



PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT GENERAL AU PLAN  
INSTANCE D'EVALUATION DE LA POLITIQUE PUBLIQUE  
DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS

*document public*

## le risque sismique en France

---

P. Godefroy  
avec la collaboration de C. Martin et P. Mouroux

mars 1994  
R 37961

numéro de référence P 04232049



Ministère de l'Industrie,  
des Postes et Télécommunications  
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre des  
actions de Service public du BRGM

BRGM  
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL  
Département utilisation et protection  
de l'espace géologique  
Groupe Risques naturels et Géoprospective  
BP 167 - 13276 MARSEILLE CEDEX 09 - FRANCE  
Tél.: (33) 91 17 74 74

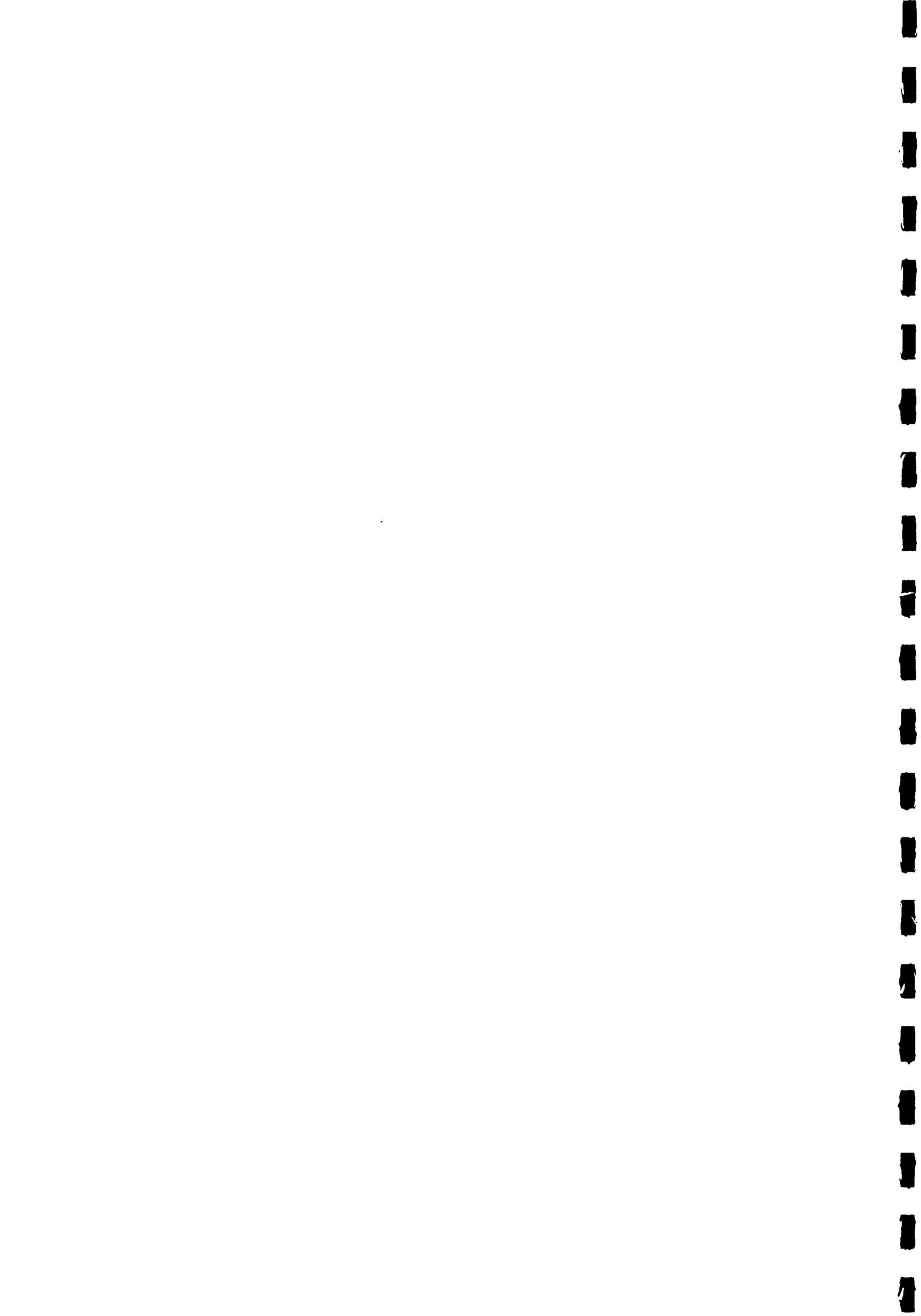
## **AVERTISSEMENT**

Ce rapport, établi à la demande de l'Instance d'évaluation de la politique publique de prévention des risques naturels, vise à présenter un état synthétique de la situation relative au risque sismique. Préparé dans des délais très courts, sur la base de la documentation disponible et de l'expérience propre au BRGM, il ne s'agit que d'un document provisoire et probablement incomplet, à ce stade.

Cette première version sera donc soumise aux principaux acteurs de l'évaluation et de la prévention du risque sismique afin d'y intégrer les amendements qu'ils souhaiteraient y voir apporter. Ce document sera présenté à l'Instance, lors d'une réunion fixée fin avril 94.

Ce rapport est accompagné d'un dossier documentaire. Celui-ci est présenté sous forme de références de publications et ouvrages divers, classés par thèmes.

Enfin, plusieurs remarques générales concernent surtout la France métropolitaine. Les Antilles qui, à bien des égards, offrent une situation particulière vis-à-vis du risque sismique, font l'objet de commentaires propres.



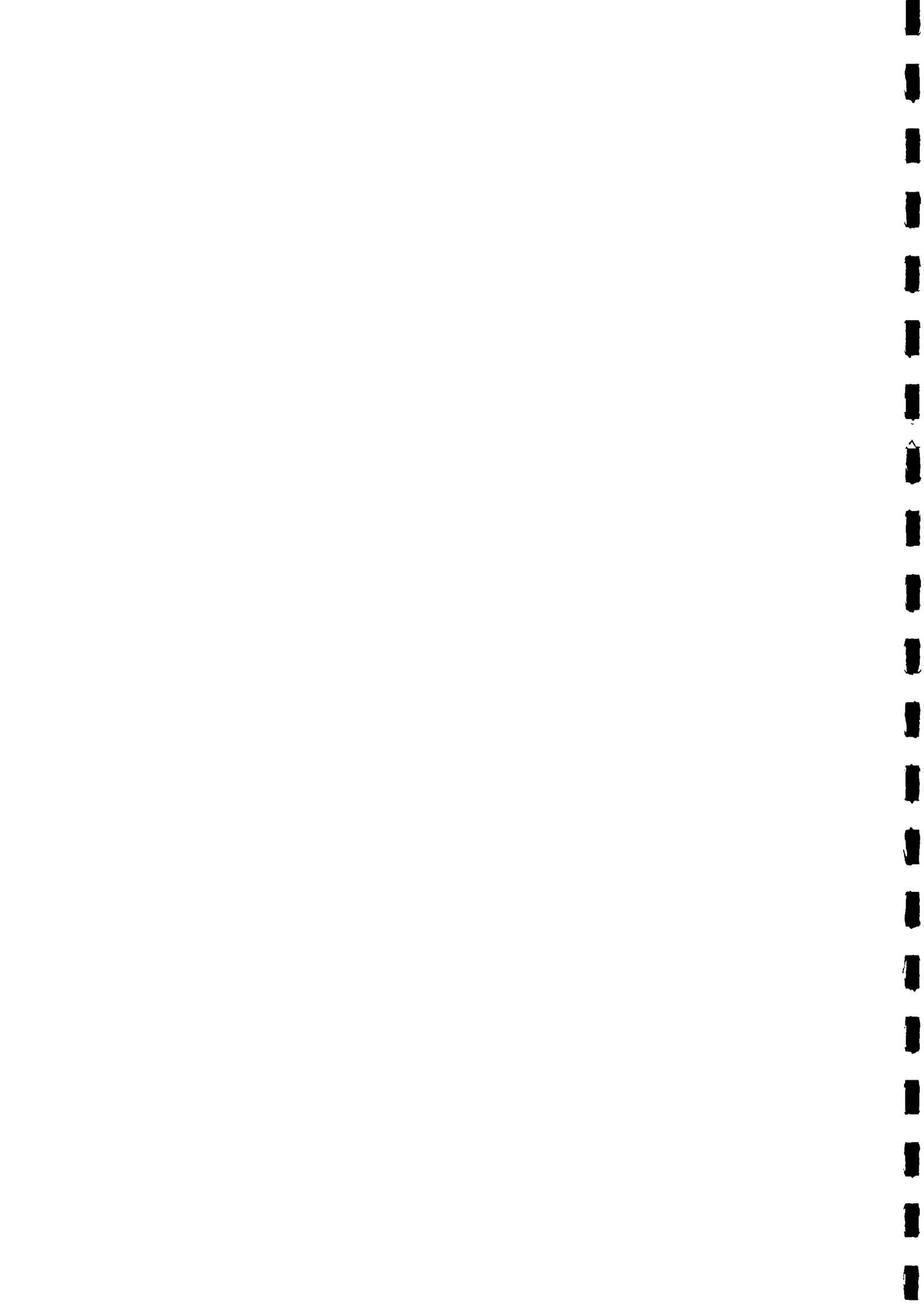
## RESUME

Ce rapport, établi à la demande de l'Instance d'évaluation de la politique publique de prévention des risques naturels, vise à présenter un état synthétique de la situation relative au risque sismique en France.

Il s'attache à décrire :

- les bases scientifiques des études phénoménologiques concernées,
- les méthodes d'évaluation et de cartographie de l'aléa,
- les approches de la vulnérabilité à cet aléa,
- les outils de surveillance,
- les problèmes posés par la prévision, à différentes échelles de temps,
- enfin, les différents volets de la prévention du risque sismique.

Progrès récents et recherches prioritaires sont recensés pour chacun de ces thèmes. Ils conduisent à proposer une panoplie d'actions pour le futur.



## TABLES DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Particularité de la France métropolitaine en regard du risque sismique.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Présentation générale du risque sismique en France d'outre-mer .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Petites Antilles : département de Guadeloupe et de Martinique.....	4
1.2.2. Autres départements et territoires d'outre-mer.....	5
<b>1.3. Grands traits de l'évolution récente de la politique française de prévention du risque sismique .....</b>	<b>6</b>
<b>2. EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Rappel de quelques définitions .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Problèmes posés et méthodes.....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Aléa régional .....	10
2.2.2. Aléa local .....	12
2.2.3. Différents types de zonage sismique .....	17
<b>2.3. Etat des données en France .....</b>	<b>17</b>
2.3.1. Connaissance de la sismicité .....	17
2.3.2. Données néotectoniques .....	19
2.3.3. Etudes sismotectoniques .....	19
2.3.4. Evaluation de l'aléa régional.....	19
2.3.5. Evaluation de l'aléa local .....	21
<b>2.4. Récapitulatif des progrès effectués et des recherches prioritaires recommandées .....</b>	<b>22</b>
<b>3. SURVEILLANCE SISMOLOGIQUE ET DONNEES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Introduction.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Réseaux de surveillance sismique .....</b>	<b>26</b>
3.2.1. Réseaux nationaux et régionaux métropolitains. Centralisation des données .....	26
3.2.2. Réseaux de surveillance dans les DOM-TOM .....	27
3.2.3. Conclusion .....	27

<b>3.3. Réseaux accélérométriques .....</b>	<b>28</b>
3.3.1. Réseau permanent français actuel .....	29
3.3.2. Evolution récente des réseaux accélérométriques français et projets .....	30
3.3.2.1 Réseau permanent .....	30
3.3.2.2 Réseau mobile .....	31
3.3.3. Conclusion .....	32
<b>3.4. Investissements nécessaires.....</b>	<b>32</b>
<b>4. PREDICTION DES SEISMES ET PREVENTION.....</b>	<b>34</b>
4.1. Introduction.....	34
4.2. Prévision ou prédiction ? .....	34
4.3. Perspectives et situation en France.....	36
4.4. Conclusion .....	37
<b>5. EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES .....</b>	<b>39</b>
5.1. Définitions, concepts et problèmes de base.....	39
5.2. Etat des connaissances.....	42
5.3. Recherches nécessaires et propositions d'actions :.....	44
<b>6. DIFFERENTS VOLETS DE LA PREVENTION DU RISQUE SISMIQUE.....</b>	<b>46</b>
6.1. Protection parasismique .....	46
6.1.1. Réglementation technique et cadre légal d'application .....	47
6.1.2. Mise en oeuvre pratique.....	49
6.1.3. Conclusion .....	52
6.2. Planification de l'aménagement du territoire et de l'occupation des sols .....	53
6.3. Information et sensibilisation, formation et éducation.....	54
6.3.1. Information et sensibilisation .....	54
6.3.2. Formation et éducation .....	55
6.4. Préparation.....	55
<b>7. CONCLUSION : RECAPITULATIF DES ACTIONS SOUHAITABLES.....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. PARTICULARITE DE LA FRANCE METROPOLITAINE EN REGARD DU RISQUE SISMIQUE

La France métropolitaine, comme plusieurs de ses voisins nord-européens, est un pays à sismicité modérée, correspondant principalement à un domaine intraplaque éloigné des zones de fortes déformations tectoniques résultant de la collision des plaques africaine et européenne.

Cette situation engendre, pour différents aspects de l'évaluation et de la prise en compte du risque sismique qui doivent être abordés selon les recommandations formulées par l'Instance, des particularités qu'il faut, d'emblée, souligner :

*a) L'évaluation de l'aléa sismique est rendue plus délicate du fait :*

- des difficultés à identifier les sources sismiques,
- de l'incertitude sur la magnitude des séismes maximaux plausibles,
- des périodes de retour éventuellement très grandes de ces événements extrêmes,
- du problème de la représentativité des échantillons de données de sismicité instrumentale et historique ne couvrant respectivement que quelques décennies et quelques siècles.

L'écueil principal à éviter, ressenti comme un échec par les scientifiques et perçu comme un constat d'ignorance voire d'incapacité par l'opinion publique, est l'occurrence d'un séisme majeur hors des zones sismogènes répertoriées. Cette situation, illustrée récemment encore par le séisme de Killari-Latur (magnitude : 6.4) en Inde centrale, le 29 septembre 1993 ou même dans une région plus célèbre pour sa sismicité, par le séisme de Landers (magnitude 7.5) en Californie, le 28 juin 1992, dans le désert Mojave à l'est du système de failles de San Andreas, est relayée fallacieusement par les médias comme une "surprise" pour les scientifiques (autrement dit une incompréhension des phénomènes). Or, cette "surprise" ne traduit en fait qu'une méconnaissance de la sismotectonique régionale, résultant de l'insuffisance d'investigations géologiques et notamment néotectoniques, préalables.

Dans les régions à sismicité modérée tout particulièrement, il est indispensable de consacrer aux études de néotectonique et de paléosismicité, l'effort nécessaire à une évaluation fiable de l'aléa sismique, c'est-à-dire fondée sur une observation et un inventaire des phénomènes à une échelle de temps adaptée à leur réalisation (au sens aléatoire du terme), soit plusieurs dizaines de milliers d'années.

*b) Cette activité modérée n'offre pas ou peu d'opportunités :*

- d'enregistrer de forts mouvements vibratoires du sol provoqués par un séisme,
- de vérifier, "en vraie grandeur", le comportement des structures soumises à l'épreuve du tremblement de terre.

Dans l'un et l'autre cas, la solution de secours consiste à tirer parti de l'expérience existant à l'étranger, dans des pays plus sismiques :

- constitution de banques de données accélérométriques à partir des enregistrements qui ont pu y être recueillis,
- missions post-séismes pour étudier la pathologie des bâtiments et développer une analyse en retour.

Pour le premier point, ces succédanés ne peuvent constituer qu'un pis-aller car la variété des conditions géologiques et sismologiques remet facilement en cause l'utilisation de données qui ne sont pas propres aux régions concernées. Il faut donc d'une part, développer un réseau d'enregistrement approprié pour recueillir des données même lors de séismes faibles et d'autre part, concevoir des campagnes expérimentales qui permettent de caler les modèles de calcul de mouvements sismiques pour différentes conditions de site (lithologiques et topographiques).

Pour le second point, il faut favoriser également l'étude expérimentale du comportement des structures (par exemple à l'aide de tables vibrantes de taille suffisante), et valider les modèles théoriques de calcul dynamique par des données réelles.

*c) La prévision à court terme (ou "prédiction" : annonce de la date, du lieu et de l'importance d'un séisme futur) est beaucoup plus ardue et moins "rentable".*

Plus ardue, parce que les méthodes de prédiction qui en sont encore à un stade de recherche expérimentale, reposent d'une part, sur l'identification de signes précurseurs parmi l'observation et la mesure continues d'une multitude de paramètres physiques et chimiques du sous-sol et d'autre part, sur l'interprétation de ces précurseurs au travers d'un modèle sismogénétique.

Cette identification, purement empirique dans un premier temps, exige des corrélations statistiques significatives entre "anomalies" de ces paramètres et événements sismiques. Moindre est l'activité sismique, moindres sont les possibilités de détecter ces corrélations.

Moins rentable, parce que les moyens à mettre en oeuvre pour rendre opérationnels de tels réseaux d'observation et surveillance continus sont considérables et que l'investissement correspondant est difficilement justifiable en regard de la période de retour des séismes destructeurs<sup>1</sup> en un lieu donné, même en admettant un taux de succès des prédictions proche de 100%.

Enfin, la "gestion sociologique" de la prédiction est plus difficile. En effet, pour être totalement efficace la prédiction doit s'accompagner d'une préparation de la population afin que les comportements soient adéquats lors de l'annonce de l'évènement. Il faut donc que des plans d'évacuation aient été conçus et que des exercices de mise en oeuvre de ces plans soient pratiqués régulièrement pour créer de véritables réflexes. Il est illusoire d'entretenir de tels réflexes lorsque l'occurrence de l'évènement en question est à l'échelle de plus d'une, voire quelques, générations. Ce constat ne doit pas pour autant conduire à une attitude fataliste. Ces exercices d'évacuation ne sont qu'une composante de plans de secours plus globaux qui visent à préparer les populations au meilleur comportement possible en cas de séisme majeur (c'est-à-dire pendant et après l'évènement). Ces plans sont indispensables mais il ne faut pas se cacher l'énorme difficulté que représentent, une fois passé le stade de leur conception et de leur élaboration, les actions de

---

<sup>1</sup> Il faut rappeler que la prédiction n'a d'intérêt que pour les événements qui représentent une menace pour la sécurité des personnes et justifient des mesures d'évacuation.

sensibilisation, d'information et d'éducation nécessaires à leur intégration par le public concerné. De telles actions ont été engagées par exemple à Wickerschwihir (Haut-Rhin)<sup>2</sup> et à Avignon (Vaucluse) ou sont en cours à Lambesc (Bouches-du-Rhône).

*d) En matière de protection parasismique et donc de réglementation s'appliquant à la construction, un distinguo apparaît vite indispensable entre :*

- des ouvrages dont la protection doit être assurée quoi qu'il en coûte, compte tenu des conséquences catastrophiques pour la population et l'environnement que pourrait avoir leur endommagement, même mineur,
- des ouvrages dont la protection doit garantir la satisfaction des devoirs de la Puissance Publique en matière de sécurité des personnes qu'ils abritent.

Dans le premier cas, dit des "ouvrages à risque spécial" (dans lequel entrent les centrales nucléaires, les installations industrielles classées, les grands barrages, etc.), des exigences de comportement sont formulées pour différents niveaux d'agression sismique dont celui du "séisme maximal plausible", quelle que soit sa probabilité d'occurrence.

Dans le second cas, dit des "ouvrages à risque normal", dans le cadre d'un arbitrage pratiqué par la Puissance Publique et qui relève d'une analyse "coût/bénéfice", des exigences de comportement visant à satisfaire prioritairement la sauvegarde des vies humaines, sont fixées pour un niveau d'agression sismique tenant compte de sa probabilité d'occurrence en regard de la durée de vie des ouvrages considérés<sup>3</sup>.

Dans un pays de sismicité modérée comme la France métropolitaine, la différence des périodes de retour des événements dimensionnants dans l'un et l'autre cas peut être de plusieurs ordres de grandeur. Par ailleurs, une incertitude pèse sur l'évaluation du séisme maximal plausible et conduit, dans la pratique, à introduire des coefficients majorateurs de sécurité.

*e) A la différence des pays fortement sismiques, où la fréquence des tremblements de terre destructeurs a "assuré" un fort taux de renouvellement du bâti et l'introduction précoce de techniques parasismiques de construction, le problème essentiel de la protection parasismique en France concerne le "renforcement" du bâti existant, souvent ancien et pouvant représenter un patrimoine architectural.*

Tant au plan des techniques à mettre en oeuvre que des coûts associés, la problématique diffère notablement de celle posée par les constructions actuelles et futures.

Or, une des caractéristiques des séismes (à l'image des cyclones pour les régions concernées) est l'extension géographique considérable des zones exposées lors d'un événement majeur. Il ne saurait être question, dès lors, de mesures dissuasives pour l'occupation du bâti existant telles qu'elles pourraient s'envisager pour d'autres types d'aléas naturels dont les effets sont circonscrits à des secteurs limités.

---

<sup>2</sup> Plan P.E.G.A.S. (plan d'entraide générale et d'assistance aux secours)

<sup>3</sup> La définition de cette intensité de dimensionnement optimale, bien que s'inscrivant dans un cadre conceptuel relativement bien circonscrit, reste un exercice périlleux dès lors qu'une surestimation n'est pas mieux admise par l'opinion publique qu'une sous-estimation, en raison du surcoût associé que le système actuel fait totalement supporter au citoyen.

## 1.2. PRESENTATION GENERALE DU RISQUE SISMIQUE EN FRANCE D'OUTRE-MER

### 1.2.1. Petites Antilles : département de Guadeloupe et de Martinique

Les archipels de la Guadeloupe et de la Martinique ont été sévèrement meurtris par les tremblements de terre au cours des trois derniers siècles, notamment en 1839 (plus de 300 morts en Martinique) et en 1843 (plus de 3000 morts en Guadeloupe). Les dégâts lors de ces séismes majeurs (de même que lors des séismes locaux de 1851 et 1897 en Guadeloupe) ont été considérables, la majeure partie des capitales, Pointe-à-Pitre et Fort-de-France, ayant été rasées. Une simulation du séisme du 8 février 1843 dans le contexte actuel (année 1972) conduit au bilan catastrophique de plus de 100 000 morts sur l'ensemble des Antilles et 600 millions de dollars US de pertes.

Ce préambule illustre combien le risque sismique est élevé en Guadeloupe et Martinique et ce, pour plusieurs raisons qui sont propres à ces départements, où la situation est bien différente du contexte métropolitain.

La première est que l'aléa sismique y résulte d'un contexte géodynamique actif, s'exprimant également par du volcanisme, le long d'une zone de contact matérialisée par l'arc des Petites Antilles, et des déformations tectoniques associées en domaine intraplaque, au voisinage de cette zone de contact.

