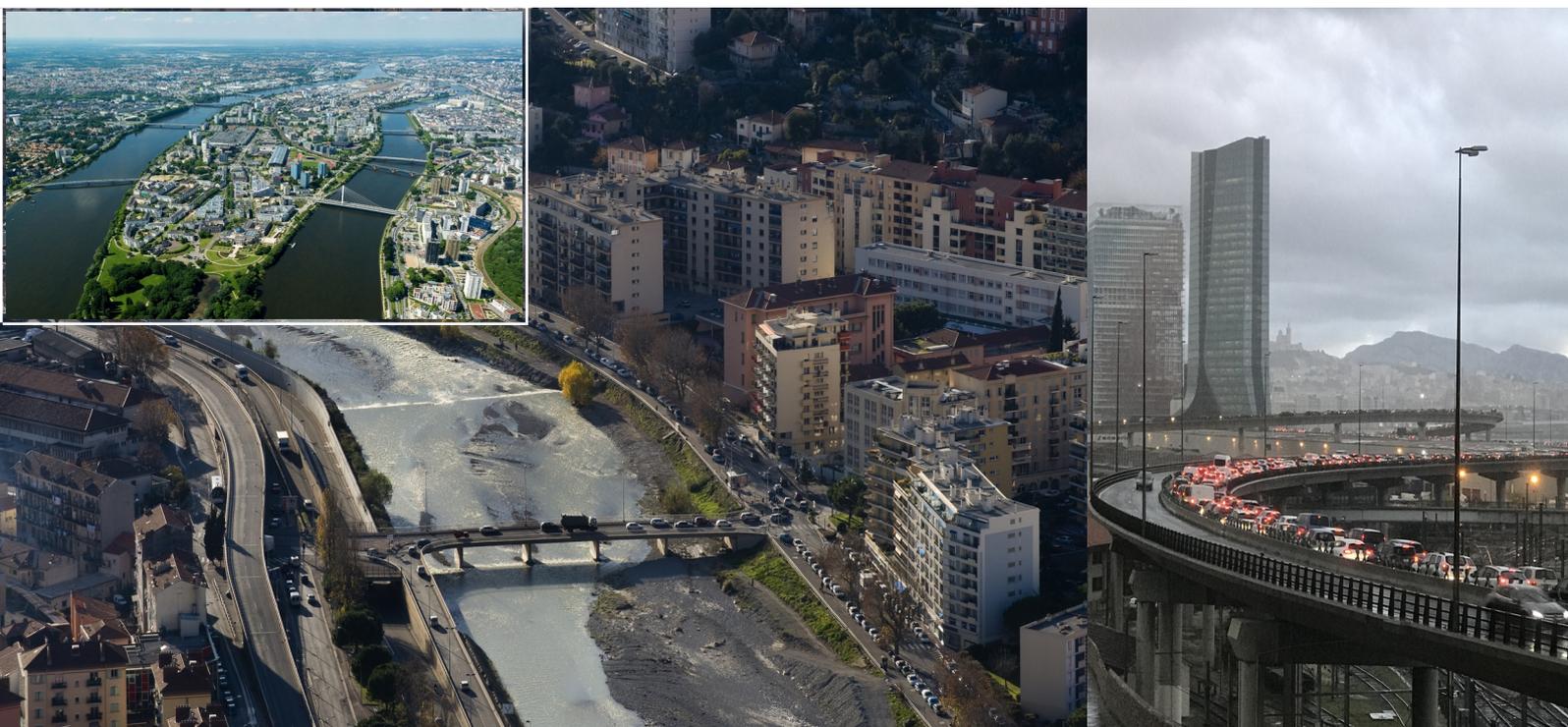


Projet SISMET :

Expérimentation d'une démarche d'évaluation et de prise en compte des risques sismiques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures urbaines ou inter-urbaines

Phase 1 : Présentation générale de l'étude
(contexte, objectifs, démarche adoptée, structuration des livrables...)



Historique des versions du document

Commentaire	Date	Auteurs	Vérifié	Approuvé	Version
Version initiale	18/02/19	D. Davi		J.-C. Carlès	V0
Intégration commentaires J. Chauvel (MNCA) + quelques ajouts et précisions	28/06/19	D. Davi		J.-C. Carlès	V1

Projet SISMET :

Expérimentation d'une démarche d'évaluation et de prise en compte des risques sismiques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures urbaines ou inter-urbaines

Phase 1 : Présentation générale de l'étude

(contexte, objectifs, démarche adoptée, structuration des livrables...)

date : juin 2019

auteur : Cerema Méditerranée
Pôle de référence « Réduction des risques sismiques »

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

participants :

Benoît Poulin,	Cerema Ouest/DMI/OA
Julien-Pierre Chauvel	Métropole Nice Côte d'Azur/DIC/Pôle OA
Thibault Brunel de Bonneville,	CD06/DR/Service OA
Stéphane Liautaud	DDTM06/SDRS/PRNT
Anne-Charlotte Gasser	Nantes Métropole/DEP/Service OA

relecture : Jean-Christophe Carlès, DCEDI/DOA

résumé de l'étude :

Le projet SISMET, établi dans le cadre de conventions partenariales de type R&D entre le Cerema, la Métropole Nice Côte d'Azur, le Conseil Départemental des Alpes-Maritimes et Nantes Métropole, vise à expérimenter une démarche d'évaluation et de prise en compte des risques sismiques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures urbaines ou inter-urbaines. Il s'agit plus particulièrement de décliner, en les adaptant, les outils déjà développés par le Cerema pour le réseau routier national, par l'intégration des spécificités de la gestion de crise sismique dans un contexte de forte densité urbaine : risque d'effondrement de bâtiments sur les routes et leurs ouvrages, enjeux spécifiques liés à la densité du maillage des infrastructures de transport, aux entrées de villes ou à la desserte des zones les plus densément urbanisées, raccordement aux équipements vitaux en situation de crise (établissements de santé, casernes, aéroport...) et maintien de l'ordre, organisation des secours entre communes d'une même métropole ou communauté d'agglomérations...

Le projet comprend plusieurs phases, correspondant à un resserrement progressif du périmètre d'étude et à un raffinement associé du niveau d'analyse, depuis l'évaluation sommaire permettant de hiérarchiser principaux itinéraires entre eux, jusqu'au diagnostic / étude préliminaire de renforcement sismique des ouvrages les plus critiques.

Le présent rapport correspond à la première phase de l'étude, visant à en présenter le contexte, les objectifs, la démarche adoptée et la structuration des livrables, ainsi que les attentes spécifiques exprimées par chacun des partenaires.

nombre de pages : 63

n° d'affaires Sigma : C17MI0066

SOMMAIRE

1 ÉLÉMENTS DE CONTEXTE.....	5
1.1 Le risque sismique en France.....	5
1.1.1 La sismicité en France - Généralités.....	5
1.1.2 Cadre réglementaire.....	7
1.1.3 Le cadre national d'actions pour la prévention du risque sismique (CAPRiS) et ses déclinaisons territoriales.....	11
1.2 Le comportement et le rôle des infrastructures de transport dans la gestion de crise.....	12
1.3 Les outils développés par le Cerema pour l'évaluation et la prise en compte du risque sismique sur le réseau routier national.....	14
1.3.1 Objectifs et démarche générale adoptée : une approche multi-échelle permettant de cibler progressivement les enjeux.....	14
1.3.2 Méthode de hiérarchisation des itinéraires à l'échelle globale d'une région ou d'un parc étendu d'infrastructures.....	18
1.3.3 Outils d'évaluation préliminaire du risque sismique sur les éléments d'infrastructures routières à l'échelle d'un itinéraire (méthodes SISMOA, SISMUR, SISROUTE).....	20
1.3.4 Guide méthodologique « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants ».....	23
1.4 Les spécificités liées au contexte urbain ou inter-urbain.....	25
2 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE.....	27
2.1 Objectifs.....	27
2.2 Partenaires et répartition des rôles.....	28
2.3 Démarche générale et structuration de l'étude.....	29
2.3.1 PHASE 1 (présent rapport) : Présentation générale de l'étude (contexte, objectifs, démarche adoptée, structuration des livrables.....)	29
2.3.2 PHASE 2 : Identification et hiérarchisation des principaux itinéraires urbains et inter-urbains structurants dans un contexte de gestion de crise sismique.....	29
2.3.3 PHASE 3 : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages constitutifs d'un itinéraire test en milieu urbain, et pré-estimation simplifiée des mesures de protection/renforcement potentiellement induites.....	30
2.3.4 PHASE 4 : Calibrage des limites des niveaux de risques en fonction de critères de sélectivité et de coûts de renforcements potentiellement induits, et synthèse de l'étude.....	31
2.3.5 PHASE 5 (optionnelle) : Appui au développement d'un outil logiciel permettant l'exploitation cartographique des résultats.....	31
2.3.6 PHASE 6 (uniquement dans le cadre de la convention passée avec la Métropole Nice Côte d'Azur) : Diagnostic détaillé et étude préliminaire de renforcement sismiques d'un ouvrage particulièrement stratégique.....	32
2.4 Livrables.....	32
2.5 Calendrier général.....	32
GLOSSAIRE.....	34
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47
ANNEXES : DÉCLINAISONS SUR LES TERRITOIRES D'EXPÉRIMENTATION.....	49
Annexe 1 : Application aux infrastructures routières du Département des Alpes-Maritimes (06) et de la Métropole Nice Côte d'Azur.....	50
Annexe 2 : Application aux infrastructures routières de Nantes Métropole.....	61

1 Éléments de contexte

1.1 Le risque sismique en France

1.1.1 La sismicité en France - Généralités

Hormis les Antilles où l'aléa sismique est qualifié de fort, le territoire national français se caractérise par une sismicité qualifiée de modérée ou moyenne en comparaison à d'autres zones du globe et notamment du bassin méditerranéen (Grèce, Turquie, Italie, Maghreb...).

Le territoire métropolitain a toutefois connu par le passé, des tremblements de terre violents qui pourraient tout à fait se reproduire dans le futur. Pour ne citer que les plus destructeurs ou connus :

- 11 juin 1909, Lambesc (Provence) : intensité épiscopentrale de VIII-IX¹, 46 morts, 250 blessés et nombreux dommages dans plusieurs villages alentours ;
- 21 juin 1660, Bagnere-de-Bigorre (Pyrénées centrales) : intensité épiscopentrale de VIII-IX ;
- 23 février 1887, séisme de Ligure (Italie, proche frontière française, en mer Méditerranée) : intensité maximale de X, 8 morts et 51 blessés dans les Alpes Maritimes (635 morts et 555 blessés en Italie) ;
- 13 août 1967, Arette (Pyrénées occidentales) : intensité épiscopentrale de VIII, 800 sinistrés et 80% des bâtiments détruits sur la commune et les villages alentours ;
- 12 décembre 1855, Haut Verdon (Alpes Provençales) : intensité épiscopentrale de VIII ;
- 13 décembre 1509 et 14 août 1708, Manosque (Alpes Provençales) : intensités épiscopentrals de VIII ;
- 12 mai 1682, Remiremont (Vosges) : intensité épiscopentrale de VIII ;
- 23 juin 1494 et 15 février 1644, Roquebillière (Alpes Maritimes) : intensités épiscopentrals de VIII ;
- 20 juillet 1564, La Bollène-Vésubie (Alpes Maritimes) : intensité épiscopentrale de VIII ;
- 1^{er} mars 1490, Riom (Auvergne) : intensité épiscopentrale de VIII.

Plus récemment des séismes de moindre intensité dans les Pyrénées centrales en 1980 et en 2002, à Annecy en 1996 avec plus de 61 millions d'euros de dommages (intensité VII), à Sant-Dié (Vosges) en 2003, en Franche-Comté en 2004, ou encore à Barcelonnette (Alpes de Haute Provence) en 2017 et à La Rochelle (Charentes Maritimes) en 2016 ont rappelé l'exposition du territoire national à l'aléa sismique.

1 Les dommages sur les constructions sont constatés à partir d'une intensité épiscopentrale de VI

De manière générale, les zones métropolitaines les plus sismiques sont celles qui s'étendent de l'Est du fossé Rhénan à la mer Ligure, du Centre-Ouest du Sud Finistère au Massif Central et les Pyrénées.

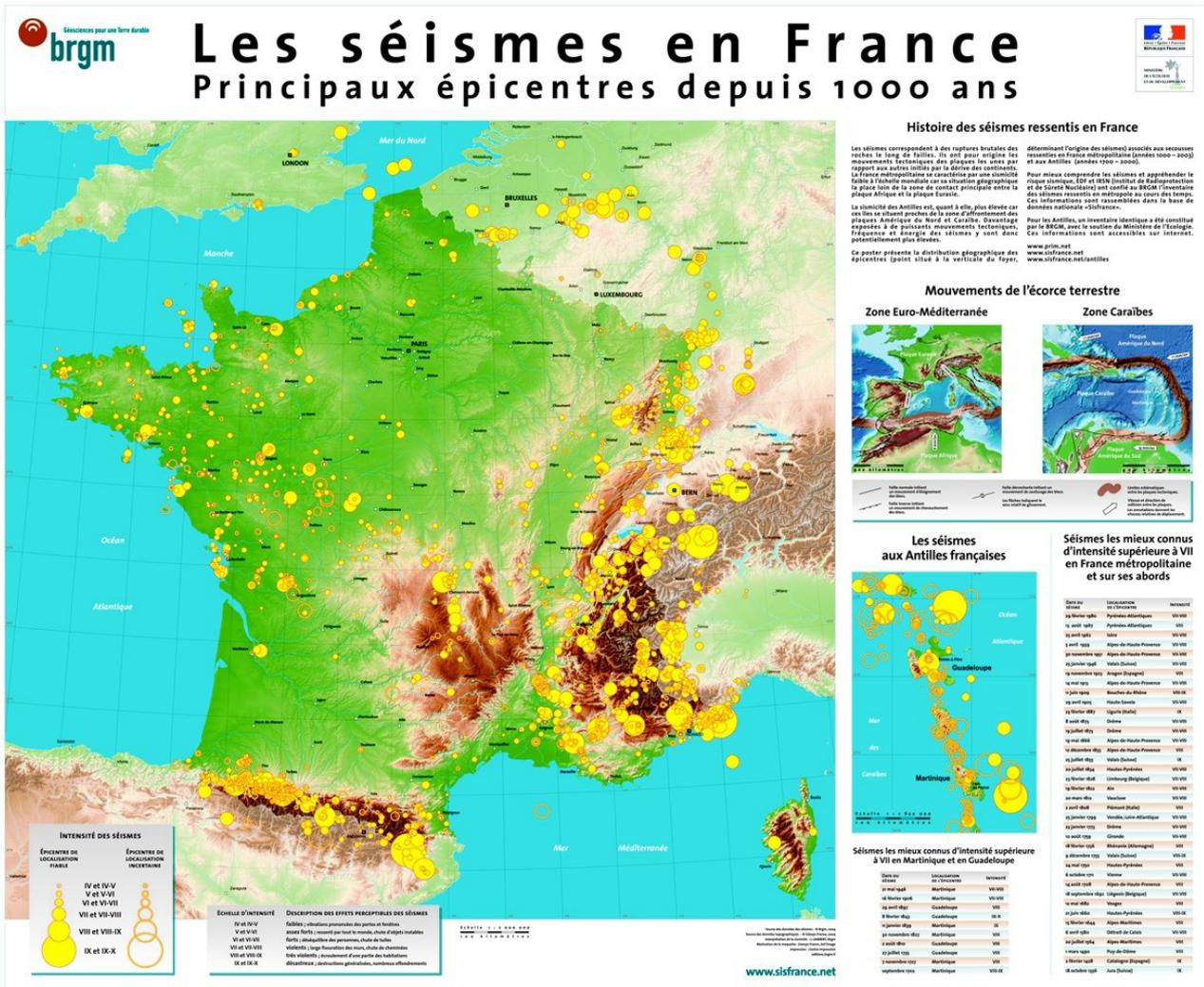


Figure 1 : Sismicité historique de la France métropolitaine (source : SISFRANCE)

Il est important en outre de rappeler que la quantification du risque sismique ne se limite pas à celle de l'aléa, mais résulte du croisement entre aléas, vulnérabilités (constructions, équipements, organisations) et enjeux (sociaux, économiques, environnementaux...).

En France, nombre d'infrastructures ou de bâtiments existants ont soit été conçus sans disposition parasismique particulière soit avec des normes parasismiques qui apparaissent aujourd'hui insuffisantes. C'est pourquoi, même si le phénomène peut être qualifié de rare, le risque sismique reste très présent sur le territoire français et nécessite une attention particulière.

A titre de comparaison, de part les nombreuses similitudes qu'il présente avec le contexte du Sud-Est de la France (niveau de sismicité, types de construction, géographie, urbanisme...), la séisme de l'Aquila de 2009 est tout à fait représentatif de ce qui pourrait se produire en France métropolitaine dans les zones de sismicité 3 et 4. De magnitude 6,2, il est en effet une bonne illustration des conséquences d'un tremblement de terre d'intensité modérée. Il s'est produit dans une zone où l'aléa sismique était qualifié

auparavant de moyen et a donné lieu à une catastrophe dont l'ampleur résumée par ces quelques chiffres : 143 morts, 500 blessés, environ 20 000 sans-abris et 2,3 milliards d'euros de dégâts.

1.1.2 Cadre réglementaire

Depuis 2010, la nouvelle réglementation sismique nationale est entrée en vigueur. 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)...

1.1.2.1 Décrets généraux relatifs à la prévention du risque sismique et à la délimitation des zones de sismicité du territoire français

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.

