

# **Un outil pour la prise de conscience du risque sismique-: les études de scénario. L'exemple de Nice**

***La Côte d'Azur n'est ni le Japon, ni la Californie, loin s'en faut, mais la menace sismique y est réelle. Et pourtant la prévention s'y heurte toujours à une prise de conscience insuffisante. D'où, à l'instar de ce qui se pratique, avec succès, dans des pays plus sismiques, la réalisation d'études de scénario qui devraient permettre l'élaboration d'une politique de prévention. Les principaux éléments de la dernière en date des études conduites à Nice, le projet Gemgep.***

***par Pierre-Yves Bard (1,2), Anne-Marie Duval (3), Patrice Foin (4),  
Philippe Guéguen (1,2), Etienne Bertrand (3),  
Jean-François Vassiliades (3), Sylvain Vidal (3),  
Christian Thibault (3), François Dunand (1)***

**L**a menace sismique, sur la Côte d'Azur, n'est pas aussi forte que dans des pays comme le Japon, la Californie, la Turquie, ou l'Algérie, et de très loin. Cependant, cette menace est réelle-: la Côte d'Azur fait partie, avec d'autres, des zones reconnues comme étant les plus sismiques de l'Hexagone, et aucun sismologue ne saurait se déclarer étonné, si un séisme d'une magnitude voisine de 6, sur l'échelle de Richter, se produisait un jour dans les Alpes-Maritimes.

Depuis plusieurs décennies, diverses mesures (d'abord timides, puis plus volontaristes) ont été prises pour limiter ce risque, grâce, notamment, à l'extension progressive du champ d'application de la réglementation parasismique, qui doit (ou tout au moins-: devrait...) être désormais respectée par toute nouvelle construction. Cependant, même si la construction immobilière reste active (principalement sur le littoral), le parc immobilier existant est majoritairement antérieur à l'entrée en vigueur

des premières règles parasismiques, en France (1969)-: de ce fait même, il est moins bien protégé. De plus, les techniques de renforcement actuellement disponibles s'avèrent, en règle générale, d'une mise en œuvre trop coûteuse pour que puisse être édictée une obligation de mise à niveau, tout du moins en ce qui concerne le bâti «-courant-» (c'est-à-dire, exempt de tout risque industriel avéré). Comparés à d'autres aléas naturels (inondations, glissements de terrain...), les séismes aux conséquences destructri-

ces présentent la spécificité d'avoir une période de retour beaucoup plus longue, qui généralement dépasse largement la mémoire individuelle (et donc, *a fortiori*, la durée d'un (voire de plusieurs) mandat(s) électif(s)...) et ce, même si des événements modérés – mais suffisamment forts pour être ressentis – surviennent assez régulièrement (à Nice, il s'en produit plusieurs par décennie). La prévention se heurte donc bien souvent à un manque de prise de conscience; ce phénomène concerne l'ensemble de la population, depuis le propriétaire ou le locataire jusqu'aux décideurs locaux, en passant par les professionnels du bâtiment (mais cette conscience d'un risque peut aussi, ponctuellement, être exagérée de manière indue: on l'a constaté par exemple, récemment, à propos du risque de tsunami, après la catastrophe qui a largement affecté l'Océan Indien, fin 2004). Nombre de pays plus sismiques que la France (comme le Japon ou la Californie, notamment) ont déjà surmonté ce problème depuis longtemps; ils ont appris qu'un moyen efficace pour favoriser une prise de conscience informée – sans minimisation, ni dramatisation – consistait en la réalisation d'études «-de scénarios-» consistant à évaluer à l'avance les dommages qu'un



Figure 1: Photo satellite de la région niçoise.

séisme «-plausible-» pourrait occasionner, à l'échelle de l'ensemble d'une agglomération, en communiquant les résultats obtenus à l'ensemble des acteurs de la construction ainsi qu'à la population, et à élaborer, sur cette base, une politique concertée de prévention, ciblée – en priorité – sur les points les plus vulnérables. Dans l'imaginaire collectif, Nice a généralement la réputation – en partie usurpée – d'être «-la ville la plus sismique de France-». Depuis plus d'une décennie, plusieurs études pilotes ont donc été conduites afin d'élaborer progressivement un «-scénario sismique-» concernant cette agglomération. La dernière en date – le projet «-Gemgep-» – lancée à l'initiative du Conseil général des Ponts et Chaussées,

notamment de son instance spécifique dédiée à la prévention du risque sismique en France – le GEPP – avec les concours financiers de l'administration centrale (ministères de l'Équipement et de l'Écologie) et de la municipalité niçoise, s'est inscrite dans la lignée de projets antérieurs (la première étude de microzonage sismique effectuée à Nice remontant au début des années 1980...), dont le projet Gemitis, et parallèlement à un projet européen (RISK-UE) destiné à l'élaboration d'une méthodologie de scénario sismique adaptée au contexte euro-méditerranéen. Nous reprendrons dans cet article, les principaux éléments de la synthèse des travaux du Gemgep, présentés en avril 2005, à Nice [2].

Par nature, une étude de scénariosismique est un exercice éminemment pluridisciplinaire. Elle commence par identifier, analyser et quantifier les « aléas » ; terme consacré désignant la « menace », c'est-à-dire, dans le cas qui nous occupe, les effets susceptibles d'être générés par un séisme éventuel, et qui affecteraient les divers types d'ouvrages. Ensuite, cette étude procède au recensement des différents « enjeux », c'est-à-dire des installations humaines dont les occupants et la fonction peuvent être affectés par l'occurrence d'un séisme, et elle en évalue la « vulnérabilité ». Enfin, elle croise l'aléa et la vulnérabilité ainsi déterminés pour évaluer le risque, c'est-à-dire les dommages potentiels. Chacune de ces étapes est entachée d'incertitudes très importantes : il faut par conséquent bien garder présent à l'esprit que les résultats finaux doivent être analysés avec un certain recul, avant la prise de toute décision constitutive d'un éventuel plan d'action.