La seconde est que les effets d'un gros tremblement de terre peuvent y être fortement accrus, à cause d'un contexte naturel particulièrement propice aux mouvements de terrain, à la liquéfaction des sols et à l'amplification des vibrations. Par ailleurs, au moins en Guadeloupe, certains systèmes de failles actives majeures peuvent être associés à des sources sismiques de taille suffisante pour que la rupture se propage jusqu'en surface du sol.

La troisième est que la vulnérabilité des constructions y est généralement très grande, dans un contexte d'urbanisme et d'aménagement souvent défavorable, en liaison avec :

- une forte densité de population en certains secteurs,
- l'occupation de zones dangereuses comme les versants raides et instables ou les zones liquéfiables par exemple,
- certaines pratiques en matière de construction, surtout pour l'habitat individuel, contraires aux principes élémentaires de protection parasismique, notamment une mauvaise conception d'ensemble anticyclonique et parasismique, le tout très souvent associé à l'absence de permis de construire et du moindre contrôle à quelque stade que ce soit.

Enfin, la dernière tient au risque lui-même, c'est-à-dire aux conséquences économiques et sociales d'un séisme qui peuvent être particulièrement graves en raison de la répartition de la population et des biens exposés :

- concentration excessive d'habitations précaires dans les grosses agglomérations,
- fragilité du capital économique lié aux infrastructures touristiques, à quelques industries et à un réseau de voies de communication souvent très exposé et, par suite, fragilité de l'équilibre social qu'il préserve,
- présence d'installations à risque spécial pouvant constituer une menace importante pour l'environnement (industries stockant des produits dangereux, barrages, etc.).

Au cours des dix dernières années, la prise de conscience de l'importance de ce risque est allée croissante et s'est traduite par le lancement de différents types d'actions financées à l'échelon central (Ministère de l'Environnement notamment) comme local (Conseils régionaux, Conseils Généraux). Elles concernent :

- le renforcement de la surveillance sismologique,
- l'amélioration de la connaissance de l'aléa sismique régional et local (avec notamment les microzonages de Pointe-à-Pitre et Fort-de-France),
- la cartographie systématique, à l'échelle communale de l'aléa sismique sur toute la Guadeloupe et une grande partie de la Martinique, à travers la réalisation d'atlas communaux des risques, répondant aux objectifs de la loi de juillet 87 sur l'information des citoyens et affichant également les aléas mouvements de terrain, inondations et co-cycloniques (houles et marées de tempête),
- des études pilotes d'évaluation de la vulnérabilité aux séismes et d'élaboration de scénarios de risque (devant être prolongées par les programmes GEMITIS/Antilles, s'inscrivant dans le cadre de la Décennie internationale pour la prévention des catastrophes naturelles : DIPCEN),
- des actions de sensibilisation et d'information des populations, de formation des professionnels de la construction et des cadres administratifs concernés, d'éducation en milieu scolaire et universitaire,
- la préparation et/ou la révision de plans de secours et d'urgence.

La difficulté majeure reste la mise en oeuvre pratique et effective de ces différents volets de la prévention du risque sismique :

- en matière de protection parasismique, où malgré une réglementation contraignante, il faut réussir à convaincre, notamment les particuliers, d'abandonner des habitudes désastreuses en matière de construction ; c'est un gros problème de communication à adapter aux spécificités sociologiques locales ; l'institution des procédures de contrôle nécessaires suppose aussi des moyens ad hoc dans les services administratifs concernés ;
- en matière d'occupation des sols et d'aménagement, avec une situation extrêmement critique pour l'existant : que faire de certains quartiers tels ceux de Trénelles ou Citron à Fort-de-France où une population de plusieurs milliers d'habitants est exposée à un danger de mort, dans des favelas, établies parfois sur des terrains publics "squattés" ? D'une façon plus générale, comment aborder le problème de la réhabilitation de ces zones urbaines ou périurbaines très menacées, où l'état des constructions existantes ne laisse aucune place à des solutions de confortement ?

En parallèle aux différents types de programmes décrits précédemment qu'il est indispensable de poursuivre, l'acuité du problème du risque sismique en Martinique et Guadeloupe exige une réaction urgente et de grande ampleur. Elle ne semble possible que par la synergie des politiques centrale (ministères concernés) et locale (implication des collectivités territoriales et responsabilisation des élus).

### 1.2.2. Autres départements et territoires d'outre-mer

D'une façon générale, à la différence de la Guadeloupe et de la Martinique, les autres départements et territoires d'outre-mer n'ont pas fait l'objet d'études et d'actions particulières récentes, dans le domaine de l'évaluation et de la prévention du risque sismique. Il est vrai qu'à l'exception de Mayotte et de Wallis et Futuna, la sismicité y est très faible et ne justifie pas, selon les principes de protection retenus par la Puissance Publique, l'obligation d'appliquer des règles parasismiques de construction aux ouvrages à risque normal.

Ce point de vue introduit dans les règles parasismiques de construction PS 69 (version 1970) a été reconduit dans les PS 69/82 (édition 1984).

Le nouveau zonage sismique de la France pour l'application des règles parasismiques de construction destinées aux ouvrages à risque normal, établi par le BRGM et publié en 1986 par la Délégation aux Risques Majeurs, ne concerne que la métropole. Cependant, lors de la préparation des décrets d'application de la loi n°87-565 du 22 juillet 1987 devant entériner ce zonage, le BRGM, en s'appuyant sur des études réalisées pour des projets particuliers, avait attiré l'attention de la DRM, dès 1988, sur l'aléa sismique significatif à Mayotte et Wallis et Futuna, en suggérant un classement respectivement en zone Ib pour Mayotte et Futuna et Ia pour Wallis.

Pour des raisons statutaires, le décret n°91-461 finalement sorti le 14 mai 1991, ne concerne, hors métropole, que les D.O.M. et St-Pierre et Miquelon.

Futuna a été frappée le 13 mars 1993 par un séisme destructeur de magnitude 6,3, localisé à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de l'île, ayant fait 3 morts et une douzaine de blessés. A la demande de l'assemblée territoriale, une mission d'évaluation du coût de la reconstruction a été effectuée sous l'égide du Conseil Général des Ponts et Chaussées. Un séisme plus modeste, de magnitude de l'ordre de 5,0, est venu, en causant quelques dégâts à Mayotte le 1er décembre 1993, rappeler que ce risque méritait probablement quelque attention.

En Guyane, la présence d'installations à risque spécial notamment avec la base du Centre national d'études spatiales (CNES) de Kourou et le grand barrage de Petit-Saut, justifie l'approfondissement de l'évaluation de l'aléa sismique qui reste sommaire pour l'instant.

La situation est un peu similaire à la Réunion. La sismicité très modérée (quelques secousses historiques connues, toutes d'intensité inférieure à VII) ne justifie pas de mesures généralisées aux ouvrages à risque normal mais la présence d'installations industrielles à risque spécial devrait conduire à affiner l'évaluation de l'aléa. De plus, dans un contexte géologique et géomorphologique très propice aux mouvements de terrain, parfois de très grande ampleur, il ne faut pas oublier le rôle déclencheur que peut avoir une secousse sismique, même faible.

Enfin, il faut rappeler le point commun à tous ces départements et territoires d'outre-mer que représente la vulnérabilité, généralement très grande, du bâti existant, surtout de l'habitat individuel.

### **1.3. GRANDS TRAITS DE L'EVOLUTION RECENTE DE LA POLITIQUE FRANÇAISE DE PREVENTION DU RISQUE SISMIQUE**

Le besoin d'une politique de prévention du risque sismique, en France, a émergé après le séisme d'Orléansville du 9 septembre 1954, dans le département d'Oran. Il en est résulté l'élaboration des premières règles parasismiques de construction française, dites A.S. 55, applicables initialement à l'Algérie seulement.

Le séisme d'Agadir, au Maroc, en 1960, a déclenché la préparation d'un nouveau règlement français, d'abord appelé PS 62 et ayant abouti finalement aux règles D.T.U. PS 69, applicables à la France métropolitaine et aux départements et territoires d'Outre-mer, dans un cadre légal qui s'est mis en place à partir de 1977.

Le développement du programme électronucléaire français, après le premier choc pétrolier de 1973, a donné un nouvel essor au savoir-faire parasismique national et a catalysé, parallèlement, un programme de recherche sur la sismicité historique et la sismotectonique de la France.

Ce dernier, cofinancé par le service central de sûreté des installations nucléaires (Ministère de l'Industrie), le BRGM, le CEA et EDF, a débouché d'une part sur la publication de la première carte sismotectonique de la France en 1981, d'autre part sur la constitution depuis 1978 d'une banque documentaire et de la base de données informatisée "SIRENE", relatives à la macrosismicité historique et contemporaine de la France, enrichies et mises à jour régulièrement par le BRGM avec l'appui de l'IPSN et d'EDF. De même, l'IPSN s'est attaché depuis 1980 à créer, à gérer et à actualiser une banque de données sur les mouvements forts du sol, à partir des enregistrements recueillis en toutes régions du Monde et particulièrement en zones péri-méditerranéennes.

Par ailleurs, les enseignements tirés du séisme destructeur d'El Asnam (Algérie) du 10 octobre 1980 (2630 morts), suivi de peu par celui d'Irpinia (Italie) du 23 novembre 1980 (3100 morts), ont conduit à une révision d'urgence des règles PS 69 sous forme d'addenda publiés en 1982. Une refonte complète du document était simultanément engagée.

Les années 1980 ont été celles de progrès notoires en matière de sensibilisation au risque sismique et d'efforts pour sa prévention en France.

Il en suffit, pour preuve, de comparer les recommandations qui ont été formulées dans le rapport à l'Académie des Sciences sur la définition et la prise en compte des risques sismiques en mai 1982 et les réalisations effectuées depuis qui, dans une large part, sont venues les satisfaire. Ce rapport, établi par un groupe d'experts rassemblant les plus éminents spécialistes français, présente une synthèse exhaustive de l'état des connaissances, de la politique de prévention et de la pratique réglementaire à l'époque. En conséquence, il s'agira surtout ici, en s'appuyant sur ce rapport de 1982, de mettre l'accent sur :

- les problèmes particuliers étant ressortis de l'évolution des connaissances,
- le bilan des réalisations accomplies,
- l'inventaire des progrès techniques encore attendus et des recherches prioritaires qui en découlent,
- les éventuels dysfonctionnements de la politique de prévention mise en oeuvre jusque là.

Il faut souligner qu'outre la politique volontariste de l'Etat en matière de prévention des risques naturels, matérialisée par l'action de la Délégation aux risques majeurs, c'est essentiellement la fédération des compétences au sein de l'Association française du génie parasismique, créée en 1984, qui a permis les progrès de cette dernière décennie.

**C'est ainsi que le risque sismique est vraisemblablement le risque naturel en France, pour lequel tant les concepts que la mise en oeuvre d'une politique de prévention assortie de la législation ad hoc, sont les plus avancés.**

C'est sous l'égide de l'AFPS :

- qu'ont été préparés les nouveaux textes techniques devant suppléer les règles PS 69 et addenda 82, édités sous le nom de recommandations AFPS 90,
- qu'ont été publiés, en français et en anglais, des états de l'Art du savoir-faire français en génie parasismique,

- qu'ont été envoyées systématiquement, après chaque séisme destructeur majeur dans le Monde, des missions d'experts sur le terrain,
- qu'ont été organisés nombre de colloques et workshops dynamisant les échanges et les débats au sein de la communauté concernée,
- qu'ont été développés et formalisés les échanges internationaux dans ce domaine, dont la consécration se traduira par la tenue de la prochaine conférence internationale de zonage sismique à Nice, en octobre 1995, et peut-être, par celle de la prochaine conférence européenne de génie parasismique à Paris, en 1998.

C'est également avec l'appui de l'AFPS qu'ont été édités de nombreux documents de sensibilisation au risque sismique à l'attention des médias et du grand public.

Enfin, les principales étapes de l'évolution de la politique de prévention du risque sismique au cours de la dernière décennie au plan de la réglementation et du cadre législatif associé (cf. chapitre 6 de cette note) concernent :

- la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles et à l'institution des plans d'exposition aux risques (P.E.R.) ;
- la publication par la DRM, en 1986, du "nouveau zonage sismique de la France pour l'application des règles parasismiques de construction et la mise en oeuvre des plans d'exposition aux risques", établi par le BRGM mais limité à la France métropolitaine ;
- la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs, confiant à l'Etat la responsabilité d'établir une réglementation du risque sismique définissant les zones exposées, les normes techniques à appliquer et les niveaux de dimensionnement à considérer en fonction de ces zones et d'une classification des bâtiments dépendant de leur destination et du risque associé ;
- la création à la demande de la DRM, en mai 1988, d'un groupe d'études sous l'égide du Conseil général des ponts et chaussées, chargé de formuler cette réglementation ;
- le décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique introduisant le distinguo entre ouvrages à risque normal et ouvrages à risque spécial, et entérinant le zonage sismique de la France publié en 1986 ;
- la loi n° 90-509 du 25 juin 1990 modifiant le code des assurances et portant extension aux départements d'outre-mer du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles ;
- l'arrêté du 16 juillet 1992 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la catégorie dite "à risque normal" ;
- la publication, par le Centre scientifique et technique du bâtiment, des règles PS-MI 89 révisées 92 (construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés) ;
- le décret n° 93-351 du 15 mars 1993 relatif aux plans d'exposition aux risques naturels prévisibles ;
- l'arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées.

Le résultat essentiel est que la prise en compte du risque sismique est devenu obligatoire pour toute construction nouvelle, en France :

- quelle que soit sa localisation s'il s'agit d'un ouvrage à risque spécial ;
- dans les zones Ia, Ib, II et III du zonage sismique de la France, s'il s'agit d'un ouvrage à risque normal de classe B, C ou D, à compter du 1er juillet 1994 pour les maisons individuelles et du 1er juillet 1993 pour les autres bâtiments.

## 2. EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE

### 2.1. RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS<sup>4</sup>

Un séisme correspond à l'apparition d'une rupture brutale au sein des roches de l'écorce terrestre, lorsque les contraintes auxquelles elles sont soumises dépassent leur résistance au cisaillement. Cette rupture qui, en contexte intraplaque, prend le plus souvent naissance entre quelques kilomètres et une vingtaine de kilomètres de profondeur sous la surface du sol, sur une faille préexistante et parfois très ancienne, se propage à des vitesses moyennes de l'ordre de quelques km/s jusqu'à épuisement de l'énergie potentielle de déformation et peut ainsi, éventuellement, atteindre la surface du sol et y provoquer des déformations tectoniques.

C'est cette propagation de la rupture qui engendre l'émission d'ondes élastiques rayonnant dans toutes les directions, en créant un mouvement vibratoire tridirectionnel du sol, dont l'amplitude s'atténue en première approximation avec la distance à la source sismique.

Déformations tectoniques et surtout mouvement vibratoire du sol sont responsables de toute une série d'effets sur l'homme, les constructions et l'environnement géologique. C'est l'estimation statistique de ces effets en un lieu donné qui permet de quantifier l'intensité macrosismique en ce point. Pour les besoins du génie parasismique, il est préférable de disposer de grandeurs physiques telles les paramètres de mouvement du sol en ce point (accélération, vitesse ou déplacement) ou le spectre de réponse de ce mouvement (courbe donnant l'amplitude maximale du déplacement, de la vitesse et de l'accélération d'une série d'oscillateurs simples soumis à ce mouvement, en fonction de leur période propre variant de 0 à l'infini, et pour une certaine valeur d'amortissement).

Intensité macrosismique et paramètres du mouvement du sol varient, pour un séisme donné, en fonction de la distance à la source et des conditions lithologiques, topographiques et structurales propres au site de mesure.

Par contre, l'importance du séisme peut être caractérisée par une grandeur unique : la magnitude, qui représente l'énergie rayonnée à la source sous forme d'ondes sismiques, ou le moment sismique, qui est le produit de la surface de rupture, du glissement moyen et du module de rigidité du milieu.

L'estimation idéale de l'aléa sismique consisterait à modéliser parfaitement, en tous points, le mouvement et le comportement du sol lors d'un séisme, dont l'occurrence future serait elle-même représentée par une loi de paramètres connus.

---

<sup>4</sup> Des détails peuvent être trouvés dans de nombreux textes du dossier documentaire joint au rapport

Dans la pratique, deux échelles d'étude sont distinguées :

- l'échelle régionale, à laquelle le milieu est supposé "géologiquement homogène" et où l'on se limite au calcul d'un mouvement sismique de référence en conditions standards ("rocher horizontal") associé soit à un "séisme maximal", soit à une probabilité annuelle de dépassement (ou à son inverse : une période de retour) ;
- l'échelle locale, où sont pris en compte d'une part les "effets de site", soit les modifications de ce mouvement sismique de référence dues à la lithologie et la topographie propres au site considéré, d'autre part les "effets induits", soit les conséquences du mouvement vibratoire sur la stabilité des pentes et le comportement des sols (liquéfaction, tassement, etc.) ; peuvent s'y ajouter, si la zone étudiée est traversée par des failles actives dont les caractéristiques sismotectoniques le justifient, les déformations cosismiques en surface du sol pouvant accompagner les événements de magnitude suffisante.

L'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle locale et sa cartographie constituent ce que l'on appelle généralement les études de microzonage sismique.

## 2.2. PROBLEMES POSES ET METHODES

### 2.2.1. Aléa régional

Il s'agit de résoudre les problèmes suivants :

- l'identification et la localisation des sources sismiques,
- la caractérisation de leur activité (loi de distribution des séismes dans le temps et en fonction de la magnitude),
- la modélisation de l'énergie rayonnée par ces sources et de son atténuation avec la distance.

♦ Le premier est l'objet de l'analyse sismotectonique qui vise à mettre en évidence les liens entre la sismicité et les structures géologiques actives actuellement ou dans un passé récent (quelques milliers à quelques millions d'années), soit sous forme de failles sismogènes, soit sous forme d'unités sismotectoniques, c'est-à-dire des domaines géologiques où la sismicité peut s'interpréter en fonction d'un mécanisme de déformation global, sous l'action du champ de contraintes régional actuel. Il importe donc d'établir une typologie des déformations géologiques récentes et actuelles : c'est l'objet de la néotectonique.

Dans les régions de sismicité modérée, comme la France métropolitaine, cette analyse est délicate pour plusieurs raisons :

- il n'y a généralement pas d'opportunité d'observation directe de séisme majeur,
- les enregistrements actuels et historiques ne sont pas forcément représentatifs de l'activité sismique à long terme,
- les indices géologiques et/ou géomorphologiques des déformations sismiques sont beaucoup moins évidents.

Il s'agit donc de développer des méthodes appropriées pour rassembler et interpréter les données.

Cette réflexion a donné lieu à l'organisation d'une conférence internationale, sous l'égide de l'AFPS, en octobre 1991 et à la création d'un groupe de travail franco-américain<sup>5</sup> sur "l'évaluation de l'aléa sismique en région de sismicité modérée". Il en est ressorti la mise en évidence des besoins suivants :

- caractériser l'activité sismique sur une période aussi large que possible, en prolongeant les données instrumentales (sur quelques décennies) et historiques (sur une dizaine de siècles), par des études de paléosismicité qui visent à détecter les traces géologiques "fossiles"<sup>6</sup> de séismes majeurs antérieurs à la période historique ;
- développer les méthodes adéquates pour identifier et quantifier les déformations géologiques récentes ; c'est l'objet de la néotectonique qui doit s'appuyer sur des données géomorphologiques, géodésiques et morphostructurales et s'attacher à reconstituer les champs de contraintes tectoniques régionaux récents et actuels, les relations entre les structures et les déformations géologiques profondes et superficielles et enfin, le comportement mécanique des différents niveaux crustaux.

Ainsi l'analyse sismotectonique doit substituer à une simple description de données géologiques et sismologiques, une interprétation des mécanismes physiques en termes sismogénétiques. Elle doit s'appuyer pour cela sur des recherches fondamentales en amont, sur la sismogenèse et la source sismique et, parallèlement, sur l'étude détaillée sur le terrain, des séismes majeurs survenant actuellement. Ces missions post-séismes sont très riches d'enseignements et mettent en évidence l'extrême complexité des phénomènes d'apparition et de propagation de la rupture sismogène. Il est ainsi évident que dans les régions à sismicité modérée, il est indispensable de procéder à des simplifications et des approximations qu'il faut pouvoir justifier du mieux possible.

♦ La caractérisation de l'activité des sources sismiques est traitée classiquement selon deux types de démarche :

- une démarche probabiliste, qui décrit l'occurrence future des séismes sur la source par une loi de distribution des probabilités annuelles de dépassement de différents seuils de magnitude ;
- une démarche déterministe, qui associe à chaque source sismique un séisme maximal plausible et ses caractéristiques (énergie, profondeur du foyer, type de mécanisme à la source, etc.).

Pour la première, les difficultés résident :

- dans la représentativité de ces lois pour les événements rares et forts (calage des paramètres et forme des lois pour les événements extrêmes),
- dans la validité de l'hypothèse de stationnarité dans le temps (constance de la probabilité annuelle d'occurrence au cours du temps), au delà de plusieurs siècles ; il est fréquent en effet, d'observer pour une source ou une région donnée, une alternance de périodes de moindre et plus forte activité.

Pour la seconde, c'est l'estimation fiable du séisme maximal associé à chaque source qui reste délicate. C'est là que les données de paléosismicité peuvent être d'un apport précieux. Dans la pratique, le séisme maximal plausible est calculé, par défaut, à partir du séisme le plus fort connu

<sup>5</sup> Ce groupe de travail s'appuie sur l'expérience acquise en France et dans le centre et l'Est des Etats-Unis. Y sont associés des experts australiens et d'autres pays nord-européens.

<sup>6</sup> Indices de rupture en surface du sol et déformations associées.

historiquement placé dans les conditions les plus défavorables pour le site et majoré forfaitairement<sup>7</sup>. Cette majoration est censée couvrir les incertitudes de l'analyse sismotectonique.

♦ La modélisation de l'énergie rayonnée par les sources sismiques et de son atténuation avec la distance s'aborde de deux façons :

- des approches empirico-statistiques qui, sur la base d'un grand nombre d'enregistrements de mouvements forts du sol dans des conditions variées, exploitent des corrélations entre des paramètres de la source (magnitude, moment), la distance à la source et des paramètres de sites (lithologie) ;
- des approches théoriques qui couplent des modèles de rayonnement de la source, de propagation en milieu hétérogène et de réponse des sites.

Les premières se heurtent, en France, à l'absence de données expérimentales sur les mouvements forts (cf. chapitre 3). Elles obligent à extrapoler des lois établies sur des données acquises dans des contextes sismotectoniques et géologiques parfois très différents de celui de notre pays. De plus il est encore nécessaire de développer les études statistiques pour individualiser le rôle de chaque paramètre. Les secondes, qui ont fait l'objet de nombreuses recherches fondamentales ces dernières années à travers plusieurs thèses, demandent encore quelques développements, avant de donner lieu à des méthodes totalement opérationnelles.