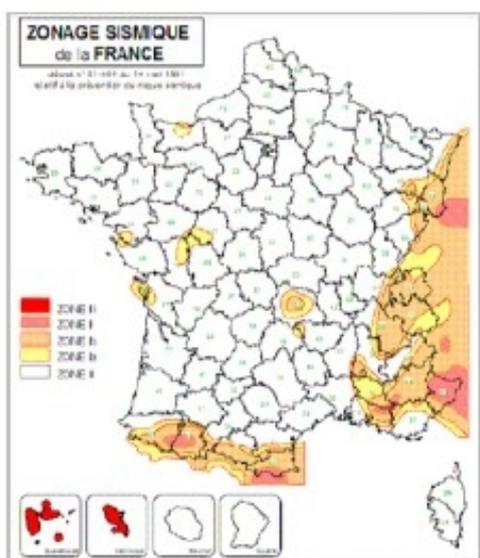
La classe dite "à risque spécial" comprend les bâtiments, les équipements et les installations pour lesquels les effets sur les personnes, les biens et l'environnement de dommages même mineurs résultant d'un séisme peuvent ne pas être circonscrits au voisinage immédiat des-dits bâtiments, équipements 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 :

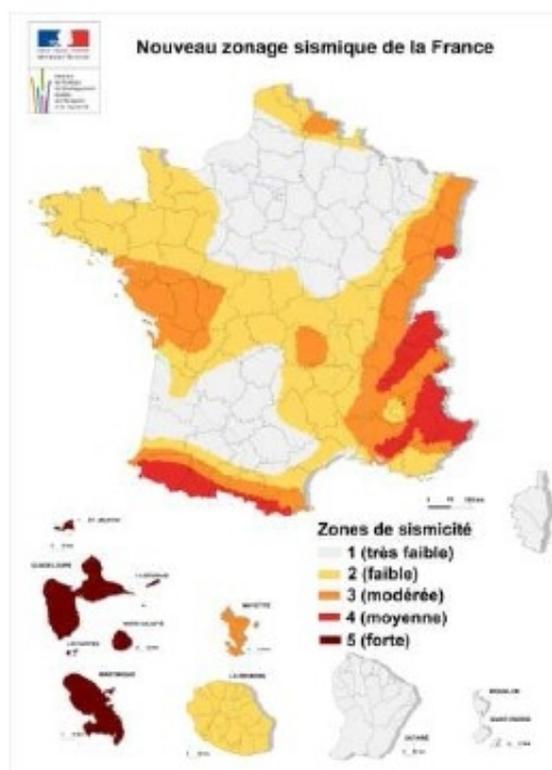
- Zone de sismicité 1 (très faible) ;
- Zone de sismicité 2 (faible) ;
- Zone de sismicité 3 (modérée) ;
- Zone de sismicité 4 (moyenne) ;
- Zone de sismicité 5 (forte).

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 précédentes règles en vigueur (Décret n°91-461 du 14 mai 1991 et anciennes règles PS92), 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, établi en prenant en compte l'amélioration des connaissances scientifiques de la sismicité historique et des failles sismotectoniques actives, ainsi que de nouvelles données de sismicité instrumentale sur le territoire français, 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. 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).

A noter également que le zonage sismique de la France est désormais défini commune par commune et non plus par cantons.

1.1.2.2 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.

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 associés aux différentes classes de sols...).

Le corpus réglementaire parasismique national (décrets et arrêtés) définit ainsi les dispositions permettant de satisfaire aux exigences de comportement représentant le niveau de protection minimal requis par la Puissance Publique. Le niveau de sismicité à prendre en compte y est exprimé par des valeurs d'accélération dites de « référence », qui traduisent un choix résultant d'un compromis entre l'aléa sismique et le surcoût économique des mesures de protection.

L'aléa sismique est la combinaison de l'accélération réglementaire (accélération sur la zone en considérant le sol rigide, a_{gr}) avec le coefficient (S) correspondant à la classe de sol, c'est à dire à la qualité du sol, ainsi que le cas échéant avec un coefficient topographique (S_T) correspondant aux conditions de relief. Les aspects socio-économiques, relatifs à l'importance stratégique de l'ouvrage et aux conséquences de son éventuel effondrement, sont également pris en compte par un coefficient d'importance (γ_I , resp. égal à 1, 1,2 ou 1,4 pour les catégories d'importance II, III et IV associées aux ponts), qui pondère l'accélération issue de l'aléa.

Les valeurs des coefficients de sol S permettant de prendre en compte de façon forfaitaire l'effet de site géologique en fonction du type de sol et des zones de sismicité, tels que définis dans l'Arrêté « ponts » sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Classes de sol	Coefficients de sol S pour la prise en compte de l'effet de site géologique	
	Zones 1 à 4 (France sauf Antilles)	Zone 5 (Antilles : Martinique et Guadeloupe)
A : Rocher	1	1
B : Sol de bonne à très bonne résistance mécanique	1,35	1,2
C : Sol de résistance mécanique moyenne	1,5	1,15
D : Sol de faible résistance mécanique	1,6	1,35
E : Configuration de sol à fort effet amplificateur	1,8	1,4

Figure 3 : Coefficients de prise en compte forfaitaire de l'effet de site géologique en fonction du type de sol [3]

S'agissant du coefficient de site topographique S_T , celui-ci est évalué forfaitairement conformément aux prescriptions de l'Eurocode 8-5 [6] à partir des conditions de relief (pente et hauteur des talus) et de la présence éventuelle d'une couche lâche en surface. Sa valeur peut typiquement varier entre 1 et 1,7.

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 enfin que tout ouvrage dont l'endommagement pourrait provoquer des dommages à un bâtiment, un équipement ou une installation de catégorie d'importance IV se voit attribuer cette même catégorie d'importance.

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

1.1.2.3 Plans de prévention des risques sismiques (PPRS)

Le plan de prévention des risques sismiques (PPRS) permet de prendre en compte le risque sismique dans l'aménagement, la construction et la gestion du **territoire communal**.

La caractérisation de l'aléa sismique local dans le cadre des PPRS est généralement établi sur la base d'études dites de « microzonage sismique ». **Ces études sont d'un niveau de précision plus élevé que la réglementation nationale et permettent de mieux intégrer les spécificités locales** en ce qui concerne :

- la définition des mécanismes de sources sismiques (activité probabiliste des failles proches, accélérations et spectres au rocher associés),
- l'évaluation et la prise en compte (coefficients de majoration et spectres locaux) des effets de site locaux pouvant résulter de la constitution du sol (géologie) et/ou de la topographie (relief),
- l'identification des zones plus particulièrement exposées aux potentiels effets induits (liquéfaction des sols, chutes de blocs, glissements de terrain, tsunamis...)²

2 Voir glossaire en fin de rapport

Conformément à l'article L.563-1 du code de l'environnement, « dans les zones particulièrement exposées à un risque sismique ou cyclonique, des règles particulières de construction parasismique ou paracyclonique peuvent être imposées aux équipements, bâtiments et installation » et « si un plan de prévention des risques est approuvé dans l'une de ces zones, il peut éventuellement fixer, en application de l'article L.562-1, des règles plus adaptées ».

Cela signifie en d'autres termes que la réglementation locale (PPRS), à partir du moment où elle est approuvée, s'impose théoriquement devant la réglementation nationale, et ce qu'elle conduise à un niveau d'accélération plus ou moins contraignant que cette dernière.

Le guide méthodologique révisé « PPR sismique » en cours d'édition par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire [10] classe parmi les « enjeux incontournables » les axes routiers (ainsi que les ouvrages : ponts, soutènements, remblais... qui les composent) stratégiques pour l'intervention des secours et la desserte des équipements sensibles.

Ce même guide qualifie de prioritaire la réduction de la vulnérabilité de ces infrastructures de transport existantes jugées indispensables en cas de séisme. Il précise en outre que cette réduction de vulnérabilité consistera à appliquer des mesures de renforcement afin d'assurer la meilleure protection possible et le maintien des conditions d'opération de ces infrastructures en cas de crise, en fonction des contraintes technico-économiques. Il s'agira ainsi d'évaluer et d'adopter la meilleure solution permettant d'améliorer la sécurité des usagers et dans la mesure du possible maintenir l'opérabilité des équipements : renforcement, consolidation des structures, réhabilitation ou démolition et reconstruction.

Il est enfin recommandé d'effectuer cette approche sur des enjeux ciblés, par secteur homogène.

1.1.3 Le cadre national d'actions pour la prévention du risque sismique (CAPRiS) et ses déclinaisons territoriales

Comme suite au programme national de prévention du risque sismique, dit « Plan séisme », conduit entre 2005 et 2010, et à son évaluation, un **Cadre d'actions pour la prévention du risque sismique (CAPRiS)** [11] a été élaborée de manière concertée et diffusé en septembre 2013.

Répondant aux recommandations du Conseil d'orientation pour la prévention des risques naturels majeurs (COPRNM), ce cadre d'actions a pour objet d'orienter et de coordonner les politiques de prévention du risque sismique sur le territoire national, dans les régions en zones de sismicité 2 à 4. Il définit quatre priorités nationales :

1. Sensibilisation au risque sismique et formation à la construction parasismique
2. Réduction de la vulnérabilité des constructions par l'application de la réglementation parasismique et le développement du renforcement du bâti existant
3. Aménagement du territoire communal par les plans de prévention des risques sismiques
4. Amélioration de la connaissance de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique.

Ce cadre national doit être décliné en programmes d'actions territorialisés à l'échelle régionale ou interrégionale, de manière adaptée aux niveaux de risques des différents territoires. La mise en œuvre de ce cadre d'actions doit ainsi reposer sur une responsabilité partagée de l'ensemble des acteurs concernés, de manière adaptée selon l'action et l'échelle de travail : État, collectivités territoriales, professionnels de la construction, associations, organismes scientifiques, entreprises, citoyens. **En particulier, les collectivités territoriales sont amenées à jouer un rôle essentiel dans ce dispositif.**

Il existe par ailleurs des plans d'action départementaux séisme qui déclinent des actions locales pour la prévention du risque sismique, la sensibilisation des acteurs et la gestion de crise.

L'évaluation et la prise en compte du risque sismique sur les infrastructures routières stratégiques s'inscrit dans la priorité n°4 du CAPRiS : « Amélioration de la connaissance de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique », et permet plus particulièrement de répondre à la problématique "Réflexions sur la prise en compte du risque sismique dans les infrastructures et les réseaux" exprimée dans le cadre de cette dernière.

1.2 Le comportement et le rôle des infrastructures de transport dans la gestion de crise

Lorsque survient une crise liée à un phénomène naturel (inondations, séisme, cyclone...), la tenue des infrastructures de transport revêt un enjeu particulièrement prégnant, à la fois vis-à-vis de l'exposition au risque des usagers (victimes directes en cas d'effondrement d'un pont, d'un éboulement de rochers sur la route ou de submersion des ouvrages hydrauliques par exemples, risque de sur-aléa en cas d'accident de transport de matières dangereuses...), mais aussi et surtout du fait des conséquences indirectes associées au rôle de ces infrastructures dans la gestion de crise et l'organisation des secours :

- **acheminement des secours d'urgence (matériels et humains) en provenance des régions voisines et accès aux zones sinistrées,**
- **évacuation des victimes vers les hôpitaux et les centres de soins,**
- **desserte des équipements stratégiques du territoire (PC de crise, casernes, réseaux vitaux et distribution d'énergie, moyens de communication..)**
- **reprise de l'activité socio-économique à moyen terme,**
- **reconstruction...**

Au sein de ces infrastructures, les ouvrages d'arts (ponts, murs, digues...), du fait de leur sensibilité particulière, représentent généralement des points critiques.

Les retours d'expérience des séismes passés [20], ont ainsi mis l'accent sur le **rôle vital des infrastructures de transport et des ouvrages qui les composent en période de crise et de récupération**. Le séisme de l'Aquila (avril 2009) en Italie [19] a en particulier démontré que dans une région montagneuse largement desservie par des ouvrages

autoroutiers, la bonne tenue de ces infrastructures constituait un des éléments clés de la rapidité d'accès et d'intervention des secours en provenance des régions voisines, contribuant ainsi très significativement à la limitation du nombre de victimes.



Source : Mission post-sismique Aquila CETE Méditerranée (2009)

Figure 4 : Illustrations de la gestion de crise lors du séisme de l'Aquila (avril 2009) en Italie [19]

Plus généralement, 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 ou de zones sensibles sur la totalité du parc existant. Dans la plupart des cas, les dommages notables induisant des coupures d'itinéraires se concentrent ainsi :

- sur les **ouvrages (ponts ou murs) les plus anciens ou de typologies identifiées comme particulièrement vulnérables**,
- dans les zones exposées à des **chutes de blocs ou glissements de terrain induits** par les secousses sismiques,
- sur les portions de routes (en particulier **remblais de grande hauteur ou digues**) susceptibles d'être déstructurés par des mouvements de sol (notamment en cas de phénomène de **liquéfaction**³) ;

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. [7].

3 Voir glossaire en fin de rapport.

Notas sur comportement observé des tunnels :

Très peu de retours d'expériences post-sismiques ont fait état de dommages sur les tunnels [21]. L'explication au bon comportement de ces structures et des ouvrages souterrains en règle générale tient à deux raisons essentielles :

1. les sollicitations sismiques sont généralement plus faibles en profondeur qu'à la surface du sol,
2. la structure souterraine est rigidement encastrée dans le sol et n'est donc pas exposée au phénomène d'amplification dynamique des mouvements que subissent les structures de surface du fait de leur souplesse.

Les seuls dégâts notables observés sur les tunnels suite à des séismes correspondent ainsi à des circonstances très particulières : traversée de la faille active ayant joué lors de l'événement sismique, instabilité gravitaire induite de grande masse, liquéfaction étendue ou fortes discontinuités des sols...

Dans la très grande majorité des autres cas, seules les têtes de tunnels méritent une attention particulière (stabilité interne et sensibilité aux glissements de terrain). En fonction de leur nature, ouvragée ou non, le comportement de ces dernières est à rapprocher de celui de murs ou de simples talus.

1.3 Les outils développés par le Cerema pour l'évaluation et la prise en compte du risque sismique sur le réseau routier national

1.3.1 Objectifs et démarche générale adoptée : une approche multi-échelle permettant de cibler progressivement les enjeux

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 » (guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts [9] rendu d'application obligatoire par l'Arrêté du 15 septembre 1995 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux ponts de la catégorie dite « à risque normal »). Depuis 2010 [3], les normes européennes Eurocode 8 [4] [5] [6]) s'imposent pour le dimensionnement des ouvrages neufs.

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 niveau sismique réglementaire de dimensionnement (Figure 5). Parallèlement, le zonage sismique de la France a été revu pour être en conformité avec les définitions et la philosophie plus probabiliste des Eurocodes et le nombre de régions concernées par le séisme a ainsi été singulièrement augmenté pour couvrir quasiment tout le territoire métropolitain à l'exception du bassin parisien et du bassin aquitain (cf. §1.1.2.1).

Cette évolution pose donc nécessairement la question de la mise à niveau des constructions dans les zones pour lesquelles le niveau d'aléa a été revu à la hausse.

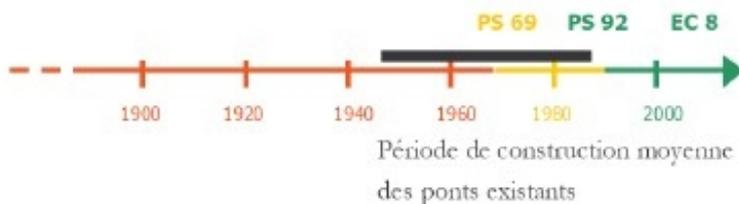


Figure 5 : Période de construction moyenne des ponts et évolution de la réglementation parasismique en France

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 renforcement 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, le Cerema a développé un certain nombre d'outils (Figure 6) destinés à assister les gestionnaires ou Maîtres d'ouvrages des grandes infrastructures structurantes, qu'ils soient publics ou privés, dans les choix d'ordre stratégique ou décisionnel qui s'imposent à eux :

- 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 ?

Ces outils, **développés et calibrés à l'origine pour le réseau routier national**, reposent sur une démarche générale consistant 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)** :

- Analyse 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 ;
- Analyse à l'échelle locale visant à prioriser les ouvrages ou tronçons de route le long d'un itinéraire donné ;
- Étude spécifique 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.

Le respect de cette démarche générale, représentée par le logigramme de la Figure 7 ci-après, vise à 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.