## Aléa sismique

Ainsi, la première étape consiste à estimer les « agressions » sismiques que vont subir les bâtiments et l'ensemble de l'environnement

naturel. Ces agressions peuvent être caractérisées en termes, soit plutôt qualitatifs et descriptifs (intensité macro-sismique, matérialisée par une échelle de dommages), soit plus quantitatifs et plus riches en informations (amplitude et contenu fréquentiel des mouvements vibratoires). Ces mouvements dépendent de la taille du séisme, de son éloignement et de la nature des terrains de couverture. Quelle que soit la façon dont on les caractérise, il faut d'abord choisir des événements de scénario, puis évaluer les mouvements produits sur le territoire concerné, en fonction tant de la distance par rapport à l'épicentre que de la nature du sous-sol.

De plus, cette agression sismique peut aussi avoir des conséquences sur certains milieux naturels, en provoquant des glissements de terrain ou une liquéfaction des sols causant, à leur tour, des dégâts aux implantations humaines – dommages dont l'éventualité et, le cas échéant, l'analyse doivent être dûment envisagées dans toute étude d'aléa.

## Séismes de scénario

La sismicité de la région niçoise s'inscrit dans le cadre géodynamique général du rapprochement des plaques tectoniques eurasienne et africaine,

et du mouvement de poinçonnement avec rotation antihoraire de l'Italie, dont témoigne l'ensemble de l'Arc alpin. Les vitesses de déformation restent très faibles (de l'ordre du millimètre par an), en comparaison avec des valeurs d'environ 2-cm/an en Algérie ou en Grèce, voire même dépassant 10-cm/an dans les zones sismiques les plus actives du globe (dont, notamment le pourtour Pacifique) : ceci explique un taux de sismicité somme toute très modéré, avec des périodes de retour longues, en ce qui concerne les événements forts et destructeurs.

Dans le cas de Nice, plusieurs zones ont été identifiées comme susceptibles de générer des séismes notables (magnitude > 5) et donc, potentiellement destructeurs. Ces zones se situent à terre (vallée du Var à l'ouest, basse vallée de la Vésubie au nord, accident de Saorge Taggia au Nord-Est), ou encore au large, en Mer Ligure.

Après enquête auprès de différents spécialistes (géologues et sismologues), seuls, deux séismes ont finalement été retenus pour ces études de scénario (figure-2) :

✓ -le premier correspond à l'activité sismique du « golfe de Gênes » (marge ligure) ; il a été déterminé en translatant le séisme de 1887, situé au large de Savone/Imperia, sur

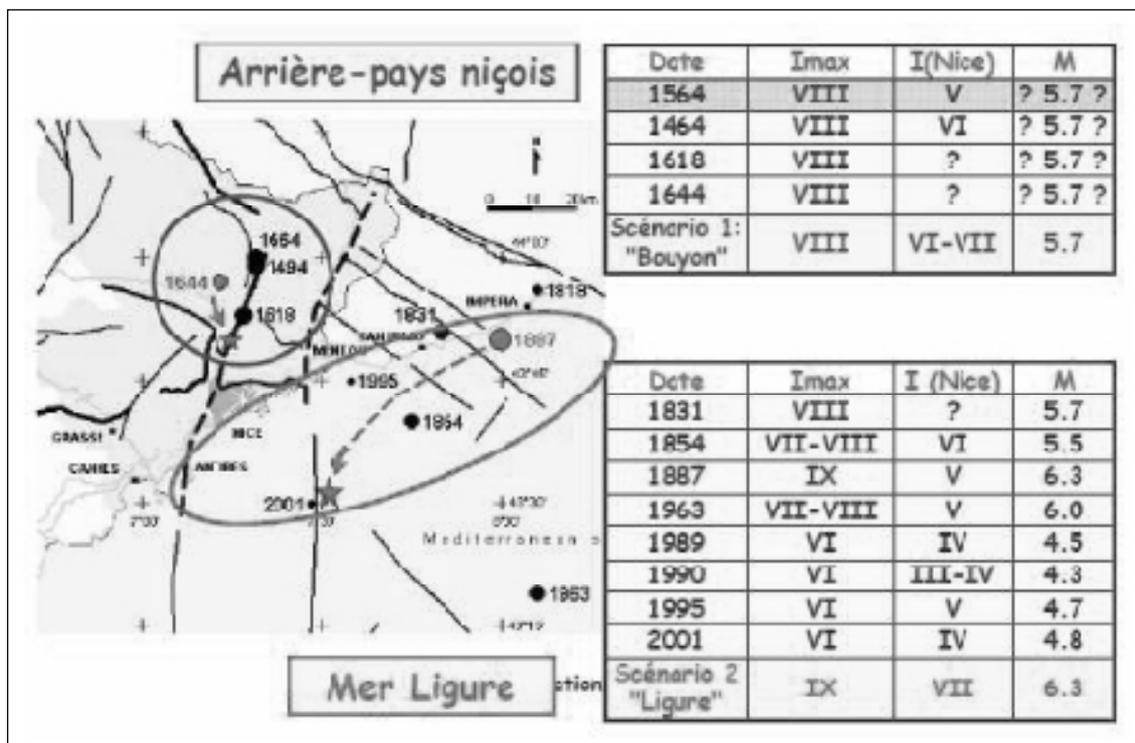


Figure 2 : Carte des zones sismiques.

des failles similaires situées à 30-km au Sud/Sud-Est de Nice, où s'est d'ailleurs produit en février 2001 un séisme de magnitude 4.7, très bien ressenti (et enregistré) à Nice ;

✓-le second correspond à l'activité sismique en décrochement de la basse vallée de la Vésubie-; comme dans le cas précédent, le séisme de 1644, d'une magnitude estimée de 5.7, a été déplacé au point de cette zone le plus proche de Nice, correspondant au village de Bouyon (distance entre l'épicentre et le centre de Nice : 17-km).

Comparés aux séismes historiques ayant affecté Nice (tableaux de la figure-2), ces hypothèses de travail, plausibles du point de vue tec-

tonique, plaident plutôt pour l'hypothèse de la sécurité. A titre de comparaison, une magnitude de 6.3 correspond au dernier séisme, survenu le 21 novembre 2004, au large des Saintes, en Guadeloupe.