### 2.2.2. Aléa local

La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles prévoit, dans son article 5, l'établissement de Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles (PER), dont les dispositions réglementaires valent servitude d'utilité publique et doivent être annexées au Plan d'Occupation des Sols (POS).

A la suite de cette loi, et du décret d'application n° 84-328 du 3 mai 1984, un programme a été mis en chantier pour la réalisation de quelques PER sismiques dans les communes du territoire national estimées les plus exposées (principalement Alpes Maritimes, Bouches du Rhône et Alpes de Haute-Provence).

Même si l'extension de ce programme à d'autres communes a rencontré des difficultés (essentiellement financières), il a permis des progrès méthodologiques considérables pour l'évaluation de l'aléa sismique local et la réalisation des microzonages "sismo-géotechniques". Ceux-ci constituent la partie technique préalable à l'élaboration des PER sismiques qui sont, en quelque sorte, une transposition du "constat technique" en prescriptions réglementaires opposables aux tiers.

---

<sup>7</sup> C'est la pratique en matière de sûreté nucléaire maintenant étendue aux installations à risque spécial, qui retient :

- un séisme maximal historiquement vraisemblable (S.M.H.V.), le plus fort connu sur chaque source ou dans chaque unité sismotectonique, ramené à la distance minimale du site le long de cette source ou des frontières de cette unité ;
- un séisme majoré de sécurité (S.M.S.), déduit du S.M.H.V. par une augmentation de 1 degré en intensité macrosismique et, en première approximation, une multiplication par 2 de son spectre de réponse

Afin d'être menée à bien et de façon la plus homogène possible sur le territoire national, la réalisation des microzonages sismiques nécessitait un cadre réglementaire (qui existe avec les lois et décrets précédents) et des critères et outils appropriés conduisant à une évaluation quantifiée de phénomènes souvent complexes, dans un domaine où la science et les techniques évoluent rapidement.

Concernant ce dernier point, la DRM en 1989 d'une part, et l'AFPS en 1993 d'autre part, ont élaboré des guides méthodologiques pour la réalisation des études techniques, dont il conviendrait de s'inspirer avant toute élaboration de microzonage. Ils permettent de dresser un état de l'art en la matière et des problèmes qui restent posés.

Les différents volets de l'évaluation de l'aléa sismique local concernent :

- la cartographie des failles sismogènes et la prise en compte des déformations tectoniques de surface qui peuvent leur être associés,
- la quantification des effets de site et leur représentation cartographique (délimitation de zones homogènes quant à la réponse dynamique des sols),
- la cartographie des effets induits (dont l'occurrence n'est généralement considérée que de façon déterministe).

♦ La reconnaissance des failles sismogènes est un problème délicat, particulièrement en contexte de sismicité modérée, déjà évoqué au paragraphe précédent. La cartographie de ces failles à l'échelle locale, généralement 1/5 000 ou 1/10 000, pose des problèmes ardues de représentation.

D'abord, parce que la trace de ces accidents profonds n'est pas toujours connue ni visible, voire même identifiable, en surface ou sub-surface. Ensuite parce que selon la plus ou moins grande compétence des terrains affectés, les déformations associées à la propagation de la rupture sismogène depuis le foyer, peuvent prendre des allures très diverses et intéresser des zones plus ou moins larges en surface du sol de part et d'autre de la projection du plan de faille profond. Enfin, parce que l'amplitude même des déformations prévisibles est très difficile à cerner. Il est indispensable de progresser sur cette connaissance des déformations potentielles de surface associées à une source sismique de caractéristiques données pour quantifier et cartographier de façon appropriée cet aléa. Cela passe par le développement d'analyses statistiques soignées sur les séismes actuels engendrant des ruptures et déformations de surface et celui de modèles tenant compte des propriétés rhéologiques du milieu.

Il faut rappeler par ailleurs, que la reconnaissance précise de ces failles, à cette échelle, peut nécessiter la mise en oeuvre de méthodes d'investigation lourdes et coûteuses (géophysique, sondages, tranchées).

Enfin, il importe dans la prise en compte de cet aléa, de respecter les mêmes principes de protection parasismique que ceux retenus quant au mouvement vibratoire du sol ; à savoir que la considération de situations extrêmes ne se justifie que pour les ouvrages à risque spécial. Pour les ouvrages à risque normal, il faudrait pouvoir évaluer la probabilité d'occurrence d'un séisme d'une part sur le segment de faille concerné, d'autre part de taille suffisante pour que la rupture se propage jusqu'en surface du sol, et comparer cette probabilité à la durée de vie moyenne des ouvrages. Dans le contexte français métropolitain, un tel résultat est, pour le moment, une utopie et il faut se résoudre à une approche forfaitaire justifiée, au mieux, par un seuil de probabilité en deçà duquel on doit vraisemblablement se situer.

♦ La quantification des effets induits est un objectif réaliste car on cerne actuellement de manière satisfaisante les causes physiques des modifications des mouvements sismiques résultant de la perturbation de la propagation des ondes sismiques dans la partie la plus superficielle de la Terre, particulièrement hétérogène et anisotrope. Une interprétation a pu être fournie dans la plupart des cas, grâce à toute une série d'études théoriques et expérimentales, qui ont mis en évidence l'importance primordiale des facteurs suivants:

- 1) caractéristiques mécaniques des différentes formations superficielles (densité, rigidité, compressibilité, amortissement, non-linéarité, etc.) ;
- 2) géométrie de ces formations (stratification plane, vallées alluviales, bassins sédimentaires, discordances, etc.) ;
- 3) topographie de surface (collines, falaises, etc.).

Classiquement, ces modifications sont décrites de diverses manières non indépendantes, soit dans le domaine temporel (valeurs maximales et durée du signal), soit dans le domaine spectral (spectres de Fourier ou spectres de réponse), soit dans le domaine spatial (mouvements différentiels d'un point à l'autre).

L'estimation quantitative des effets des conditions locales sur les mouvements sismiques peut se faire par différentes méthodes plus ou moins sophistiquées (en fonction des moyens financiers disponibles) mais qui s'appuient toutes, au départ, sur un examen attentif des cartes géologiques et topographiques (à des échelles allant de 1/5 000 à 1/25 000) et des données géotechniques disponibles.

On distingue:

1) les méthodes instrumentales, qui utilisent les enregistrements de différentes sources sismiques, naturelles ou artificielles, pour comparer les caractéristiques spatiales et temporelles des mouvements mesurés en divers sites représentatifs des conditions géotechniques locales. Cela permet d'obtenir les fonctions de transfert de ces sites, avant d'extrapoler les résultats sur toute la zone d'étude, sur la base de critères relatifs aux caractéristiques géomécaniques des sols et aux conditions topographiques. Ces méthodes présentent l'inconvénient d'être relativement lourdes et coûteuses, mais ont l'avantage d'être assez fiables et de caler les résultats des modélisations numériques. Elles peuvent mettre en oeuvre plusieurs techniques :

\* enregistrements de la microsismicité, par un réseau de sismomètres, analogiques ou digitaux, en différents sites judicieusement choisis, recueillant soit la sismicité locale ou régionale, soit des tirs de carrière ou tirs à l'explosif. L'étude des rapports spectraux entre ces différents sites et un (ou deux) site rocheux de référence, conduit alors à une estimation expérimentale de leurs fonctions de transfert respectives. Cette méthode apporte des informations précieuses par rapport à la seule utilisation de modélisations numériques, mais comporte un certain nombre d'inconvénients :

- la non-linéarité du comportement des sols n'est pas prise en compte ;
- il faut, pour chaque site, un nombre suffisant d'enregistrements, afin de garantir la stabilité des effets observés ;
- sa mise en oeuvre est délicate en milieu urbain, en raison du niveau très élevé du bruit ambiant ;

\* enregistrements du bruit de fond :

Cette méthode, développée initialement au Japon, commence à être utilisée en France où elle conduit à des résultats prometteurs lorsque la géométrie des couches superficielles n'est pas trop complexe. Elle permet l'estimation des fréquences de résonance et des amplifications correspondantes. On peut espérer l'appliquer dans la pratique très prochainement, après les validations qu'il convient de faire en recherche scientifique. Cette méthode présente encore quelques limitations :

- les ondes engendrées par les sources de bruit de fond et leur gamme de fréquence, sollicitent souvent le site de façon très différente des ondes sismiques. En particulier, la transposition aux fortes déformations du sol n'est valable que si celui-ci se comporte de manière linéaire ;
- le bruit de fond se révèle très variable dans le temps en zone urbaine, et il est nécessaire de procéder à des enregistrements à différents moments puis d'effectuer une analyse statistique des spectres obtenus.

Ceci étant, cette méthode est de mise en oeuvre relativement aisée et nécessite moins de moyens matériels que la précédente.

\* enregistrements accélérométriques :

Lorsqu'on dispose d'enregistrements accélérométriques locaux correspondant à des mouvements forts, on peut également procéder au calcul des rapports spectraux en s'affranchissant, cette fois, des problèmes de non-linéarité. La méthode reste peu applicable pour le moment en France métropolitaine, en raison du faible nombre de stations accélérométriques disponibles et du faible niveau de la sismicité.

2) les méthodes théoriques ou numériques, qui peuvent utiliser de multiples modèles allant du plus simple au plus compliqué. Leur application nécessite une très bonne connaissance de la géométrie des formations superficielles et de leurs caractéristiques géomécaniques. Par rapport aux méthodes instrumentales, elles présentent l'avantage d'être assez souples mais leur principale limitation vient des incertitudes et imprécisions sur les caractéristiques mécaniques des sols en profondeur (en l'absence de reconnaissances géotechniques in situ ou tests de laboratoire sur échantillons). Il est donc nécessaire de les valider et de les caler par des données expérimentales.

\* Les méthodes simplifiées reposent sur des modèles simples unidimensionnels ou plus complexes, bidimensionnels, et se limitent à l'estimation de la période fondamentale  $T_0$  du sol et du niveau  $A_0$  de l'amplification correspondante. Ce sont les valeurs de ces paramètres qui sont cartographiées.

\* Les méthodes théoriques plus complexes sont basées sur des calculs de propagation d'ondes (1D, 2D ou 3D) qui permettent de prédire la réponse sismique des différents sites, en fournissant :

- la fonction de transfert locale,  $H(f)$  ;
- le spectre de réponse local et toutes les informations temporelles et fréquentielles intéressant le génie parasismique.

Au plan théorique, les méthodes développées en France sont très performantes. Il reste néanmoins nécessaire d'axer les travaux futurs sur la validation des résultats numériques par des mesures expérimentales, qui passent par le renforcement des réseaux sismologiques

et accélérométriques existants. Il faut aussi améliorer notre connaissance, théorique et expérimentale, sur les effets de site topographiques.

Au plan méthodologique, trois niveaux de finesse sont envisageables pour les microzonages sismiques :

- le niveau A, plus simple, pour lequel la prise en compte des effets de site ou phénomènes induits ne va guère au-delà de ce qui est prévu dans la réglementation parasismique ;
- le niveau B, intermédiaire, fait appel à des méthodes simplifiées et conduit à la cartographie de la période fondamentale du sol et de l'amplification correspondante ;
- le niveau C, le plus détaillé, aboutit à des déterminations quantitatives des effets locaux, à l'aide de techniques plus lourdes (expérimentation, reconnaissances géotechniques, modélisations numériques) et à l'évaluation des fonctions de transfert de chaque site.

Enfin, en matière de cartographie, les années 1990 ont vu l'émergence des systèmes d'informations géographiques (SIG), qui constituent des outils extrêmement précieux dans les études de microzonage car ils permettent aussi bien le traitement et le croisement d'un grand nombre de données référencées, qu'une cartographie informatisée et évolutive des zones instables.

♦ La cartographie des effets induits (liquéfaction, mouvements de terrain) suppose de combiner la susceptibilité du site au phénomène considéré et l'aléa sismique local en tant que facteur déclenchant.

Ce facteur déclenchant est représenté par une accélération maximale du sol et/ou un nombre de cycles de charge équivalents.

\* Les sols liquéfiables sont lâches, peu contraints et saturés en eau. Les règles PS françaises proposent des critères d'identification de tels sols :

- par méthodes qualitatives (analogie de faciès géologiques avec des formations s'étant déjà liquéfiées sous action sismique) ; les critères sont liés à la lithologie, l'âge des formations et la piézométrie ; ne s'appuyant pas sur les caractéristiques mécaniques des dépôts, ces méthodes ne sont qu'une première estimation de la potentialité de liquéfaction ;
- par méthodes quantitatives, beaucoup plus coûteuses, exploitant les propriétés mécaniques des sols (saturation, granulométrie, liquidité, plasticité) qu'il faut obtenir lors de tests en laboratoire et essais in situ ; elles consistent à calculer un coefficient de sécurité égal au rapport, à une profondeur donnée, entre la résistance au cisaillement cyclique et la contrainte de cisaillement engendrée par le séisme.

La profondeur des sols liquéfiables est une donnée extrêmement importante pour rechercher des solutions de fondations appropriées. C'est un problème à traiter au cas par cas, en fonction du projet considéré.

\* L'occurrence d'un mouvement de terrain résulte de la conjonction dans l'espace et dans le temps de facteurs permanents (lithologie, morphologie, propriétés mécaniques des terrains, etc.) et de facteurs déclenchants (séisme, pluviométrie, action anthropique).

La prise en compte de l'action sismique dans l'occurrence de mouvements de terrain peut aller de la simple analyse pseudo-statique (calcul d'un coefficient de sécurité fonction de la pente, des caractéristiques mécaniques des terrain, de l'hydrogéologie et d'un coefficient sismique forfaitaire relié à l'aléa), à la modélisation par éléments finis si les données et moyens financiers le permettent.

Les recherches pour développer des méthodes fiables et de coût raisonnable d'évaluation et de cartographie de l'aléa mouvements de terrain sous action sismique doivent être encouragées.

En conclusion, il faut souligner qu'il existe actuellement une disproportion entre la rigueur de la démarche justifiant la prise en compte de l'aléa sismique régional et les principes de cartographie de l'aléa sismique local, qui n'explicitent pas les probabilités associées à l'occurrence des effets induits ou même aux amplifications du mouvement vibratoire du sol. L'approche, pour l'évaluation de l'aléa sismique local, est déterministe et maximaliste. Sa traduction réglementaire mériterait donc la formulation de critères de prise en compte homogènes à l'échelle nationale, pour les ouvrages à risque normal.

### 2.2.3. Différents types de zonage sismique

Les études d'aléa sismique, lorsqu'elles ne sont pas propres à un site ou un projet particulier, débouchent généralement sur une représentation cartographique qualifiée de "zonage sismique". Le tableau 1 rappelle les différents types de zonage sismique dont il faut bien saisir les différences d'échelle, de signification et de destination ou d'utilisation.

## 2.3. ETAT DES DONNEES EN FRANCE

### 2.3.1. Connaissance de la sismicité

♦ Des progrès importants ont été accomplis dans le domaine de la sismicité instrumentale (cf. chapitre 3) avec les réseaux nationaux du LDG/CEA et de l'INSU (réseau RENASS), et le développement de plusieurs réseaux régionaux denses. On dispose ainsi d'une trentaine d'années de données fiables sur le réseau national et d'une dizaine d'années sur quelques réseaux régionaux.

♦ Au plan de la sismicité historique, la base de données informatisée SIRENE et la banque documentaire associée (en cours d'archivage sur CD-ROM), sont maintenant des outils rodés et entretenus régulièrement dans le cadre d'un contrat tripartite entre le BRGM, l'IPSN et EDF. Il importe que le financement public de cet outil essentiel reste assuré.

Les enquêtes macrosismiques sur les séismes actuels affectant le territoire métropolitain sont à nouveau assurées par le Bureau central sismologique français (E.O.P.G.S. de Strasbourg) depuis 1986. Mais c'est une activité mal soutenue financièrement et dont la mise en oeuvre pose des problèmes d'organisation.

♦ Les études de paléosismicité en France ont été initiées sous l'impulsion de plusieurs organismes (IPSN, GEOTER, EDF et BRGM) et laboratoires universitaires (Montpellier, Orsay, Chambéry, etc.). Elles ont déjà fourni des résultats prometteurs et fondamentaux dans des régions où aucune trace d'activité sismique historique ni instrumentale n'est connue. Elles demandent encore des développements importants :

- au plan des recherches sur la quantification des phénomènes (thèses en cours),
- au plan de la multiplication des sites d'étude.

TYPE	ECHELLE ET EMPRISE	OBJET	UTILISATION APPLICATIONS	EXEMPLE
ZONAGE "MACROSISMIQUE"	Petite 1/1 000 000 à 1/2 500 000 territoire national	Prise en compte forfaitaire de l'aléa sismique régional  (paramètres significatifs par rapport à la durée de vie des ouvrages)	Correspondance entre zones et valeurs nominales de l'action sismique — dimensionnement des ouvrages à risque normal (règles PS)	Nouveau zonage sismique de la France (1986)  décret 91-461 du 14 mai 1991
ZONAGE "SISMOTECTONIQUE"	Moyenne 1/250 000 à 1/1 000 000 région (ou pays)	Prise en compte déterministe de l'aléa sismique régional : séismes maximaux vraisemblables associés à des structures sismogènes	Définition site par site d'un niveau d'agression (ex: SMHV, SMS) — dimensionnement d'installations à risque spécial	Application de la règle fondamentale de sûreté RFS I-2c  (nucléaire)
MICROZONAGE  SISMIQUE	Grande 1/5 000 à 1/10 000 commune(s)	Prise en compte de l'aléa sismique local	- amplification du mouvement vibratoire (effets de site)  - ruptures et déplacements du sol (effets induits) — ♦ choix du site ♦ dimensionnement (en référence aux règles PS)	Plans d'exposition aux risques  (P.E.R.)

Tableau 1 - Différents types de zonage sismique

### 2.3.2. Données néotectoniques

Un inventaire exhaustif a été entrepris :

- d'une part sous la coordination de l'IPSN, en association avec la société GEOTER et l'USTL de Montpellier, dans le cadre d'un programme lancé en 1986 et qui a abouti à un mémoire de la Société géologique de France publié en 1993,
- d'autre part par le BRGM, avec la constitution depuis 1993, d'une banque documentaire et d'une base de données néotectoniques, dans le cadre de son activité de service public en risques naturels.

De nombreux travaux sont engagés régulièrement par des laboratoires universitaires et des organismes de recherche. Il est essentiel de pouvoir en centraliser les résultats et de tenir à jour la base de données précitée.

Des approches nouvelles, telle la morphotectonique quantitative développée par le laboratoire de tectonique de l'Institut de Physique du Globe de Paris doivent également être encouragées.

### 2.3.3. Etudes sismotectoniques

La première carte sismotectonique de la France, résultat d'un projet lancé en 1975 par le BRGM avec l'appui du CEA, d'EDF et du SCSIN, a été publiée en 1981. C'est aujourd'hui, un document dépassé à bien des égards mais qui marque l'état des connaissances à cette date.

Le programme mentionné au paragraphe précédent, sous la coordination de l'IPSN avec la collaboration de GEOTER, de l'USTL et de l'IPG de Strasbourg a donné lieu à la nouvelle publication, en 1993, d'une carte de la tectonique actuelle et récente de la France et des régions limitrophes à 1/1 000 000, accompagnée d'un atlas de 23 cartes de base présentant une synthèse exhaustive des connaissances sur la structure et la dynamique récente et actuelle de la croûte, et enfin d'un zonage sismotectonique. Ce zonage n'est pas une carte d'aléa sismique mais s'attache à établir une typologie des déformations récentes et actuelles et de leur amplitude, ainsi que de la sismicité associée.

Enfin, le BRGM, en s'appuyant sur les études sismotectoniques régionales effectuées depuis 1986 pour répondre aux besoins des DRIRE, prépare actuellement une synthèse à l'échelle nationale devant déboucher sur un zonage des unités sismotectoniques qui soit le pendant, pour les ouvrages à risque spécial et la réglementation parasismique qui leur est propre, du zonage sismique de la France publié en 1986 pour l'application des règles parasismiques de construction destinées aux ouvrages à risque normal.

### 2.3.4. Evaluation de l'aléa régional

♦ Aucune étude de synthèse à l'échelle nationale n'a encore été publiée. Des études probabilistes ont été effectuées sur le Sud-Est de la France, au début des années 80, respectivement par EDF, le BRGM et le CEA/IPSN. L'IPSN a prolongé les recherches correspondantes mais les résultats n'en sont pas encore finalisés car ils doivent intégrer d'une part, les progrès dans l'identification des sources sismiques résultant de la synthèse sismotectonique préparée sous la coordination du même organisme, et d'autre part, les résultats relatifs à l'importance et aux périodes de retour des séismes majeurs que fournissent les études de paléosismicité.

Les méthodes d'évaluation probabiliste de l'aléa sismique ont considérablement évolué au cours de la dernière décennie, notamment aux Etats-Unis. Il est hautement souhaitable qu'une étude globale soit finalisée à l'échelle de la France, en intégrant les acquis récents tant au plan des connaissances sismotectoniques que des moyens méthodologiques. Il est rappelé que l'intérêt de cette approche est de rendre aussi explicites que possible les arbitrages pratiqués lors de la prise en compte du risque. Elle permet, en effet, d'exprimer le risque, in fine, comme une espérance mathématique de pertes dans une région ou sur un site donnés et au cours d'une période de référence. Elle rend ainsi plus facile la comparaison avec d'autres risques naturels ou technologiques et celle des politiques de prévention qui en découlent.

♦ Le zonage sismique de la France pour l'application des règles parasismiques de construction destinées aux ouvrages courants, publié en 1986 et dont l'application vient d'être officialisée par le décret du 14 mai 1991 de la loi de juillet 87, n'est pas une carte d'aléa sismique.

Il traduit simplement la façon dont la Puissance Publique prend en compte l'aléa sismique pour satisfaire les objectifs de protection parasismique des ouvrages à risque normal. Il s'appuie sur un certain nombre de cartes de synthèse relatives à la sismicité historique qui sont autant de représentations partielles de l'aléa sismique (intensités maximales vraisemblablement atteintes historiquement, fréquence observée historiquement de secousses ayant atteint ou dépassé différents seuils d'intensité, etc.). Etabli en 1985 par le BRGM, selon une méthodologie qui a été développée spécialement à cette fin et présentée de façon explicite dans un ouvrage édité par la DRM, il est par essence, révisable en fonction d'une évolution des connaissances. De même que le zonage établi pour les règles PS 69 est apparu obsolète au début des années 80, le zonage de 1985 devra être repris, même s'il n'est pas fondamentalement remis en cause.

Aux Antilles (Guadeloupe et Martinique), un vaste programme pour l'évaluation de l'aléa sismique régional et local a été lancé dès 1986, sous la coordination du BRGM, avec le soutien financier des Conseils Régionaux de Guadeloupe et Martinique et de la Délégation aux risques majeurs. Il est relayé, depuis 1990, par de nombreuses études et réalisations pratiques visant à intégrer la prise en compte du risque sismique dans une véritable politique de prévention, notamment dans le cadre de la DIPCEN.