Figure 6 : Outils développés par le Cerema (ex-Sétra) pour l'évaluation et la prise en compte du risque sismique sur le réseau routier national

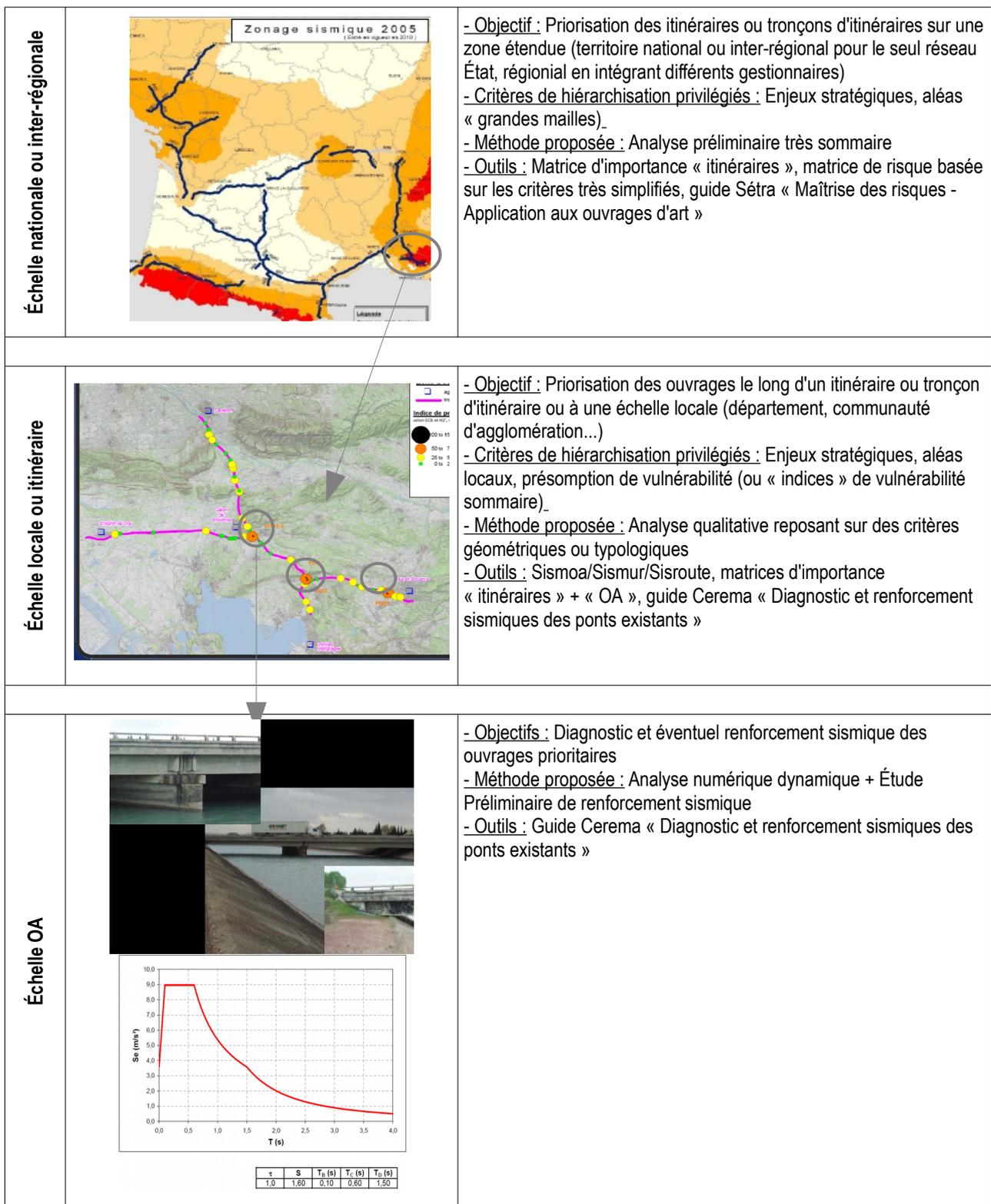
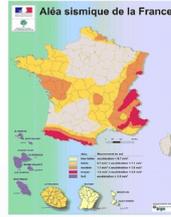


Figure 7 : Logigramme général

Chacune de ces étapes de priorisation est basée sur la prise en compte des trois mêmes critères d'aléa, de vulnérabilité et d'enjeu ou importance (Figure 8). 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.



Sismicité du site d'implantation de l'ouvrage
(accélération + effets induits)

Importance stratégique de l'ouvrage
(organisation des secours et reprise de l'activité socio-économique)

Vulnérabilité présente de l'ouvrage
aux séismes (méthodes Sismoa / Sismur / Sisroute)

L'ouvrage		Aléa			Vulnérabilité	Importance	
Victimes directes		<1000 : 1	1k - <10k : 2	>10 000 : 3	non : 3 moyen : 2 élevé : 1	non : 3 moyen : 2 élevé : 1	
Trafic sur l'ouvrage (en véh)		< 200 : 1	200 - <4000 : 2	> 4000 : 3			
Surface de tablier (m²)		nulle : 0	moindre : 1,5	élevée : 3			
Frein embouteillage sur ouvrage							
Voie franchise							
Type de voie		RD, Nét. Sted. : 1	RN, TER : 2	Autoroute, TGV : 4			
Trafic sous l'ouvrage (en véh)		<1000 : 1	1k - <10k : 2	>10 000 : 4			
Frein embouteillage sous ouvrage							
Niveau sous franchise							
Organisation des secours							
Franchissement d'un itinéraire vital au sens des PIB		oui : 4	non : 0			non : 0 moyen : 2 élevé : 4	
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)							
Possib. de pont de secours (béton-140 m)		oui : 3	non : 0			non : 3 moyen : 2 élevé : 1	
Possib. de déviation locale (écluse, noué urbain)		oui : 3	non : 0				
Rôle socio-économique voie franchise							
Type voie		VC : 0	RD : 1	RN, Nét. TER : 2	Autoroute, TGV : 3		
N° voies		1 voie : 0	2 voies : 0,5	3 ou 4 voies : 1	> 5 voies : 2		
Trafic (en véh)		<1000 : 0	1k - <10k : 0,5	>10 000 : 1			
Trafic PI							
Rôle de desserte		village : 0	regroup. : 0,5	normal : 0,5	élevé : 1		
Rôle de desserte		regroup. : 0,5	regroup. : 0,5	normal : 0,5	élevé : 1		
Niveau franchise							
Possibilités de reconstruction de l'ouvrage							
Durée de reconstruction		< 6 mois : 1	6 - < 24 mois : 2	> 2 ans : 4			
Valeur intrinsèque de l'ouvrage							
Coût		< 1 M€ : 0,5	1 < 15 M€ : 1	15 < 60 M€ : 2	> 60 : 4		
Valeur patrimoniale historique (ouvrage classé)							
		oui : 2	non : 0				

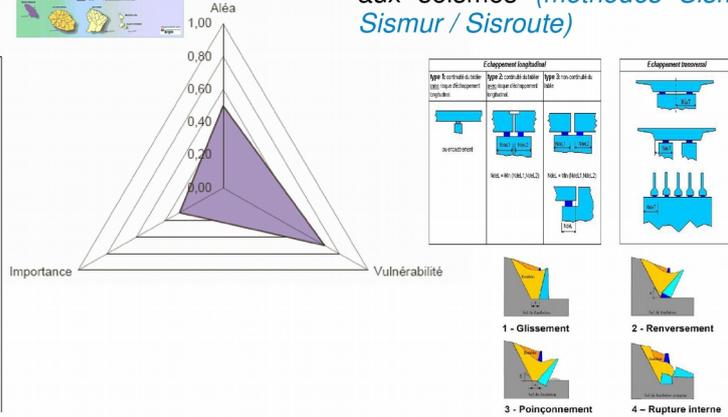


Figure 8 : Principe général de hiérarchisation des infrastructures et des ouvrages qui les composent en fonction des indices normalisés d'aléa, de vulnérabilité et d'importance

Au final, la décision du durcissement au séisme des itinéraires routiers, et donc des ouvrages d'art qui les composent, repose sur une analyse coût/bénéfice entre le coût du renforcement et les pertes économiques résultant d'un tremblement de terre.

L'analyse intègre indirectement, outre pertes associées directement à la reconstruction des ouvrages, toutes les conséquences sociales, humaines et économiques de leur ruine et de l'interruption de l'itinéraire. Ces coûts indirects s'avèrent généralement beaucoup plus élevés 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, télécommunications...).

1.3.2 Méthode de hiérarchisation des itinéraires à l'échelle globale d'une région ou d'un parc étendu d'infrastructures

À l'échelle globale d'une région ou d'un parc étendu d'infrastructures routières, l'approche consiste à comparer et prioriser les itinéraires ou tronçons d'itinéraires les uns par rapport aux autres [12]. 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 (cf. Figure 9). L'approche intègre également 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 9 : Critères d'importance pour le classement des itinéraires existants

Le critère « aléa » repose essentiellement sur la nouvelle carte du zonage sismique national (cf. Figure 2), 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.

La quantification et le croisement des indices d'« aléa », de « vulnérabilité » et d'« importance » conduisent in fine à la définition de trois niveaux de priorité (resp. P₁, P₂ et P₃, en vue d'une analyse plus précise du risque sismique sur l'itinéraire (via les outils SISMOA/SISMUR/SISROUTE – cf. §1.3.3) et éventuellement au diagnostic détaillé et le cas échéant au renforcement structural des ouvrages les plus sensibles (à partir des recommandations du guide « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » – cf. §1.3.4).

Dans le cas des applications menées sur le réseau routier national, la notion d'itinéraires a été définie comme tronçons de route compris entre deux échangeurs (cas de tronçons autoroutiers) 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 a pu également correspondre à une configuration de site particulière et cohérente (zone de relief marqué, limite du zonage sismique national...).

1.3.3 Outils d'évaluation préliminaire du risque sismique sur les éléments d'infrastructures routières à l'échelle d'un itinéraire (méthodes SISMOA, SISMUR, SISROUTE)

À l'échelle locale d'un itinéraire ou d'un tronçon d'itinéraire, la démarche établie par le Cerema s'appuie sur les outils SISMOA, SISMUR et SISROUTE [13] [14] [15] [16] [17] [18], développés ou en cours de développement, qui permettent un raffinement de la prise en compte de la vulnérabilité pressentie de chaque ouvrage (ponts, murs, plate-formes ou remblais routiers) et des aléas locaux (effets de site et induits). Le critère « enjeu » est basé sur une matrice d'importance à l'échelle de l'ouvrage intégrant des 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 : desserte de centres vitaux à proximité immédiate (hôpitaux, casernes de pompiers, commissariats de police, aéroports, etc.), possibilités ou non de rétablissements d'urgence (pont de secours, déviations locales...). Ces aspects sont synthétisés dans le tableau de la Figure 10 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 10 : Critères d'importance pour le classement des ouvrages d'art portant un même itinéraire

Les outils SISMOA, SISMUR et SISROUTE reposent sur des **approches simplifiées** et **nécessitent uniquement des paramètres d'entrée relativement simples et facilement accessibles, à partir d'une visite sur site et des données générales du dossier d'ouvrage (caractéristiques géométriques ou typologiques principales de l'ouvrage et de son environnement immédiat) :**

- Pour les ponts : forme et régularité des hauteurs de piles, 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...), date de construction et état pathologique... ;
- Pour les murs de soutènement : hauteur et épaisseur en tête, matériaux constitutifs, état général, pente et caractéristiques géotechniques des terrains... ;
- Pour les remblais routiers, talus (ou pentes) connexes et sol d'assise : hauteur et largeur de plate-forme, pente des talus, volumes des blocs ou des couches de terrain meubles menaçant de s'effondrer, taux de saturation des terrains en eau, caractéristiques géotechniques des sols (granulométrie, compacité...).

Le croisement des indices d'aléa et de vulnérabilité associés aux différents éléments constitutifs de la route (ponts, murs et têtes de tunnels, remblais...) aboutissent au calcul des indices de risque de coupure d'itinéraire. Ces indices peuvent être aisément actualisés pour différents scénarios de séisme :

- zonage réglementaire national associé à différentes périodes de retour,
- carte d'accélération locales de référence (PPRS, étude de microzonage, carte de scénario sismique prédéfini...),
- événement sismique déterministe (passé ou simulé, ou réellement enregistré dans le cadre de la gestion de crise en temps réel) défini par la localisation de l'épicentre, la profondeur et la magnitude ;
- contexte météorologique concomitant impactant les conditions hydriques des sols...

Le croisement des indices de risque et d'importance (ou enjeux) aboutit finalement au calcul d'un indice de priorité qui, à partir d'un seuil établi forfaitairement, permet d'identifier les ouvrages ou tronçons d'itinéraire nécessitant un diagnostic plus approfondi (calcul de structure à partir d'une modélisation numérique) et le cas échéant une étude de renforcement – cf. §1.3.4).

L'analyse des indices de vulnérabilité partiels associés aux différentes parties d'ouvrages, permet en outre une **pré-identification (informative) des points faibles pressentis**, parades ou techniques de renforcement envisageables, ainsi qu'une **pré-évaluation statistique des coûts relatifs associés (sur la base des coûts des techniques de renforcement les plus couramment mises en œuvre).**

A noter enfin que, bien que l'exploitation dynamique des résultats au format SIG ne soit pas directement intégrée à l'outil, le formatage des données et résultats est particulièrement adapté à ce type d'exploitation, permettant ainsi à l'échelle d'un itinéraire ou d'une zone donnée, de :

- représenter les vulnérabilités et indices de risque de chaque élément de l'itinéraire,
- visualiser de manière rapide et efficace le risque de coupure de l'itinéraire pour les différents scénarii sismiques envisagés,
- d'en déduire rapidement les points les plus critiques de l'itinéraire par la localisation sur le fond de plan des données de trafic, des équipements stratégiques à desservir à proximité (hôpitaux, casernes, aéroports...) ainsi que des éventuelles déviations et itinéraires alternatifs possibles avec les temps de parcours associés.

Les Figure 11 et Figure 12 ci-dessous présentent deux exemples d'exploitations géographiques déjà menées à partir de l'outil dans le cadre d'études opérationnelles :

Scénario 1 : Nouveau zonage (EC8) – Période de retour 475 ans

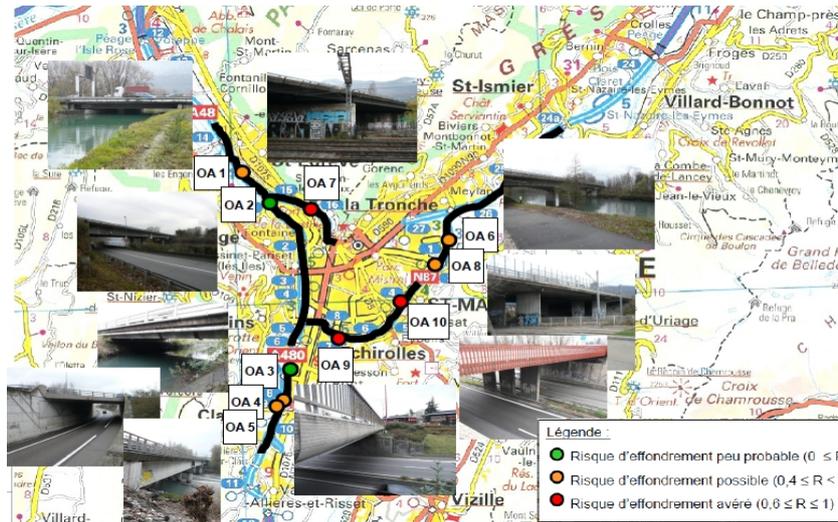


Figure 11 : Exemple d'application des méthodes Sismoa/Sisroute, pour l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les principaux ouvrages du réseau routier national de desserte de l'agglomération Grenobloise dans le cadre de l'exercice de simulation de crise sismique « Richter 38 »

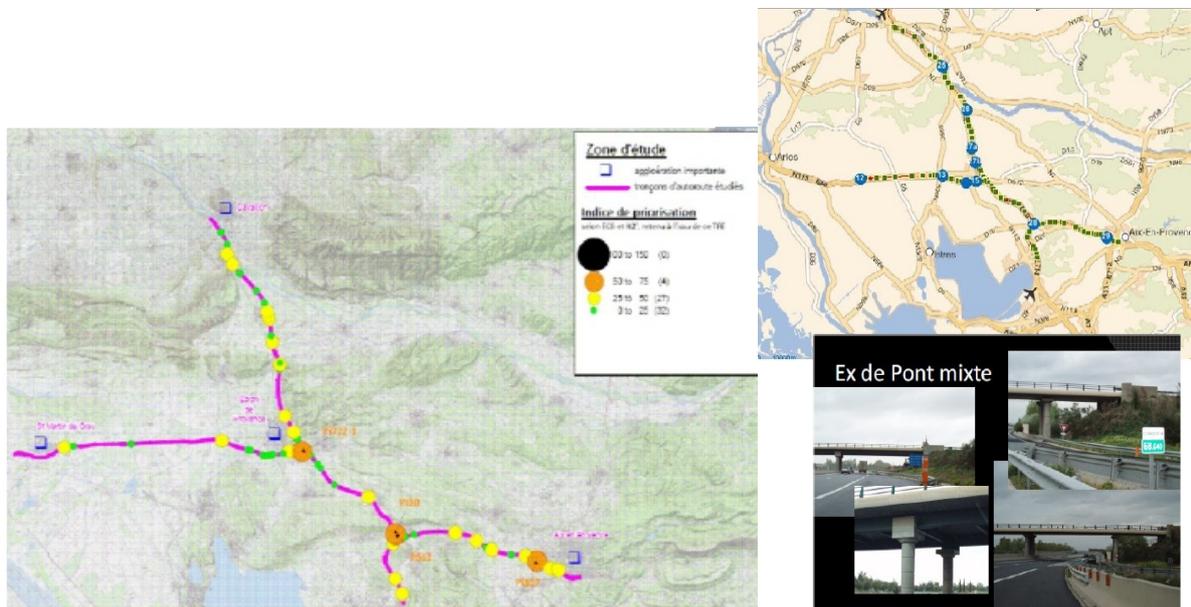


Figure 12 : Analyse de la vulnérabilité sismique des ouvrages courants du triangle autoroutier A7-A8-A54 (Vinci-ASF)

En règle générale, l'application de l'approche proposée, sur certaines parties du réseau routier national plus particulièrement exposées au risque sismique, a conduit à préconiser un diagnostic détaillé uniquement des ouvrages, en particulier non courants, présentant un enjeu socio-économique important et situés en zones d'aléa modéré à fort (zones 3 à 5 au sens du nouveau zonage sismique national), présentant une présomption de vulnérabilité élevée et/ou reposant sur des types de sols défavorables.

Notas sur les limites d'utilisation de l'approche :

(1) Les outils SISMOA, SISMUR, SISROUTE ne sont destinés qu'à fournir une première évaluation « statistique » du risque sismique à l'échelle d'un patrimoine étendu d'ouvrages. À ce titre, ils ne peuvent en aucun cas se substituer à un diagnostic détaillé basé sur une modélisation numérique (calcul de structure), pour la vérification de la capacité résistante des ouvrages (en terme par exemples de niveau de séisme ou accélération admissible). Ils apportent en revanche une aide précieuse en terme de première évaluation structurale « à dire d'expert » pour l'identification des principaux points critiques (ou points faibles structuraux).

(2) Les ponts non courants (ponts en arcs ou à béquilles, ponts suspendus ou à haubans, ouvrages cantilevers...) sortent du champ d'application de la démarche (limites d'utilisation de l'outil SISMOA). Il en va de même de certaines structures particulières (ouvrages de couvertures, centres commerciaux ou bâtiments enjambant les autoroutes, barrages hydrauliques portant des routes...) pour lesquels une analyse spécifique est recommandée. Certaines circonstances exceptionnelles (tsunamis, rejets de faille active en surface...), peu enclines à se produire sur le territoire national ou dont l'intensité attendue du phénomène est jugée sans impact notable sur les infrastructures routières, ne sont pas non plus couvertes par la méthode.