### Mouvements au rocher

L'étape suivante consiste à évaluer les mouvements produits par ces séismes de scénario sur le territoire municipal. Ces mouvements, en dehors de tout «-effet de site-», ne dépendent que de la taille du séisme (sa magnitude) et de l'éloignement de son épicentre (le séisme étant un phénomène d'ondes émises et se

propageant, en profondeur, au sein de la croûte terrestre). De nombreuses méthodes, allant du très simple au très sophistiqué, peuvent être envisagées. Celles retenues pour l'étude effectuée à Nice restent très classiques. Il s'agit de l'utilisation de «-relations d'atténuation-». Ce sont des relations mathématiques, établies empiriquement, à partir d'observations ou d'enregistrements faits lors de séismes passés, survenus en d'autres lieux, et traduisant la relation existant entre la magnitude, la distance à l'épicentre du séisme, d'une part, et d'autre part, les mouvements du sol, représentés par le descripteur classiquement utilisé en génie

parasismique pour caractériser simplement et directement les mouvements d'un bâtiment, à savoir: le «-spectre de réponse-». Cette méthode présente l'avantage d'offrir des comparaisons directes avec les niveaux de dimensionnement spécifiés dans la réglementation nationale, dont l'apparente simplicité ne doit cependant pas cacher les fortes incertitudes et variabilités associées à leur utilisation (suivant que l'on est contrôleur ou exploitant, on peut facilement arriver à des différences d'estimation variant d'un facteur 2 à 3 !).

Dans le cas de Nice, l'ordre de grandeur des estimations résultant de cette approche est de 0.1-g (g étant l'accélération de la pesanteur) en matière d'accélération maximale horizontale au sol, et de 0.25-g pour ce qui concerne les accélérations maximales attendues dans les niveaux supérieurs des immeubles de plusieurs étages.

Ces valeurs moyennes restent très sensiblement au-dessous des niveaux réglementaires actuels (0.25-g et 0.625-g, respectivement)-; elles ne sont que légèrement inférieures aux estimations probabilistes obtenues à l'occasion des travaux visant à réviser le zonage sismique de la France [3]. Pour fixer les idées par une image concrète, ces valeurs moyennes (0.1-g au rocher) sont compa-

rables à ce qui a été enregistré à Basse-Terre, en Guadeloupe, lors du séisme «-des Saintes-», le 21-novembre 2004.

### Aléa local

#### ✓-Effets de site

Les mouvements sismiques peuvent être très sensiblement modifiés par les conditions géologiques locales, proches de la surface. Ces effets, appelés «-effets de site directs-», sont des effets de propagation d'ondes, qui aboutissent à des amplifications pouvant atteindre des facteurs très élevés (supérieurs à 10, dans certains cas extrêmes). Ils sont liés au piégeage des ondes sismiques dans les formations superficielles, moins rigides, et aux phénomènes de résonance qui en découlent dans certaines bandes de fréquence. Ils ont été reconnus responsables de la très forte variabilité spatiale des dommages, ainsi que de l'impact très différencié suivant les hauteurs d'immeuble, dans les cas de très nombreux séismes (Tokyo 1923, Caracas 1967, Mexico 1985, San Francisco 1989, Kobe 1995...).

Ils affectent principalement, d'une part, les reliefs marqués et, d'autre part, les remplissages sédimentaires. Or il s'agit malheureusement là de configurations que l'on retrouve toutes deux dans la ville de Nice:

collines du Château, du Mont Boron, de Cimiez, de Fabron/la Lanterne/les Moulins-; vallées du Paillon et du Var (voire, également, vallée du Mignan), zone côtière.

Par ailleurs, deux autres types d'effets, dits «-induits-», sont liés à la couverture superficielle: la liquéfaction, qui affecte les sols sableux saturés d'eau sous l'effet des vibrations liées au séisme, et qui peut entraîner l'enfoncement partiel (voire le basculement) des éléments construits dans ces zones-(par perte de capacité portante du sol)-; des éboulements, ou des glissements de terrain, déclenchés par le séisme sur les versants instables.

#### ✓-Géologie de surface et modèle géotechnique

L'estimation et la localisation des effets de site, de quelque nature qu'ils soient (directe ou induite), passent par une connaissance détaillée du sous-sol (géologie, géométrie, caractéristiques géotechniques). Pour le cas de Nice, un modèle géotechnique de synthèse a été élaboré à partir de différentes sources d'information: modèle numérique de terrain (par pas de 2 m), carte géologique de surface numérisée (au 1/5000<sup>e</sup>), compilation des sondages existants et disponibles (quelques centaines), mesures géophysiques, notamment du «-bruit de fond sismique-»

(vibrations ambiantes). Cette méthode de mesure donne, sous certaines conditions, la valeur de la fréquence de résonance fondamentale, c'est-à-dire la fréquence en deçà de laquelle il ne se produit pas d'amplification par effet de site.

Toutes ces informations ont permis d'identifier, hors substratum rocheux, différentes formations alluviales et d'en cartographier la position et l'épaisseur, sur tout le territoire de la commune de Nice. Hormis une couche de remblais anthropiques, ces formations, d'origine essentiellement fluviale, se différencient par leur granulométrie (argiles, limons, sables fins, sables grossiers, graviers) et leur âge. Leur épaisseur maximale dépasse la centaine de mètres dans la vallée du Var, et la cinquantaine de mètres dans les deux vallées du Paillon (la vallée actuelle à l'Est, et l'ancienne à l'Ouest de la ville). La couche de sable fin mérite une attention toute particulière, en raison de sa forte susceptibilité d'entrer en liquéfaction. L'utilité de cette synthèse et de ce modèle vont bien au-delà des seuls problèmes sismiques-: tous les travaux et études nécessitant une information géotechnique peuvent en bénéficier. Il est donc dans l'intérêt de tous de la maintenir à jour.