Cette première phase qui s'est échelonnée de 1986 à 1990, a débouché sur la publication de deux volumineux rapports (un pour chaque région) et de plus d'une douzaine de rapports annexes. Elle a bénéficié, sous le pilotage du BRGM, de la collaboration de la société GEOTECSIS et de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier), de l'Institut de Physique du Globe de Paris et des observatoires de la Guadeloupe et de la Martinique, et de l'Université des Antilles et de la Guyane. Ses principaux résultats concernent :

- une synthèse du cadre géodynamique de l'arc des Petites Antilles ;
- un bilan du contexte structural (à terre et sur les marges) et de la néotectonique, avec de nombreux travaux de terrain ;
- une mise à jour et une synthèse des données de sismicité historique et instrumentale, avec une révision importante des séismes majeurs ayant affecté ces îles, conduisant à un progrès considérable dans l'identification des sources sismiques menaçant les Antilles françaises ;
- le calcul des mouvements sismiques de référence associés à ces sources, le redéploiement du réseau accélérométrique installé en 1977 et l'exploitation des quelques données qu'il a fournies ;
- une première approche globale, sur chaque île et à l'échelle du 1/100 000, des effets induits pouvant être associés à des séismes majeurs, à travers un zonage géotechnique sommaire ;

- le microzonage sismique à 1/5 000 d'un secteur de Pointe-à-Pitre et à 1/10 000 d'une partie de Fort-de-France ;
- une série de recommandations pratiques pouvant en être tirées en matière de construction et d'aménagement, notamment au plan :
  - \* de l'adaptation des règles parasismiques de construction à ces données nouvelles (modulation du zonage pour leur application, spectres de réponse standards reflétant les spécificités des sources sismiques),
  - \* de la définition de priorités pour des études de microzonage sismique,
  - \* de la prise en compte des microzonages là où ils ont été effectués dans les documents d'aménagement et d'urbanisme,
  - \* enfin, de l'identification de secteurs "critiques" en raison du bâti existant particulièrement vulnérable et de propositions d'actions de sensibilisation, information, éducation, etc.

### 2.3.5. Evaluation de l'aléa local

En France, l'évaluation de l'aléa local se fait soit sur un site donné, dans le cadre réglementaire de la prise en compte du risque sismique pour les ouvrages "à risque spécial", où il s'agit de définir les mouvements sismiques de référence utilisables pour le dimensionnement de structures nouvelles ou la réhabilitation de structures anciennes, soit dans le cadre de la réalisation des PER sismiques ou encore à des fins de recherche scientifique.

Le point sur la réalisation des PER en France établi par la DRM, fin 1992, fait état d'un peu moins d'une centaine de PER sismiques prescrits sur l'ensemble des communes métropolitaines, dont seulement 35 ont été approuvés.

Dans les DOM-TOM, deux microzonages sismiques ont été réalisés à Fort-de-France en Martinique et à Pointe-à-Pitre en Guadeloupe, dans le cadre du programme d'étude et de prévention du risque sismique aux Petites Antilles décrit au paragraphe précédent. Depuis 1990, grâce à une nouvelle convention de recherche avec les régions Guadeloupe et Martinique d'une part (essentiellement consacrée à la méthodologie et à la mise en oeuvre de la cartographie de l'aléa mouvements de terrain), de cofinancements du Conseil Général de la Guadeloupe d'autre part, le BRGM a poursuivi et étendu les microzonages sismiques de Pointe-à-Pitre et Fort-de-France sur les communes limitrophes. Dans le cadre des programmes DPCN-Caraïbes, de nouvelles techniques de microzonage sismique s'appuyant sur l'utilisation de systèmes d'informations géographiques sont mises en oeuvre et permettront, par le croisement aux données relatives à la vulnérabilité qui sont acquises parallèlement, de construire de véritables "scénarios de risque". Le même type de programme est engagé, dans le cadre du programme DPCN-Méditerranée, sur la ville de Nice, le tout sur financement du Ministère de l'Environnement.

En France métropolitaine particulièrement, l'état des réalisations des études de microzonage est donc faible en regard de la volonté de l'État, affichée dès 1982, d'étendre les PER sismiques à de nombreuses communes situées dans les zones les plus sismiques du territoire.

Un effort important a pourtant été fait pour développer des recherches sur les méthodologies de microzonage sismique, telles qu'elles ont été décrites en 2.2.2, notamment par le CETE-Méditerranée, l'IRIGM de Grenoble et le BRGM..

L'AFPS a publié en novembre 1993, pour le compte de la Délégation aux risques majeurs, le premier guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique, qui transcrit les résultats de ces recherches en termes de travaux et études pouvant être mis en oeuvre, dans la pratique, en fonction des objectifs visés et des moyens disponibles.

Il est fondamental que des études de microzonage sismique soient entreprises, le plus rapidement possible, dans les secteurs à plus haut risque sismique, c'est-à-dire justifiant :

- d'une part, d'un niveau élevé d'éléments à risque : concentration urbaine et/ou industrielle ou de problèmes particuliers de vulnérabilité (cas des coeurs des vieilles villes avec patrimoine architectural, par exemple) ;
- d'autre part, d'un aléa local diversifié et pouvant se situer nettement au dessus du niveau moyen de l'aléa régional, en raison d'effets de sites et/ou d'effets induits significatifs.

Pour cela, un document tel le guide méthodologique précité est indispensable et doit être tenu à jour régulièrement en fonction des progrès techniques. Il devrait donner lieu à un véritable cahier des charges certifié par l'Administration et diffusé très largement, afin de permettre à un maximum d'organismes compétents d'intervenir pour la réalisation de ces microzonages mais dans un cadre cohérent et en produisant des documents homogènes, de qualité égale et dont il faudrait instaurer une procédure de validation.

La réflexion en cours sur les futurs plans de prévention des risques (P.P.R.) apparaît comme une excellente opportunité en ce sens.

#### **2.4. RECAPITULATIF DES PROGRES EFFECTUES ET DES RECHERCHES PRIORITAIRES RECOMMANDEES**

Il s'appuie sur un bilan des réalisations par rapport aux recommandations formulées dans le rapport à l'Académie des Sciences en 1982 :

- ♦ études détaillées des séismes majeurs actuels :

Des missions post-séismes sont désormais organisées systématiquement sous l'égide de l'AFPS. Il faut les poursuivre.

- ♦ sites pilotes d'étude de sismogenèse et de prédiction sismique : cf. chapitres 3 et 4
- ♦ sismicité instrumentale et réseaux de surveillance : cf. chapitre 3
- ♦ sismicité historique et macrosismicité :

La base de données SIRENE est maintenant un outil rodé ; la pérennité de son entretien et de sa mise à jour doit être assurée. De gros efforts ont été accomplis pour développer les études trans-frontalières, notamment dans le cadre de programmes de recherche de la CCE ; il faut en finaliser les résultats. Les enquêtes macrosismiques sont désormais à la charge du BCSF à Strasbourg ; des moyens suffisants (financiers et humains) doivent leur être consacrés.

♦ études néotectoniques et paléosismicité :

Des progrès considérables ont été accomplis en matière d'inventaire bibliographique des indices. Les bases de données en résultant doivent pouvoir être entretenues et enrichies régulièrement. Ces données doivent être validées par des contrôles sur le terrain.

Enfin les études de paléosismicité doivent être généralisées sur tous les sites favorables identifiés. Parallèlement aux observations de terrain, un effort est indispensable pour améliorer la quantification des phénomènes (études statistiques intégrant des données étrangères, modélisations). C'est une clé essentielle pour la prise en compte des événements majeurs dans l'évaluation du risque sismique.

♦ synthèse sismotectonique :

Les publications récentes et en cours, qui mettent considérablement à jour l'état des connaissances affiché par la carte sismotectonique de la France de 1981, doivent être prolongées par une identification plus fine des failles sismogènes et des unités sismotectoniques et la détermination de leur fonctionnement, en recherchant un consensus entre les différentes équipes spécialisées concernées.

♦ évaluation de l'aléa régional :

Les résultats des thèses récentes et en cours sur la modélisation des sources sismiques et leur rayonnement, la propagation en milieu hétérogène et la réponse des sites doivent être exploités à des fins opérationnelles d'amélioration du calcul des mouvements forts.

Un nouvel essor doit être donné aux approches probabilistes de l'aléa sismique et une évaluation globale à l'échelle du territoire national doit être finalisée.

Il faut préserver la possibilité de réviser à moyen terme le zonage sismique de la France pour l'application des règles parasismiques de construction, en fonction des progrès effectués depuis son établissement en 1985.

♦ évaluation de l'aléa local :

Les recherches méthodologiques et la validation expérimentale de techniques prometteuses, telles les fonctions de Green empiriques ou l'enregistrement du bruit de fond, doivent être soutenues avec les moyens nécessaires (investissement en matériel notamment) pour passer dans la pratique opérationnelle des études de microzonage sismique.

De même le calage expérimental des méthodes théoriques et modèles numériques pour la quantification des effets de sites, topographiques en particulier, est à développer.

Par ailleurs, l'introduction des systèmes d'informations géographiques comme outil de base de la réalisation des microzonages sismiques est à généraliser. C'est la seule garantie de structurer correctement les données de base utilisées, de garder la trace des traitements effectués, d'homogénéiser les résultats (qualitativement et quantitativement) et leur présentation, de pouvoir mettre à jour facilement la cartographie correspondante en fonction de données nouvelles, enfin de pouvoir croiser ces informations relatives à l'aléa à celles concernant la vulnérabilité sous toutes ses formes et donc de déboucher sur une approche du risque. C'est également le moyen d'explicitier les fondements d'une réglementation et de mesures à développer pour la prévention du risque sismique à l'échelle locale et donc de les faire accepter plus facilement.

Enfin, il faudrait rapidement :

- établir un cahier des charges, à l'échelle nationale, pour la réalisation des études de microzonage sismique devant s'inscrire dans le cadre de la cartographie réglementaire des risques naturels, par exemple à partir du guide méthodologique publié par l'AFPS,
- engager un plan de réalisation de microzonages sismiques dans les secteurs à plus haut risque sismique,
- sensibiliser les cadres de l'Administration intervenant comme services prescripteurs et/ou instructeurs de programmes de cartographie des risques naturels, à la qualité exigible des études de microzonage sismique afin d'éviter l'hétérogénéité actuelle des documents produits pour la réalisation des PER.

La mise en place des futurs P.P.R. est une opportunité à saisir en ce sens.

### 3. SURVEILLANCE SISMOLOGIQUE ET DONNEES EXPERIMENTALES

#### 3.1. INTRODUCTION

Toute politique de prévention du risque sismique passe par l'évaluation préalable de l'aléa, pour laquelle les données instrumentales issues des outils d'observation et de surveillance sismiques contribuent à un double objectif:

- la localisation et la caractérisation des sources sismiques,
- la définition des mouvements sismiques contre lesquels il faut se prémunir en matière de protection parasismique.

Actuellement, le premier objectif est en partie atteint, grâce notamment aux deux réseaux sismologiques nationaux dont les données instrumentales viennent compléter utilement les données de sismicité historique ou de paléosismicité. L'extension et la multiplication des réseaux locaux sont par contre souhaitables, dans les régions les plus actives car eux seuls permettent une caractérisation suffisamment fine des sources sismiques.

En revanche, le second objectif ne pourra être atteint de manière satisfaisante que lorsque la France se sera équipée de réseaux accélérométriques. En effet, si notre pays s'est doté depuis une trentaine d'années d'un code de construction parasismique, puis d'une réglementation concernant aussi bien les ouvrages à "risque normal" qu'à "risque spécial", la détermination des niveaux de sollicitation sismique réglementaires demeure malaisée, en raison du manque total de données accélérométriques propres à la France.

Par ailleurs, la surveillance sismologique, si possible en temps réel, doit satisfaire les besoins propres à la sécurité civile :

- information instantanée sur le lieu et l'importance d'un séisme susceptible d'avoir occasionné des dégâts et fait des victimes,
- suivi d'une "crise sismique", c'est-à-dire de l'évolution quotidienne, voire horaire, de l'activité d'une zone, lors d'un essaim de secousses ou d'un événement majeur accompagné de nombreuses répliques.

Le premier type d'informations doit être adressé aux autorités compétentes pour une organisation aussi immédiate que possible des secours nécessaires. Il suppose une astreinte de la part des organismes chargés de la collecte et de l'exploitation des données instrumentales.

Le second doit pouvoir répondre à l'attente d'un pronostic, voire d'une alerte. Il rejoint en cela des objectifs de prédiction sismique qui sont discutés au chapitre 4.

Le présent chapitre concerne plus particulièrement l'inventaire des réseaux actuellement opérationnels, en s'attachant à décrire pour chacun d'eux les limites et les développements souhaités dans l'optique d'une meilleure prévention du risque sismique en France.

La France est un pays à sismicité modérée, où se produisent de temps à autre des séismes destructeurs. Elle a en effet connu historiquement quelques séismes destructeurs localisés sur le territoire métropolitain ou dans les régions limitrophes (Bâle en 1356, Catalogne en 1428, arrière pays niçois en 1564, Bigorre en 1660 et 1750, Vosges en 1682, Mer Ligure en 1887, Lambesc en 1909, etc.).

Depuis l'installation des réseaux instrumentaux en 1962, on dénombre sur le territoire métropolitain une moyenne annuelle d'une vingtaine de séismes de magnitude supérieure à 3.5, dont les plus importants (Mer Ligure en 1963 : M=5,7, Arette en 1967 : M=5.5, Oléron en 1972 : M=5.2, vallée d'Ossau en 1982 : M=5.1, Sierentz en 1980 : M=4.9, Bigorre en 1989 : M=4.7) ont été largement ressentis, avec parfois des dommages aux constructions.

Ces événements justifient ainsi pleinement l'existence et le développement des réseaux de surveillance sismique. Il convient de distinguer les réseaux de surveillance sismique conventionnels, destinés à localiser les sources sismiques, des réseaux accélérométriques dont les données sont plus particulièrement exploitées en sismologie de l'ingénieur.

## **3.2. RESEAUX DE SURVEILLANCE SISMIQUE**

La surveillance de l'activité sismique du territoire métropolitain est assurée en temps réel par deux réseaux gérés par deux organismes nationaux : le laboratoire de détection géophysique du commissariat à l'énergie atomique (LDG/CEA) et l'institut national des sciences de l'Univers (INSU).

Ces deux réseaux complémentaires, fournissent au Bureau Central Sismologique Français (BCSF), dans un délai généralement inférieur à une heure, les principaux paramètres des séismes importants survenant en France ou dans les régions frontalières: temps origine, coordonnées, magnitude.

Ces informations sont également transmises dans les meilleurs délais à la Direction de la Sécurité Civile, à la Délégation aux Risques Majeurs, aux divers laboratoires et instituts de sismologie français et étrangers, et à diverses agences de presse.

Ils ont donc un rôle de surveillance, mais aussi d'information.

### **3.2.1. Réseaux nationaux et régionaux métropolitains. Centralisation des données**

Les données instrumentales proviennent d'un peu plus d'une centaine de stations sismologiques groupées essentiellement en deux réseaux :

1) le réseau national du CEA/LDG, créé en 1962 à des fins stratégiques militaires (enregistrement des explosions nucléaires), est actuellement constitué d'une trentaine de stations sismologiques homogènes, réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain, et dont les données sont transmises en temps réel par télémesure au centre de traitement de Bruyères-le-Chatel (Essonne), où elles sont enregistrées en continu sous forme numérique ;

2) le réseau national de surveillance sismique RéNaSS de l'INSU, de création plus récente, est actuellement constitué d'une centaine de stations sismologiques. Il s'appuie également sur un ensemble de sept réseaux régionaux et de stations isolées dont les données sont transmises en

temps quasi réel au Bureau Central Sismologique Français (BCSF), situé à l'Ecole et Observatoire de Physique du Globe de Strasbourg (EOPGS).

Les principaux réseaux régionaux sont les suivants : Fossé Rhéan (13 stations), Alpes Maritimes (8 stations), Provence (8 stations), Pyrénées Orientales (10 stations), Arette (9 stations), Auvergne (8 stations), Alpes (3 stations), auxquels il faut ajouter le réseau SISMALP développé par le LGIT-Grenoble, qui comporte une quarantaine de stations sismologiques implantées dans des sites alpins et qui constitue actuellement l'un des réseaux régionaux les plus performants d'Europe.

L'ensemble des données provenant de ces réseaux est archivé et publié par le BCSF, créé en 1921 par décret. Son rôle est essentiellement de centraliser et analyser en temps différé les données de chaque séisme affectant le territoire français.

Le BCSF centralise deux types de données:

- 1) les données instrumentales issues des réseaux RENASS et CEA/LDG (et de celui des Antilles) ;
- 2) les données macrosismiques issues d'enquêtes sur le terrain en liaison avec le BRGM et les services départementaux de la Protection Civile. Ces enquêtes sont menées pour tout séisme de magnitude supérieure à 3.5.

### **3.2.2. Réseaux de surveillance dans les DOM-TOM**

Deux réseaux répondant à des objectifs très différents peuvent être signalés :

- 1) celui des Antilles françaises, région qui est considérée comme la plus sismique du territoire national ;
- 2) celui de la Polynésie française implanté pour des raisons stratégiques et de sécurité liées au centre d'expérimentation nucléaire du Pacifique, qui ne sera pas détaillé ici.

Le réseau régional des Petites Antilles, est constitué depuis 1978 de 11 stations sismologiques réparties sur les îles d'Antigua (1 station), de la Guadeloupe et ses dépendances (5 stations), de la Dominique (2 stations) et de la Martinique (4 stations). La maintenance du réseau et la centralisation des données sont effectuées par les observatoires de la Montagne Pelée en Martinique et de la Soufrière en Guadeloupe, avant communication des données au BCSF.

Par ailleurs, à des fins de surveillance volcanologique, la direction des observatoires de l'INSU et le laboratoire de sismologie de l'Institut de Physique du Globe de Paris gèrent des réseaux locaux de "courte portée", implantés sur les principaux appareils volcaniques actifs français et entretenus par les observatoires volcanologiques correspondants (La Soufrière de Guadeloupe, la Montagne Pelée de Martinique, La Fournaise de la Réunion, etc.).

### **3.2.3. Conclusion**

Les réseaux assurant actuellement la surveillance sismique du territoire français (réseau du CEA/LDG et réseau RENASS de l'INSU s'appuyant sur les réseaux régionaux) permettent en gros de détecter tout évènement de magnitude supérieure à 1.5 et de localiser tout évènement de magnitude supérieure à 2.5.

Cependant, en raison de la répartition des stations sismologiques, ces seuils de détection et de localisation et, a fortiori, la précision sur les paramètres focaux, sont très variables d'une région à l'autre. Les performances décroissent considérablement dans les régions côtières et frontalières où la couverture azimutale des foyers par les stations est mauvaise. Pour les régions frontalières, le BCSF assure toutefois la collecte des données des réseaux étrangers avant de procéder aux calculs.

L'incertitude sur la localisation épacentrale peut varier de la dizaine de kilomètres (voire plus), pour les séismes de faible magnitude (inférieure à 3.5), à quelques kilomètres pour les séismes de magnitude plus élevée.

Quant à la profondeur focale, les réseaux nationaux ne peuvent en donner généralement qu'un ordre de grandeur, même si les bulletins sismologiques affichent une précision kilométrique illusoire.

Le seul moyen d'améliorer la précision de la localisation est d'augmenter la densité des stations sismologiques. A titre d'exemple, sur la région alpine, en adjoignant aux données des 44 stations du réseau SISMALP, celles de la douzaine de stations du réseau de Gênes, le laboratoire de géophysique interne et tectonophysique de Grenoble est en mesure de localiser les hypocentres des séismes alpins de magnitude supérieure à 2, avec une précision de l'ordre du kilomètre si le séisme s'est produit à l'intérieur du réseau.

Une telle précision autorise ainsi une meilleure reconnaissance des accidents sismogènes et de l'activité qui les caractérise. L'augmentation du nombre de stations des réseaux sismologiques français apparaît donc fondamentale à l'avenir pour améliorer notre connaissance de l'aléa sismique.

Les réseaux nationaux permanents peuvent satisfaire les objectifs d'une surveillance globale du territoire et fournir les éléments attendus pour les événements les plus forts. Seuls les réseaux régionaux et locaux peuvent, par contre, procurer des données suffisamment fiables et précises pour identifier et caractériser les failles sismogènes. Ces réseaux régionaux et locaux ne justifient pas forcément, par contre, une implantation permanente. Certains objectifs qui leur sont assignés peuvent être atteints au cours de campagnes expérimentales de durée variable (quelques mois à plusieurs années). Leur conception, en termes de capteurs et de transmission des données (donc de coût), peut être notablement différente de celle des réseaux fixes permanents de portée nationale. Le développement des réseaux régionaux et locaux, temporaires ou non, est une priorité pour progresser efficacement dans la reconnaissance des sources sismiques en France.

### **3.3. RESEAUX ACCELEROMETRIQUES**

En France, la détermination des mouvements sismiques de référence (sous forme de spectres de réponse élastiques) souffre de l'absence quasi-totale d'enregistrements (accélérogrammes) adaptés pour leur calcul. De ce fait, le recours à des méthodes statistiques exploitant des enregistrements provenant de pays sismiquement plus actifs ou à des modélisations numériques est obligatoire mais demande à être validé par des données spécifiquement françaises.

En effet, les capteurs équipant les réseaux actuels de surveillance sismique du territoire (décrits ci-dessus) saturent dans la région épacentrale, dès que la magnitude dépasse 3 à 3.5. Ainsi, la forme du signal, élément essentiel pour l'évaluation de l'aléa sismique, est complètement perdue.

A part quelques cas localisés, seuls les accéléromètres installés dans les centrales nucléaires permettent d'enregistrer cette forme du signal, mais ils présentent deux faiblesses majeures :

- d'une part ils sont très peu sensibles et ne déclenchent au mieux que pour des séismes de magnitude supérieure à 4 à condition qu'ils soient très proches,
- d'autre part, leur répartition liée à celle des installations nucléaires en France ne coïncide pas, a priori, avec les régions les plus sismiques de France (Sud-Est, Pyrénées, Alsace), à de rares exceptions près.

Dans ces conditions, si un séisme destructeur survenait en France, il n'y aurait que très peu de chances de recueillir des mouvements forts et probablement pas dans la zone épicertrale. Il ne pourrait donc en résulter aucun progrès dans l'estimation quantitative de l'aléa sismique.

Il est donc évident, pour tous les spécialistes de génie parasismique (sismologues et ingénieurs de structures) qu'il manque en France un réseau d'accéléromètres capable d'enregistrer des mouvements forts du sol sans saturer.