(3) L'analyse des infrastructures de transport en milieu urbain, caractérisées entre autres par une forte densité de réseaux avec des interactions fortes, et exposées au risque d'effondrement de bâtiments sur les routes et leurs ouvrages, sort également du champ d'application de la démarche.

1.3.4 Guide méthodologique « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants »

Dans la continuité des développements SISMOA/SISMUR/SISROUTE, le Cerema a rédigé un guide méthodologique intitulé « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » [7], fournissant 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, **un certain nombre de recommandations, d'outils et de méthodes pour :**

- le recueil des informations nécessaires à un bon diagnostic,
- l'instrumentation et les investigations de terrain éventuellement nécessaires,
- la mise en œuvre des méthodes d'analyse spécifiques pour le diagnostic,
- la définition des niveaux de performance à atteindre,
- les différentes stratégies et techniques de renforcement possibles.

Les aspects décisionnels du guide, visent à définir un **niveau acceptable d'abaissement du risque, établi sur la base d'un meilleur optimum performance/coût/enjeux et fournissent 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.**

La méthode de diagnostic sismique préconisée est basé sur un **calcul numérique dynamique ou pseudo-dynamique de la structure** et résulte 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. Le guide propose alors, en fonction des faiblesses identifiées au travers du diagnostic sismique, **des techniques de renforcement économiquement raisonnables, qui permettent d'abaisser très sensiblement le niveau de risque pour l'ouvrage et son environnement.**

En pratique, le diagnostic et l'étude préliminaire de renforcement sismiques pourront donc 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.**

L'approche a d'ores et déjà été testée avec succès dans le cadre de plusieurs études opérationnelles, plus particulièrement dans le Sud de la France.

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, mais il fournit un certain nombre de recommandations générales d'appui à la prise de décision.

1.4 Les spécificités liées au contexte urbain ou inter-urbain

Par rapport aux grands itinéraires structurants du réseau routier national pour lesquels les différents outils présentés précédemment ont principalement été développés, les itinéraires situés en milieux urbains ou inter-urbains se distinguent par **un certain nombre de caractéristiques ou d'enjeux spécifiques** (illustrés par la Figure 13) :

- **Forte densité urbaine** induisant des risques réciproques entre infrastructures de transport et constructions avoisinantes :
 - **Risque d'effondrement de bâtiments de grande hauteur sur les infrastructures et leurs ouvrages** ;
 - **Risque d'effondrement de ponts ou d'ouvrages de soutènement sur des bâtiments, équipements, installations ou réseaux** (notamment stratégiques) qu'ils franchissent ou longent ;
- **Redondance des infrastructures de transports et nombreuses intersections** : autoroutes pénétrantes, voiries communales, pistes cyclable, voies piétonnes, bus, tramways, voies ferrées, transports à câbles...
- **Diversité des configurations** : boulevards périphériques et entrées de villes, grandes avenues, ruelles étroites, voies sur berges... ;
- **Zones de congestions récurrentes**, notamment aux heures de pointe ou à certaines saisons (villes touristiques) ;
- **Problématique du maintien de l'ordre en zone densément peuplée** ;
- **Dessertes des équipements stratégiques communaux** (établissements scolaires, EHPADs, cliniques, casernes...) **ou de portée régionale voire nationale ou internationale** (hôpitaux, gares, ports, aéroports, stades, salles de concerts...) ;
- **Diversité des zones d'intérêts desservies** : centres et monuments historiques, banlieues et quartiers pavillonnaires, zones industrielles ou commerciales, espaces touristiques à forte densité hôtelière... ;
- **Solidarité à organiser entre les villes au sein d'une même métropole ou communauté de communes** (y compris les zones les plus excentrées ou géographiquement isolées) **en termes de desserte et d'accès des secours** ;
- **Segmentation de l'espace urbain par la présence éventuelle de rivières et cours d'eau et risque d'isolement en cas de rupture des ouvrages de franchissement** ;
- Dans le cas des villes littorales, exposition à certains risques spécifiques (tsunamis)...

Un des objectifs du projet consistera donc à **vérifier l'applicabilité de la démarche générale définie pour le réseau routier national** et à **proposer et tester**, sur quelques cas représentatifs des grandes agglomérations françaises et de leur exposition aux risques sismiques, **des adaptations ou ajustements éventuellement nécessaires de ces outils**.



Figure 13 : Illustrations des spécificités liées au contexte urbain ou inter-urbain (au travers de diverses vues des villes de Nice, Marseille, Grenoble, Nantes et Lourdes)

2 Présentation de l'étude

2.1 Objectifs

Le projet SISMET porte sur l'expérimentation et le développement d'une démarche d'évaluation et de prise en compte des risques sismiques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures de transport géré par une Métropole, une collectivité de communes ou un conseil départemental (contexte urbain ou inter-urbain).

La finalité et les applications possibles de l'approche sont multiples :

- **Évaluation globale du risque sismique sur les itinéraires structurants ou sur les itinéraires prioritaires de secours d'un périmètre donné**, par l'établissement de scénarios de crise réalistes en termes de répartition de dommages sur les réseaux routiers et de coupures d'itinéraires ou de ruptures d'accès pressenties ;
- Dans un contexte de moyens limités et dans un souci d'efficacité financière et organisationnelle, **priorisation des actions à mener** par l'identification préliminaire simplifiée des tronçons d'itinéraires et ouvrages les plus sensibles et exposés, en vue d'une **orientation ciblée de diagnostics plus approfondis** pouvant déboucher le cas échéant sur des **projets de renforcement** ;
- **Extension possible vers la réalisation d'outils de gestion de crise « en temps réel »** permettant une pré-orientation des moyens de secours ;

En concentrant ainsi in fine les moyens sur des enjeux ciblés, par secteurs homogènes en vue d'une réduction sensible et économiquement pertinentes des infrastructures routières les plus stratégiques et des ouvrages les plus sensibles ou exposés qui les composent, l'étude s'inscrit pleinement dans les objectifs et principes de réduction du risque sismique établis dans le cadre de la méthodologie d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Sismiques (PPRS) [10] et du Cadre national d'Actions pour la Prévention du Risque Sismique (CAPRiS) [11] rappelés aux §1.1.2.3 et 1.1.3.

Pour le Cerema, il s'agit également, du point de vue du développement méthodologique (activité de type Recherche et Développement), de tester l'applicabilité et l'adaptabilité de la démarche générale définie pour le réseau routier national, aux caractéristiques spécifiques des territoires urbains ou inter-urbains telles que précédemment listées au §1.4, notamment en termes de définition des enjeux locaux et de prise en compte des risques d'effondrement des bâtiments sur les infrastructures routières et les ouvrages qui les composent.

2.2 Partenaires et répartition des rôles

Le projet SISMET associe et répond simultanément aux objectifs du Cerema et de plusieurs métropoles ou collectivités territoriales (grandes agglomérations ou Conseils Départementaux) en France, qui en constituent les territoires d'expérimentation :

- la **Métropole Nice Côte d'Azur (MNCA)** ;
- le **Conseil Départemental des Alpes-Maritimes (CD 06)** ;
- **Nantes Métropole**.

Le projet reste ouvert à d'autres partenariats potentiel (métropole de Strasbourg ou agglomération de Mulhouse dans le Nord-Est de la France, métropoles ou collectivités territoriales dans les Alpes et/ou les Pyrénées), l'objectif étant de :

- Tester différentes configurations de territoires correspondant à différents contextes de sismicité, d'enjeux ou de géographie (territoires de montagne notamment) ;
- Généraliser et fiabiliser la méthode d'évaluation en assurant une cohérence à l'échelle du territoire national.

La direction territoriale Méditerranée du Cerema, pôle ressource du Cerema sur la prise en compte et la réduction des risques sismiques, assure le pilotage général du projet et est responsable des développements méthodologiques et de leur déclinaison sur le patrimoine routier géré par les collectivités territoriales partenaires de sa zone d'action (Métropole Nice Côte d'Azur et CD 06).

Les divisions Ouvrages d'Art des directions territoriales du Cerema (direction territoriale Ouest pour la métropole de Nantes) assurent le relais de proximité dans leur zone d'action vers les collectivités territoriales partenaires et l'expérimentation sur le patrimoine routier dont elles assurent la gestion.

Le rôle des collectivités territoriales partenaires du projet consiste à contribuer à la fourniture des données d'entrées nécessaires à l'étude (dossiers d'ouvrages, analyse des enjeux, données de trafic...), ainsi qu'à l'évaluation et à l'analyse critique des résultats obtenus.

Un comité de pilotage composé d'un représentant des services de chaque collectivité partenaire du projet et des représentants de l'équipe projet est chargé d'assurer le suivi et la validation des différentes phases du projet, d'organiser la mise en commun des résultats et de réceptionner la production des livrables.

Sur le territoire de Nice et de ses alentours, l'étude s'intègre dans le cadre du plan séisme 06 et plus largement dans celui de la déclinaison du CAPRiS en région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). A ce titre, le Pôle Risques Naturels et Technologiques de la DDTM 06 et l'Unité Risques Naturels Majeurs du Service de la Prévention des Risques de la DREAL PACA sont également associés au projet, en particulier pour la définition du périmètre de l'étude (choix de l'itinéraire de secours prioritaire établi en coordination avec le Service Départemental d'Incendie et de Secours SDIS 06 de la Sécurité Civile) et la capitalisation des résultats (*cf. annexe 1*).

Plus globalement, le projet s'inscrit dans la démarche générale de la ligne d'action « Maîtriser les risques sismiques sur les infrastructures existantes » soutenu par la DGITM (Direction Générale des Infrastructures, des Transports, et de la Mer) du MTES (Ministère de la Transition écologique et solidaire) dans le cadre du programme d'action du Cerema et en constitue une déclinaison R&D locale.

2.3 Démarche générale et structuration de l'étude

La démarche proposée consiste à appliquer, en la déclinant au contexte local, l'approche générale établie à l'origine pour le Réseau Routier National sous gestion Etat ou sociétés concessionnaires d'autoroutes, de raffinement progressif du niveau d'évaluation du risque sismique (cf. §1.3.1)

Ce raffinement progressif se traduit en pratique par différentes phases d'analyse successives, telles que décrites ci-dessous.

2.3.1 PHASE 1 (présent rapport) : Présentation générale de l'étude (contexte, objectifs, démarche adoptée, structuration des livrables...)

Cette première phase, objet du présent rapport, vise à définir le contexte et les objectifs de l'étude, présenter la démarche envisagée et les livrables attendus, ainsi que pour chaque métropole ou collectivité partenaire de l'étude, clarifier la formulation des besoins et attentes spécifiques, préciser les contributions attendues et faire l'état des lieux et le recensement des données disponibles (cf. annexes).

Une première introduction générale de la méthodologie de hiérarchisation des principales infrastructures structurantes vis-à-vis du risque sismique y est proposée, ainsi qu'une présentation des méthodes et outils SISMOA, SISMUR et SISROUTE développés pour l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages et infrastructures du réseau routier national (enjeux, objectifs, approche générale mise en œuvre), en mettant l'accent sur les adaptations nécessaires à une déclinaison de leur utilisation dans un contexte urbain ou inter-urbain.

2.3.2 PHASE 2 : Identification et hiérarchisation des principaux itinéraires urbains et inter-urbains structurants dans un contexte de gestion de crise sismique

L'objectif de cette deuxième phase consiste à décrire de manière plus détaillée la méthodologie de hiérarchisation des principales infrastructures structurantes vis-à-vis du risque sismique développée et calibrée pour le patrimoine de l'Etat, puis de proposer les nécessaires adaptations de cette méthode, par l'ajustement de certains critères d'analyse et de leur cotation, pour une application dans un contexte de gestion de crise sismique en milieu urbain ou inter-urbain.

Ces adaptations seront testées et analysées sur les territoires d'expérimentation constitués par tout ou partie du patrimoine routier géré par chacune des collectivités partenaires du projet en vue d'en asseoir la pertinence technique.

Limites de l'étude et contribution attendue de la part des collectivités partenaires associées au projet :

La hiérarchisation des différents itinéraires (ou tronçons d'itinéraires) gérés par les métropoles ou collectivités partenaires, bien que reposant sur une analyse très simplifiée croisant différents indices d'enjeux, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaires, ne pourra être exhaustif sur tous les itinéraires de la métropole ou collectivité concernée.

Un premier filtre permettant de borner l'étude devra donc être établi en partenariat avec elle. En outre, les services techniques de la collectivité seront associés pour l'analyse critique et le renseignement des différents critères (aléa, vulnérabilité, enjeux) en fonction de leur propre connaissance du patrimoine dont elle a la gestion, et de leur analyse du contexte et des enjeux.

2.3.3 PHASE 3 : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages constitutifs d'un itinéraire test en milieu urbain, et pré-estimation simplifiée des mesures de protection/renforcement potentiellement induites

La phase 3 de l'étude consistera à présenter de manière plus détaillée les méthodes et outils SISMOA, SISMUR et SISROUTE d'évaluation préliminaires du risque sismique sur infrastructures routières existantes et les ouvrages qui les composent (ponts, murs de soutènement et tête de tunnels, plate-formes et remblais routiers) : approche et principes d'analyse, entrants nécessaires, résultats obtenus, domaine et limites d'application...

Outre l'amélioration des outils existants vis-à-vis de la prise en compte des effets induits (liquéfaction des sols et instabilités gravitaires) et de la vulnérabilité des murs de soutènement, des adaptations de ces outils, développés et calibrés à l'origine pour le réseau routier national, seront proposées en vue d'une application en zone urbaine ou inter-urbaine.

Les outils ainsi modifiés seront ensuite testés sur un itinéraire ou tronçon d'itinéraire test, sélectionné à l'issue de la phase précédente pour chaque métropole ou collectivité partenaire, en vue d'en démontrer la pertinence et l'applicabilité, et/ou de proposer certains ajustements nécessaires des critères d'analyse.

Cette expérimentation pourra être menée pour différentes hypothèses d'aléa : niveaux d'accélération réglementaires du zonage sismique national associés à différentes valeurs de périodes de retour, cartes d'aléas résultants d'études de microzonage sismique menées dans le cadre de PPRS communaux, séismes de scénarios...

L'exploitation des résultats, en particulier les sources d'aléas induits ou de vulnérabilités structurales relatives aux ouvrages identifiés comme les plus critiques sur l'itinéraire, permettra en outre une pré-estimation simplifiée des coûts de protection ou de renforcement potentiellement induits (études et travaux) établis à dire d'expert sur la base de ratios statistiques forfaitaires.

Limites de l'étude et contribution attendue de la part des collectivités partenaires associées au projet :

L'expérimentation de la démarche se limitera à un seul itinéraire test par territoire, et visera à classer les ouvrages de cet itinéraire en différents niveaux de vulnérabilité et de risque. Les services de la métropole ou collectivité en charge de la gestion de ces ouvrages seront associés à l'étude notamment pour la mise à disposition et l'exploitation des dossiers d'ouvrages et la facilitation des visites sur site.

2.3.4 PHASE 4 : Calibrage des limites des niveaux de risques en fonction de critères de sélectivité et de coûts de renforcements potentiellement induits, et synthèse de l'étude

Cette phase 4 constituera la synthèse de l'étude d'évaluation et de prise en compte des risques sismiques à l'échelle d'un réseau d'infrastructures urbaines ou inter-urbaines.

Elle comportera notamment :

- Une analyse critique des résultats de l'étude en termes de caractère discriminant (sélectivité de la démarche) et de coûts de protection ou de renforcement potentiellement induits ;
- La validation ou des propositions de recalibrage des limites associées aux différents niveaux de risque issus de la méthode, dans un souci d'efficacité financière et organisationnelle ;
- L'identification et la proposition d'éventuelles suites à donner au projet.

2.3.5 PHASE 5 (optionnelle) : Appui au développement d'un outil logiciel permettant l'exploitation cartographique des résultats

La phase 5, optionnelle et pouvant être activée comme suite à donner à l'issue de la phase 4, consiste dans le développement d'une plateforme de données compatible avec une exploitation de type SIG permettant une représentation synthétique (et potentiellement dynamique) des résultats par les services de la collectivité en charge de la prévention et de la gestion des crises, ainsi éventuellement que la rédaction d'un cahier des charges pour la réalisation d'un outil cartographique dédié.

Limites de l'étude et contribution attendue de la part des collectivités partenaires associées au projet :

Cette phase ne comprend pas le développement informatique proprement dit de l'outil, mais uniquement l'appui à son élaboration (définition des fonctionnalités « métier », appui à l'élaboration du cahier des charges le cas échéant). Une proche collaboration est requise avec les services des collectivités en charge du développement et de l'exploitation de l'outil SIG de gestion des risques ou de gestion patrimoniale actuellement utilisés le cas échéant.

2.3.6 PHASE 6 (uniquement dans le cadre de la convention passée avec la Métropole Nice Côte d'Azur) : Diagnostic détaillé et étude préliminaire de renforcement sismiques d'un ouvrage particulièrement stratégique

Dans le cadre de la convention partenariale passée avec la Métropole Nice Côte d'Azur, une phase 6 supplémentaire a été intégrée au projet.

Cette phase consiste dans l'étude de diagnostic sismique détaillé d'un ouvrage particulièrement stratégique de l'itinéraire de secours prioritaire (pont Napoléon III de franchissement du Var à l'Ouest de la ville de Nice).

Menée à partir d'une modélisation numérique (calibrée à partir d'une instrumentation dynamique in-situ), cette étude vise à évaluer le niveau de performance actuel de l'ouvrage, en référence avec celui qu'il devrait réglementairement avoir s'il s'agissait d'un pont nouveau.

A l'issue de ce diagnostic sismique, une étude comparative de différentes stratégies et niveaux de renforcement sismique (étude préliminaire de renforcement sismique) est menée, dont l'objectif est d'établir et chiffrer la solution technique permettant d'atteindre le meilleur optimum coût/performance/enjeux.