✓-Effets d'amplification

Diverses observations, obtenues grâce à l'installation temporaire de stations sismologiques en différents points de la ville de Nice, relayées par les stations permanentes du RAP (Réseau accélérométrique permanent : il s'agit d'un réseau d'observation sismique français, dont cinq stations ont été installées à Nice), ont mis en évidence de très fortes amplifications, liées au remplissage sédimentaire des vallées centrales. L'exemple du séisme du 25-février 2001 est éloquent : les différences d'amplitude entre sites alluviaux et rocheux dépassent un facteur 10, au centre des vallées (stations Alsace-Lorraine), sur une plage de fréquences assez large au-delà de la fréquence fondamentale, et ces différences sont associées aussi à une prolongation significative de la durée des mouvements. Ce niveau très élevé (bien supérieur à ce qui est pris en compte forfaitairement dans la réglementation nationale) est lié à la géométrie «-de vallée-», qui favorise un piégeage «-optimal-» des ondes sismiques dans les formations superficielles.

Des enregistrements de bruit de fond sismique, effectués en près de 700-points, ont ensuite permis d'étendre ces informations ponctuelles, au moyen d'un traitement particulier consistant à cartographier la fréquence de résonance sur

l'étendue de la quasi totalité du territoire communal, et autorisant ainsi un calibrage des modèles de calcul. Ces mesures de bruit de fond s'avèrent constituer un outil très économique, dont l'utilisation doit cependant demeurer bien encadrée, afin d'éviter des abus ou des erreurs d'interprétation (selon les recommandations d'un projet européen qui vient tout juste de se terminer-: Sesame, <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>).

On a également eu recours à une approche numérique pour comprendre ces forts niveaux d'amplification et essayer de les cartographier quantitativement. Malgré l'abondance des informations géotechniques, cette approche est cependant limitée par la nécessité de formuler des hypothèses complémentaires concernant les paramètres de propagation des ondes sismiques (paramètres dont la mesure reste aujourd'hui encore exceptionnelle-: il s'agit de la vitesse et de l'amortissement, ainsi que de la sensibilité de ces ondes au degré de déformation résultant du séisme lui-même. Les valeurs qui ont été retenues se sont révélées cohérentes avec les (trop) rares mesures disponibles, dont l'une avait d'ailleurs été obtenue grâce à une méthode innovante fondée, elle aussi, sur la mesure du bruit de fond sismique. Divers

calculs ont été effectués, plus ou moins sophistiqués, car prenant (ou non) en compte les réverbérations latérales des ondes, dans les remplissages (sédimentaires) superficiels.

Les résultats concordent, indiquant-:

✓-une réponse plus riche en hautes fréquences ( $f > 2$  Hz) sur les bords de vallée, et en fréquences intermédiaires (de 1 à 2-Hz) dans les parties centrales-;

✓-une différenciation bien plus marquée que ce qui est proposé dans les normes parasismiques actuelles (PS92) ou à venir (EC8)-;

✓-l'importance des «-effets de vallée-» liés aux réverbérations latérales induites par l'extension limitée, vers l'est et vers l'ouest, des vallées centrales et de leur remplissage alluvial.

Bien qu'il reste encore des résultats à confirmer ou à amé-

liorer, au terme de toutes ces études menées grâce à différentes approches, une certitude se dégage-: la configuration géologique superficielle peut conduire, à Nice, à de très importantes modifications et à une forte variabilité spatiale du signal sismique.

#### ✓-Aléa liquéfaction

La liquéfaction est un phénomène particulier, qui se manifeste essentiellement dans les sols sableux saturés en eau (c'est-à-dire-: situés sous la nappe phréatique). Violentement secoués, ceux-ci se compactent-: la pression de l'eau interstitielle augmente, cette eau s'infiltré entre les grains de sable, le sol perd sa résistance au cisaillement et se met à se comporter comme un liquide. Les sols se tassent, les fondations perdent leur capacité portante-: s'ensuivent des

dommages majeurs pour les constructions.

Dans le cas de Nice, la présence d'un horizon de sable fin (parfois sur une assez grande épaisseur) et la position très haute de la nappe phréatique ont rendu nécessaire l'analyse de cet aléa. Les études, menées avec les outils classiques de la géotechnique sismique, ont permis de cartographier le niveau de cet aléa sur le territoire communal : si les zones les plus dangereuses se situent dans la partie sud de la vallée centrale et aux environs de l'aéroport, le risque d'une liquéfaction généralisée n'apparaît cependant pas comme majeur, pour les séismes de scénario envisagés.

#### ✓-Aléa mouvements de terrain

Les instabilités de versant sont un phénomène malheureusement bien connu à Nice, sous

Variation d'intensité maximale site / rocher	Taux moyen de dommages sur toute la ville de Nice		Variabilité maximale sur le territoire municipal	
	Aucun croisement fréquentiel	Croisement fréquences site / bâtiments	Aucun croisement fréquentiel	Croisement fréquences site / bâtiments
<b>Séisme «-de Bouyon-» I = VI-VII</b>				
$\square_{I_{max}} = 0$	8 %	9 %	2 % à 25 %	2 % à 25 %
$\square_{I_{max}} = 2$	14 %	12 %	3 % à 51 %	4 % à 39 %
<b>Séisme «-ligure-» I = VII</b>				
$\square_{I_{max}} = 0$	12 %	14 %	3 % à 33 %	3 % à 34 %
$\square_{I_{max}} = 2$	20 %	17 %	5 % à 62 %	6 % à 49 %

Tableau : Sensibilité des dommages aux effets de site et à leur mode de prise en compte.

différentes manifestations (chutes de pierre, éboulements, glissements, effondrements, coulées...). Si elles se manifestent déjà en l'absence de tout séisme, on déduit aisément que les vibrations associées aux séismes risquent d'en accélérer le déclenchement et/ou d'en modifier l'extension: il peut en résulter des risques directs pour les vies humaines, ainsi que des dommages, pour les bâtiments et différents types d'infrastructures (réseaux, voirie), susceptibles d'être essentielles pour l'acheminement des secours. Une méthodologie spécifique, prenant en compte ce facteur aggravant que constituent les vibrations sismiques, a donc été appliquée aux cartes de l'aléa « mouvements de terrain », déjà établies en régime statique. Les produits finaux de ce volet de l'étude sont des cartes de mouvements de terrain, à l'échelle du 1/5000<sup>e</sup>, couvrant la totalité de la commune et, de plus, en dynamique.