Dès 1989, un groupe composé d'experts du BRGM, du LCPC, de L'IRIGM, du LRPC Nice et du CETE Méditerranée a établi, pour le compte de la DRM, des propositions pour un réseau accélérométrique permanent en France.

Il a mis en évidence le retard considérable de la France par rapport à ses voisins européens dans ce domaine et a conclu non seulement sur l'urgence de la mise en place d'un réseau accélérométrique permanent français en "champ libre", destiné à l'enregistrement des mouvements forts, mais aussi sur la nécessité de développer d'une part un réseau accélérométrique mobile sensible, permettant d'intervenir rapidement après un séisme important ou de réaliser des études d'aléa sismique local, et d'autre part un réseau accélérométrique permanent "structures", capable d'apporter rapidement de nombreuses données sur le comportement dynamique du bâti existant dans les régions les plus sismiques.

### 3.3.1. Réseau permanent français actuel

Ce réseau est actuellement composé d'un peu plus d'une trentaine d'accéléromètres installés pour la plupart sur les sites nucléaires et du CEA et d'EDF, le reste des appareils étant sous la responsabilité des universitaires.

Il s'agit en grande partie d'appareils peu sensibles, ne déclenchant que pour des accélérations du sol supérieures à 0.01 g, ce qui correspond approximativement à un séisme de magnitude 4 survenant à moins de 15 kilomètres du site, ou à un séisme de magnitude 5 à moins de 30 km, ou encore à un séisme de magnitude 6 à moins de 50 kilomètres.

Ainsi le réseau CEA-EDF n'a fourni jusque là que deux enregistrements: le premier lors du séisme de Sierentz en 1980 ( $M=4.7$ ) qui a déclenché l'accéléromètre SMA1 de la centrale de Fessenheim, le second lors du séisme de Briançon en 1991 ( $M=4.7$ ) qui a déclenché l'accéléromètre de type SSA1 de la station de Fouillouze du CEA. Le nombre d'enregistrements est donc très faible en regard de la dizaine de séismes de magnitude supérieure ou égale à 4 survenant chaque année en France.

Les accéléromètres beaucoup plus sensibles, installés par l'IPGP dans les Pyrénées, ont donné lieu depuis quelques années à plusieurs dizaines d'enregistrements correspondant essentiellement à des séismes de faible magnitude et exploités à des fins purement sismologiques.

Par ailleurs, le réseau des Petites Antilles géré par le BRGM depuis 1978, comprenant une dizaine d'accéléromètres peu sensibles de type SMA1 a fourni 4 enregistrements lors du séisme de Montserrat en 1985, mettant en évidence un effet de site notable sur la ville de Pointe à Pitre. Ce réseau a été restructuré en 1993 et dispose désormais de 5 appareils neufs de type SMACH SM2 plus sensibles que les SMA1, permettant d'espérer quelques enregistrements annuels.

### **3.3.2. Evolution récente des réseaux accélérométriques français et projets**

Sous l'impulsion des spécialistes du génie parasismique et de l'institut des sciences de l'univers (INSU), plusieurs projets ont pu se concrétiser depuis le début des années 1990.

#### **3.3.2.1 Réseau permanent**

L'objectif majeur de ce réseau, issu du rapport effectué par un comité d'experts composé de chercheurs et d'ingénieurs mis en place par la DRM, est de fournir à la communauté scientifique les données permettant à la fois de mieux caractériser les mouvements du sol lors de forts séismes survenant en France et de justifier, par des données propres au contexte français, les mouvements sismiques de référence à prendre en compte pour le dimensionnement des structures dans le cadre de l'application de la réglementation.

A cette fin, il doit permettre:

- d'enregistrer des mouvements forts sans saturer jusqu'à 1g, tout en déclenchant sur des mouvements faibles ;
- d'étudier le mouvement du sol dans toute la bande de fréquence utile en génie parasismique (0.1-50 Hz), en particulier pour :
  - \* la validation des méthodes actuelles (empirico-statistiques, ou modélisations numériques) de calcul des mouvements forts du sol ;
  - \* la caractérisation des sources sismiques ;
  - \* la détermination de lois d'atténuation en fonction de la distance ;
  - \* l'amélioration des lois d'échelle moment sismique-magnitude.

Il doit également couvrir toutes les zones sismiques françaises afin de garantir l'enregistrement de tout séisme significatif affectant le territoire.

Dans sa conception initiale, le réseau devait comporter à terme une centaine de stations accélérométriques réparties en une dizaine de "sous-réseaux" régionaux et nécessiter un budget de plusieurs millions de francs sur 6 ans, qu'il n'a jamais été possible de réunir.

Aussi, a-t-il été décidé en 1993, grâce à un financement de la DRM, de réorienter le projet en une opération pilote destinée à montrer les biens fondés et la faisabilité du réseau français et à soulever les problèmes qui pourraient être rencontrés. Cette opération est menée sous la responsabilité de D. Hatzfeld et de P.Y. Bard du LGIT-Grenoble.

A ce jour, la zone géographique de l'opération pilote, les choix techniques concernant le matériel et les possibilités de coopération entre les divers laboratoires sont pratiquement arrêtés.

La zone géographique devait répondre à plusieurs critères:

- 1) être suffisamment sismique pour fournir un nombre satisfaisant d'enregistrements annuels,
- 2) disposer d'un réseau sismologique assez dense afin d'avoir une localisation précise des sources,
- 3) susciter l'intérêt et la mobilisation du plus grand nombre d'organismes.

La zone retenue, les Alpes du Nord et Maritimes, satisfait assez bien ces critères :

- la sismicité permet d'espérer une centaine d'événements de magnitude supérieure à 2 par an,
- le réseau SISMALP et les réseaux régionaux de Provence, de Cadarache et des Alpes Maritimes permettent une localisation précise des événements,
- plusieurs laboratoires présents régionalement sont concernés et motivés (LGIT-Grenoble, CETE Méditerranée, Institut de Géodynamique de Nice, CEA et IPSN, BRGM).

Concernant le matériel, il paraît indispensable dans cette phase pilote de disposer de capteurs à 6 voies pour coupler sur une même station, accéléromètre et sismomètre, afin d'optimiser la capacité de déclenchement et d'enregistrement. La solution préconisée repose sur le développement par Strasbourg, d'une station accélérométrique bâtie autour d'un micro-ordinateur PC, compatible avec les stations du réseau national RENASS.

L'installation d'une dizaine de stations, programmée dès 1994, sera assurée essentiellement par le LGIT-Grenoble et l'Institut de géodynamique de Nice, avec la collaboration du CETE Méditerranée et l'appui ponctuel de l'IPSN et du BRGM.

### **3.3.2.2 Réseau mobile**

Dès 1989, l'Institut national des sciences de l'univers (INSU), après concertation avec différents organismes spécialisés en génie parasismique, affichait la volonté de se doter d'un réseau accélérométrique mobile. Depuis 1990, grâce à plusieurs sources de financement (INSU, MRT, DRM, IPSN, Région Rhône Alpes, CCE), le réseau mobile qui est doté de 13 stations portables, est placé sous la responsabilité de D. Hatzfeld du LGIT-Grenoble, et est à la disposition de la communauté scientifique française.

Son objectif principal est de permettre l'enregistrement de séismes de magnitudes variées (mouvements faibles et mouvements forts du sol) grâce à une instrumentation de grande dynamique pouvant être déplacée sur un large éventail de sites.

Il doit notamment servir à :

- intervenir après un fort séisme,
- acquérir des données indispensables à la recherche fondamentale (études de la source, de la propagation, de l'anisotropie, etc.),
- fournir des données essentielles de génie parasismique, dans des régions variées, (activité sismique de failles, lois d'atténuation régionales, effets de site, validation des méthodes d'évaluation des mouvements forts par modélisations numériques ou fonctions de Green empiriques, etc.).

Ce réseau a été déployé à une vingtaine de reprises depuis sa création pour des objectifs de recherche fondamentale (source, atténuation, anisotropie), et pour quelques études plus appliquées (effets de site, microzonage sismique) dont les résultats devraient être publiés. Son planning d'utilisation est complet un an à l'avance.

Il est fondamental que ce réseau mobile soit entretenu voire renforcé par de nouveaux accéléromètres.

### 3.3.3. CONCLUSION

En matière d'accélérométrie, la France est en retard par rapport à ses voisins européens.

Le réseau permanent actuel, composé d'appareils peu performants, localisés pour l'essentiel dans des ouvrages stratégiques, ne permet pas d'envisager des progrès satisfaisants en génie parasismique dans les années à venir et ne répond pas à l'attente de la communauté scientifique (chercheurs, sismologues, ingénieurs).

Une étude pilote est actuellement en cours dans les Alpes et devrait se concrétiser, dès 1994, par l'installation du matériel. Il est essentiel que ses résultats soient pris en compte pour que la Puissance Publique mette enfin en oeuvre, à l'échelle nationale, les moyens nécessaires à ce réseau permanent.

Le réseau accélérométrique mobile, qui a déjà prouvé son utilité, constitue un projet à soutenir dans les années à venir.

L'INSU dispose également d'un certain nombre de stations accélérométriques mobiles réparties dans ses divers instituts et laboratoires, qui sont essentiellement utilisées à des fins de recherche fondamentale.

Il conviendrait pour l'avenir de prendre toute la mesure de l'intérêt de tels réseaux, à travers un projet fédérateur, regroupant chercheurs et ingénieurs spécialisés, qui, sans perdre de vue les objectifs scientifiques, devrait s'attacher à améliorer l'évaluation et la prise en compte du risque sismique pour une réduction effective de l'impact socio-économique d'un séisme destructeur dans notre pays.

### 3.4. INVESTISSEMENTS NECESSAIRES

♦ Les réseaux de surveillance sismique bénéficient de budgets de fonctionnement dépendant des tutelles des organismes qui en sont responsables (CEA/LDG, INSU, etc.). Les réseaux locaux et régionaux sont souvent cofinancés par les conseils généraux des départements concernés mais des difficultés surviennent parfois. En effet, l'objectif de surveillance à des fins de protection civile ne relève pas des prérogatives ni des missions de la recherche. En l'absence d'un soutien des services compétents de l'Etat ou des collectivités territoriales, les organismes universitaires ne peuvent assurer le fonctionnement de tels réseaux.

Il paraît souhaitable qu'un recensement exhaustif des besoins soit effectué pour les réseaux locaux et régionaux et qu'une politique budgétaire claire soit mise en place pour garantir leur financement. Elle est subordonnée à la définition du partage des responsabilités en la matière, entre l'Etat et les collectivités.

♦ Les propositions pour l'implantation d'un réseau accélérométrique en France, émises en 1989, étaient accompagnées de coûts qui restent d'actualité.

Ainsi, pour un réseau d'une centaine de stations, réparties en dix sous-réseaux régionaux, permettant de couvrir l'ensemble des zones sismiques du territoire, ces coûts seraient de l'ordre de 100 à 250 KF par station (acquisition et installation du matériel, y compris informatique) et de 20 à 35 KF de fonctionnement (maintenance, prétraitement et stockage des données), par an et par station.

Ces fourchettes sont très larges, car dépendantes du type de matériel choisi (sensibilité des capteurs, performance des enregistreurs) et de la solution retenue pour la transmission des données (télémetrie, réseau téléphonique, ...). Selon les options retenues, cela conduirait, pour la totalité du réseau, à des sommes d'environ 10 MF à 25 MF pour l'équipement (dont l'acquisition pourrait être étalée sur plusieurs années) et d'environ 2 MF à 3,5 MF pour le fonctionnement annuel.

Bien que nécessitant un investissement initial plus important, l'instrumentation numérique très sensible, permettant la télésurveillance et la télétransmission des données, garantit, par rapport à un matériel moins coûteux, moins performant et de maintenance plus difficile, une rentabilité scientifique bien supérieure, qui permettra à court terme une amélioration significative de la prise en compte du risque sismique en France.

Ceci conduit à recommander l'installation progressive du réseau, en commençant par les régions sismiques prioritaires, identifiées en 1989. Sachant que chacune d'elles doit être équipée de 8 à 10 stations, le coût correspondant serait d'environ 2 MF d'investissement et de 300 KF de fonctionnement annuel.

Compte tenu par ailleurs, des sommes mises en jeu, mais aussi des résultats attendus, depuis la recherche scientifique jusqu'aux applications en matière de réglementation parasismique, il serait opportun de rechercher le financement conjoint de plusieurs ministères, des régions et des industriels.

L'opération pilote menée dans le Sud-Est de la France, devrait apporter, d'ici la fin 1994, des éléments techniques et financiers nouveaux qui permettront d'orienter l'évolution future du réseau permanent et d'en apprécier son coût avec plus de précision.

♦ Concernant le réseau accélérométrique mobile, doté actuellement de 13 stations portables, le coût unitaire d'un appareil est d'environ 150 KF, auxquels doivent se rajouter les frais de maintenance, plus ou moins élevés en fonction des conditions climatiques rencontrées sur le terrain et du pourcentage annuel d'utilisation.

Compte tenu de l'intérêt de ce réseau, il paraît fondamental qu'un budget de fonctionnement (comprenant des dépenses de fournitures et des unités d'oeuvre) soit consacré à la maintenance et à la gestion de ce réseau, afin de garantir le suivi technique du matériel et son opérabilité en cas de crise sismique.

Il serait par ailleurs souhaitable, de compléter le réseau actuel, par une dizaine d'appareils, ce qui correspondrait à un investissement d'environ 1,5 MF.

## 4. PREDICTION DES SEISMES ET PREVENTION

### 4.1. INTRODUCTION

La prévision des séismes en France, thème cher aux médias depuis le milieu des années 80, demeure du domaine de la recherche scientifique, qui débute en la matière, et doit être abordé avec toute la sérénité et la rigueur scientifique qui s'imposent pour ce sujet délicat et propice aux polémiques.

La dernière assemblée générale de l'association française de génie parasismique (AFPS) du 10 juin 1993 fut suivie d'une séance de présentations orales, où l'on a abordé pour la première fois au sein de l'AFPS, le thème de la prédiction sismique (prévision à court terme). P. Bernard de l'Institut de Physique du Globe de Paris a traité la prévision. C. Maron, B. Massinon et J.P. Avouac du CEA/LDG ont présenté les résultats obtenus à partir du réseau de stations électrotelluriques et magnétiques mis en place pour tester la méthode VAN<sup>8</sup> dans le Sud-Est de la France. Puis S. Abbad de l'Infortere et B. Mohammadioun de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire du CEA, ont abordé l'utilisation du gaz radon comme moyen de prévision des tremblements de terre.

Le cahier technique n°9 de l'AFPS (1993) rapporte ces trois présentations orales qui permettent de dresser un rapide bilan de ce sujet en France et l'on pourra emprunter à son éditorial, les propos de A. Pecker : *"Les exposés qui ont été présentés mettent clairement en évidence les limitations des méthodes basées à l'heure actuelle sur la seule observation des précurseurs et de leur corrélation éventuelle aux événements sismiques. Il ressort également des exposés, qu'une analyse fiable, si elle existe, ne peut être basée que sur l'observation de plusieurs précurseurs, une meilleure compréhension physique des phénomènes et une analyse scientifique prenant en compte à la fois les succès et les échecs"*.

### 4.2. PREVISION OU PREDICTION ?

Il convient dès à présent de distinguer la prévision des séismes de leur prédiction.

♦ La première est une estimation de la probabilité d'occurrence d'un séisme à long terme, dans une région sismique assez large. Il s'agit par exemple d'en déterminer la période de retour par l'analyse statistique ou probabiliste de la sismicité d'une faille ou d'une région sismique, à partir des données instrumentales, historiques et de paléosismicité, ou grâce à des modèles cinématiques que viennent enrichir les données sur les déformations plioquaternaires. Elle s'applique directement à l'évaluation de l'aléa sismique.

♦ La seconde est une détermination de la date d'occurrence d'un séisme à court terme (quelques heures à quelques semaines) en un lieu précis et avec une énergie donnée. Elle s'efforce de répondre aux trois questions suivantes concernant un séisme futur : où? quand? quelle magnitude?. Elle repose sur l'existence et l'analyse de précurseurs, qui regroupent toutes les

---

<sup>8</sup> V.A.N. pour Varotsos, Alexopoulos et Nomikos, noms de physiciens grecs ayant développé cette méthode

"anomalies" géophysiques, hydrogéologiques, géochimiques voire éthologiques qui peuvent être détectées avant un fort séisme. Elle suppose donc l'observation, la surveillance ou l'enregistrement d'une multitude de paramètres extrêmement variés et sur des aires qui peuvent être très vastes.

La prédiction d'un tremblement de terre doit respecter quatre étapes :

- l'identification des caractéristiques d'une anomalie dans un signal correspondant à l'enregistrement continu d'un paramètre donné, par une comparaison systématique avec le bruit de fond "normal" ;
- la corrélation statistique de l'occurrence répétée de cette anomalie avec celle des séismes, en définissant des règles précises sur la fenêtre en temps, en espace et en magnitude ;
- l'interprétation de ce lien reposant sur un modèle physique associé au phénomène sismique en profondeur ;
- l'élaboration d'un modèle prédictif, introduisant la dynamique du phénomène et capable d'en prévoir l'évolution temporelle.

A l'heure actuelle, si les trois premières étapes peuvent être plus ou moins satisfaites (un certain nombre de précurseurs, notamment électriques et magnétiques, ne sont pas encore effectivement interprétables de manière satisfaisante par des modèles physiques), la dernière en revanche reste loin d'être atteinte.

Quelques exemples permettent d'ailleurs de souligner à quel point la prédiction demeure délicate. On peut tout d'abord citer une prédiction réussie, comme ce fut le cas pour le séisme de Haicheng, en Chine, en 1975, de magnitude 7.3. Il fut précédé pendant un an de nombreux types de précurseurs (variations du niveau d'eau dans les puits, des relevés inclinométriques, de l'activité sismique, du comportement animal), jusqu'à une crise sismique ( de magnitude maximale 4), qui décida les autorités à faire évacuer la population, avec succès, puisque le soir même le séisme eut lieu, détruisant la ville, mais ne faisant que peu de victimes. Un an plus tard, dans la région voisine de Tangshan, des phénomènes précurseurs analogues se produisirent, mais il n'y eut pas de crise sismique marquée avant le séisme destructeur. Il ne fut pas prédit et détruisit la ville de Tangshan, faisant près d'1 million de morts !

Si ce type de précurseurs peut être expliqué par un modèle de déformation présismique au voisinage de la faille, d'autres, notamment électriques, magnétiques et électromagnétiques ne le sont pas encore, comme c'est le cas des perturbations du bruit de fond magnétique observées à quelques kilomètres du récent séisme de Loma Prieta (Californie) de 1989 (M=7), 10 jours puis 3 heures avant la rupture.

Certains exemples de fausses alarmes incitent aussi à la plus grande prudence quant à l'utilisation des méthodes de prédiction par la Puissance Publique. Ce fut le cas de l'alerte civile donnée en 1992 par l'USGS, pour un séisme de magnitude 6 sur le segment de Parkfield de la faille de San Andreas, sur lequel été tentée une expérience pilote de prédiction grâce à une instrumentation très dense et variée. Les données historiques connues sur ce segment conduisait à une prévision d'un séisme de magnitude 6 pour la période 1985-1993. L'alerte donnée fut basée sur l'occurrence d'un séisme le 20 octobre, de magnitude 4.7 et sur l'observation passée de tels séismes moins d'un jour avant les séismes forts de 1934 et de 1966. Il fut alors estimé que ce séisme de magnitude 4.7 donnait lieu à une probabilité de séisme de magnitude 6 pour les 3 jours suivants, justifiant l'alerte publique. Il n'y eut en fait que des répliques de magnitude inférieure à 4 et heureusement des conséquences économiques quasi nulles puisque la région n'est pratiquement pas habitée.

L'identification de précurseurs reste donc une opération malaisée d'autant qu'il est toujours délicat de les distinguer des sources de bruit non stationnaire pouvant parasiter les mesures.

Certaines méthodes de prédiction font par ailleurs abstraction de la physique du phénomène. C'est par exemple le cas de la méthode de l'institut de Physique du Globe de Moscou, dirigé par Keilis-Borok, basée sur l'analyse statistique de l'évolution temporelle de plusieurs paramètres décrivant la fluctuation de la sismicité de vastes régions. Sont ainsi identifiées des valeurs anormales de ces paramètres, justifiant une prédiction qui reste entachée d'une forte incertitude sur la localisation, de l'ordre d'une dizaine de fois la dimension de la source du séisme prédit (soit des centaines de kilomètres pour un séisme de magnitude 6.5, de 20 km de rupture).

C'est aussi le cas de la méthode VAN basée sur les mesures des courants électrotelluriques. L'analyse des fluctuations de la différence de potentiel mesurée entre deux électrodes impolarisables enterrées et distantes d'une dizaine à quelques centaines de mètres, permet d'identifier des signaux anormaux, dits "SES" (seismic electric signal). L'interprétation d'un SES se fait sur la base des observations passées, recueillies à la même station et corrélées à des séismes régionaux (qui peuvent être parfois distants de plusieurs centaines de kilomètres de la station d'observation du SES !). Elle conduit à la prédiction d'un séisme dont les performances annoncées sont : moins de trois semaines de délai, une incertitude de localisation inférieure à 120 km et une erreur de magnitude de 0.7, pour des séismes de magnitude supérieure à 5. La méthode reste cependant fortement contestée par la communauté scientifique internationale, au regard des seuls documents publiés à ce jour par le groupe VAN. D'une part, les enregistrements ne sont pas corrigés des fluctuations du champ externe et d'autre part, les prédictions sont loin d'être systématiques pour les plus gros séismes. Les SES observés dans certaines stations ne pourraient être imputables qu'à une structure électrique particulière de l'ouest de la Grèce, les seuls séismes de magnitude supérieure à 5.5 ayant fait l'objet d'une prédiction réussie étant situés à l'ouest du Péloponnèse. Par ailleurs il n'existe pas de modèle physique satisfaisant, capable de rendre compte des niveaux de différence de potentiel élevés (0.1 V), mesurés en des sites d'observation distants de plusieurs centaines de kilomètres des séismes auxquels ils sont associés. Enfin les exemples de succès remportés présentés par le groupe VAN concernent une grande majorité des séismes modérés, de magnitude inférieure à 5. Les corrélations statistiques entre ces événements et les SES enregistrés sont dès lors, sujettes à caution, dans le contexte d'activité sismique élevée propre à la Grèce où la fréquence de ces séismes faibles est très forte.

Ces résultats statistiques exigent encore une analyse critique approfondie avant de pouvoir livrer une interprétation fiable. Nul doute que les travaux en cours de plusieurs équipes de recherche permettront, à l'avenir, d'éclaircir certains points qui demeurent, à l'heure actuelle, obscurs. En tout état de causes, un effort de recherche important, au plan international, est indispensable pour progresser efficacement dans ce domaine.

Au delà des objectifs strictement scientifiques, qui relèvent de l'étude de la sismogenèse, reste à savoir si l'investissement nécessaire pour espérer des applications pratiques, est justifié dans un pays de sismicité modérée comme la France métropolitaine (cf. chapitre 1).