Limites de l'étude et contribution attendue de la part des collectivités partenaires associées au projet :

L'étude de diagnostic sismique ne comprend pas les investigations éventuellement nécessaires (en particulier géotechniques) à mener au droit de l'ouvrage. Elle suppose en outre la fourniture du dossier d'ouvrage complet (notes de calcul, plans de coffrage et de ferrailage, relevés d'inspections détaillées périodiques...) par le service gestionnaire.

2.4 Livrables

La structuration des livrables sera cohérente avec l'organisation de l'étude en différentes phases successives telles que décrites ci-dessus (**un livrable par phase**).

Le corps du texte de chaque livrable développera les objectifs et développements méthodologiques associés à chacune des phases du projet, tandis que les annexes présenteront les résultats de l'expérimentation sur chacun des territoires d'étude (**pour chaque phase : une annexe par territoire d'expérimentation**).

2.5 Calendrier général

Le projet a démarré en octobre 2018, et est prévu pour une durée totale d'environ 2 ans, avec l'échéancier prévisionnel pour la remise des livrables suivant (versions V0 comprenant les développements méthodologiques associés à chaque phase en corps de texte ainsi qu'une annexe présentant un exemple de mise en application sur un des territoires d'expérimentation) :

- Phase 1 : février 2019
- Phase 2 : octobre 2019

- Phase 3 : [décembre 2019](#)
- Phase 4 : [septembre 2020](#)

Des points d'étape sont prévus à l'issue de chaque phase, en vue d'une mise en commun et d'une validation des résultats [et des versions définitives des rapports](#) entre les différents partenaires de l'étude.

La phase 5 (optionnelle) pourra éventuellement être activée à l'issue de la phase 4, tandis que la phase 6 (diagnostic détaillé et étude préliminaire de renforcement sismique d'un ouvrage particulièrement stratégique), qui ne concerne que la Métropole Nice Côte d'Azur, pourra être menée en parallèle 2 à 4.

Glossaire

Les définitions ci-dessous sont pour la plupart extraites du site de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS - <http://www.afps-seisme.org/SEISMES/Quelques-definitions>) ou du site internet de la prévention du risque sismique (Plan Séisme – <http://www.planseisme.fr/spip.php?page=glossaire#gloss154>), éventuellement complétées et précisées à partir de documentations techniques plus spécialisées sur tel ou tel aspect [7] [10] [18] [22].

Accélération du sol :

En génie parasismique, on utilise l'accélération du sol pour définir le séisme car c'est le paramètre physique le plus riche qui est relié directement aux forces qui s'exercent à la base des ouvrages de génie civil.

L'accélération du sol intègre différents paramètres : l'accélération maximale de référence au rocher (**PGA** ou a_{gr}), les éventuels **effets de site** pouvant amplifier localement l'amplitude des vibrations sismiques en fonction des conditions géologique ou de relief, ainsi que le contenu ou les caractéristiques du signal sismique (nombre de cycles, durée, contenu fréquentiel au travers du **spectre de réponse élastique**).

En France, le Réseau Accélérométrique Permanent collecte les accélérations du sol enregistrées en France métropolitaine et aux Antilles.

Accélérogramme :

Représentation graphique de l'enregistrement d'une onde sismique, donnant l'**accélération du sol** en fonction du temps (généralement selon les 3 composantes N-S, E-O et V), réalisé au moyen d'un accéléromètre.

Aléa sismique :

L'aléa est une estimation de la probabilité qu'un événement naturel survienne dans une région donnée et dans un intervalle de temps donné. L'aléa sismique est donc la probabilité, pour un site, d'être exposé à une secousse tellurique de caractéristiques données. L'évaluation de l'aléa sismique intègre la **magnitude**, l'ampleur et la **période de retour** des **séismes**. Elle peut également être quantifiée en termes d'**accélération du sol** ou bien d'**intensité macrosismique**.

Chutes de blocs :

Sur les versants montagneux, les masses rocheuses prédécoupées par des systèmes de discontinuités donnent lieu à des instabilités de mécanismes variés : glissement plan, glissement de dièdre, basculement, rupture de pied d'une colonne, décollement d'écaillés en paroi, etc. Les instabilités sont classées en fonction du volume élémentaire des blocs. Des volumes rocheux importants peuvent se déstabiliser et donner des éboulements allant de quelques dizaines de mètres cubes à des centaines de milliers de mètres cubes.

Type d'éléments éboulés	Volume
Pierres	< 1 dm ³
Blocs	1 dm ³ à 1 m ³
Gros blocs	> 1 m ³
Éboulement en masse	centaines de milliers de m ³
Écroulement	millions de m ³

Tableau 23 : Volume en fonction du type d'éléments éboulés
(Source : Cerema ITM)

La majoration de l'aléa chutes de blocs par suite de la sismicité résulte de l'effet de purge que peut produire la secousse sismique. On observe également un allongement sensible des trajectoires des blocs libérés lors du séisme, lié à une modification de l'accélération initiale des blocs.



a) Lors du séisme de Niigata (Japon 2004) (Source : Cerema ITM)



b) Lors du séisme de l'Aquila (Italie 2009)

Comme dans le cas des **glissements de terrain**, les facteurs aggravants peuvent provenir d'origines diverses : présence d'eau dans le massif, ruissellements et crues, action du gel/dégel, actions anthropiques, occupation du sol (végétation)...

En ce qui concerne le risque d'endommagement des infrastructures routières, le volume des blocs rocheux mobilisés et l'énergie cinétique correspondante sont des paramètres importants. En effet, les chutes de pierres isolées ne doivent pas être prises en compte tandis que quelques blocs de grande taille ou un éboulement en masse peuvent engendrer la rupture des ouvrages. Les parades envisageables vis-à-vis des chutes de blocs pourront consister dans des mesures ou dispositifs de protections passives localisés au droit de l'ouvrage (écrans, filets, merlons, fosses, couvertures pare-blocs en béton armé...), ou dans des mesures de prévention actives destinées à limiter le phénomène à la source (purges de la paroi rocheuse, clouage des blocs...). À noter que par rapport aux autres phénomènes, les seuils de déclenchement des glissements de terrains et chutes de blocs sont généralement très faibles, le séisme ne faisant que révéler des conditions déjà proches de l'instabilité.

Distance épiscoptrale :

Distance par rapport à l'**épiscoptr**. Quand on est « près » du séisme, on donne souvent la distance épiscoptrale en km.

Effets de site :

Les effets de site sont des modifications du mouvement du sol par rapport au mouvement enregistré sur le rocher. Ils sont causés par la résonance des ondes sismiques produite par la topographie du relief (**effets de sites topographiques**) ou par la présence de formations géologiques superficielles meubles (**effets de sites géologiques**). Le plus souvent, les effets de site conduisent à une amplification des mouvements sismiques.

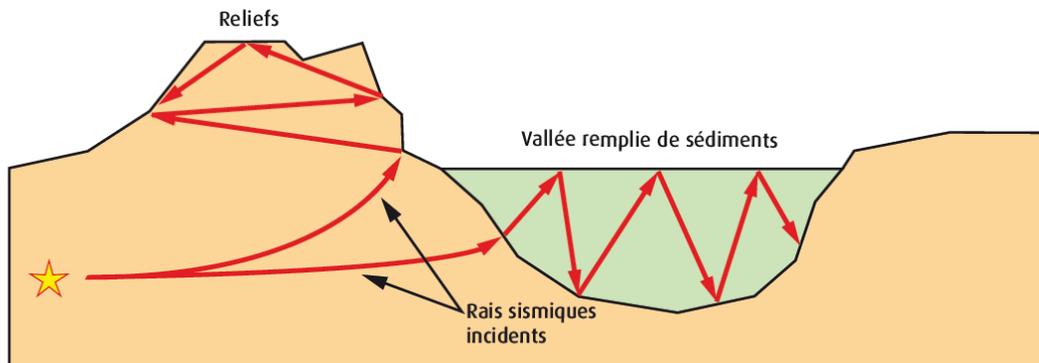


Figure 29 : Illustration des effets de site géologique et topographique (Source : Cerema ITM)

Effet de site géologique (ou lithologique) :

Les effets de site géologiques (ou lithologiques) se traduisent par une modification des caractéristiques vibratoires (contenu fréquentiel et amplitude) de l'onde sismique du fait de la géologie superficielle (géométrie et caractéristiques mécaniques des couches), en particulier du fait de la mise en résonance d'une couche de sol sédimentaire ou cuvette alluvionnaire. Ces effets de site conduisent généralement à une augmentation de la durée du séisme et à une amplification des sollicitations vibratoires, en particulier dans les gammes de basses fréquences, ce qui a tendance à accroître les risques d'effondrement liés aux phénomènes de résonance, notamment dans les structures souples.

La réglementation nationale définit ainsi des coefficients d'amplification (ou coefficients de sol S) ainsi que des paramètres de modification du **spectre de réponse élastique** au rocher pour chacune des 5 classes de sol qui y sont définies (cf. Figure 3 du présent rapport). Lorsqu'ils sont approuvés, les **PPRS** peuvent, sur la base d'études de microzonage sismique, modifier ou préciser localement ces paramètres à l'échelle d'un territoire communal.

Effets de site topographique :

Les reliefs topographiques comme les sommets de buttes isolées (collines, éperons rocheux...), de crêtes allongées, les rebords de plateaux et de parois rocheuses sont souvent le siège d'amplifications importantes du signal sismique dans une assez large bande de fréquences. Ces effets de site, dits topographiques, sont liés à l'effet de « rebond » et de superposition de l'onde sur les parois du relief.

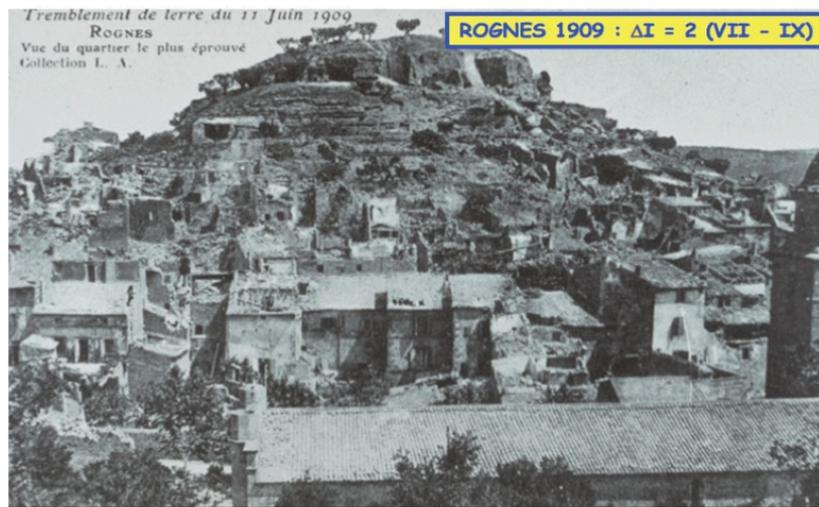


Figure 84 : Exemple de mise en évidence d'effet de site topographique : Rognes 1909
(Source : Ville de Rognes)

Dans l'Eurocode 8 [4] [5] [6], cet effet se traduit par une majoration de l'action sismique de calcul (**accélération du sol**) par le biais d'un coefficient d'amplification topographique S_T dont la valeur varie entre 1 et 1,4 pour les ouvrages situés sur ou à proximité de pentes (buttes et versants longs), de hauteur supérieure à 30 m et d'inclinaison supérieure à 15° (en fonction la largeur de crête, de la position relative de l'ouvrage par rapport au sommet et de l'angle d'inclinaison du versant). Comme dans le cas des **effets de site géologiques**, les **PPRS**, lorsqu'ils sont approuvés, peuvent modifier ou préciser localement cette valeur d'amplification sur la base d'études de microzonage sismique réalisées à l'échelle d'un territoire communal.

Effets induits :

Phénomènes naturels provoqués ou induits par les séismes, et dont les effets s'ajoutent à ceux liés aux mouvements du sol (<http://www.planseisme.fr/-Dossier-Seismes-et-effets-induits-Quand-une-catastrophe-.html>). Les principaux effets induits sont les mouvements de terrain ou instabilité gravitaires (**glissements de terrain** ou **chutes de blocs**), le phénomène de **liquéfaction des sols**, et les **tsunamis** .

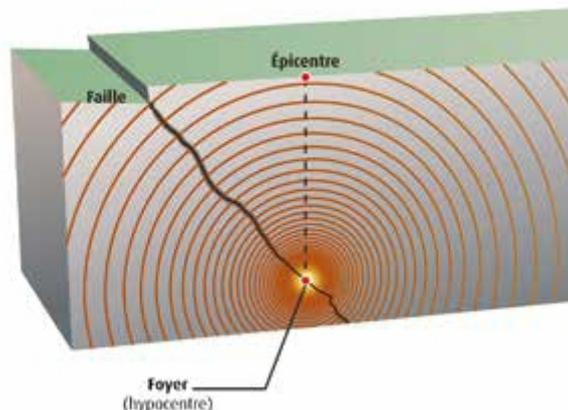
Enjeu (ou conséquences) :

Les enjeux sont constitués par les personnes, les biens, les équipements et l'environnement potentiellement menacés par un aléa : on peut hiérarchiser les enjeux en fonction de leur importance avant, pendant et après une crise et en estimer la vulnérabilité face à une intensité donnée d'un événement naturel donné.

Pour une infrastructure routière ou élément d'infrastructure donné(e), les enjeux correspondent au bénéfice que l'ouvrage apporte au gestionnaire. Pour évaluer ces enjeux, sont généralement utilisés le trafic supporté par l'ouvrage, les équipements, zones d'habitations ou d'activités desservis, ainsi que l'implantation de l'ouvrage dans le réseau routier afin de savoir s'il est facile de mettre en place une déviation en cas de fermeture du tronçon de route concerné.

Épicentre :

L'épicentre correspond à la projection du **foyer (ou hypocentre)** à la surface du globe, et en général, il est associé au mouvement sismique le plus élevé.



Faille active :

Les séismes de forte magnitude sont engendrés par une rupture co-sismique qui se traduit par un déplacement relatif brutal, pouvant atteindre le mètre, voire plusieurs mètres, le long d'un plan de faille (les failles susceptibles de provoquer les séismes sont appelées **failles actives sismogènes**, par opposition aux **failles actives asismiques** qui se caractérisent par un mouvement très lent et continu sans génération de sismicité - ou alors diffuse et très faible). En fonction de la profondeur du séisme et des caractéristiques géologiques du site, ce déplacement d'une faille sismogène peut soit être absorbé par les couches sédimentaires plus déformables surplombant la faille, soit se propager jusqu'en surface et y induire un déplacement permanent décimétrique ou métrique (on parle alors de rejet de faille en surface ou de déplacement co-sismique du sol engendré par une faille alors qualifiée de **faille capable**).

L'Eurocode 8-2 [2] définit les failles sismo-tectoniques comme actives, lorsque celles-ci sont susceptibles de produire un événement de magnitude de moment supérieure à 6,5, avec un taux de glissement historique moyen d'au moins 1 mm/an et en cas de preuve topographique d'une activité sismique au cours de l'ère Holocène (c'est-à-dire les 11 000 dernières années écoulées). Il impose alors un certain nombre de prescriptions particulières dans le cadre du dimensionnement des ouvrages neufs situés à proximité de telles failles, notamment l'utilisation d'un **spectre de réponse élastique** spécifique, prenant en compte les effets d'une **source** proche.

Sur le territoire national métropolitain, des études géologiques ont montré que certaines ruptures de surface s'étaient produites dans les 100 000 dernières années [10]. Selon l'état des connaissances actuelles, ce territoire ne présente aucune « faille sismo-tectonique active » au sens de la définition proposée dans l'Eurocode 8-2.. Des failles actives ont en revanche été identifiées dans les Antilles.

Foyer (ou hypocentre) :

Point de départ de la rupture des roches, le foyer ou hypocentre représente la zone de la **faille** où s'est produite la rupture et d'où les ondes sismiques commencent à se propager.

Glissements de terrain :

Les glissements de terrain correspondent à un affaissement brutal d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variable sur une pente, le long d'une surface de rupture identifiable. Les volumes de glissements peuvent varier de quelques mètres cubes (glissement pelliculaire de talus de déblai par exemple), à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes. Les vibrations générées par les séismes peuvent être responsables de l'apparition de glissements de terrain, par un facteur aggravant ou la combinaison de facteurs aggravants : augmentation des efforts moteurs (actions inertielles), réduction de la résistance au cisaillement de certaines couches sensibles (notamment par augmentation des pressions interstitielles).

Des glissements de terrain anciens peuvent également être réactivés par des séismes. Une attention particulière doit donc être apportée aux sites exposés à ce type d'aléa. L'action sismique peut, en plus d'être l'événement déclencheur, augmenter l'ampleur du phénomène.



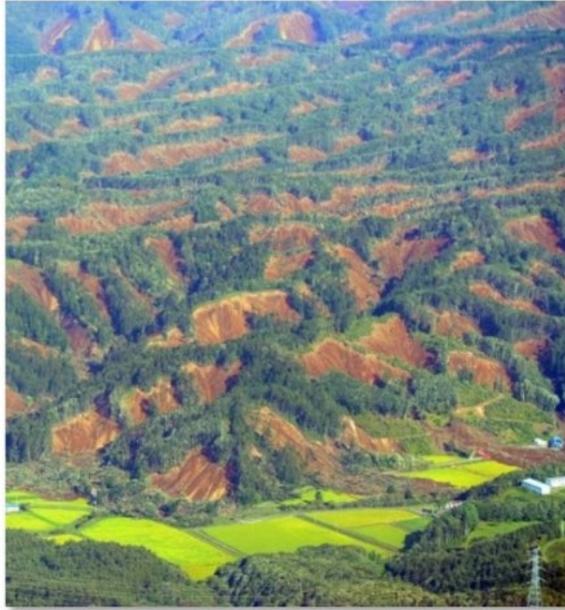
*Cas d'une infrastructure routière située à l'aval
(route ensevelie sous les masses glissées) (Source : Cerema ITM)*



*Cas d'une infrastructure routière située à l'amont
(route emportée) (Source : Cerema ITM)*

Figure 31 : Routes impactées par des mouvements de versants sous séismes (Niigata - Japon 2004)

Bien que la gravité soit le moteur du glissement, les glissements de terrain se développent suite à la conjonction de plusieurs facteurs aggravants comme la géologie du site, la morphologie des versants, les actions anthropiques (excavations, surcharges...), l'érosion naturelle (ruissellement, érosion de berges), mais également l'hydrogéologie et l'hydrologie (saturation des matériaux, augmentation des pressions interstitielles, etc.). Les retours d'expérience post-sismiques récents ont ainsi mis en évidence que les précipitations, eaux de ruissellement et d'infiltration, par la dégradation mécanique des terrains, avaient une influence considérable sur les seuils de déclenchement des phénomènes de glissement de terrain.