### Remarques conclusives sur l'aléa local

Bien que l'étude ait essayé d'être aussi large que possible, certains aspects n'ont pas pu être abordés pour des raisons scientifiques, techniques et/ou économiques. L'aléa tsunami par exemple, qui peut être lié soit à un très gros séisme en

Méditerranée occidentale – possible mais d'une très faible probabilité –, soit à un glissement de terrain de grande ampleur dans des sédiments jeunes accumulés sur le talus continental (phénomène analogue à ce qui s'est produit en 1979), pouvant lui-même être déclenché par un séisme local, même relativement modéré: une analyse détaillée aurait nécessité des reconnaissances en mer, irréalisables en raison de contraintes budgétaires.

Le principal résultat n'en demeure pas moins la mise en évidence d'un fort conditionnement des dommages par les conditions locales, ce qui souligne l'intérêt que présenterait l'établissement d'un plan de prévention du risque sismique (PPRs), dans le cas l'agglomération niçoise.

## Enjeux et Vulnérabilité

### Philosophie générale de l'approche

Compte tenu des images associées au mot séisme, à la suite de catastrophes récentes dans différentes parties du globe (Inde, Iran, Indonésie, Turquie, Cachemire...), une prise de conscience «-raisonnée-» ne

peut faire l'impasse sur l'estimation de l'impact humain (nombre de victimes). Ce bilan humain dépend en tout premier lieu des dommages portés aux constructions constituant les lieux de vie usuels, à savoir: les logements, les bureaux, les établissements d'éducation, les commerces, etc. Certains ont une plus grande importance que d'autres, soit en raison des enjeux humains (plus grande concentration de personnes, comme par exemple les établissements recevant du public --ERP--, en particulier: les établissements d'enseignement), soit en raison de leur fonction, dont le maintien est absolument vital en cas de crise (centres de secours, hôpitaux). Cette différenciation est d'ailleurs présente dans la réglementation parasismique actuelle, par le biais de la « classe d'importance » des bâtiments, libellée B, C ou D (5). La méthodologie à suivre consistera d'abord à identifier les enjeux exposés (bâti, réseaux divers: transports, gaz, électricité, eau, téléphone...), et à évaluer ensuite leur vulnérabilité au séisme, pour enfin recouper cette information avec les «-agressions-» afin de pouvoir mieux apprécier les dommages.

La première étape, essentielle, consistera donc à dresser un inventaire du bâti (avec ses diverses catégories), d'une

manière qui autorise ensuite une évaluation – fût-elle sommaire – de leur vulnérabilité. Compte tenu du nombre total de bâtiments sur la commune (entre 40 000 et 60 000), et de l'absence actuelle (pour ce qui concerne la France) d'inventaire technique systématique du bâti existant, il était impossible de les analyser, chacun, dans le détail. L'un des défis était donc de développer, puis d'appliquer des techniques d'évaluation optimisant le rapport (fiabilité de l'estimation) / (volume et coût de la collecte d'informations), en essayant également d'affiner l'estimation en fonction de l'enjeu. La traçabilité des données, des méthodes et des résultats devait être assurée, de façon à ce que ces résultats puissent être à la fois compris et évalués de façon indépendante, et mis à jour et réutilisés en fonction de l'évolution des connaissances et des besoins. Comme d'autres pays plus sismiques que la France ont déjà acquis une grande expérience en la matière, les travaux se sont inspirés au maximum des méthodologies, en particulier italiennes, d'autant que la typologie d'une partie importante du bâti niçois est très proche de celle du bâti de son proche voisin. Au-delà de la vulnérabilité physique du bâti, l'impact réel d'un séisme destructeur dépend aussi beaucoup des

fonctionnalités de la ville et de leur propre vulnérabilité au séisme. Une analyse du système urbain niçois a été menée dans le cadre d'autres études (Gemitis et RISK-UE), qui a permis de mettre en évidence [1] plusieurs spécificités remarquables:

- ✓ l'importance de la fonction accueil et tourisme (200 hôtels, 10 000 chambres) et, par voie de conséquence,
- ✓ celle, également des infrastructures d'accès et de transport-;
- ✓ la structuration très forte, due au contexte géographique (urbanisation différenciée entre collines et plaines-;
- ✓ l'existence de voies d'accès prioritaires ;
- ✓ enfin, l'absence d'industries dangereuses.

### **Importance des établissements liés à la fonction «-santé-»**

Le premier élément –l'importance du tourisme– devrait amener à se pencher plus particulièrement sur la vulnérabilité des équipements afférents (hôtels, centres de congrès, musées et monuments-; infrastructures de transport-: aéroport, réseaux routier et autoroutier, réseau ferré, port-;

infrastructures de télécommunications...). Le second –l'urbanisation différenciée entre collines et plaines– aggrave plutôt la vulnérabilité globale, des contraintes d'implantation ayant amené à concentrer de nombreux équipements dans le «-corridor littoral-». Les deux derniers constituent au contraire des atouts de la ville de Nice vis-à-vis du risque sismique. Notons toutefois que le personnel de santé, même s'il est très nombreux à Nice, n'est pas nécessairement assez formé à la médecine d'urgence.

Une étude complète devrait également comprendre une analyse de la vulnérabilité des principaux réseaux-: transports urbains, télécommunications, eau potable, assainissement, gaz, électricité. Dans la pratique, un certain nombre de difficultés techniques, juridiques et économiques sont apparues au cours de l'étude, limitant considérablement la mise à disposition des informations pertinentes. Sauf pour ce qui concerne le réseau routier, il n'a pas été possible de les surmonter. Mais cette étude aura au moins eu le mérite de les mettre en lumière et d'initier des réflexions afin que ces obstacles puissent être surmontés.

### **Le bâti «-courant-» (classe B)**

### ✓-Inventaire typologique du parc immobilier niçois et détermination de secteurs homogènes

Une analyse préliminaire du bâti niçois, faite en étroite concertation avec des architectes locaux, a permis de mettre en évidence quatre grandes périodes de construction, avec des transitions en 1880, 1940 et 1969. Cette première classification typologique, par âge des bâtiments, croisée avec d'autres critères relevant de l'urbanisme, de la fonction (résidentielle, commerciale, centre historique...), a permis dans un premier temps de délimiter différents « secteurs homogènes », au nombre total de vingt-sept. A l'intérieur de chaque secteur, les bâtiments ne sont pas forcément d'un seul type, mais la répartition entre les différents types y est particulière, et géographiquement assez homogène.

### ✓-Analyse de la vulnérabilité du bâti de classe B

L'étape suivante a consisté à soumettre le bâti de chacun de ces secteurs à une grille d'analyse de vulnérabilité, pré-établie et reconnue au niveau européen (projet RISK-UE, [1]). Pour être statistiquement représentatif, cet échantillonnage a été établi sur la base de reconnaissances visuelles, effectuées tout au long d'itinéraires arbitraires, dans chacun des secteurs. Au total, ce sont

plus de 3-300-bâtiments (soit près de 10-% de l'ensemble du parc) qui ont ainsi été examinés par des architectes locaux expérimentés.

Sur cette base, on a pu évaluer un «-indice de vulnérabilité-» moyen de l'ensemble de chaque secteur, en supposant représentatif l'échantillonnage repéré au cours d'un itinéraire. Cet indice est évalué sur une échelle allant de 0 (très peu vulnérable) à 1 (extrêmement vulnérable), et il est un outil commode pour comparer les performances sismiques de bâtiments fondamentalement très différents.

Il en ressort que le bâti niçois a une vulnérabilité moyenne globale de l'ordre de 0.6-: en d'autres termes, pour un séisme d'intensité moyenne avoisinant VII, les dommages moyens seraient de l'ordre de 10-% (cette notion de «-dommages moyens-» peut être assimilée, en première approximation (très simplifiée), au rapport entre le coût total des réparations à faire et la valeur de l'ensemble du parc immobilier).

Cependant, ces vulnérabilités, et donc les taux de dommages associés, sont très différentes d'un secteur à l'autre, en raison des différences de typologies. Il se trouve, malencontreusement, que la plupart des secteurs les plus fondamentalement vulnérables sont aussi ceux où l'aléa est le plus

élevé, en raison de phénomènes locaux d'amplification de l'onde sismique...

### ✓-Mise en correspondance avec l'aléa local : fréquences propres du bâti

Comme indiqué plus haut, les caractéristiques des mouvements sismiques varient fortement, en fonction des caractéristiques du sous-sol. Une des caractérisations les plus simples et immédiates de cette variabilité peut s'opérer par le contenu fréquentiel, et notamment la fréquence de résonance fondamentale du sol  $f_s$  : au-dessous de  $f_s$ , les mouvements ne sont pas modifiés-; autour de  $f_s$ , ils sont fortement amplifiés-; enfin, au-delà de  $f_s$ , ils peuvent encore l'être de façon significative. Les immeubles ayant eux-mêmes un comportement essentiellement résonnant, avec une fréquence fondamentale et des harmoniques, la détermination des fréquences propres des immeubles ( $f_b$ ) paraît un bon moyen d'estimer leur sensibilité aux variations locales de l'aléa. A résistance intrinsèque égale (c'est-à-dire, à indice de vulnérabilité équivalent), la situation la plus défavorable est celle où les fréquences du sol et de l'immeuble coïncident-; la plus favorable étant celle où  $f_b < f_s$ .

Ces fréquences  $f_b$  peuvent être mesurées simplement à partir

de l'enregistrement des vibrations ambiantes. Une campagne de mesure sur un échantillon de bâtiments «représentatif» a permis de caler la dépendance entre la fréquence de résonance du bâtiment et sa hauteur, pour différents types de structures. Il en ressort que les fréquences des bâtiments en maçonnerie (situés, pour la plupart en centre ville, sur les alluvions du Paillon) varient entre 2-Hz et 5-Hz, c'est-à-dire qu'elles correspondent malheureusement exactement aux fréquences amplifiées par le sol, ce qui aggrave le risque, tandis que celles des bâtiments en béton armé varient dans une gamme plus large, en corrélation directe avec leur hauteur ( $f_b = 25/N$ , où N est le nombre d'étages). Il convient d'ajouter à cela le fait que, suivant l'épaisseur plus ou moins importante des alluvions sous-jacentes, ces immeubles seront plus ou moins vulnérables.

### Bâti de classes C et D

Cette catégorie de bâtiments mérite un examen plus attentif, d'abord afin de bien inventorier et identifier les enjeux associés, sensiblement plus importants, et d'estimer leur vulnérabilité, non plus statistique mais individuelle et, enfin, en vue de favoriser une prise de conscience spécifi-

que du risque qu'ils présentent, chez ceux qui en ont la gestion.

#### ✓-La procédure suivie

Devant l'absence —étonnante, mais réelle— de recensements systématiques de ces bâtiments «importants», s'impose la tâche —primordiale— de constituer un inventaire aussi exhaustif que possible et de le faire valider par les administrations concernées. La tâche suivante consistera à en estimer la vulnérabilité. Compte tenu du nombre total de bâtiments ainsi identifiés (plus d'un millier), et de l'impossibilité de les analyser tous en détail, une procédure d'analyse «gigogne» a été élaborée sur la base de fiches permettant une analyse à différents niveaux de détail, tous compatibles entre eux. Le premier niveau —le plus rudimentaire— est renseigné par les gestionnaires de parc eux-mêmes, chargés de remplir un questionnaire simple (d'ordre qualitatif et géométrique, il porte sur les matériaux de construction utilisés, l'âge du bâtiment, la nature du terrain d'implantation, sa hauteur et ses régularités géométrique), assorti d'un guide informatif. Les niveaux suivants font appel à des fiches un peu plus détaillées, qui doivent être remplies soit (après inspection visuelle extérieure) par un technicien dûment formé, soit

(après inspection extérieure et intérieure) par un ingénieur spécialisé dans les structures du bâtiment.

L'élaboration et l'étalonnage de ces fiches, effectués en liaison étroite avec l'AFPS (6), se sont appuyés sur l'expérience italienne, patiemment rassemblée sous l'égide du GNDT italien (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*).

#### ✓-Principaux résultats pour le parc «-C-D-» niçois

Le recensement effectué par le Cete Méditerranée a conduit à établir une liste de 1 168 établissements de statut public, et de 189 établissements privés (ERP), pouvant comprendre, chacun, un ou plusieurs bâtiments. L'enquête «technique», menée par courrier et Internet auprès des gestionnaires de ces parcs, a dès lors permis de renseigner les fiches «élémentaires» (premier niveau) pour un sous-ensemble de 540 bâtiments publics, dont le dépouillement a conduit à l'estimation d'un «Indice de vulnérabilité» moyen de premier niveau,  $IV_{1,0}$ , et à un intervalle de confiance. L'analyse des informations ainsi recueillies fait apparaître plusieurs points remarquables:-

✓-dans leur grande majorité, ces bâtiments sont situés sur des zones où l'aléa est relativement plus élevé, en raison de la couverture alluviale;-

✓-les établissements d'enseignement (écoles primaires, collèges, lycées et universités) constituent une très importante proportion des bâtiments publics (238/540). Cette proportion, conforme à la proportionnalité italienne, indique qu'une politique de prévention/renforcement parasismique passe certainement par une action d'envergure sur les établissements d'enseignement (qui présente aussi l'avantage d'être susceptible de sensibiliser une large proportion de la population, *via* les parents et les professeurs)-;

✓-bien qu'il y ait à la fois une grande incertitude et une grande variabilité, il est quand même possible d'identifier certaines catégories de bâtiments plus vulnérables, en moyenne, que d'autres. Il s'agit, en particulier, des églises et des chapelles, mais aussi de la plupart des musées, des «-établissements de sécurité-» (casernes) et des logements associés, ainsi que des établissements de santé. A l'inverse, les installations sportives, les centraux téléphoniques et la plupart des établissements scolaires et des bâtiments administratifs sont, en moyenne, moins vulnérables.

## Le risque

La combinaison des résultats en termes d'aléa et de vulnérabilité donne accès au risque, ce qui se traduit, pour les séismes de scénario, par des estimations des dommages et de leur distribution spatiale. Ces estimations, rappelons-le, sont entachées d'énormes incertitudes, et leur intérêt essentiel réside dans leur ordre de grandeur, ainsi que dans leur variabilité spatiale.

Cet exercice d'évaluation du dommage moyen a été mené essentiellement pour le bâti B et à deux échelles, celle de la ville dans son ensemble, et celle des 27 secteurs homogènes. A cette dernière échelle, il devient possible de prendre en compte les variabilités spatiales de l'aléa (effets de site) et de la vulnérabilité, ainsi que l'information croisée sur le positionnement relatif des fréquences du bâti et du sol.

### Bâti B, échelle globale

Lorsqu'on moyenne la vulnérabilité de l'ensemble du bâti de la ville (en pondérant les indices de chaque secteur par le nombre de bâtiments, soit par la population), on obtient, pour le bâti B, un indice de vulnérabilité moyen d'un ordre de 0.6.

Si on ne prend pas en compte les effets de site dans les zones

alluviales, on aboutit alors aux estimations suivantes:

✓-pour un événement d'intensité moyenne VI-VII, comme le séisme «-de Bouyon-», le taux de dommage moyen, sur l'ensemble de la ville de Nice, serait de 7 à 8-%-;

✓-pour un événement d'une intensité moyenne de VII, comme le séisme «-ligure-», le taux de dommage moyen sur la ville tournerait autour de 10 à 11-%.

### Bâti B, échelle du secteur

A cette échelle, si l'on ne prend en compte, dans un premier temps, que les variations spatiales de vulnérabilité, on voit apparaître une forte différenciation des taux de dommages d'un secteur à l'autre-: de 2-% à 25-% pour le séisme «-de Bouyon-», de 3-% à 33-% pour le séisme ligure. La prise en compte supplémentaire des effets de site conduit à des évolutions beaucoup plus significatives tant en termes de dommages moyens qu'en termes de variabilité spatiale. Plusieurs éléments essentiels se dégagent-de l'étude du séisme ligure :

✓-la prise en compte des effets de site augmente systématiquement les dommages moyens-: cela résulte de la localisation des bâtiments les plus vulnérables (en gros, les

plus anciens), dans les vallées centrale et du Paillon, sujettes aux phénomènes d'amplification-;

✓-la variabilité, de secteur à secteur, augmente considérablement avec le niveau des effets de site. Certains secteurs apparaissent comme systématiquement plus exposés (Vieille-Ville, Mairie, Centre, Port-Riquier et Gare-du-Sud). D'autres, au contraire, apparaissent plus sûrs, en raison d'un aléa moins élevé (Mont-Boron, Observatoire, Collines, Fabron-la-Lanterne...) ou d'un bâti plus récent et de moindre vulnérabilité (Paillon, par exemple). Dans le détail, la prise en compte (ou non) de l'information fréquentielle amène cependant à des images de distributions de dommages légèrement différentes, suivant la coïncidence (ou non) entre les fréquences du bâti et celles du sol-;

✓-la prise en compte de l'information fréquentielle conduit également à des estimations de dégâts plus réalistes (moins élevées).

### Bâti C-D

Pour le bâti C-D, hors prise en compte des effets de site, les dommages estimés pour une intensité VII (correspondant au séisme ligure) restent limités (de l'ordre de 15 à 20%, dans

l'ensemble), comme l'indique la figure-3. On retrouve évidemment des variations significatives d'une catégorie d'établissement à l'autre (les plus touchées étant les églises et chapelles anciennes), mais on peut cependant noter qu'au sein de chaque catégorie, il existe certains bâtiments très différents de la moyenne, et assez vulnérables pour mériter un examen plus approfondi: une quarantaine d'entre eux, en effet, risqueraient d'être endommagés à plus de 30%. La retranscription de ces «-taux de dommages-» en nombre de victimes (nombre de morts, nombre de blessés à différents degrés de gravité) et en coût économique est très délicate et imprécise. Outre une méconnaissance des «-taux de victimisation-» en fonction du

niveau de dommages, les premiers dépendent de nombreux facteurs, aléatoires, comme l'heure ou la saison à laquelle surviendrait le séisme, tandis que le second dépend de l'estimation financière du patrimoine immobilier niçois, des coûts de réparation associés à ces «-taux de dommage moyen-», et des pertes indirectes. Nous rappellerons simplement les estimations effectuées dans l'étude RISK-UE [1] pour le séisme «-ligure-», qui donnent les ordres de grandeur «-raisonnables-» en l'état actuel des connaissances : de quelques dizaines à quelques centaines de morts-; un nombre légèrement supérieur de blessés nécessitant hospitalisation et de 1 à 7 milliards d'euros de pertes économiques directes.

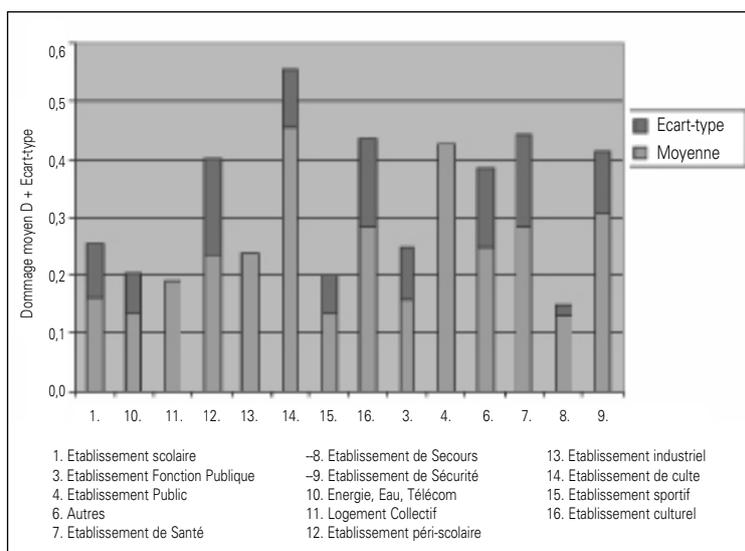


Figure 3 : Figures des taux de dommages moyens pour le bâti C-D, pour le séisme «-ligure-» (I = VII), (la localisation du bâtiment, le type de sol, les effets de site, et l'information fréquentielle ne sont pas pris en compte).

## Quelques remarques finales

L'ensemble de ces résultats concernant l'aléa local, ainsi que la vulnérabilité locale, joints à l'importance des enjeux humains et économiques sur l'agglomération niçoise, militent en faveur de la réalisation d'un Plan de prévention des risques (PPR) sismique: cet instrument, qui sur le plan purement technique permet de substituer à la réglementation nationale, forcément forfaitaire, une réglementation locale plus spécifique et donc mieux adaptée aux conditions locales, permettrait aussi l'appropriation par l'ensemble de la population et des acteurs de la construction de résultats déjà très riches mais dont l'énoncé reste pour le moment techniquement complexe. L'intégration de toutes les informations sous SIG ouvre aussi la voie à des scénarios « interactifs » permettant à la fois d'évaluer la robustesse des résultats et de préparer les services concernés (équipes de secours, inspections et services de diagnostics d'urgence...) à différents scénarios de crise.

Cette étude peut également servir de pilote à des études similaires, à réaliser dans d'autres villes sismiques, en France ( Lourdes, Grenoble, Mulhouse...) ou à l'étranger: on peut en effet assurer, avec

quasiment 99,99-% de chances de succès, que les prochaines décennies connaîtront un certain nombre de catastrophes sismiques urbaines, dont plusieurs dans le bassin méditerranéen (Alger, Beyrouth, Catane, Istanbul, Le Caire, Lisbonne, Naples ...).

Mais, par-delà ces résultats techniques —préalables indispensables mais non suffisants—, l'acquis le plus déterminant est certainement l'établissement d'échanges constructifs et durables entre les différents partenaires de la prévention. Ces échanges ont permis d'élaborer un programme d'action qui a permis d'avancer efficacement dans une prévention active dont la mise en œuvre devrait être facilitée par la montée en puissance du Programme national de prévention du risque sismique annoncé par le ministère de l'Ecologie et du Développement durable.

## Notes

(1)-LGIT (Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique), Observatoire de Grenoble – Maison des géosciences – BP-53X – 38041 Grenoble Cedex-9.

(2)-LCPC (Laboratoire central des Ponts-et-Chaussées), 58 boulevard Lefebvre – 75732 Paris Cedex-15.

(3)-LRPC Nice (Laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées) – Cete Méditerranée – 56 bd Stalingrad – 06300 Nice.

(4)-Conseil général des Ponts-et-Chaussées – Tour Pascal – 92555 Paris La Défense.

(5)-Classe B-: bâtiments dont la défaillance présente un risque dit moyen pour les personnes, au sens du décret n°-91-461 du 14-mai 1991 et de l'arrêté du 29-mai 1997 «-Classification et règles de construction parasismiques applicables aux bâtiments de la catégorie dite à risque normal-». Classe C-: bâtiments dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes ou en raison de leur importance socio-économique. Classe-D-: ceux dont le fonctionnement est primordial pour les besoins de la sécurité civile, la défense nationale et le maintien de l'ordre public.

(6)-AFPS : Association française de génie parasismique, <http://www.afps-seisme.org>.

## Bibliographie

[1]-Mouroux, P., B. Le Brun, S. Depinois, E. Bertrand, P. Masure, 2004. Projet européen RISK-UE : application à la ville de Nice, Rapport final. Document BRGM/RP-53202-FR, septembre 2004, 137 pages.

[2]-Bard, P.-Y., A.-M. Duval, E. Bertrand, J.-F. Vassiliadès, S. Vidal, C. Thibault, B. Guyet, J.-P. Mèneroud, P. Guéguen, P. Foin, F. Dunand, S. Bonnefoy-Claudet et G. Vettori, 2005. Le risque Sismique à Nice: apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles. Rapport final GEMGEP, 52 pages.

[3]-Martin, C, et Ph., Combes, 2002. «-Révision du zonage sismique de la France, Etude probabiliste-». Rapport final Contrat GTR/MATE/0701-150.