#### 4.3. PERSPECTIVES ET SITUATION EN FRANCE

Outre le développement des approches statistiques décrites ci-dessus, la tendance générale de la communauté scientifique internationale est au choix de sites pilotes dans des régions où l'aléa sismique est élevé et où l'on attend un séisme fort à l'échelle d'une décennie. Il y est proposé d'y concentrer des réseaux d'instruments variés, comme sur le site de Parkfield aux Etats-Unis, sur la lacune de Tokai au Japon, ou sur celui de Mudurnu en Turquie, le long d'un segment de la faille nord-Anatolienne. En effet, le taux de succès des prédictions est étroitement lié à la possibilité de détecter simultanément différents types d'anomalies. Cela permet également de mieux

comprendre, dans un modèle global, l'ensemble des perturbations physiques et chimiques du milieu, qui précèdent un tremblement de terre.

En France, la prédiction, qui en est à ses balbutiements, reste du domaine de la recherche scientifique universitaire et de quelques expérimentations telles que celles réalisées par le CEA/LDG pour tester la méthode VAN dans le Sud-Est de la France. La sismicité y est très modeste comparée à celle de la Grèce, et le contexte structural très différent. Les travaux réalisés à ce jour par l'équipe du CEA n'ont pu mettre en évidence aucune corrélation claire entre SES et sismicité.

De son côté, l'INSU est impliquée dans trois programmes d'étude de la prédiction des séismes dans des régions sismiquement actives : Grèce, Chili, et Chine. La sismicité de la France n'a pas été jugée suffisamment élevée, pour y justifier le développement d'un tel programme. Ces travaux permettront probablement des progrès au plan fondamental mais dont l'extrapolation au cas particulier de la France se heurtera aux difficultés déjà évoquées.

Une synthèse des travaux de recherche fondamentale et des essais de validation et d'application dans des contextes sismiques variés, y compris en région de sismicité modérée et particulièrement en France, est un préalable indispensable à une étude de faisabilité susceptible de guider une politique nationale en la matière, à des fins de protection de la population par des plans d'évacuation pré-sismiques. Il faut être conscient des délais assez longs (probablement plus d'une dizaine d'années), que cela suppose.

#### **4.4. CONCLUSION**

La prédiction des séismes en France n'en est qu'à ses débuts, et accuse un retard certain par rapport à d'autres pays en raison, notamment, de sa sismicité modérée.

Elle reste actuellement du domaine de la recherche scientifique, qui doit s'attacher à préciser les corrélations existant entre les différents types de précurseurs observés et la sismicité, et à les expliquer par des modèles physiques. Les programmes correspondant, en cours à l'INSU, doivent être encouragés.

Les tests de la méthode VAN effectués dans le Sud-Est de la France par le CEA/LDG, doivent également être poursuivis et étendus à d'autres régions si l'on veut pouvoir apprécier, un jour, l'applicabilité d'une telle méthode en France.

En conclusion, si la prédiction des séismes dans les zones les plus actives du monde a abouti à quelques succès, les méthodes sont encore loin d'être opérationnelles, notamment dans un pays à sismicité modérée comme la France. Leur développement, basé sur l'acquisition simultanée d'un grand nombre de données pertinentes, pose un problème critique d'investissement qu'il faudra aborder en termes d'analyse coût/bénéfice.

**La prédiction n'est pas opérationnelle aujourd'hui pour la protection des personnes. Et ce d'autant plus, que son efficacité requiert :**

- d'une part la négociation d'un charte déontologique relative à la gestion des alertes, entre scientifiques et responsables politiques,
- d'autre part la préparation de plans d'évacuation des population et leur répétition régulière lors d'exercices de simulation.

**De surcroît, au delà de cet objectif primordial qu'est la sauvegarde des vies humaines, la prédiction des séismes n'est d'aucun apport pour la protection parasismique des biens. En effet, l'annonce d'un séisme destructeur ne l'empêchera jamais de survenir et de ravager le patrimoine économique et culturel, avec ses conséquences sociales et politiques, si les mesures de prévention nécessaire en matière de conception parasismique des constructions et des infrastructures n'ont pas été définies et mises en oeuvre. Enfin, les résultats de la prédiction d'un séisme et de l'évacuation corrélative des populations seront d'autant plus sûrs, que les ouvrages abritant les personnes et les infrastructures leur permettant de quitter les lieux les plus exposés, resteront opérationnels lors de la secousse.**

**Indubitablement, prédiction et protection parasismique sont deux composantes complémentaires de la prévention du risque sismique, qu'il faut absolument éviter d'opposer, surtout en termes de choix de politique budgétaire.**

## 5. EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX SEISMES

### 5.1. DEFINITIONS, CONCEPTS ET PROBLEMES DE BASE

• La vulnérabilité est une des composantes du risque sismique que l'on peut représenter comme une fonction de pertes dépendant de "l'intensité" (au sens commun du terme) du séisme. C'est l'élément primordial de la réduction du risque sismique puisque, à la différence d'autres phénomènes naturels dangereux comme les mouvements de terrain ou les crues, on ne peut empêcher les séismes de survenir ou même en atténuer la fréquence ou l'agressivité. Ne pouvant agir sur l'aléa sismique, c'est la diminution de la vulnérabilité qui sera à la base de la protection parasismique. Ce point sera traité au chapitre suivant avec les différents volets de la prévention du risque sismique.

Selon le vocabulaire international (UNESCO, UNDRO) la vulnérabilité  $V_i$  représente la perte proportionnelle relative à l'intensité  $i$ , avec :

$$\text{perte proportionnelle} = \frac{\text{coût de réparation ou de remplacement}}{\text{valeur du bâtiment}}$$

En fait, cette définition de la vulnérabilité est très restrictive, puisqu'elle ne concerne que l'évaluation des pertes directes, c'est-à-dire le coût de la réparation ou du remplacement d'une construction et non l'analyse de l'ensemble du processus, qui peut conduire aux autres pertes, soit humaines (tués ou blessés), soit indirectes, liées par exemple à toute sorte de dysfonctionnement provoqué par un séisme.

Il faudrait alors étendre la notion de vulnérabilité à différents "milieux", ce terme paraissant bien adapté aux différentes composantes de toute vie sociale au sens large. On peut ainsi différencier :

- le milieu naturel ;
- le milieu construit (superstructures et infrastructures), pour lequel la notion de vulnérabilité s'applique habituellement, à partir de la définition ci-dessus ;
- le milieu productif (industriel, agricole, ...) dont la vulnérabilité dépend des deux milieux précédents ;
- le milieu social et culturel (groupes, organisations, institutions), dont la vulnérabilité dépend non seulement de celles des milieux précédents, mais également du comportement de ces différents composants, avant, pendant et après un séisme.

La plupart des recherches concernant le concept de vulnérabilité ont été effectuées essentiellement sur le milieu construit, voire sur les conséquences immédiates sur les milieux productif (pertes de production) et social (pertes humaines). Il n'existe pas d'approche exhaustive permettant, par exemple à l'échelle d'une ville, d'analyser les conséquences d'un séisme sur le comportement de groupes ou d'institutions et les effets en résultant.

♦ Par ailleurs, il est clair que cette définition de la vulnérabilité du milieu construit (ou vulnérabilité structurale) ne peut s'appliquer qu'à une structure particulière ou une famille de structures ayant un comportement analogue sous sollicitation sismique. L'évaluation de cette vulnérabilité structurale à l'échelle d'une ville ou d'une région nécessite donc deux étapes :

- la détermination des fonctions de vulnérabilité spécifiques à chaque catégorie de structures et d'infrastructures,
- la prise en compte de la distribution statistique de ces catégories sur des aires géographiques définies par un niveau d'aléa homogène.

On conçoit aisément que chaque catégorie de structures (des maisons individuelles aux immeubles d'habitation collectives et de bureaux, en passant par les installations industrielles et d'équipement et les ouvrages d'art) et d'infrastructures (voies de communication : routières, ferroviaires, fluviales, réseaux : électricité, eau, gaz, etc.), recouvre elle-même toute une série de sous-catégories, dès lors que l'on tient compte de la multitude de paramètres qui peuvent intervenir dans la vulnérabilité. Il faudra donc, à l'évidence, se contenter d'approches simplifiées, pour lesquelles des paramètres tels l'âge des ouvrages, les plans de masse, les matériaux utilisés, la conception d'ensemble et les fondations seront plus importants.

La complexité et l'énormité d'une démarche exhaustive de l'évaluation de la vulnérabilité globale est facilement imaginable.

Il faut donc bien distinguer, dans la pratique :

- les études de vulnérabilité propres à un projet particulier (par exemple dans un but de confortement),
- les estimations globales dans le cadre d'une évaluation de risque à l'échelle d'une ville ou d'une région, nécessitant des fonctions de vulnérabilité simplifiées et par contre, des traitements statistiques élaborés.

Dans le cadre de la politique publique de prévention du risque sismique, c'est vers l'amélioration des méthodes d'évaluation globale de la vulnérabilité qu'il faut concentrer les efforts. En effet, cela permettra de mieux apprécier l'efficacité et justifier le bien-fondé et la validité de la réglementation parasismique développée. Cela favorisera également des évaluations de risques par des approches homogènes, exploitables pour hiérarchiser des priorités en matière de prévention.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du milieu construit reposent sur la détermination de fonctions d'endommagement obtenues principalement par des analyses en retour, c'est-à-dire l'étude de la pathologie des bâtiments après de gros séismes. Ces expériences "en vraie grandeur" sont irremplaçables, par la richesse de leur enseignement. Il est donc indispensable de soutenir les missions post-séismes. Depuis que le génie parasismique existe en tant que discipline structurée (soit au plus, une trentaine d'années), ces expériences n'ont pas concerné la France métropolitaine et c'est à l'étranger qu'il faut forger nos connaissances.

L'évaluation de la vulnérabilité pourrait aussi s'envisager par des études expérimentales (sur tables vibrantes) et des calculs dynamiques. Mais dans l'un et l'autre cas, les coûts sont très vite prohibitifs (il suffit de considérer le projet français CASSBA, qui se limite à l'étude expérimentale du comportement d'un simple portique). Ce type d'approche ne semble envisageable que pour des structures particulières présentant un risque élevé.

Le calcul du comportement d'une structure exige de la modéliser (propriétés d'inertie, de raideur, capacités de dissipation d'énergie, etc.), de calculer les mouvements et les efforts résultant d'une sollicitation sismique et enfin, de vérifier la résistance à ces efforts. Les modèles peuvent être simples (quelques masses ponctuelles et ressorts) ou beaucoup plus complexes (éléments finis à plusieurs milliers de degrés de liberté). Les calculs peuvent être faits en élasticité linéaire ou en tenant compte de comportements non linéaires des matériaux et éléments de structure, ce qui est indispensable pour les forts niveaux de sollicitation sismique mais qui nécessite de connaître ces lois de comportement, ce qui n'est pas toujours le cas. La vérification de la résistance aux efforts doit tenir compte de la ductilité des éléments structuraux simples (linéaires, plans, ...) et plus complexes. Des programmes de recherche ont été engagés dans la dernière décennie, sur la plupart de ces points. Il convient d'en dresser un bilan et de redéfinir les priorités.

Enfin, la vulnérabilité du milieu construit doit intégrer celle des équipements des bâtiments et des installations industrielles, qui peuvent représenter, en eux-mêmes, un risque plus ou moins élevé selon leur fonction (par exemple : chemins de câbles, transformateurs, équipements des blocs opératoires hospitaliers, etc.). Les exigences formulées à l'égard de ces équipements peuvent ainsi concerner :

- l'opérabilité, soit le maintien de certaines fonctions actives (comme, par exemple, la capacité de fermeture d'une vanne) ;
- l'intégrité, soit le maintien de certaines fonctions passives (comme, par exemple, l'étanchéité d'une paroi ;
- la stabilité, soit l'absence de chute ou d'effondrement.

L'étude de la vulnérabilité des équipements revient donc à celle de la satisfaction de ces exigences, selon la sollicitation sismique. Là encore, c'est essentiellement à partir d'une analyse en retour du comportement des équipements lors de séismes importants, que les enseignements les plus riches sont tirés. Ils permettent d'édicter des règles, pour une grande part assez simples, visant à réduire cette vulnérabilité.

Compte tenu de l'extrême diversité des équipements, tant dans leur nature que dans leur fonction, une analyse directe de leur vulnérabilité n'est concevable qu'au cas par cas, dans des situations qui le justifient. Dans le cadre d'évaluations globales de la vulnérabilité, il faudrait pouvoir étayer des considérations statistiques par quelques tests sur des échantillons significatifs.

♦ La vulnérabilité du milieu productif est une notion encore plus complexe, puisqu'elle suppose l'analyse de données économiques, qui sont une référence à un instant donné mais varient rapidement avec le temps. Il faudrait donc pouvoir définir une vulnérabilité dépendante du temps, dont le croisement avec l'aléa devient de plus en plus difficile. D'où le recours à des scénarios de risque, à un instant donné.

Enfin, la vulnérabilité du milieu social et culturel est peut-être la plus difficile à appréhender, dans la mesure où elle dépend d'une part des autres types de vulnérabilité et d'autre part, de mécanismes sociaux et comportementaux que l'on peut s'efforcer de caractériser mais qui restent, pour une part, aléatoires. C'est là que la préparation intervient pour "forcer" et optimiser ces mécanismes.

♦ Ces notions restent, en grande majorité, très théoriques et n'ont donné lieu, jusque là, qu'à très peu d'applications pratiques. Il y a donc là un vaste domaine de recherche, où des progrès importants doivent être accomplis rapidement. L'immensité de la tâche et la complexité des problèmes suppose des investissements qui ne sont concevables qu'à travers un effort de coopération internationale. Cependant, la spécificité des contextes de chaque pays, tant au plan des constructions que des systèmes économiques et sociaux, n'autorise pas l'extrapolation trop hâtive de résultats et imposera des études particulières.

## 5.2. ETAT DES CONNAISSANCES

♦ Pour la vulnérabilité du milieu construit, les premières analyses d'ensemble datent du début des années 80 et, en particulier, d'un projet de l'UNESCO dans les Balkans.

La difficulté majeure réside dans la définition de ce que l'on entend par "intensité"<sup>9</sup>. Avec des enregistrements de mouvements de sol, en particulier pour les séismes de Montenegro (1979) et de Corinthe (1981), il a été possible pour ce projet de confronter les "pertes proportionnelles" avec des données objectives sur les mouvements sismiques.

Depuis le début des années 1980, des progrès ont été réalisés dans l'analyse systématique de ces "pertes proportionnelles", comme en témoignent les communications aux différents congrès internationaux de génie parasismique, (San Francisco - 1984, Tokyo - 1988, Madrid - 1992) et au workshop "Seismic vulnerability and risk assessment" du projet SEISMED, en décembre 1990, auquel participaient 15 pays méditerranéens.

Différentes "écoles" d'étude de la vulnérabilité s'identifient ainsi, sans que cette liste soit exhaustive :

- yougoslave (J. PETROVSKI, Z. MILUTINOVIC, D. RISTIC, N. NOCEVSKI, D. ANICIC, M. TOMAZEVIC)
- italienne (V. PETRINI, A. CORSANEGO, D. BENEDETTI, G. AUGUSTI)
- grecque (T. TASSIOS, P. CARYDIS, C. SYRMAKEZIS, H. MOUZAKIS)
- suisse (H. TIEDEMANN, S. COCHRANE, W. SCHAAD)
- japonaise (Y. TATSUMI, M. MATSUBARA, Y. MORI, ...)
- turque (P. GÜLKAN, O. ERGÜNAY, ...)
- mexicaine (UNAM)
- californienne (EERI STANFORD)
- anglaise (MARTIN CENTRE, CAMBRIDGE, ...).

Chaque école propose ainsi des "fonctions de vulnérabilité" ou "fonctions d'endommagement", par référence soit à l'intensité macrosismique MSK ou MM, soit à l'accélération maximale.

♦ En France, peu d'études de vulnérabilité ont été réalisées. Il faut signaler cependant :

- l'étude de simulation du séisme de Lambesc, réalisée en 1984, à la demande de la Délégation aux Risques Majeurs, par le LCPC, le CSTB, le CETE-Méditerranée (Aix-en-Provence) et le BRGM, où des pertes proportionnelles ont été proposées pour différents types de constructions de la région touchée par le séisme provençal du 11 juin 1909 ;

---

<sup>9</sup> Les échelles d'intensité macrosismique étant, elles-mêmes, en grande part, des échelles de vulnérabilité du bâti.

- une étude pilote d'évaluation des risques naturels (sismique, mouvements de terrain, cyclonique et volcanique) sur 4 collèges (CES) de Martinique, réalisée en 1992 par le BRGM et le bureau VERITAS pour le Conseil Général de la Martinique ; une analyse détaillée de la vulnérabilité de ces bâtiments et de leurs équipements à différents niveaux de sollicitation sismique a pu être entreprise et a débouché sur une série de recommandations concrètes pour parer aux faiblesses les plus criantes ; elle a été révélatrice de l'état extrêmement critique de ces constructions accueillant pourtant un nombre très élevé d'élèves ;
- une étude du même type pour un collège de Capesterre en Guadeloupe, en 1993, qui a conduit à envisager la fermeture provisoire de l'établissement, pour permettre des mesures d'urgence ;
- diverses études du CETE-Méditerranée (laboratoire de Nice), en liaison avec l'IRIGM.

L'étude de simulation du séisme de Lambesc est la seule, à ce jour, fournissant quelques données économiques sur le risque sismique en France. C'est typiquement une étude s'appuyant sur une méthodologie de type "scénario", c'est-à-dire fixant les caractéristiques de la sollicitation sismique et la date de l'évènement : une répétition du séisme du 11 juin 1909, le 11 juin 1982, un même jour (vendredi) et à la même heure (21 h). Les résultats sont éloquentes même si la marge d'incertitude sur certains chiffres dépasse 100% :

- 400 à 970 morts et 1850 à 5650 blessés,
- 450 bâtiments détruits, 22 000 endommagés,
- près de 5 milliards de francs de pertes directes et 400 à 500 millions de pertes indirectes (soit 7 fois le budget annuel de la région PACA, à la même date !).

♦ Toujours pour la DRM, une étude méthodologique de vulnérabilité humaine et de préparation à la gestion de situations de crise a été effectuée en 1993 par le BRGM en collaboration avec l'Université des Antilles-Guyane, sur deux des collèges martiniquais ayant déjà été retenus pour l'étude précitée de 1992. Elle s'est appuyée sur une enquête approfondie auprès de l'Administration du personnel de l'établissement, des élèves et de leurs parents. Elle a clairement mis en évidence les lacunes en matière d'information sur les risques, de sensibilisation à leur prise en compte et de préparation aux situations qui pourraient en résulter. Elle a débouché sur diverses manifestations à caractère éducatif et sur des exercices de mises en situations. Un relais doit être pris par les autorités concernées pour bâtir, à partir de là, un véritable plan de secours et d'organisation de situation d'urgence.

De telles études, dont certains résultats seulement sont généralisables, devraient être multipliées dans les établissements recevant du public des régions les plus exposées. Elles permettraient d'établir des plans particuliers, analogues aux consignes en cas d'incendie, dans le cadre de règles globales de sécurité propres à ces établissements.

♦ Il n'existe par ailleurs pas, en France, d'étude systématique entreprise par exemple, à l'échelle d'une ville ou d'une région, pour évaluer différentes "fonctions d'endommagement" relatives à diverses typologies de construction. De plus, les paramètres habituellement utilisés (intensité macrosismique MSK ou accélération maximale) dépendant du type de sol, les auteurs présentent souvent des "fonctions d'endommagement" pour une typologie particulière de construction et en fonction du type de sol. L'utilisation de paramètres spectraux paraîtrait plus logique mais aucune recherche n'a été réalisée, actuellement et à notre connaissance, dans ce domaine.

Il serait souhaitable qu'une telle démarche soit entreprise très rapidement et ceci dans le cadre d'une étude méthodologique globale du risque sismique en France.

Deux projets sont actuellement lancés dans ce sens par la Délégation aux Risques Majeurs, dans le cadre de la DIPCEN : les projets GEMITIS-Méditerranée et GEMITIS-Antilles, où l'on envisage d'évaluer le risque sismique sur des zones-pilotes des villes de Nice, Fort-de-France et Pointe-à-Pitre. Ces projets sont étalés sur 4 années (1993-1996) et ont déjà bénéficié d'un soutien de la DRM en 1993. Ils doivent être financés jusqu'à leur terme.

### **5.3. RECHERCHES NECESSAIRES ET PROPOSITIONS D'ACTIONS :**

♦ Un effort important est à mettre en oeuvre pour améliorer les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du milieu construit en distinguant bien plusieurs objectifs :

1) Les études de comportement sous action sismique, pour faire progresser les techniques de construction parasismique qui s'adressent aux constructions futures et dont les résultats sont intégrés progressivement à la réglementation parasismique (cf. évolution des règles PS 69, recommandations AFPS 90). Elles peuvent concerner les structures (matériaux, éléments plus ou moins complexes, etc.) et les équipements. Elles sont abordables par analyses en retour, études expérimentales et modélisations.

Des programmes de recherches ont été engagés dans ces différentes directions en France (par exemple par le CSTB, le CEBTP, etc.) et à l'étranger. Il importe d'en dresser le bilan et de définir les axes prioritaires des travaux futurs.

Le présent rapport doit absolument être complété sur ce point.

2) Les études de comportement sous action sismique concernant le bâti existant et pouvant viser :

- soit à des mesures de renforcement, confortement, mise en conformité (installations industrielles), etc. ;
- soit à des estimations globales de dommages potentiels pour des évaluations de risque.

Les premières ne peuvent se traiter qu'au cas par cas. Elles ne peuvent être suivies de mesures efficaces que dans la mesure où les techniques de confortement parasismique de l'existant font elles-mêmes l'objet d'efforts importants. Il faut rester conscient que ces deux aspects du traitement préventif du bâti existant sont très délicats à mettre en oeuvre et représentent un investissement économique considérable.

Les secondes supposent un gros effort de recherche pour développer des méthodes simplifiées, adaptées à la grande variété typologique du bâti, particulièrement en France. Il serait ainsi illusoire d'escompter bénéficier des seuls efforts de recherche de pays plus avancés dans ce domaine comme les USA ou le Japon, où les pratiques en matière de construction et le parc immobilier sont totalement différents. Ces méthodes pourraient déjà s'adresser aux quatre grandes catégories de construction que sont :

- les ouvrages postérieurs aux règles PS,
- les ouvrages récents (moins de 30 à 40 ans),
- les ouvrages anciens (de l'ordre du siècle),
- les ouvrages historiques, qui posent un problème de sauvegarde du patrimoine architectural (avec des contraintes techniques spécifiques).

Cette dernière catégorie de constructions devrait faire l'objet d'une attention particulière car elle constitue tous les coeurs de nos villes et villages.

♦ Les vulnérabilités des milieux productif, social et culturel ne sont guère abordables qu'à travers des scénarios, par exemple des simulations dans le contexte actuel, de séismes majeurs passés. De telles études, qui se limitent aujourd'hui à de très rares cas en France, doivent être généralisées dans les villes et les régions les plus exposées, pour conduire à l'élaboration de véritables plans de préparation, qui devraient permettre d'éviter que tout séisme important ne soit systématiquement synonyme de catastrophe majeure. Cela suppose la mise à disposition de méthodologies suffisamment "rodées". Les programmes GEMITIS, lancés dans le cadre de la DIPCN, visent à fournir de telles méthodologies. Leur soutien doit être garanti jusqu'à leur terme.

## 6. DIFFERENTS VOILETS DE LA PREVENTION DU RISQUE SISMIQUE

La prévention du risque sismique peut s'appuyer, globalement, sur deux voies parallèles et complémentaires, dont les apports respectifs ont déjà été évoqués au chapitre 4 :

♦ la réduction du risque sismique, par :

- la protection parasismique et la planification de l'aménagement et de l'occupation des sols (diminution de la vulnérabilité des milieux construits et productifs) ;
- l'information et la sensibilisation au risque sismique, de tout public concerné, et la formation aux techniques préventives ;
- la préparation au risque sismique (diminution de la vulnérabilité des milieux sociaux et culturels) ;

♦ la prédiction des séismes et l'élaboration de plans d'évacuation.

Ce dernier point, traité en détail au chapitre 4, n'est pas repris ici.

### 6.1. PROTECTION PARASISMIQUE

Elle repose, pour un projet particulier, sur deux composantes essentielles :

\* le choix du site, qui doit éviter des conditions géologiques qui puissent être fatales ou très préjudiciables au projet : proximité immédiate de failles sismogènes, instabilités de versant ou comportements défavorables de sols (ex. : liquéfaction), non traitables directement ou parables par des techniques de construction appropriées et pouvant matériellement être mises en oeuvre dans le cadre du projet ;

\* le dimensionnement du projet (dans une conception parasismique d'ensemble), qui suppose que soient fixés :

- une intensité de dimensionnement, soit le niveau de sollicitation sismique contre lequel on entend se protéger,
- des exigences de comportement, soit ce que l'on attend de l'ouvrage exposé à cette sollicitation,
- les règles de calcul de ce comportement et de vérification de la satisfaction des critères imposés.

♦ Le premier point (choix du site) se traite à partir de documents relatifs à l'aménagement et l'occupation des sols, qui doivent afficher les aléas et réglementer les autorisations de construire avec ou sans prescription de mesures préventives. Concernant le risque sismique, il faut rappeler que les techniques parasismiques permettent, presque toujours, d'envisager des solutions aux problèmes posés, sauf dans le cas de ruptures et déplacements du sol trop importants (mouvements de terrain, par exemple). Celles-ci peuvent être cependant très onéreuses et leur efficacité est difficilement garantie à 100%. C'est pourquoi les principes de protection

parasismique mis en oeuvre dans la réglementation, relèvent plutôt de mesures dissuasives (surcoût) que de véritables interdits, face à ce problème.

♦ Le second point (conception parasismique et dimensionnement) fait l'objet des règles parasismiques de construction et du cadre légal de leur application, dont l'évolution récente a été rappelée au chapitre 2.

### 6.1.1. Réglementation technique et cadre légal d'application

Parmi les différents risques naturels, c'est vraisemblablement le risque sismique qui bénéficie actuellement, en France, du meilleur état d'avancement dans ce domaine. D'une part, la philosophie de la protection s'inscrit dans un cadre conceptuel relativement bien défini maintenant. D'autre part, les documents techniques ont été établis et validés à travers un consensus entre la Puissance Publique et les représentants des secteurs professionnels concernés, puis entérinés par voie législative.

Ces principes généraux sont, en bref, les suivants <sup>10</sup> :

\* les actions sismiques sont traitées comme des actions accidentelles, à la différence des charges permanentes ou normales, c'est-à-dire qu'elles sont introduites par des coefficients de sécurité différents des secondes dans les combinaisons de calcul ;

\* intensité de dimensionnement et exigences de comportement résultent d'un arbitrage pratiqué par la Puissance Publique entre des critères :

- "physique" : l'aléa sismique,
- économique : le surcoût entraîné par la mise en oeuvre des mesures de protection, en regard de la réduction du risque que l'on peut en attendre,
- politique : l'importance accordée à la protection parasismique.

Cet arbitrage relève d'une analyse coût/bénéfice, dont les fondements théoriques sont accessibles mais dont la mise en oeuvre pratique n'est, actuellement, pas réaliste. Il tient compte des tendances d'évolution de deux variables essentielles du problème (que l'on ne peut décrire par des fonctions parfaitement déterminées) :

- la réduction du risque sismique pour un ouvrage particulier, qui tend à diminuer au fur et à mesure que l'on considère des intensités de dimensionnement de plus en plus élevées ;
- le coût de la protection, qui reste modéré et "raisonnable" en dessous d'un certain seuil d'intensité de dimensionnement mais qui croît très rapidement au delà.

Il s'agit donc de rechercher une valeur optimale au dimensionnement qui assure le meilleur "rendement" : réduction du risque/coût. C'est cette optimisation qui conduit au distinguo entre :

- ouvrage à risque normal et ouvrage à risque spécial, d'une part ;
- différentes catégories d'ouvrages à risque normal, d'autre part.

---

<sup>10</sup> Pour plus de détails, voir par exemple : le Nouveau zonage sismique de la France (1986) ou le Traité de génie parasismique (1985), publié sous l'égide de l'AFPS aux presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.

♦ Pour les ouvrages à risque spécial, dont l'endommagement, même mineur, peut avoir des conséquences catastrophiques pour l'environnement, on est conduit, quoiqu'il en coûte, à maintenir au niveau le plus bas possible, les probabilités d'accident. Les exigences de comportement sont définies au cas par cas, pour chaque projet considéré individuellement (protection intrinsèque). L'intensité de dimensionnement correspond à l'agression maximale susceptible d'être subie par l'ouvrage, éventuellement majorée d'un coefficient de sécurité.

♦ Pour les ouvrages à risque normal, représentant la grande majorité des constructions et pour lesquels les conséquences d'un sinistre restent circonscrites à l'ouvrage lui-même, ses occupants et son environnement immédiat, des considérations économiques, sur la durée de vie moyenne des constructions et politiques, sur les frontières entre devoir et prérogatives de la Puissance Publique et libertés individuelles, conduisent à des objectifs moins ambitieux tant pour les probabilités de sinistre que pour les exigences de comportement. Ces dernières sont définies par une protection statistique, dont les résultats doivent s'apprécier, par exemple, à l'échelle d'une ville soumise à l'épreuve du tremblement de terre. Elle admet que certaines structures subissent des déformations se situant franchement dans le domaine post-élastique. L'objectif principal est la sauvegarde des vies humaines et, dans la mesure du possible, la protection du patrimoine économique, mais sans exclure un certain pourcentage de pertes, jugé "admissible", notamment si l'intensité de la secousse dépasse l'intensité de dimensionnement. Il n'y a plus de protection absolue et de risque tendant vers zéro mais une protection relative et un risque acceptable.

**L'intensité de dimensionnement est fixée forfaitairement par la Puissance Publique.**

♦ L'ensemble de ces dispositions a conduit, en France, aux textes rappelés au chapitre 1 et dont le tableau 2 synthétise les résultats essentiels. Dans les deux cas, risque normal comme risque spécial, la réglementation ne traduit que la protection minimale imposée par la Puissance Publique. Tout maître d'ouvrage peut, à travers un cahier des charges, viser une protection supérieure en regard des critères qui lui sont propres.

Il faut également souligner que l'arrêté du 16 juillet 1992 ne définit les règles de classification et de construction parasismique que pour les ouvrages nouveaux à risque normal. Quid des ouvrages existants ?

Ces règles de construction sont les D.T.U. "règles parasismiques PS 69 révisées 1982 et annexes" (édition janvier 1984), auxquelles peuvent se substituer, pour les maisons d'habitation individuelles, les règles "PS-MI 89 révisées 92" (publiées par le CSTB) plus simples. Cependant, les progrès considérables des deux dernières décennies en génie parasismique, remettent en cause à bien des plans, les règles PS 69, même avec les révisions de 1982. C'est pourquoi les recommandations AFPS 90, dont le troisième tome vient de paraître et parachève ainsi l'élaboration de ce document technique à jour de l'état de l'Art, sont appelées à remplacer rapidement les règles PS 69.

L'arrêté correspondant devra donc être modifié. Les progrès majeurs intégrés aux AFPS 90 concernent, entre autres :

- le domaine d'application, étendu à tous types d'ouvrages (hors ceux classés à risque spécial) ;
- la prise en compte de l'action sismique, par le biais d'un coefficient sismique qui distingue bien les paramètres propres à la structure et ceux propres au site ; l'intensité de dimensionnement, dépendant de la zone sismique et de la classe d'ouvrage, est introduite par une accélération nominale calant des spectres élastiques normalisés dépendant des conditions de sol (effets de site liés à la lithologie) ; un coefficient topographique intègre les effets de site liés au relief ;

enfin le coefficient d'interaction sol/structure est bien individualisé et un coefficient de ductilité permet de faire la part entre réponse élastique et post-élastique de la structure ;

- les méthodes de calcul qui ont été diversifiées et améliorées ;
- les matériaux ;
- l'introduction de chapitres propres aux ouvrages de soutènement, constructions industrielles, réservoirs et silos, tours et mâts, ouvrages d'Art, réseaux et enfin, équipements.

L'arrêté du 10 mai 1993, fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées, doit être complété par une circulaire d'application, en cours d'élaboration. A cette fin, un groupe d'étude sur le risque spécial (G.E.R.S.) a été créé sous l'égide de l'AFPS et contribue à la réflexion menée par le service de l'environnement industriel du Ministère de l'environnement.

### 6.1.2. Mise en oeuvre pratique

♦ La mise en oeuvre pratique de cette réglementation, maintenant très structurée, pose cependant un certain nombre de problèmes :

1) Elle ne s'adresse qu'aux ouvrages futurs. Or, le bâti existant, dont une large part ne peut être remplacée, même sur la base d'un taux moyen de renouvellement, en raison de son caractère "historique", pose des problèmes très ardues de confortement parasismique. Il faut d'une part, que des solutions existent et soient définies au cas par cas, d'autre part, que des moyens importants soient alloués à ces opérations de réhabilitation, particulièrement coûteuses. C'est cependant un problème crucial. Il importe qu'une politique globale soit mise en oeuvre pour :

- \* favoriser les recherches sur le confortement parasismique du bâti existant et historique (telles celles engagées par différents CETE),
- \* élaborer des règles techniques qui soient utilisables comme un guide, puisque des études particulières resteront, dans tous les cas, nécessaires,
- \* inventorier dans les zones les plus exposées, le patrimoine historique et architectural ainsi menacé et définir des programmes prioritaires de confortement et/ou réhabilitation,
- \* mettre en place un système de financement de tels programmes, étant entendu que la charge est trop lourde, individuellement, pour être supportée par chaque propriétaire<sup>11</sup> et globalement, par l'Etat ou les collectivités. Il faudrait probablement inventer un système mixte, impliquant toutes les parties et faisant appel, pourquoi pas ?, aux assureurs.

Pour le bâti existant, qui n'appartient pas aux centres historiques, il faut retenir que son renouvellement se fait à un taux moyen de 1%. Il faudrait donc plus d'un siècle pour que les nouvelles normes parasismiques se soient généralisées dans le parc immobilier (à moins de séismes majeurs qui amènent à augmenter brusquement ce taux de renouvellement !).

---

<sup>11</sup> on peut largement dépasser les 10% de la valeur immobilière qui constituent la limite fixée dans les P.E.R.

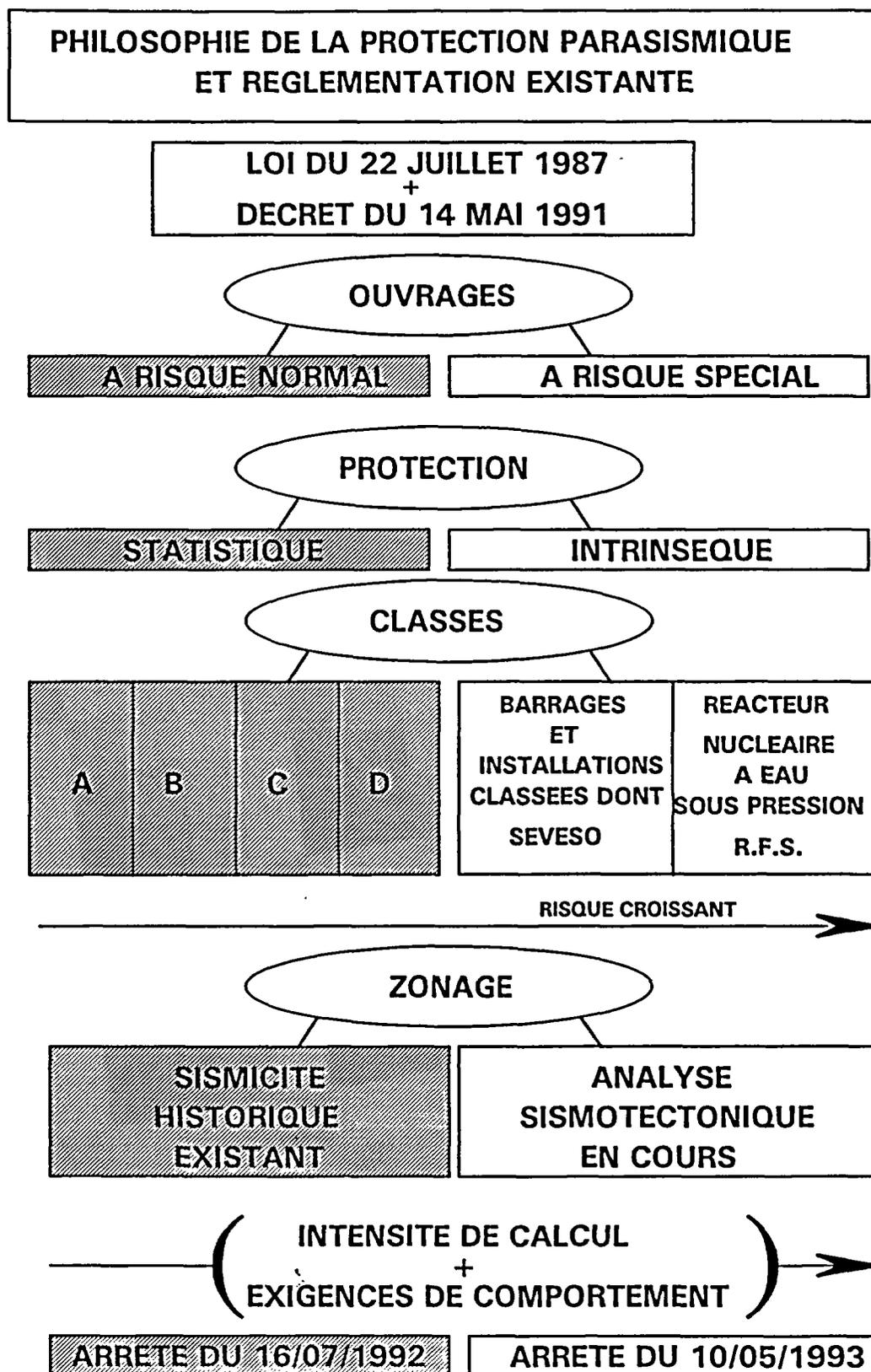


Tableau 2 - Philosophie de la protection parasismique et réglementation existante

Il faut également rappeler le cas extrêmement critique des Antilles et en général des DOM-TOM, où la vulnérabilité du bâti existant est extrêmement élevée. Dans certains quartiers de grosses agglomérations comme Fort-de-France ou Pointe-à-Pitre, on peut considérer qu'elle est proche de 100% pour des séismes d'intensité VII à VIII, dont la période de retour est de l'ordre de 50 ans en Martinique, comme en Guadeloupe. Il n'est pas question dans ce cas de confortement. Il faut, par contre, des mesures d'urgence, conduisant probablement à déplacer et reloger les populations concernées, en assurant cette fois une gestion drastique de ces terrains particulièrement menacés. C'est un problème économique et politique très délicat mais il faut absolument lancer ce cri d'alarme.

2) Son application aux ouvrages nouveaux suppose le comportement ad hoc de toute une chaîne d'intervenants dans l'acte de construire. C'est souvent là que le bât blesse! La culture parasismique doit diffuser tout le long de cette chaîne : architecte, ingénieur, entrepreneur, "contrôleur" et même client, qui doit savoir formuler ses exigences de qualité.

La réglementation n'étant, somme toute, sous sa forme généralisée actuelle, que très récente, il serait particulièrement opportun de mettre en place une structure qui étudie de près, sur des environnements tests, sa mise en application et les problèmes qu'elle soulève ; par exemple, un groupe de travail constitué sous l'égide de l'AFPS, qui traite quelques départements pilotes, avec l'appui des services de la DDE et des bureaux de contrôle.

♦ Un des problèmes les plus critiques est celui du contrôle de l'exécution sur les chantiers. Outre les actes délibérément malveillants à des fins crapuleuses d'économie, il y a également un énorme problème de compréhension des techniques à mettre en oeuvre. C'est-à-dire qu'il faudrait envisager un programme d'envergure de formation des professionnels du bâtiment, sans négliger, surtout, les petits entrepreneurs, maçons et artisans qui représentent une part primordiale de l'exécution des maisons individuelles. Il faudrait commencer par imposer un niveau de qualité minimale dans le choix et l'utilisation des matériaux, même sans considération parasismique. Il faut sensibiliser très tôt et surtout responsabiliser toutes les parties impliquées. Une mauvaise exécution sur chantier met en péril la vie des futurs occupants.

♦ Les services techniques chargés de délivrer les autorisations de construire (DDE), doivent avoir également la formation et les moyens ad hoc pour exécuter leur mission (car il ne faut pas arriver non plus, à un alourdissement excessif de la procédure). Enfin, il faut aussi s'assurer d'une capacité (en moyens humains) des bureaux de contrôle à intervenir au moment opportun. En effet, il y a des moments clés dans l'exécution d'un chantier, où la vérification peut être efficace. Trop tardive, elle devient inutile car bien des défauts majeurs peuvent être masqués par "l'habillage de la structure".

Là aussi, on peut penser que la préparation d'un guide pratique du contrôle sur chantier, serait très utile.

Il faut cependant être parfaitement conscient que ces pratiques ne s'imposent pas totalement "par la force". Il faut réellement qu'il y ait sensibilisation. Il en suffit pour preuve de constater les difficultés qu'ont eues certains maîtres d'oeuvre et ingénieurs, parfaitement au fait des dispositions parasismiques, pour chercher à obtenir, finalement en vain, qu'elles soient appliquées par les entrepreneurs, même lorsqu'elles étaient inscrites au cahier des charges.

♦ Reste enfin l'aspect juridique. Faut-il sanctionner la non application des règles parasismiques dès lors qu'elles sont devenues obligatoires ? Quels moyens mettre en oeuvre ? Se repose vite le problème du contrôle. Là encore, face à un sujet d'émergence nouvelle, dont les principales leçons

seront tirées de cas concrets (jurisprudence), le rôle d'un groupe de travail serait tout à fait positif.

### 6.1.3. Conclusion

♦ Des progrès considérables ont été accomplis au cours de la dernière décennie tant sur le contenu technique des règles parasismiques de construction, que sur le cadre légal de leur application. Un dispositif très structuré de protection parasismique est maintenant disponible. Il reste cependant :

- à le faire **CONNAITRE** : soit mettre en place un programme d'information d'envergure nationale sur la réglementation parasismique et son application. Il faut que tout public (du particulier, aux médias, aux professionnels et aux administrations) sache qu'elle existe. A l'image du "tour de France", organisé par l'AFPS et la DRM en 1986 et 1987, pour promouvoir le nouveau zonage sismique de la France et les futures recommandations AFPS 90, des manifestations dans toutes les régions seraient à organiser.
- à le faire **ACCEPTER** : soit développer des actions de sensibilisation visant à responsabiliser tous les acteurs du processus parasismique, pour qu'ils soient pleinement conscients de son intérêt ; la démarche, engagée depuis plusieurs années déjà par la DRM, pour rendre aussi transparents que possible tous ces textes réglementaires, en explicitant largement les données, méthodes et critères sur lesquels ils sont bâtis, doit être amplifiée. Il faut également conserver une approche consultative aussi large que possible de tous les milieux professionnels concernés, pour que cette réglementation émerge d'un consensus sous l'autorité de l'Etat.
- à le faire **COMPRENDRE** : soit expliquer, à tous niveaux et tous publics, ces textes, qui ne sont pas toujours d'un abord facile. Il faut que l'esprit en soit bien perçu et que la mise en oeuvre paraisse aussi aisée que possible. Ce sont donc des actions d'éducation multiples et adaptées à des auditoires variés qu'il faut envisager, accompagnés de la production de tout type de support approprié : plaquettes, guides, etc. Actuellement il arrive que des erreurs graves soient commises, uniquement par défaut de compréhension de la réglementation et mauvaise exécution, alors que l'intention y était !
- à le faire **APPLIQUER** : ce devrait être une conséquence directe des trois premiers objectifs. Une réglementation bien comprise et acceptée, gage de qualité, est suivie plus volontiers. Il importe surtout qu'elle soit respectée à tous les stades d'un projet (conception, calcul et exécution).
- à le faire **CONTROLER** : soit garantir les moyens ad hoc aux services de l'Etat assumant cette responsabilité, sachant que le contrôle doit s'exercer pour délivrer les autorisations de construire, mais aussi lors de l'exécution pour vérifier la conformité du projet. Cette deuxième étape est inimaginable pour tous les projets particuliers. Il faut donc que les entrepreneurs soient parfaitement convaincus de leur devoir en la matière. Des contrôles "aléatoires" sur les chantiers pourraient contribuer à gagner cette conviction.
- à le faire **SANCTIONNER** : de tels contrôles n'auront probablement d'efficacité que s'ils sont susceptibles de déboucher sur des sanctions "positives" (attestation de conformité) ou "négatives" (procédure pénale ?). Ne faut-il pas mettre en place une instance compétente pour anticiper les situations juridiques qui pourraient résulter de l'application de la loi et de ces décrets et arrêtés et proposer les mesures ad hoc, qui permettraient de gérer convenablement ces situations ?

♦ Il faut, par ailleurs, rappeler une fois encore, l'immense problème que pose le bâti existant, qui devrait faire l'objet, maintenant, d'une réflexion approfondie pour définir une stratégie :

- quelles priorités ?
- quelles possibilités techniques ?
- quels coûts ?

Il faudrait, là aussi, parvenir à un texte législatif qui formalise la politique publique en la matière, en s'appuyant sur les travaux d'un groupe d'experts.

La politique de prévention du risque sismique ne sera pas crédible tant que subsistera cette "épée de Damoclès", que représente le risque associé à certains établissements publics (scolaires, hospitaliers, etc.) particulièrement vulnérables et dans des zones à aléa significatif, ou à ces quartiers de plusieurs villes des Antilles (par exemple), qui se sont développés sans aucun contrôle et où des milliers de vies sont menacées.

## 6.2. PLANIFICATION DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'OCCUPATION DES SOLS

La loi du 13 juillet 1982 permet l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, dont les séismes. En contrepartie, elle prévoit l'obligation pour l'Etat d'élaborer des plans d'exposition aux risques prévisibles (P.E.R.), dans des conditions fixées par le décret du 3 mai 1984.

Ce cadre légal devrait donc permettre de réglementer l'occupation des sols (notamment en matière d'autorisation de construction) et d'orienter les aménagements en tenant compte, entre autres, du risque sismique. Comme cela a été rappelé précédemment :

\* les interdictions de construire, en raison du risque sismique, se limitent à des cas exceptionnels :

- mouvements de terrain dont l'aléa est augmenté du fait du déclencheur sismique et rendent les versants ou les zones de réception impropres à la construction,
- liquéfaction des sols s'il s'agit de projets ne pouvant adopter des techniques de fondation ad hoc (pieux profonds, par exemple),
- proximité immédiate de failles sismogènes à condition de tenir compte d'une part de la catégorie d'ouvrage concernée et d'autre part, dans la mesure du possible, de la probabilité de rupture jusqu'en surface du sol et de son amplitude.

\* la prise en compte de l'aléa sismique local, grâce à des études de microzonage sismique, permet de cartographier les effets de site, de moduler l'application des règles parasismiques en conséquence et d'identifier, a priori, les types d'ouvrages les plus sensibles selon la réponse du sol aux sollicitations dynamiques ; ce dernier point devrait donc favoriser des schémas d'aménagement qui intègrent ce facteur.

L'établissement d'un PER comporte deux phases :

- une phase technique, en l'occurrence, un microzonage sismique reposant sur des méthodes plus ou moins sophistiquées selon les moyens disponibles (cf. chapitre 2) et recensées à la demande de la DRM, dans un guide méthodologique dont la dernière version vient d'être publiée par l'AFPS, en novembre 1993 ;

- une phase dite "technico-administrative", consistant, sous la conduite du service instructeur (généralement un service extérieur de l'Etat : DDE ou DDA) en la présentation des résultats de la phase technique aux élus locaux (maire) et la discussion/négociation de leur traduction sous forme du zonage réglementaire (rouge, bleu, blanc).

Cette procédure est apparue assez lourde dans la pratique et s'est soldée par un faible taux de PER approuvés et publiés, par rapport aux PER prescrits et instruits. Elle est corrélativement très lente à aboutir. Autant d'inconvénients qui semblent imputables d'une part à un manque de moyens des services instructeurs, d'autre part aux réticences de certains élus lorsque les contraintes introduites sont jugées trop préjudiciables en termes fonciers.

Par ailleurs, dans les PER sismiques qui ont été approuvés, le zonage final occulte une part importante des résultats du microzonage sismique.

Il importe donc que la démarche nouvelle devant conduire aux plans de prévention des risques (P.P.R.) intègre mieux les mesures préventives face au risque sismique, en matière d'orientation de l'aménagement. Il est essentiel, également, qu'un cahier des charges précis soit établi quant au contenu des PPR, par référence aux nouvelles règles parasismiques de construction.

Enfin, il conviendrait de s'intéresser en priorité au problème que pose l'occupation des sols très exposés, à forte densité de constructions très vulnérables. Quelles solutions "curatives" envisager : réhabilitation, évacuation et gel, etc. ? Quels sont les problèmes économiques et juridiques posés ? Un programme particulier mériterait d'être lancé le plus rapidement possible sur ce sujet, en commençant au moins par une ou deux zones-tests.

## **6.3. INFORMATION ET SENSIBILISATION, FORMATION ET EDUCATION**

### **6.3.1. Information et sensibilisation**

La loi de juillet 1987, complétée par le décret du 11 octobre 1990 et la circulaire du 10 mai 1991, définit les droits du citoyen et, corrélativement, les devoirs de l'Etat et plus généralement, de la Puissance Publique, en matière d'information sur les risques majeurs. C'est ainsi "un nouvel état d'esprit qui doit se manifester par des attitudes résolument ouvertes", qui est attendu de la part de l'Administration, des collectivités locales et des acteurs et responsables de secteurs économiques éventuellement générateurs de risques.

Bien avant 1990, la DRM et l'AFPS, ont engagé de nombreuses actions de sensibilisation au risque sismique, visant essentiellement l'Administration, les collectivités locales et les professionnels de la construction (architectes, urbanistes, bureaux d'étude et ingénieurs, entrepreneurs, etc.). De même, les D.R.I.R.E., dans le cadre de l'application de la directive SEVESO et de l'élaboration des études de dangers, ont organisé diverses manifestations pour provoquer la prise de conscience du risque sismique en milieu industriel et favoriser l'application de la réglementation correspondante.

Plus récemment, la mise en place des cellules d'information préventive (C.I.P.) a donné lieu à des actions visant un public beaucoup plus large (ensemble de la population, médias, etc.). Les exemples ont encore assez rares cependant (Antilles, Avignon, Lambesc, etc.), et il est absolument nécessaire d'inciter à leur généralisation dans toutes les zones concernées.

A cet égard, il faut rappeler que l'information doit être aussi complète que possible. Elle ne doit surtout pas se limiter au simple "porté à connaissance" (affichage des aléas et des risques) mais apporter également des éléments en matière de moyens de prévention. Il faut absolument éviter de laisser le public démuni devant la découverte du risque, ce qui est générateur de réactions très négatives.

### 6.3.2. Formation et éducation

♦ La nécessité d'une formation appropriée, accompagnant la mise en oeuvre de la réglementation parasismique, a déjà été soulignée au paragraphe 6.1. Elle doit absolument toucher tous les milieux professionnels concernés par l'acte de construire. Depuis 1990, elle se développe dans les services extérieurs de l'Etat, les services techniques des collectivités territoriales, etc., souvent avec l'aide de la MAFPEN (mission académique de formation des personnels de l'Education Nationale).

♦ Au delà, c'est à travers tout le système éducatif, que la prise de conscience du risque sismique et la mise en place des comportements appropriés, doivent se faire. Dans ce domaine, la France en est restée au stade des balbutiements. Il suffirait pourtant de quelques aménagements des programmes scolaires et d'un appui pédagogique, pour faciliter la tâche des enseignants. Or, seules quelques actions éparses d'enseignants en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Pyrénées, Alsace, Isère et dans les DOM peuvent être recensées. La DRM a également coordonné la préparation d'une "mallette pédagogique" sur les risques majeurs, comportant une plaquette spéciale pour le risque sismique.

♦ Au plan de l'enseignement supérieur, il n'existe pas encore de cursus bien individualisé en matière de génie parasismique, même si plusieurs écoles et universités proposent des modules ou certificats spécialisés (Ecoles centrales de Lyon et Paris, Ecole des Ponts et Chaussées, Ecole des Mines, Ecole nationale supérieure de géologie de Nancy, Institut des sciences et techniques de Grenoble, etc.). Les enseignements universitaires restent plutôt orientés vers la physique du Globe (sismologie fondamentale) et n'intègrent encore que très peu, des éléments de sismologie de l'ingénieur.

L'exemple du certificat d'études approfondies en architecture parasismique de l'Ecole d'architecture de Marseille-Luminy, qui existe depuis plus de 5 ans mais est maintenant menacé, est assez unique.

C'était pourtant une recommandation véhémente du rapport de 1982 de l'Académie des Sciences. Un effort important reste donc à engager pour créer des enseignements de troisième cycle spécialisés, des cycles de fin d'étude d'écoles d'ingénieurs et des formations plus techniques (IUT, maîtrises, mastères, etc.).

### 6.4. PREPARATION

C'est un volet très important de la prévention qui concerne l'optimisation des comportements de la population et du fonctionnement des mécanismes sociaux et des institutions, avant, pendant et après un séisme.

Ce sont des actions parallèles à l'organisation des secours qui entre dans les prérogatives de la sécurité civile et qui ne sera pas développée ici. En effet, celle-ci relève de la gestion de crises et des catastrophes, qui n'est plus à proprement parler, de la prévention.

La préparation peut concerner différentes périodes :

- avant un séisme majeur : notamment des exercices d'évacuation pour simuler des situations qui pourraient résulter de la prédiction de séismes (cf. chapitre 4 ;
- pendant un séisme majeur : consignes sur les "gestes essentiels", à diffuser aussi largement et régulièrement que possible ;
- après un séisme majeur : entraide d'urgence et organisation post-catastrophe complémentaire aux interventions de la sécurité civile.

Un exemple d'action pilote globale (information et préparation) est celui du plan PEGAS (plan d'entraide générale et d'assistance aux secours), réalisé par la commune de Wickerschwihr, dans le Haut-Rhin. Sous l'impulsion du maire et d'un animateur architecte-urbaniste, les habitants ont participé à une analyse exhaustive de l'impact possible du risque sismique sur le fonctionnement de la commune et à l'élaboration d'une planification préventive. Des actions similaires sont en cours à Avignon (Vaucluse) et Lambesc (Bouches-du-Rhône).

**Il faut dépasser le stade de ces cas sporadiques et inciter les collectivités à généraliser de telles démarches.**

L'objectif est cependant beaucoup plus difficile à atteindre que dans les pays plus sismiques où la perception du risque est plus aigüe.

**Pour toutes ces actions de préparation, la répétition est une condition sine qua non d'efficacité. Elle suppose donc une continuité des programmes correspondants et des structures chargées de les mettre en oeuvre.**

## **7. CONCLUSION : RECAPITULATIF DES ACTIONS SOUHAITABLES**

Ce chapitre s'efforce de résumer les conclusions qui ont été égrénées au fur et à mesure du texte. Elles sont rappelées sous forme d'un tableau où apparaissent les résultats attendus. Il n'a pas été possible par contre, dans les délais impartis, d'y associer des ordres de grandeur des coûts associés.

Pour conclure, il faut rappeler le caractère très pernicieux du risque sismique par rapport à d'autres risques naturels, en France. En effet, si la fréquence des événements majeurs est faible (de l'ordre d'un séisme destructeur et 4 séismes responsables de dommages sévères par siècle), leur occurrence peut se traduire par une véritable catastrophe, tant par l'extension des zones touchées, que par le nombre des victimes, les pertes économiques et le traumatisme social. A la différence des inondations par exemple, il n'y a pas, de fait, de référence de l'impact d'un fort séisme sur un contexte d'urbanisme et d'aménagement représentatif des situations actuelles et de leur évolution rapide. Ainsi, les consciences s'endorment-elles facilement !

De même, la politique de prévention des risques naturels est fortement influencée par ces références statistiques à la période la plus récente (une à quelques décennies au maximum). Il est indispensable, pour le risque sismique, d'adopter une approche particulière qui s'appuie :

- sur des simulations,
- sur l'expérience de pays étrangers mais en veillant, alors, à bien tenir compte des spécificités des milieux construits, sociaux et culturels respectifs.

Ceci étant, force est de constater que des progrès considérables ont été accomplis en France, notamment dans le domaine de la réglementation parasismique. Ce satisfecit ne doit pas occulter les difficultés que pose la mise en oeuvre pratique d'une politique de prévention, ni la persévérance indispensable pour qu'elle porte ses fruits. Si le Japon et la Californie mesurent aujourd'hui l'efficacité de ces investissements, c'est qu'ils y ont été engagés depuis plus de trente ans ! Nos efforts actuels ne profiteront surtout qu'à nos enfants ou nos petits enfants.



Tableau 3 - Récapitulatif des propositions d'action

DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
<p>EVALUATION ET PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL (cf. chapitre 2)</p> <p>* Acquisition, validation et centralisation de données pertinentes (d'observation, expérimentales et théoriques)</p>	⇒ développer les bases de données néotectoniques et les études de paléosismicité	- localisation des sources sismiques et prise en compte des évènements extrêmes (risque spécial)	permanent
	⇒ pérenniser l'entretien de la base SIRENE et l'organisation des enquêtes macrosismiques		permanent
	⇒ poursuivre les missions d'études des séismes majeurs actuels sur le terrain	- compréhension de l'occurrence des séismes	permanent
	⇒ poursuivre les recherches sur la sismogenèse et les sources sismiques		permanent
	⇒ développer les bases de données sur les mouvements forts du sol et leur traitement statistique	- améliorer le calcul des mouvements de référence	permanent
	⇒ développer les modèles de rayonnement de la source, propagation et réponse des sites pour le calcul de mouvements synthétiques		permanent



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
* Exploitation des données et des résultats à des fins réglementaires	<p>⇒ rechercher un consensus sur la définition d'unités sismotectoniques en France et l'élaboration d'un zonage destiné aux ouvrages à risque spécial</p> <p>⇒ donner un nouvel essor aux approches probabilistes et finaliser une évaluation globale de ce type, à l'échelle du territoire national</p> <p>⇒ préserver la possibilité de réviser le zonage destiné aux ouvrages à risque normal</p>	<p>- favoriser l'application de la réglementation destinée aux ouvrages à risque spécial</p> <p>- permettre d'utiliser des critères explicites de prise en compte de l'aléa</p> <p>- améliorer l'efficacité de la réglementation</p>	<p>court terme</p> <p>moyen terme</p> <p>permanent</p>
EVALUATION ET PRISE EN COMPTE DE L'ALEA SISMIQUE LOCAL (cf. chapitre 2)			
* Acquisition de données pertinentes	<p>⇒ développer des méthodes de quantification et de cartographie des déformations potentielles associées aux failles sismogènes</p> <p>⇒ valider par des données expérimentales les résultats des modélisations numériques sur les effets de site</p> <p>⇒ valider les méthodologies d'application des fonctions de Green empiriques et d'enregistrement du bruit de fond</p>	<p>- justifier et permettre la prise en compte des failles sismogènes</p> <p>- justifier la quantification des effets de site et la faciliter</p>	<p>moyen terme</p> <p>moyen terme</p> <p>moyen terme</p>



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
* Cartographie et application à des fins réglementaires	⇒ généraliser la mise en oeuvre de SIG dans les études de microzonage sismique	- préserver les possibilités de révision des cartes d'aléa et faciliter le croisement avec les données de vulnérabilité	moyen terme
	⇒ développer des méthodes fiables et de coût raisonnable de cartographie de l'aléa mouvement de terrain sous action sismique	- faciliter la prise en compte des effets induits	moyen terme
	⇒ établir un cahier des charges pour la réalisation des études de microzonage	- garantir l'homogénéité des études et leur qualité	moyen terme
	⇒ engager un plan de réalisation de microzonages dans les secteurs à plus haut risque sismique	- prendre en compte l'aléa local dans des secteurs prioritaires	moyen terme
SURVEILLANCE SISMOLOGIQUE ET DONNEES EXPERIMENTALES (cf. chapitre 3)			
* Surveillance sismique	⇒ développer les réseaux denses régionaux et locaux, temporaires et/ou permanents	- améliorer l'identification des sources sismiques et la qualité de la surveillance	moyen terme
	⇒ recenser les besoins pour leur financement et mettre en place la politique budgétaire ad hoc	- garantir la pérennité des réseaux	court terme et permanent



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
* Réseau accélérométrique permanent	<p>⇒ développer progressivement, à partir des expériences pilotes engagées, un réseau permanent d'accéléromètres en champ libre et "en structures", couvrant correctement les zones sismiques du territoire national</p> <p>⇒ mobiliser d'urgence les moyens budgétaires d'investissement et assurer les crédits de fonctionnement</p>	- garantir l'acquisition de données sur les mouvements forts du sol propres au contexte français	<p>moyen terme</p> <p>court terme et permanent</p>
* Réseau accélérométrique mobile	⇒ garantir l'entretien et le renforcement du réseau mobile français	- permettre les campagnes expérimentales nécessaires à l'évaluation de l'aléa sismique local et à l'étude des sources	permanent
PREDICTION DES SEISMES (cf. chapitre 4)	<p>⇒ développer les travaux de recherche sur différentes méthodes, dont VAN et des tests de faisabilité en France</p> <p>⇒ évaluer la rentabilité d'une politique de développement de la prédiction dans le contexte français</p>	<p>- apprécier la faisabilité de la prédiction des séismes en France</p> <p>- justifier un éventuel investissement public</p>	<p>long terme</p> <p>court terme</p>



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
EVALUATION DE LA VULNERABILITE (cf. chapitre 5)  * Comportement des matériaux et des éléments de structures	⇒ établir le bilan des recherches effectuées en France et à l'étranger et définir les axes prioritaires de travaux futurs	- mettre à jour les besoins de recherche	court terme
	⇒ favoriser les études expérimentales éventuellement à travers une coopération internationale	- valider les calculs dynamiques	moyen à long terme
* Evaluation de la vulnérabilité du bâti existant	⇒ poursuivre les missions post-séismes et les analyses en retour correspondantes	- enrichir les connaissances sur le comportement du bâti lors d'expériences "en vraie grandeur"	permanent
	⇒ développer les méthodes de détermination des fonctions d'endommagement, notamment les approches simplifiées	- permettre le développement des études de vulnérabilité	moyen terme
	⇒ engager un programme prioritaire d'évaluation de la vulnérabilité des établissements publics de la classe C et D, dans les zones les plus exposées	- mesurer le risque engageant directement la responsabilité de la Puissance Publique	moyen terme
	⇒ développer les méthodes d'évaluation globale de la vulnérabilité du milieu construit, notamment les approches simplifiées, et les outils cartographiques correspondants	- évaluer le risque à l'échelle de villes, de bassins, de régions	moyen terme



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
	⇒ engager un programme prioritaire d'évaluation de la vulnérabilité du bâti aux Antilles	- dégager des actions d'urgence de réduction du risque aux Antilles	court terme
* Vulnérabilité des milieux social et culturel	⇒ multiplier les études de vulnérabilité humaine dans les ERP des régions les plus exposées	- établir des plans particuliers de préparation	moyen terme
	⇒ inciter les collectivités les plus exposées à établir et exploiter des scénarios de risque	- établir des plans communaux de préparation	moyen terme
	⇒ dans le cadre des programmes DIPCN, soutenir les projets GEMITIS-Méditerranée et GEMITIS-Antilles jusqu'à leur terme	- disposer d'études pilotes allant jusqu'à la proposition d'un programme de gestion des risques	court terme
PROTECTION PARASISMIQUE (cf. chapitre 6)			
* Réglementation et cadre d'application (ouvrages nouveaux)	⇒ publier les recommandations AFPS 90 sous forme de nouvelles règles PS et adapter l'arrêté de juillet 92 en conséquence	- améliorer l'efficacité de la protection parasismique	court terme
	⇒ mettre en place un groupe de travail sur l'application pratique de la réglementation récente	- proposer des actions facilitant la mise en oeuvre pratique de la réglementation, analyser en retour les dysfonctionnements	court terme



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
	<p>⇒ développer les moyens de contrôle (y compris de type "aléatoire" sur chantier) ; établir un guide pratique du contrôle sur chantier</p> <p>⇒ mettre en place un groupe de travail sur l'aspect juridique lié à l'application de la réglementation et aux sanctions</p> <p>⇒ développer un programme d'envergure d'information et de formation sur les règles PS, vers un public varié et à l'aide de supports multiples</p>	<p>- garantir l'application pratique de la réglementation</p> <p>- favoriser l'acceptation de la réglementation et sa bonne application</p>	<p>court à moyen terme</p> <p>court terme</p> <p>court terme</p>
* bâti existant	<p>⇒ définir et mettre en oeuvre une politique globale de traitement préventif du bâti existant</p> <p>⇒ favoriser les recherches sur le confortement parasismique du bâti existant avec une attention particulière pour le patrimoine historique et architectural</p> <p>⇒ établir des règles techniques qui soient utilisables comme un guide</p> <p>⇒ inventorier dans les zones les plus exposées, les programmes prioritaires de confortement et/ou réhabilitation</p> <p>⇒ mettre en place un système de financement de tels programmes (assurances?)</p>	<p>- étendre la protection parasismique à la totalité du parc immobilier</p> <p>- proposer des solutions pratiques de traitement du bâti existant</p> <p>- faciliter la mise en oeuvre de ces solutions</p> <p>- proposer des mesures d'urgence</p> <p>- permettre la mise en oeuvre économique de ces mesures</p>	<p>moyen terme</p> <p>moyen terme</p> <p>court terme</p> <p>court terme</p> <p>moyen terme</p>



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
	⇒ mettre en oeuvre des mesures d'urgence sur certains secteurs des Antilles (étudier les possibilités de désaffectation de certaines zones, avec relogement)	- sauver des vies humaines actuellement très menacées	court terme
	⇒ développer un texte législatif régissant le bâti existant, à partir des travaux d'un groupe d'experts	- garantir à terme l'application pratique de ces mesures	moyen terme
PREVENTION (suite) (cf. chapitre 6)			
* aménagement et occupation des sols	⇒ profiter de la procédure PPR pour instaurer un cahier des charges intégrant les résultats des microzonages sismiques en termes d'orientation de l'aménagement et par référence aux nouvelles règles PS	- améliorer la prise en compte du risque sismique dans la construction et l'orientation de l'aménagement	court terme
	⇒ développer des études prioritaires sur les problèmes posés par l'occupation des sols très exposés, par de fortes densités de constructions très vulnérables (zones tests)	- proposer des solutions alternatives dans des zones à très haut risque	court terme
* information et sensibilisation	⇒ inciter à la généralisation de la mise en place des CIP	- prise de conscience la plus large possible du risque sismique et des moyens de le réduire	court terme
	⇒ faire connaître la réglementation		court terme



DOMAINE CONCERNE	PROPOSITION	RESULTATS ATTENDUS	CARACTERE DE L'ACTION OU DELAI DE MISE EN OEUVRE
* formation et éducation	⇒ mettre en place la formation ad hoc de tous les milieux professionnels impliqués dans l'acte de construire	- garantir l'efficacité de la politique de prévention du risque sismique	moyen terme
	⇒ impliquer l'ensemble du système éducatif	- inculquer des réflexes précoces de prévention	moyen terme
	⇒ créer des enseignements techniques (IUT) et des troisièmes cycles (universités, écoles d'ingénieurs) spécialisés en génie parasismique	- garantir l'existence de professionnels compétents	court terme
* Préparation	⇒ généraliser l'élaboration de plans communaux de préparation aux situations de crise	- réduire les pertes en vies humaines et les traumatismes sociaux en cas de catastrophes	moyen terme
	⇒ prévoir la continuité des programmes d'entretien et de répétition de tels plans et la pérennité des structures en ayant la charge		permanent

NB : Ordre de grandeur des délais de mise en oeuvre

- Court terme : inférieur à 5 ans
- Moyen terme : 5 à 10 ans
- Long terme : supérieur à 10 ans