Vue aérienne des glissements de terrain généralisés dans la localité japonaise d'Atsuma, le 6 septembre 2018 lors d'un séisme ayant succédé à d'importants phénomènes de précipitations s'étant traduit par des sols gorgés d'eau et particulièrement instables (Source : AFP)

Intensité macrosismique :

Classification de sévérité de la secousse au sol en fonction des effets observés (personnes, objets, bâtiments...) dans une zone donnée. Les deux principales échelles utilisées en France (MSK64 et EMS-98) comportent 12 degrés (notés en chiffres romains). Le degré I correspond à une secousse imperceptible (même dans des circonstances favorables), les dégâts aux bâtiments commencent au degré V et deviennent importants (destructions de bâtiments) à partir de VIII. Le degré XII caractérise une catastrophe généralisée, les effets atteignant le maximum concevable. L'échelle EMS-98 constitue aujourd'hui l'échelle de référence en Europe.

Contrairement à la **magnitude**, l'intensité caractérise les effets et les dommages d'un séisme en un lieu donné. Pour un séisme, l'intensité diminue avec la distance et n'est donc pas un critère intrinsèque au phénomène naturel. Elle rend compte d'un certain état de l'environnement humain face à l'occurrence d'un séisme (constructions importantes, qualité et état de la construction, degré de préparation de la population...).

Liquéfaction des sols :

La liquéfaction des sols désigne le phénomène physique de passage des sols d'un état solide à un état liquide. Ce changement d'état s'observe dans le cas de forts mouvements sismiques (suffisamment puissants et prolongés dans le temps), appliqués à des sols sensibles formant un dépôt récent (terrains du Quaternaire) de nature sableuse, lâches, saturés en eau et peu profonds.

Ce comportement s'explique par l'effondrement du sol saturé lâche, qui induit la génération de fortes pressions interstitielles et une réduction critique de la résistance au cisaillement.

En zone sismique, les ouvrages de franchissement de cours d'eau, situés dans les vallées

alluviales sédimentaires ou les plaines côtières sont plus particulièrement exposés à ce type de phénomène. L'évaluation du risque de liquéfaction doit être effectuée lorsque le sol de fondation comprend des couches étendues ou des lentilles épaisses de sables lâches, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe et à proximité de la surface. Dans ce cas, une étude spécifique par un bureau d'études spécialisé permettra, sur la base de reconnaissances de sols spécifiques *in situ* (SPT, CPT, CPTu, essais d'identifications) ou en laboratoire (essais de liquéfaction à la presse triaxiale cyclique), de préciser le risque de liquéfaction et l'étendue des couches liquéfiables, et le cas échéant de proposer des solutions de renforcement des fondations ou un traitement du sol.



Figure 30 : Exemple d'effondrement d'un pont suite à la liquéfaction du sol porteur (Chili 2010)
(Source : P. Gueguen - ISTerre Univ Grenoble)

Magnitude :

La magnitude représente l'énergie libérée par une source sismique sous forme d'onde pendant un séisme. Elle est estimée à partir de l'enregistrement du mouvement du sol pendant un séisme soit à partir de l'amplitude du signal enregistré par des sismographes, soit à partir de sa durée. C'est une valeur caractéristique de la « puissance » d'un séisme.

Plusieurs types de magnitude peuvent être utilisés pour caractériser un séisme (magnitude des moments M_w , des ondes de surface M_s , des ondes de volume m_B , de durée $MD...$). Cependant, la plus utilisée est la magnitude locale M_l (ou magnitude de Richter).

L'« échelle de Richter » n'a, par définition, aucune limite théorique (ni inférieure ni supérieure). Se fondant sur des critères physiques (taille maximale d'une secousse tellurique et énergie rayonnée correspondante), on estime néanmoins qu'une valeur limite doit exister : la magnitude des plus violents séismes connus à ce jour ne dépasse pas 9,5. A partir d'une magnitude 5,5 un séisme dont le foyer est peu profond peut causer des dégâts notables aux constructions.

Niveau de priorité :

Dans le cadre de la démarche proposée dans le présent document, le niveau de priorité traduit la résultante de la combinaison des trois facteurs d'**aléa**, de **vulnérabilité** et d'**enjeux (ou conséquences)**, ou encore comme la combinaison des indices de **risque sismique** et d'enjeux.

Période de retour :

La période de retour désigne la durée moyenne séparant, en un lieu donné, deux séismes de même **intensité**, mais il arrive que ce terme soit aussi utilisé pour exprimer la durée moyenne entre deux séismes de même **magnitude**. La période de retour décroît à mesure que l'on considère des intensités sismiques faibles, pour la simple raison que les séismes sont d'autant plus fréquents que leur magnitude est faible.

La période de retour de 475 ans considérée dans la réglementation parasismique française correspond quant à elle à un niveau d'accélération de référence au rocher (**PGA ou a_{gr}**) ayant une probabilité de 10% d'être atteinte en 50 ans.

PGA (ou a_{gr}) :

La valeur du PGA (Peak Ground Acceleration) ou a_{gr} dans la norme Eurocode 8 [4] [5] et la réglementation sismique nationale française, correspond à la valeur d'**accélération maximale** de référence au niveau du rocher.

Cette valeur correspond également à l'origine du spectre de réponse de réponse élastique au rocher (pour une période nulle et des coefficients d'effets de site pris égaux à 1).

La réglementation sismique nationale [1] [2] [3] fixe les valeurs de l'accélération maximale de référence au rocher à considérer sur les différentes **zones de sismicité** du territoire national. Ces valeurs, associées à une **période de retour** de référence conventionnelle de 475 ans sont ensuite à majorer le cas échéant par un coefficient d'importance γ_I permettant de tenir compte de l'importance (ou **enjeu**) associé à chaque ouvrage.

Zone de sismicité	A_{Ek} (ou a_{gr}) (m/s^2)
2 (Faible)	0,7
3 (Modérée)	1,1
4 (Moyenne)	1,6
5 (Forte)	3

Accélération horizontales nominales de référence au rocher A_{Ek} (ou a_{gr}) à considérer selon les zones d'aléa sismique, en m/s^2

Les valeurs de PGA à prendre en compte pour une étude donnée peuvent également être définis dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques Sismiques (**PPRS**) approuvé qui se substitue localement au zonage national, ou bien dans le cadre de **scénarios sismiques déterministes** spécifiques à l'étude.

PPRS :

Les PPRS (ou Plans de Prévention des Risques Sismiques) visent à prendre en compte le risque sismique dans l'aménagement, la construction et la gestion du territoire à l'échelle d'une commune.

La caractérisation de l'**aléa sismique** local dans le cadre des PPRS est généralement établi sur la base d'études dites de « microzonage sismique », d'un niveau de précision supérieur à la réglementation nationale et permettant de mieux intégrer les spécificités locales en ce qui concerne les mécanismes de **sources** sismiques, l'évaluation et la prise en compte des **effets de site** locaux, de même que l'identification des zones plus particulièrement exposées aux potentiels **effets induits**. A partir du moment où il est approuvé, un PPRS s'impose théoriquement devant la réglementation nationale, qu'il conduise à un niveau d'**accélération du sol** plus ou moins contraignant que cette dernière.

Profondeur focale :

La profondeur focale correspond à la profondeur du **foyer ou hypocentre** (généralement en km) comptée depuis la surface du sol.

Répliques :

Les répliques désignent l'ensemble des séismes succédant, dans une séquence sismique, au séisme le plus puissant (dit « séisme principal » ou « choc principal »). Elles résultent de la modification de l'état des contraintes souterraines induites par le séisme principal, et traduisent un ajustement vers un nouvel état stable dans lequel les contraintes pourront à nouveau s'accumuler dans la durée. Par conséquent, les répliques sont situées à proximité de la **faille** responsable du choc principal, et leur fréquence diminue habituellement avec le temps. En général, plus le séisme principal est puissant, plus le nombre de répliques est important, et plus elles se poursuivent dans le temps : de plusieurs semaines à plusieurs années...

Risque sismique :

Conventionnellement, le risque sismique résulte de la conjonction d'un **aléa sismique** et d'une **vulnérabilité** des personnes, des biens et des activités sur ce site.

Dans le cadre de la démarche présentée ici, le risque sismique est associé au risque de « rupture de l'itinéraire ». Il est évalué par combinaison de différents indices d'aléas (**accélération sismique** et **effets induits**) avec différents indices de **vulnérabilité** associés aux différents types d'ouvrages (ponts, murs, remblais) et éléments de structure qui les composent vis-à-vis de ces différents aléas.

La combinaison du risque sismique avec la nature et l'importance des **enjeux** (économiques, patrimoniaux, sociaux...) conduit à l'évaluation d'un **niveau de priorité**.

Scénario déterministe :

Un scénario de séisme déterministe correspond à un événement réel, passé ou simulé. Contrairement au cas des **scénarios probabilistes**, il n'est donc pas fait appel ici à des notions de période de retour.

Pour les scénarios déterministes, les paramètres principaux (localisation de l'**épicentre**, **magnitude** et **profondeur focale**) sont choisis. Ce séisme peut correspondre un séisme historique ou récent afin de « calibrer » le scénario, un séisme qui vient de se produire (gestion de crise) ou tout simplement un séisme quelconque pour simuler et améliorer la préparation à la gestion de crise et prévoir le durcissement de certains éléments du réseau. Dans ce type de scénarios, les valeurs des **PGA** sont calculées depuis l'épicentre à partir de lois d'atténuation (ou loi de propagation des accélérations) et des coefficients d'**effets de site**.

Par exemple, le dimensionnement de certaines constructions peut être établi sur la base du séisme maximum historiquement connu (SMH) qui s'est produit à l'intérieur d'une **zone sismotectonique** et est supposé pouvoir se reproduire en tout point de la zone, ou sur la base du séisme maximum historiquement vraisemblable (SMHV). C'est ce type d'approches qui est actuellement utilisé pour l'application des normes parasismiques des installations à risque spécial et des installations nucléaires de base.

Scénario probabiliste :

Les scénarios sismiques probabilistes sont basés sur un catalogue de sismicité le plus complet possible, utilisé pour estimer la probabilité d'occurrence de différents niveaux d'agression sismique, en général exprimée par l'accélération du sol. Le principe de base est que, dans une **zone sismotectonique** donnée, il existe une relation linéaire entre le nombre de séismes dépassant une certaine **magnitude** et cette magnitude. Utilisant cette relation et des calculs d'atténuation du mouvement sismique avec la distance, il est possible de calculer en tout point du territoire les **accélérations maximales du sol** associées à différentes **périodes de retour**. C'est ce type d'approche qui a été utilisée initialement pour l'élaboration du zonage sismique réglementaire national actuellement en vigueur [2] sur la base d'une période de retour de référence théorique de 475 ans.

Séisme/Tremblement de terre :

Ce sont des vibrations de l'écorce terrestre provoquées par des ondes sismiques qui rayonnent à partir d'une source d'énergie élastique créée par la rupture brutale des roches de la lithosphère (partie la plus externe de la terre) au niveau du **foyer (ou hypocentre)**, généralement situé en profondeur. Ses principales caractéristiques sont la **source** et la **magnitude**.

Sismicité :

Distribution géographique des séismes en fonction du temps.

Source :

La source sismique caractérise le mécanisme physique à l'origine du séisme, c'est-à-dire la rupture sur le plan de **faille** au **foyer (ou hypocentre)**.

Spectre de réponse élastique :

Le spectre de réponse élastique est utilisé par les ingénieurs pour caractériser le système de forces (ou action sismique) qui s'applique à une structure lors d'un **séisme**. Il s'exprime par un graphe qui donne la réponse, en terme d'accélération, de vitesse ou de déplacement d'un oscillateur simple en fonction de sa période propre T ou de la fréquence propre f de vibration et de son amortissement critique.

Obtenue par transformation mathématique de l'**accélérogramme**, l'amplitude spectrale associée à chacune des fréquences du mouvement du sol permet ainsi de connaître l'accélération que devra supporter une structure ayant une fréquence de vibration privilégiée.

Le spectre de calcul réglementaire, obtenu par l'enveloppe lissée de spectres naturels représentatifs d'une **zone sismotectonique** donnée, dimensionne le mouvement sismique à prendre en compte dans les règles de construction.

Tsunami :

En japonais, tsunami vient de tsu « port » et nami « vague ». C'est un raz de marée généralement provoqué par un mouvement brutal du fond de la mer, par exemple au cours d'un séisme sous-marin, d'un mouvement de terrain sous marin ou d'une éruption volcanique sous marine. Un séisme sous-marin ou côtier se produisant à faible profondeur (moins de 50 km de profondeur) et possédant une magnitude d'au moins 6,5 est susceptible de créer un tsunami. L'amplitude du tsunami généré augmente avec la **magnitude** du séisme. A partir d'une magnitude 8, le séisme peut générer un tsunami potentiellement dévastateur au niveau d'une mer ou d'un bassin océanique. Lorsqu'un tsunami atteint la côte, il peut se manifester sous diverses formes selon la taille et la période des vagues, et également selon le relief sous-marin situé à proximité du rivage et la forme du littoral, ainsi que l'état de la marée et d'autres facteurs. Les dégâts causés par les tsunamis sont le résultat direct de plusieurs facteurs : l'inondation, l'impact des vagues sur les constructions et autres structures (impact qui dépend au premier ordre de la hauteur des vagues), le reflux rapide de la mer et l'érosion.

34 tsunamis se sont produits le long des côtes métropolitaines depuis le XVIII^e siècle dont 22 en Méditerranée, 4 en Atlantique et 8 en Manche. Le territoire métropolitain, de part sa configuration géographique et l'éloignement des zones les plus sismogènes, notamment autour de la Méditerranée, est toutefois relativement peu exposé à cet aléa. Le dernier tsunami à avoir marqué les esprits en France remonte au 16 octobre 1979. Déclenché à la suite d'un glissement de terrain, il avait fait 9 morts sur le site de l'aéroport de Nice. Si la célérité et l'effet de surprise liés au phénomène peuvent ne pas être sans conséquences (notamment sur les plages ou les routes de bord de mer en période estivale), la hauteur des vagues et la force des actions induites sur les constructions en zones littorales en métropole restent cependant sensiblement inférieures à celles observées lors de phénomènes météorologiques extrêmes tels que les submersions marines. Sur les rives de Méditerranée les plus exposées au risque tsunamis, les scénarios les plus pessimistes font ainsi état de hauteurs de vagues de l'ordre de 3 m et d'inondations du littoral limitées à 1,50 m. Sur la façade atlantique, ces valeurs sont encore moins élevées. En Outre-Mer en revanche (Martinique, Guadeloupe, Réunion, Polynésie française...), le risque tsunami (d'origine sismique ou volcanique) est beaucoup plus marqué. Le CENALT, le centre d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée occidentale est opérationnel depuis juillet 2012 [22].

Vulnérabilité :

Les ouvrages humains (constructions, équipements, aménagements, etc.) ne sont pas tous capables d'absorber et de dissiper, sans dommage (rupture), les efforts transmis par les ondes sismiques. Selon leur nature et leur conception ils sont plus ou moins vulnérables à ces sollicitations.

Des règles de construction parasismique sont imposées pour réduire cette vulnérabilité dans les **zones sismiques**.

Dans le cadre de la présente étude, l'indice de vulnérabilité traduit une évaluation qualitative ou quantitative de la sensibilité des ouvrages d'art, murs de soutènement ou tronçons de route aux différents aléas sismiques (**accélération du sol** et **effets induits**).

Cet indice résulte en pratique d'une combinaison de sous-indices associés aux différents éléments de structure (tablier, piles, culées, fondation dans le cas d'un pont) ou modes de ruine, permettant ainsi de déterminer le ou les point(s) faible(s) de l'ouvrage et les mesures de confortement envisageables.

Zone d'action :

Dans le cadre des scénarios de crise sismique sur un itinéraire routier, la zone d'action correspond à la limite de la zone étudiée.

Zone sismotectonique :

Zones géographiques dans lesquelles la probabilité d'occurrence d'un séisme de caractéristiques données (**magnitude**, **profondeur focale**) peut être considérée homogène en tout point : ces zones s'articulent en général autour d'une même **faille** ou d'une même structure ou **source** tectonique.

Références bibliographiques

- [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 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 catégorie dite "à risque normal"
- [4] NF EN1998-1 Eurocode 8 : Calcul des structures en béton pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [5] NF EN1998-2 Eurocode 8 : Calcul des structures en béton pour leur résistance aux séismes – Partie 2 : Ponts
- [6] NF EN1998-5 Eurocode 8 : Calcul des structures en béton pour leur résistance aux séismes – Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques
- [7] Guide Cerema « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » (2017)
- [8] Guide Cerema « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 » (2015)
- [9] Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 1995
- [10] Plans de prévention des risques naturels (PPRN) – Risques sismiques. Guide méthodologique révisé. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire / DGPR / SRNH, [à paraître](#)
- [11] Cadre d'actions pour la prévention du risque sismique - Conseil d'orientation pour la prévention des risques naturels majeurs (COPRNM), Secrétariat du COPRNM : Direction générale de la prévention des risques - Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie, septembre 2013
- [12] Prise en compte du risque sismique sur le patrimoine OA existant - Proposition de critères décisionnels pour une stratégie de renforcement. CETE Méditerranée, juillet 2013
- [13] SISMOA : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants. Sétra, nov. 2010. http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1039w_SISMOA-1.pdf
- [14] SISMUR – Murs Poids. Rapport final. CETE Méditerranée, sept. 2011
- [15] SISMUR – Murs BA. Cerema Méditerranée, [à paraître](#)
- [16] SISMUR – Murs Gabions. Cerema Méditerranée, [à paraître](#)
- [17] SISMUR – Murs Terre armée. Cerema Méditerranée, [à paraître](#)
- [18] SISROUTE - Outil d'évaluation préliminaire du risque sismique sur les infrastructures routières - Notice technique. Cerema Méditerranée, [à paraître](#)

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

[20] Rapports de mission post-sismique AFPS. <http://www.afps-seisme.org>

[21] Comportement aux séismes des tunnels et des ouvrages souterrains. Génie Parasismique, vol. VIII-8, pp. 817-831. COUDERT J.F., PANET M., ROBERT J. Presses des Ponts et Chaussées, Paris (1986)

[22] CENALT – Centre d'alerte aux tsunamis. <http://www.info-tsunami.fr>

Annexes : Déclinaisons sur les territoires d'expérimentation

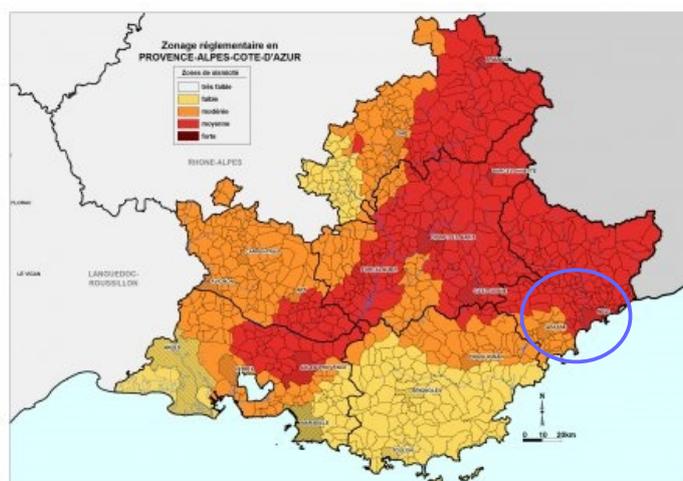
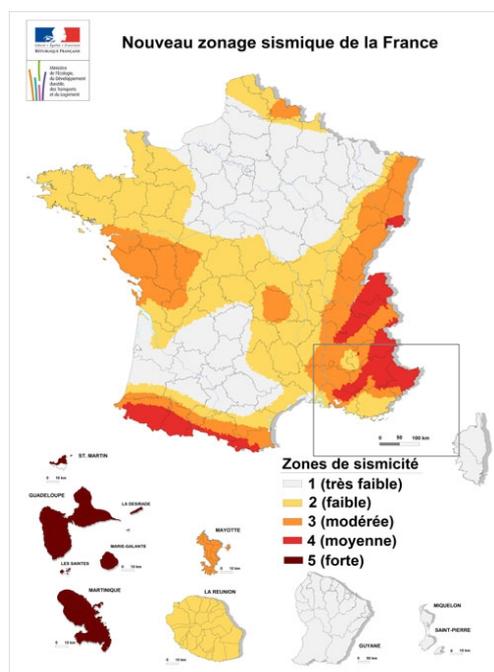
(hypothèses d'aléas spécifiques, périmètres d'étude et attentes ou objectifs particuliers exprimés, en lien avec le patrimoine routier géré par les partenaires associés au projet)

Annexe 1 : Application aux infrastructures routières du Département des Alpes-Maritimes (06) et de la Métropole Nice Côte d'Azur

1. Généralités

1.1 Exposition du territoire à l'aléa sismique

La région de Nice et plus globalement le département des Alpes-Maritimes se situent dans une des zones reconnues comme les plus sismiques du territoire national métropolitain. **Plus de 70 % de la superficie du territoire du département 06 est ainsi classée en zone de sismicité 4 (sismicité moyenne)** au sens de la réglementation parasismique en vigueur (Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010, révisé 2015, portant délimitation des zones de sismicité du territoire français [2], **le reste en zone de sismicité 3 (sismicité modérée)**.



Zonage sismique en région PACA, tel que défini par le Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 [2]

La sismicité de la région Niçoise est une conséquence plus ou moins directe de la convergence des plaques tectoniques Eurasie et Afrique dont la chaîne montagneuse des Alpes constitue une des manifestations géographiques les plus représentatives.

La région est ainsi le siège d'une micro-sismicité journalière, d'un évènement modéré de magnitude voisine de 4,5 tous les cinq ans environ et d'évènements forts (magnitude > 6) survenus au cours de son histoire. Plusieurs évènements sismiques importants ont ainsi déjà été ressentis aux alentours de Nice, notamment aux XV et XVI^{èmes} siècles dans le haut pays Vésubien. Le dernier est le séisme Ligure du 23 février 1887, pour lequel les dommages constatés ont bien sûr été plus importants en Italie où 635 victimes ont été déplorées, mais dont les effets ont également été ressentis dans les Alpes-Maritimes (8 décès et 51 blessés).

A la sismicité régionale de la région niçoise s'ajoute des **configurations géographiques locales aggravantes**, liées notamment à la proximité du relief au Nord (collines du château, du Mont-Boron, de Cimiez, de Fabron, de la Lanterne, les Moulins), de la mer au Sud (zone côtière), et des vallées alluvionnaires du Paillon, du Var et du Magnan. Ces configurations sont susceptibles d'engendrer des **effets de site** notables induisant une amplification significative du mouvement du sol, mais également de potentiels **effets induits** (glissements de terrain, chutes de blocs, liquéfaction des sols). La traversée de la ville par l'autoroute A8, du fait de ce relief très accidenté, se fait par l'intermédiaire d'une succession de viaducs de grande hauteur et de tunnels, par ailleurs régulièrement embouteillés.



*Illustrations de quelques spécificités du contexte niçois
(de gauche à droite et de haut en bas : vue d'ensemble de la ville « coincée » entre mer et montagne,
promenade des Anglais sur la zone côtière, franchissement du Paillon et ouvrages de l'autoroute A8*

Vis-à-vis de l'aléa tsunami, certains événements historiques démontrent que ce risque, bien que de nouveau largement inférieur à ce qui a été observé ces dernières années au Japon ou en Indonésie par exemples, est bien présent sur les côtes françaises de la Méditerranée :

- le 23 février 1887, un séisme en mer Ligure a provoqué un retrait de la mer suivie de vagues qui sont montées jusqu'à 2 m d'altitude à Cannes et à Antibes, inondant les plages et causant des destructions matérielles ;
- le 16 octobre 1979, l'effondrement d'une partie de l'aéroport de Nice a engendré des vagues de 3 m de haut sur Antibes, entraînant la mort de 11 personnes et provoquant d'importants dégâts ;
- le 21 mai 2003, le tsunami généré par le séisme de Boumerdès (Algérie), de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter, a causé des dégâts dans certains ports français de la façade méditerranéenne.

Ces deux derniers événements sont symptomatiques des événements qui pourraient affecter, à l'avenir, la côte d'Azur :

D'une part, un effondrement de terrain est susceptible d'engendrer un tsunami local, dont le délai de propagation serait très court. Dans le cas de l'aéroport de Nice, les travaux et l'instabilité de la zone se sont sans doute conjugués pour provoquer l'accident. De façon générale, en mer Ligure (de Fréjus à Menton pour la France), la côte est jugée instable et profonde, ce qui crée des conditions maximales de risque. D'autre part, le contexte géodynamique de la côte méditerranéenne en fait une zone de danger. Un tremblement de terre provoquant un effondrement de terrain ou un séisme sous-marin pourrait générer un tsunami qui aggraverait l'événement. Un tel séisme pourrait se produire en mer Ligure, où il existe des failles actives. Il pourrait également avoir lieu en Algérie, comme ce fût le cas lors du séisme de Boumerdès.

Pour qu'un tsunami soit notable, le séisme doit se produire à faible profondeur (moins de 50 km de profondeur) et avoir une magnitude d'au moins 6,5 sur l'échelle de Richter. Des études menées par le BRGM⁴ sur la base de scénarios extrêmes conduisent à des hauteurs de vagues maximales de l'ordre de 3 m pouvant submerger la Promenade des Anglais. La vitesse d'arrivée des vagues (plusieurs dizaines de km/h) conduit à des délais d'alerte très courts (maximum une heure) et peut donc se traduire par des dégâts non négligeables sur les façades des bâtiments ainsi que par des victimes potentielles.

Pour autant, les sollicitations engendrées et débris déposés sur les infrastructures routières sont estimés inférieurs à ceux résultant de phénomènes météorologiques de type tempêtes ou submersion marine, et une fois la route nettoyée, on peut légitimement considérer que le phénomène aura peu d'impact sur l'organisation des secours et la circulation des véhicules dédiés à cette dernière. En conséquence, l'aléa tsunami ne sera pas intégré dans l'analyse.

En termes d'enjeux, Nice est une ville qui compte un peu moins de 350 000 habitants sur une superficie légèrement inférieure à 72 km². Elle compte environ 215 000 logements et 150 000 emplois. Environ 37 000 bâtiments (dont 610 de hauteur supérieure à 25 m et 15 de hauteur supérieure à 50 m) et 12 000 constructions légères y ont été recensés. **La plupart de ces constructions, en particulier dans le centre-ville ancien, sont**

4 Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française – Rapport de synthèse. BRGM/ RP-55765-FR, décembre 2007

réputées vulnérables à l'aléa sismique puisque conçues avant l'application des premières règles parasismiques nationales.

L'aéroport de Nice, dont la plateforme a été gagnée sur la mer, est le 2^{ème} de France (12 millions de passagers en 2016) et le département des Alpes-Maritimes accueille en moyenne plus de 11 millions de touristes par an.

1.2 Actions locales déjà entreprises ou en cours pour l'évaluation et la prise en compte du risque sismique

Depuis le début des années 1980, Nice a fait l'objet de nombreuses études sismiques et a toujours été identifiée comme ville pilote en la matière. Parmi les projets réalisés, on peut notamment citer :

- Le projet GEMITIS (1993-1998) dont l'objectif était le développement d'une méthode d'évaluation des préjudices humains et des dommages matériels sur la ville de Nice à la suite d'un séisme de forte intensité ;
- Le programme européen de recherche RISK-UE (2000-2004), visant à élaborer un méthode standardisée de scénarios de crise sismique adaptée au contexte européen, fondée sur les caractéristiques communes de sept villes (Nice, Barcelone, Catania, Sophia, Bitola, Bucarest et Thessalonique) ;
- Le projet national GEM-GEP (1999-2005) initié par le Conseil Général des Ponts et Chaussée (CGPC, désormais Conseil général de l'Environnement et du développement Durable CGEDD) dont l'objectif était, à partir du développement d'un modèle géotechnique 3D des bassins sédimentaires de la ville, d'identifier les secteurs les plus vulnérables et exposés de la ville et d'attirer l'attention sur les bâtiments publics les plus sensibles. Ce modèle a été affiné et vérifié au cours des années suivantes dans le cadre des opérations de recherche menées par l'équipe Risque Sismique du CETE Méditerranée (désormais CEREMA Méditerranée).

Ces différentes applications ont permis notamment d'obtenir des estimations de la vulnérabilité des quartiers de Nice. Elles n'intégraient pas toutefois ou de manière très succincte la vulnérabilité des infrastructures de transport.

Depuis début 2017, le plan séisme départemental des Alpes-Maritimes est actif. Dans le cadre de ce plan, porté par la Préfecture des Alpes-Maritimes et le Service de Prévention des Risques Naturels Terrestres de la DDTM 06, de nouvelles études ou documents relatifs à l'évaluation et la prévention du risque sismique sur le territoire ont été produits ou sont en cours :

- Étude de priorisation des itinéraires du département vis-à-vis du risque sismique et capitalisation d'études déjà menées sur certains itinéraires et ouvrages (Cerema Méditerranée, janvier 2018⁵), par déclinaison à l'échelle du département d'une évaluation plus globale menée à l'échelle de la région PACA⁶ sur la base d'une analyse très simplifiée (« analyse macro grande maille ») croisant différents indice

5 Vulnérabilité des itinéraires stratégiques à l'aléa sismique dans le département des Alpes-Maritimes. Cerema Méditerranée, janvier 2018

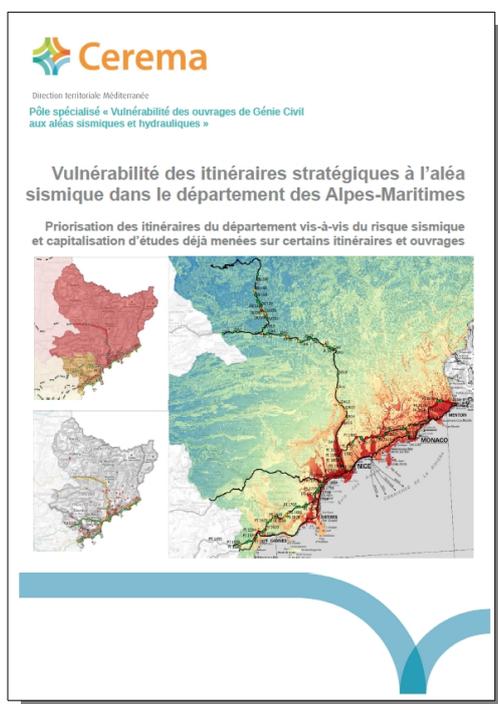
6 Vulnérabilité des itinéraires stratégiques à l'aléa sismique en région PACA – Priorisation des itinéraires de la région PACA vis-a-vis du risque sismique et capitalisation d'études déjà menées sur certains itinéraires et ouvrages (Cerema Méditerranée pour la DREAL PACA, 2016)

d'enjeux, d'exposition à l'aléa, et de vulnérabilité très sommaire ;

- PPRS de Nice (DDTM 06, janvier 2019⁷) ;
- PPRS de Saint-Laurent du Var et Menton ([à venir](#)) ;
- Étude de 8 ou 9 scénarios sismiques déterministes sur la région niçoise (BRGM, [en cours de validation officielle](#)).

La première étude, menée sur la base d'approches simplifiées sécuritaires, a notamment mis en avant la **très forte sensibilité des infrastructures structurantes du département à l'aléa sismique**, par la combinaison de facteurs défavorables en termes d'aléa, de vulnérabilité et d'enjeux. Sur un linéaire total d'itinéraires étudiés d'environ 340 km, plus de 50 % ressortent ainsi en niveau de priorité 1 (le plus élevé). Parmi les itinéraires prioritaires, on trouve en particulier :

- L'autoroute A8 en raison d'une part de son rôle de transit international (Italie-Espagne) sur la façade méditerranéenne, d'autre part de la vulnérabilité pressentie des grands viaducs qui composent le franchissement Nord de Nice ;
- L'itinéraire Nice-Digne (M202 puis RD6202) composé d'ouvrages relativement anciens et qui joue un rôle de desserte primordial des zones montagneuses reculées et particulièrement vulnérables.



*Vulnérabilité des itinéraires stratégiques à l'aléa sismique dans le département des Alpes-Maritimes
(Rapport d'étude Cerema Méditerranée, janvier 2018)*

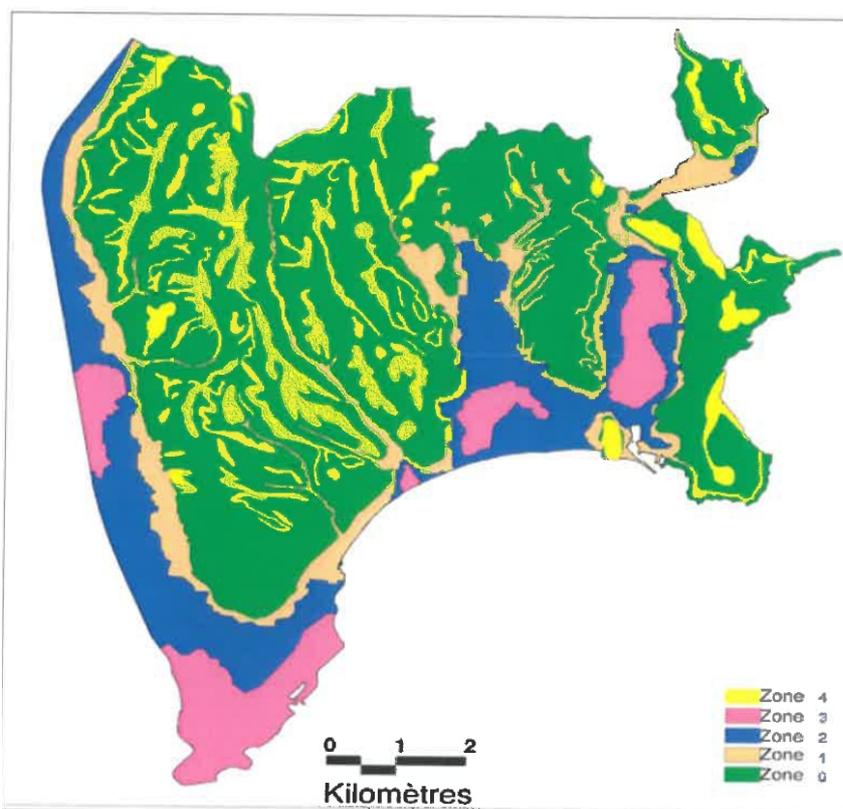
Le règlement **PPRS de Nice**, approuvé en janvier 2019, impose pour sa part un zonage spécifique à l'échelle de la commune, établi à partir d'une étude de microzonage sismique. Ce zonage découpe le territoire communal en **5 zones de sismicités notées**

7 Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles de Séismes sur la commune de Nice – Règlement et Rapport de présentation approuvés par le Préfet des Alpes-Maritimes le 28 janvier 2019

B₀ à B₄ intégrant les **effets de sites géologiques et topographiques**, et définit pour chacune de ces 5 zones un **coefficient d'amplification de site** et un spectre de réponse élastique spécifiques.

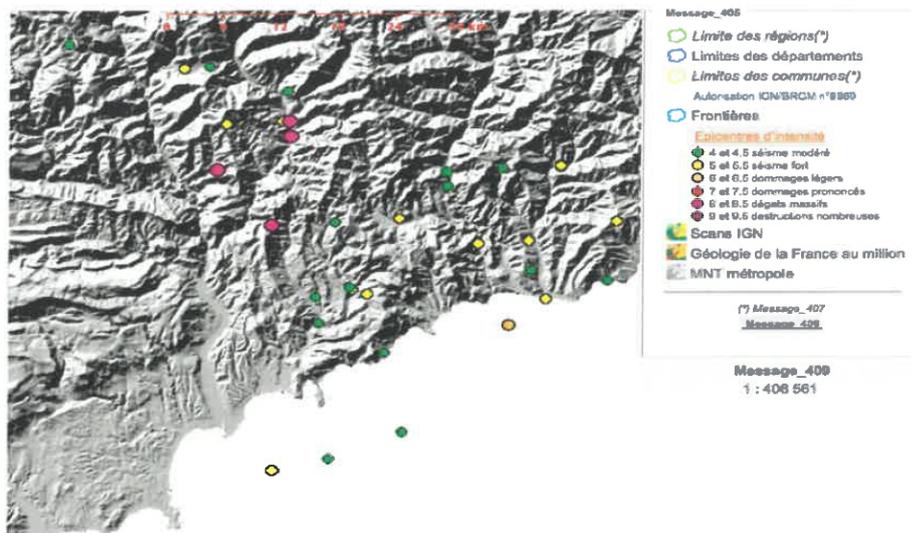
- La zone B₀ représente le rocher affleurant non sujet aux effets de site topographiques ;
- Les zones B₁ à B₃ sont des zones alluvionnaires sujettes aux effets de site sédimentaires (zone B₁ : sédiments peu épais, zone B₂ : sédiments d'épaisseur moyenne, zone B₃ : sédiments épais) ;
- La zone B₄ représente le rocher affleurant sujet aux effets de site topographiques.

Les zones B₁, B₂ et B₃ sont également réputées pouvoir être exposées au phénomène induit de liquéfaction des sols.



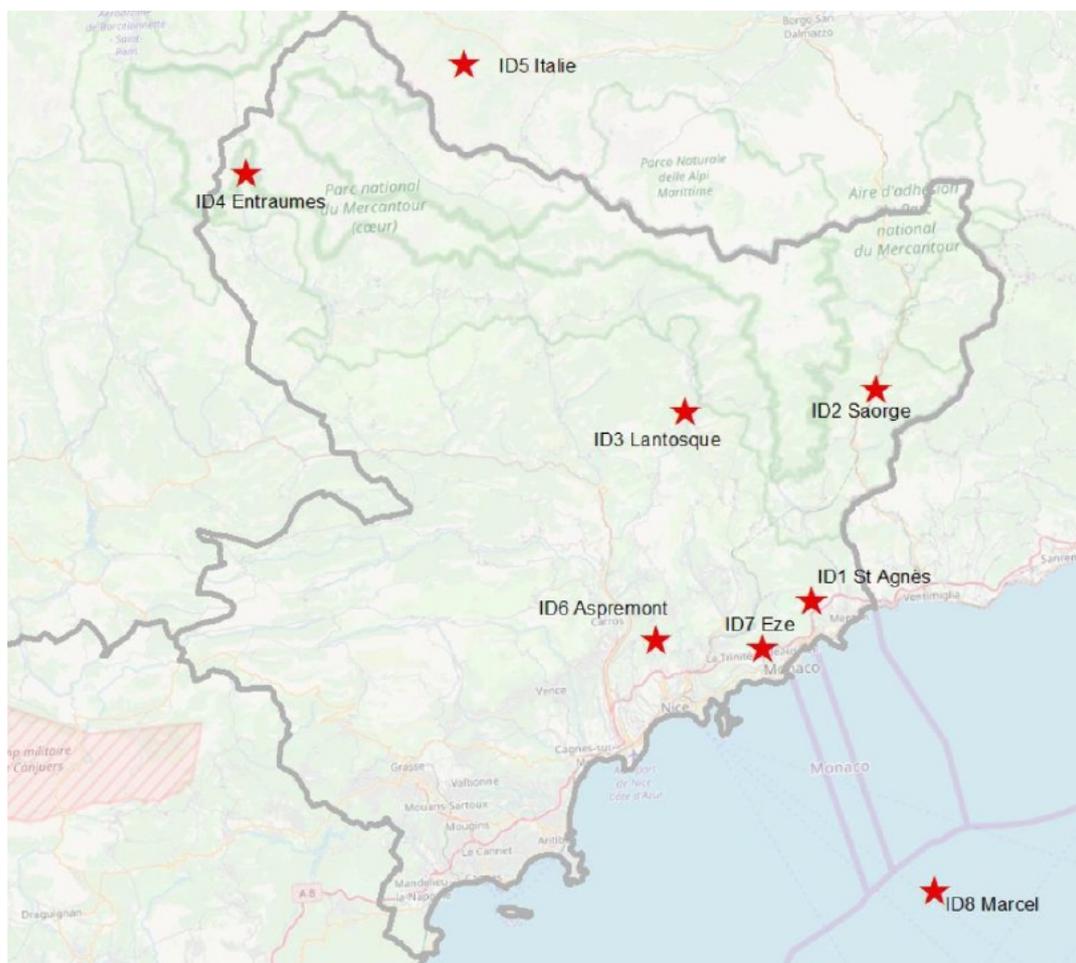
Microzonage de la ville de Nice, rendu d'application obligatoire par approbation du PPRS7

Enfin, s'agissant des **8 ou 9 scénarios sismiques déterministes** en cours de validation, ces derniers sont établis à partir de la sismicité historique de la région éventuellement n déplace la position des épicentres de manière à produire des effets plus représentatifs des évènements redoutés.



Date	Localisation	Intensité épicentrale (EMS-98)	Intensité épicentrale (EMS-98) à Nice	Profondeur (km)	Magnitude
20 juillet 1564	Argentera-Massif du Mercantour	VIII	V		5,7
23 juin 1494	Arrière Pays Niçois	VIII	VI		5,7
18 janvier 1618		VIII	?		5,7
15 février 1644		VIII	?	15	5,7
26 mai 1831		VIII	?		5,7
29 décembre 1854		VII-VIII	VI		5,5
23 février 1887		IX	V	8	6,3
19 juillet 1963	Mer Ligure	VII-VIII	V		6,0
26 décembre 1989		VI	IV		4,5
15 avril 1990		VI	III-IV		4,3
21 avril 1995		VI	V	9	4,7
25 février 2001		VI	IV		4,8

Les principaux séismes survenus en région niçoise7



Identifiant	Nom	Mw	Prof (km)	Mécanisme	GMPE	Conversion acc/intensité
ID1	St-Agnès	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID2	Saorge	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID3	Lantosque	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID4	Entraumes	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID5	Italie	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID6	Aspremont	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID7	Eze	6.2	5	Décrochant	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010
ID8	Marcel	6.2		Inverse	Bindi et al. 2014	Faenza & Michelini 2010

Localisation des épicentres et principales caractéristiques des 8 scénarios sismiques déterministes prédéfinis sur la zone d'action par le BRGM en partenariat avec le Cerema et l'unité de recherche GéoAzur de l'Université Nice Sophia-Antipolis⁸

2. Montage du projet de partenariat R&D

La Métropole Nice Côte d'Azur et le Conseil Département des Alpes-Maritimes, sont des acteurs locaux majeurs de l'aménagement des territoires et disposent de nombreuses compétences dans ce domaine, notamment les compétences « route » et « gestion des risques ». A ce titre, ils ont en charge à la fois la gestion d'un patrimoine routier conséquent et la prévention des risques pouvant menacer leur territoire, notamment en

⁸ Plan ORSEC départemental séisme - tsunami. Projet arrêté au 28 août 2018. Préfecture des Alpes-Maritimes

A l'issue de la réunion, **il a donc été décidé de focaliser les études à mener dans le cadre du projet SISMET sur les portions de l'itinéraire de secours prioritaire sous maîtrise d'ouvrage MNCA et CD06**. La portion sous gestion Escota faisant quant à elle l'objet d'études confiées par la société concessionnaire à des bureaux d'études privés, pour lesquelles le Cerema Méditerranée intervient en contrôle extérieur pour le compte du service de contrôle des concessions (GRA) de la Direction des Infrastructures de Transport du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire.

Cette décision a donné suite à la **signature de conventions R&D SISMET entre le Cerema Méditerranée et :**

- **le Conseil Départemental des Alpes-Maritimes en juillet 2018 d'une part ;**
- **la Métropole Nice Côte d'Azur en septembre 2018 d'autre part.**

3. Périmètre d'étude et clarification des objectifs associés à chaque phase

3.1 PHASE 2 : Identification et hiérarchisation des principaux itinéraires urbains et inter-urbains structurants dans un contexte de gestion de crise sismique

Compte tenu de ce qui précède, la phase 2 du projet SISMET consistera à :

- décrire la démarche et rappeler les principaux résultats et conclusions de l'étude de priorisation des itinéraires du département vis-à-vis du risque sismique, réalisée par le Cerema Méditerranée en janvier 2018 (approche « gestionnaire » d'analyse de risque visant à identifier les infrastructures les plus exposées et sensibles par croisement de critères d'aléa, de vulnérabilité et d'enjeu) ;
- puis à confronter ces éléments à la démarche de priorisation mise en œuvre par le SDIS 06 (approche « sécurité civile » pour la gestion de crise visant à définir des itinéraires prioritaires de secours, dans laquelle les infrastructures à priori les moins vulnérables et exposées sont privilégiées).

3.2 PHASE 3 : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages constitutifs d'un itinéraire test en milieu urbain, et pré-estimation simplifiée des mesures de protection/renforcement potentiellement induites

L'itinéraire test retenu pour cette phase correspond aux portions sous maîtrise d'ouvrage CD06 ou MNCA de l'itinéraire de secours prioritaire n°1 défini par la sécurité civile (SDIS 06), permettant la traversée Ouest-Est du département depuis Mandelieu-la-Napoule jusqu'à Menton, et franchissant la ville de Nice en empruntant la route littorale (promenade des Anglais).

L'étude prendra en compte différents niveaux de séismes (associés à différentes périodes de retour d'évènement dans le cadre du zonage national réglementaire probabiliste) ainsi que sur les zones concernées, les microzonages établis dans le cadre des PPRS de Nice, St-Laurent du Var et Menton le cas échéant. Les 8 ou 9 scénarios sismiques déterministes définis sur la zone d'action par le BRGM [en partenariat avec le Cerema et l'unité de recherche GéoAzur de l'Université Nice Sophia-Antipolis](#) seront également intégrés à l'étude.

3.3 PHASE 6 : Diagnostic détaillé et étude préliminaire de renforcement sismiques d'un ouvrage particulièrement stratégique

Cette phase consistera dans l'étude de diagnostic sismique détaillé du pont Napoléon III de franchissement du Var à l'Ouest de la ville de Nice, ouvrage particulièrement stratégique de l'itinéraire de secours prioritaire **en termes de circulation, de desserte immédiate d'équipements à forts enjeux (tour Cadam abritant la cellule de crise de la Préfecture 06, aéroport Nice Côte d'Azur, importante zone commerciale à proximité) et supportant des réseaux de communication.**

Cette étude visera à évaluer le niveau de performance actuel de l'ouvrage, puis à procéder à étude préliminaire de renforcement sismique consistant à comparer différentes stratégies et niveaux de renforcement sismique, puis à proposer et chiffrer la solution technique permettant d'atteindre le meilleur optimum coût/performance/enjeux.



Pont Napoléon III permettant le franchissement du Var à l'Ouest de la ville de Nice

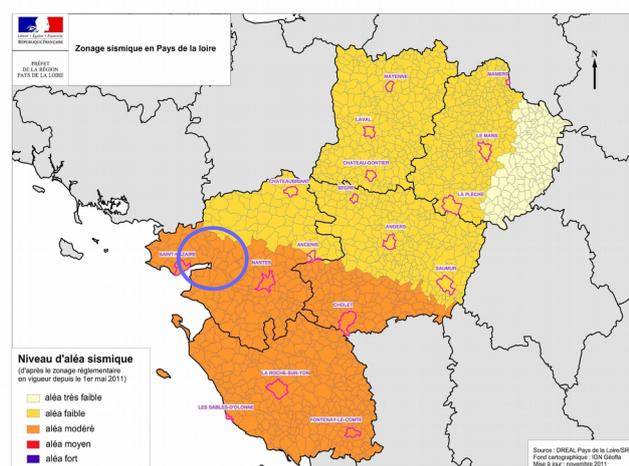
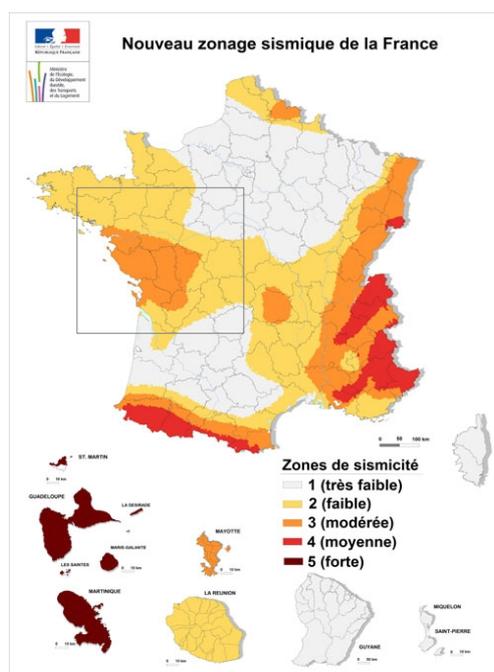
Annexe 2 : Application aux infrastructures routières de Nantes Métropole

À compéter Benoît POULIN (Cerema Ouest) et Anne-Charlotte GASSER (Nantes Métropole)

1. Généralités

1.1 Exposition du territoire à l'aléa sismique

Conformément au Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2012 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français [2], le territoire de Nantes Métropole se situe en **zone de sismicité 3, dite zone de sismicité modérée**.



Zonage sismique en région Pays de Loire, tel que défini par le Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 [2]

Situé dans une des zones françaises les plus concernées par l'évolution du zonage sismique national, le territoire de Nantes Métropole est en effet passé en 2010 d'une zone 0 de « sismicité négligeable » à la zone 3 dite de « sismicité modérée », soit une augmentation de deux niveaux.

La très grande majorité des constructions implantées sur ce territoire (à l'exception des plus récentes conçues après 2010), n'ont ainsi fait l'objet dans leur dimensionnement d'aucune prise en compte de l'aléa sismique.

Ce territoire présente en outre des configurations de sol potentiellement aggravantes (**effet de site géologique** et risque d'**effet induit liquéfaction des sols** notamment liés à la présence de la Loire).

Vis-à-vis de l'aléa tsunami, la France se trouve relativement protégée par une plateforme continentale très développée, à partir de l'Aquitaine, jusqu'à la Vendée et la Bretagne. Cette plateforme a comme effet de protéger, dans une certaine mesure, les côtes

françaises de la façade Atlantique. Dans ce contexte, l'aléa tsunami peut être considéré sensiblement moins impactant pour les infrastructures routières littorales que certains phénomènes météorologiques de type tempêtes ou submersion marine, et ne sera pas intégré dans l'analyse.

En termes d'enjeux, Nantes Métropole ... à compléter nombre d'habitants, superficie, enjeux spécifiques, densité d'urbanisation, etc.

A noter également que le Grand Port Maritime de Nantes St-Nazaire constitue le premier port de la façade atlantique française avec plus de 3 000 escales de navires marchands par an correspondant à un trafic extérieur annuel de l'ordre de 30 millions de tonnes. Cette activité logistique crée au total 2,7 milliards d'euros de valeur ajoutée et plus de 25 000 emplois dans les régions du grand Ouest.



*Illustrations de quelques spécificités du contexte nantais :
Forte densité urbaine et nombreux franchissements de la Loire*

2. Montage du projet de partenariat R&D

La métropole de Nantes est un acteur local majeur de l'aménagement des territoires et dispose de nombreuses compétences dans ce domaine, notamment les compétences « route » et « gestion des risques ». A ce titre, elle a en charge à la fois la gestion d'un patrimoine routier conséquent et la prévention des risques pouvant menacer son territoire notamment en terme de planification de la gestion de crise.

Une réunion de présentation du projet SISMET a eu lieu à Nantes le 16 octobre 2017. Cette réunion a donné suite à la **signature d'une convention R&D SISMET entre le Cerema Ouest et Nantes Métropole en mars 2018.**

3. Périmètre d'étude et clarification des objectifs associés à chaque phase

3.1 PHASE 2 : Identification et hiérarchisation des principaux itinéraires urbains et inter-urbains structurants dans un contexte de gestion de crise sismique

Périmètre de l'étude à préciser/illustrer à partir du tableau transmis par A.-C Gasser (liste d'itinéraires éventuellement à cibler sur les infrastructures structurantes à plus forts enjeux)

3.2 PHASE 3 : Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages constitutifs d'un itinéraire test en milieu urbain, et pré-estimation simplifiée des mesures de protection/renforcement potentiellement induites

L'itinéraire test retenu pour cette phase sera déterminé à l'issue de la phase 2.

L'étude spécifique de cet itinéraire prendra en compte différents niveaux de séismes (associés à différentes périodes de retour d'évènement dans le cadre du zonage national réglementaire probabiliste).

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76

Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr