

**Contenu du CD intitulé**

**AFPS**  
**Groupe de travail Zonage 2005-2007**  
**Résolution du Conseil, Avis du CST, Rapport**

*Ce CD contient les documents suivants :*

- Lettre AFPS, PL/07/04/11, datée du 26/04/2007 présentant la résolution votée le 19/04/2007 par le conseil de l'AFPS concernant le projet de zonage.
- Avis du Comité Scientifique et Technique (réunion du 21/02/2007).
- Rapport du Groupe de travail « Zonage », 1er mars 2007

Destinataires in fine

PL/07/04/11

Objet : Projet de zonage sismique de la France

Paris, le 26 avril 2007

Messieurs,

Dans mon courrier du 11 juillet 2006 avec le même objet, je vous communiquai, sous la forme d'une carte d'aléa sismique du territoire métropolitain (Corse exclue), le résultat principal des travaux du groupe « zonage » de l'AFPS. Je vous indiquai aussi que ces travaux feraient l'objet d'un rapport qui vous serait communiqué à sa parution. Je vous prie de trouver ce rapport en pièce jointe.

Concernant le projet de zonage actuel<sup>1</sup>, ayant pris connaissance des travaux du groupe « zonage » et de l'avis émis sur ces travaux par le Comité Scientifique et Technique de l'AFPS, le Conseil de l'AFPS

- constate l'expression d'avis divergents sur cette question ; cependant,
- en observant que les travaux menés par l'AFPS conduisent dans les zones les plus exposées du territoire à des valeurs d'accélération comparables à celles du projet de zonage, recommande de procéder à l'ajustement suivant :  
Z1b : 0,5 ms<sup>-2</sup> ; Z2a : 1 ms<sup>-2</sup> ; Z2b : 1,5 ms<sup>-2</sup> ;
- conclut que par rapport au zonage actuellement en vigueur, les travaux menés par l'AFPS confirment une extension importante des zones exposées ; à cet égard, sans mettre en cause le projet de zonage dans son ensemble, le rapport du groupe « zonage » montre que des ajustements sont possibles, en particulier dans certaines zones peu exposées ;
- recommande de ne pas associer de période de retour à ce projet de zonage ;
- considère que la mise en application conjointe de l'Eurocode-8 et du projet de zonage procurerait, dans l'ensemble, une protection sensiblement accrue<sup>2</sup>.

En vous assurant du dévouement de l'Association que je représente, je vous prie d'agréer, Messieurs, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Pierre Labbé  
Président de l'AFPS

P.J. : Rapport du Groupe de Travail « Zonage », avis du CST de l'AFPS, un CD

---

<sup>1</sup> Dans le projet porté à la connaissance de l'AFPS, les valeurs de calage des  $a_g$  sont les suivantes :  
 $a_{gR} = 0,0 \text{ m/s}^2$  en Z1a ;  $0,7 \text{ m/s}^2$  en Z1b ;  $1,1 \text{ m/s}^2$  en Z2a ;  $1,6 \text{ m/s}^2$  en Z2b (dénomination du GEPP).

<sup>2</sup> Le coût de cette augmentation de protection est estimé par le GEPP.

Destinataires :

Monsieur le Président du GEPP,  
Conseil Général des Ponts et Chaussées  
Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire,  
du Tourisme et de la Mer  
Arche Sud  
92055 LA DEFENSE Cedex

Monsieur le Directeur Général  
Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction,  
Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire,  
du Tourisme et de la Mer  
Arche Sud  
92055 LA DEFENSE Cedex

Monsieur le Directeur  
Direction de la Prévention et de la Protection des Risques  
Ministère de l'Écologie et du Développement Durable  
20 avenue de Ségur,  
75302 PARIS 07 SP

Copie avec PJ : M le Président de la CNPS

Copies sans PJ : Membres du Conseil de l'AFPS



**AFPS**

**RAPPORT DU GROUPE de TRAVAIL**

**« ZONAGE »**

01 Mars 2007

## **Composition du Groupe de Travail**

-PY Bard	LGIT/LCPC
-B Hernandez	CEA/DAM/LDG
-W Jalil	Retraité de la SOCOTEC
-P Labbé	EDF/SEPTEN
-P Mouroux	BRGM, maintenant retraité
-P Sollogoub	CEA/DEN/DM2S
-E Viallet	EDF/SEPTEN

*Relevé des conclusions, à l'issue de la réunion du Comité Scientifique et Technique de l'AFPS du 21 Février 2007.*

Le CST :

- prend acte du travail important accompli par le groupe de travail zonage de l'AFPS. Ce travail ouvre notamment des pistes nouvelles pour intégrer l'ensemble des données disponibles en termes de retour d'expérience et mérite d'être poursuivi ;
- constate l'expression d'avis divergents sur les travaux effectués. Compte tenu des différents éléments portés à sa connaissance, le CST considère qu'il n'est pas souhaitable que l'AFPS remette en cause le projet de zonage réglementaire qui a été porté à sa connaissance, suite aux travaux antérieurs du GEPP ;
- recommande de ne pas associer de période de retour à la carte de zonage réglementaire.

## TABLE DES MATIERES

1 Introduction	4
2 Point a : Origine des écarts entre les différentes cartes	6
3 Point b et c : Intervalles de confiance des valeurs et périodes de retour	8
4 Point d : Niveau de protection atteint	17
5 Propositions	21
Annexe 1 Modèle GZ2006	23
Annexe 2 Evaluation du risque historique et comparaison du risque calculé	27
Annexe 3 Evaluation des courbes de fragilités et des probabilités de ruine des structures	28
3 1 Introduction	28
3 2 Courbes de fragilités	28
Annexe 4 Courbes d'aléa	32
Annexe 5 Documents émis par le GT	33
Annexe 6 Proposition de zonage	34
Annexe M1 Complément de minorité P-Y Bard, W Jalil, P Mouroux	35
Annexe M2 Complément de minorité B Hernandez	49
Annexe M3 Complément de minorité W Jalil	51
Annexe M4 Complément de minorité E Viallet	53
Annexe M5 Complément de minorité P Sollogoub	59

# 1 INTRODUCTION

L'EUROCODE 8 recommande de dimensionner les ouvrages neufs pour des actions sismiques ayant une période de retour de 475 ans, c'est-à-dire dont la probabilité de dépassement n'excède pas 10% pour des ouvrages de durée de vie de 50 ans. Le zonage sismique actuel de la France (publié en 1986) ayant une base essentiellement historico-déterministe, l'application de l'EC8 a donc rendu nécessaire la définition d'un nouveau zonage élaboré sur une base probabiliste, approche jusqu'alors inappliquée pour la codification en France.

L'AFPS s'était intéressée à ces approches par l'intermédiaire du Groupe de Travail EPAS (Etude Probabiliste de l'Aléa Sismique) qui de 1996 à 2001 a développé des éléments sur cette approche et a proposé une première carte d'aléa.

Une étude d'évaluation probabiliste de l'aléa, tenant compte également des progrès de la connaissance en sismologie (historique et instrumentale) a été lancée en 2000 par le MEDD qui en a assuré le pilotage et le contrôle avec l'assistance de l'IRSN et du groupe zonage du GEPP. Elle a été menée par la société GEOTER qui a produit en 2002 une carte d'aléa, appelée MEDD2002 dans ce document. Une proposition de zonage en a été déduite par le groupe zonage du GEPP, qui a remis ses conclusions mi 2004; il est défini par des zones géographiques et, par zone, par des valeurs d'accélération associées et des formes spectrales associées. Le travail a été présenté au CST de l'AFPS, à divers stades d'élaboration, sans remarques particulières.

En 2005, des circonstances diverses, explicitées ci-dessous, ont fait naître des interrogations sur certaines valeurs du zonage :

1. Une carte d'aléa sismique de la France a été publiée dans le BSSA par le CEA-LDG en décembre 2004 ; elle présente des niveaux très sensiblement inférieurs à ceux de MEDD2002.
2. Dans le cadre d'un groupe de travail du MEDD visant à réviser le décret concernant la prise en compte du risque sismique pour les installations classées, il a été proposé de partir du zonage "risque normal" pour définir les niveaux de protection par défaut pour les « installations à risque » à l'aide de coefficients d'importance. La comparaison avec des études de site spécifiques recommandées par le décret, montre des différences assez significatives entre les deux types d'approche, différences pouvant aller dans un sens comme dans l'autre, suivant les sites et les études.
- 3 Il a semblé souhaitable d'envisager une exploitation des courbes d'aléa aux faibles périodes de retour, pour estimer le nombre annuel de dépassements de certaines valeurs seuil d'accélération, nombre que l'on peut alors comparer aux déclenchements réels observés soit sur les capteurs du RAP soit sur ceux placés sur les sites EDF. Il est à noter que cette comparaison n'avait pas été tentée lors des travaux MEDD2002: cette étude avait été lancée en 2000, et à l'époque, le RAP venait à peine d'être créé et financé au niveau national.

- 4 La comparaison aux valeurs de dimensionnement retenues dans d'autres pays. Les experts familiarisés aux études sismiques dans des régions beaucoup plus actives que la France ont attiré l'attention sur les niveaux anormalement élevés d'accélération retenus pour le dimensionnement, auxquels conduit la superposition de l'aléa, des coefficients de sol et des coefficients d'importance.

Devant ces interrogations, le Conseil de l'AFPS a pris la décision, en Juin 2005, d'alerter les Ministres concernés (Ecologie et Equipement), et les a informés d'une action de l'AFPS pour instruire les 4 points suivants :

- a) Identifier l'origine des écarts entre les différentes cartes d'aléa sismique disponibles
- b) Identifier les intervalles de confiance attachés aux valeurs d'accélération figurant dans ces cartes
- c) Fournir un ordre de grandeur réaliste de la période de retour attachée à un niveau d'accélération donné
- d) Estimer le niveau de protection atteint au terme de l'ensemble de la démarche de conception d'un ouvrage, en intégrant les marges incluses dans le choix du niveau de protection sismique et celles incluses dans les pratiques d'ingénierie

Un Groupe de Travail (dont la composition est donnée p.2) a été constitué afin d'apporter des éléments de réponse aux questions soulevées ci-dessus. Il a examiné des documents émis lors de l'étude MEDD2002, mené des évaluations propres et demandé des calculs complémentaires à GEOTER\*. En particulier, quelques membres du GT ont jugé indispensable de se comparer au retour d'expérience, chaque fois que cela était possible. Vu le temps limité dont a disposé le groupe, il est clair qu'il n'a abordé qu'une partie des points pertinents et certains de façon préliminaire. En particulier, le groupe ne s'est préoccupé que de l'accélération maximale du sol et non des valeurs spectrales. De plus, le groupe ne s'est intéressé qu'à la France métropolitaine, hors Corse.

Cette note présente les conclusions essentielles du Groupe de Travail pour les 4 points évoqués ci-dessus. Les études menées par le groupe sont résumées dans les Annexes 1 à 3. Les documents émis par le Groupe sont listés en Annexe 4.

Etant donné le temps limité dont a disposé le groupe, la complexité des sujets abordés et le nombre important d'hypothèses possibles, le groupe a eu des discussions animées et parfois vives ; il n'a pas été possible d'obtenir un consensus sur un certain nombre de points.

Le contenu de ce rapport traduit le compromis obtenu au sein du Groupe de Travail. Afin de traduire les discussions et les points de « désaccord » ou de divergences d'interprétation, tous les membres du groupe qui souhaitaient apporter un éclairage différent l'ont fait dans des annexes, numérotées de M1 à M5.

**Le rapport du Groupe est ainsi constitué de l'ensemble complet formé par :**

**Les Chapitres 1 à 5**

**Les Annexes 1 à 6**

**Les Annexes M1 à M5.**

---

\* Le contenu technique de l'étude GEOTER a été défini par le Groupe de Travail. L'étude a été financée par le CEA.

## 2 Point a : origine des écarts entre les différentes cartes

D'une manière générale, les écarts entre différentes études d'aléa probabiliste peuvent avoir des origines multiples, parmi lesquelles:

- Différences fondamentales dans la considération des incertitudes et de leur propagation.
- Différences dans le traitement du catalogue de sismicité, en particulier en ce qui concerne la relation entre les différentes magnitudes
- Lois de transformation des intensités macrosismiques en magnitude
- Différences des modèles d'atténuation
- Prise en compte de l'effet de site (bien que généralement les cartes probabilistes soient établies pour des conditions au rocher)
- Différences des modèles conceptuels de calcul probabiliste

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les seules études LDG2004 et MEDD2002, la comparaison brute (cf. réf GZ1) des rapports d'accélération obtenues par les deux cartes donne une valeur égale à 9.5 en moyenne (de 5 en moyenne dans les zones actives : frontières Est et Sud, à 25 dans les zones stables : bassins parisien et aquitain). Les figures 1 et 2 présentent les accélérations médianes à 475 ans des deux études. Les éléments essentiels qui contribuent à la différence entre les cartes pour l'aléa au rocher sont (réf GZ2):

- La relation d'atténuation, facteur prépondérant, induisant un facteur de 2 à 7 suivant les sites
- La prise en compte ou non de la dispersion dans la relation d'atténuation (facteur d'environ 2 pour une période de retour de 500 ans; ce facteur peut atteindre des valeurs supérieures à 3 pour des périodes de retour de 10000 ans ou plus)
- La prise en compte ou non d'une conversion de magnitude dans l'application des lois d'atténuation (facteur 1.4 à 2.1, plus fort dans les zones à faible sismicité)

Pour le groupe de travail, cette comparaison a été l'occasion d'une sensibilisation aux incertitudes existant dans ces approches et a permis de mettre en avant les éléments sur lesquels il fallait concentrer ses efforts. Elle a conduit à adopter une démarche probabiliste conforme au niveau d'étude que requiert le développement d'un zonage probabiliste réglementaire (du type de celle menée en France en 2002, ou dans les pays frontaliers), tout en recherchant à fonder les choix clefs sur les paramètres d'entrée (lois d'atténuations, conversions de magnitude, traitement des incertitudes) par un calage des modèles prédictifs aux observations disponibles sur la période instrumentale, dans la mesure évidemment où cela est techniquement possible et scientifiquement significatif.

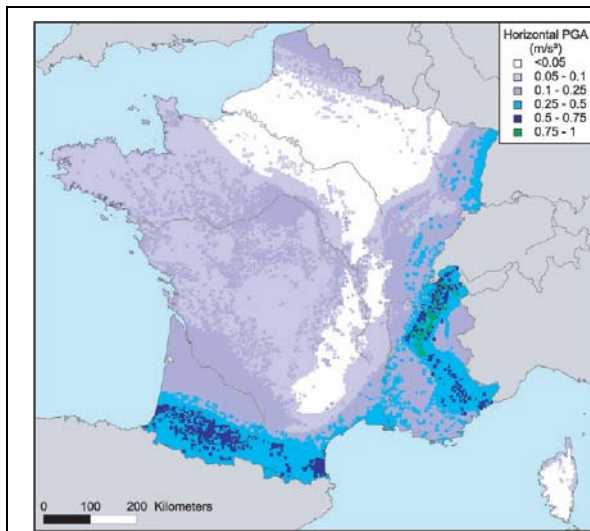


Figure 1. Carte des accélérations du sol à 475 ans de période de retour du modèle LDG2004, considérée dans le GT « Zonage » de l'AFPS. Cette carte prend en compte des effets de site évalués forfaitairement en fonction de la géologie de surface

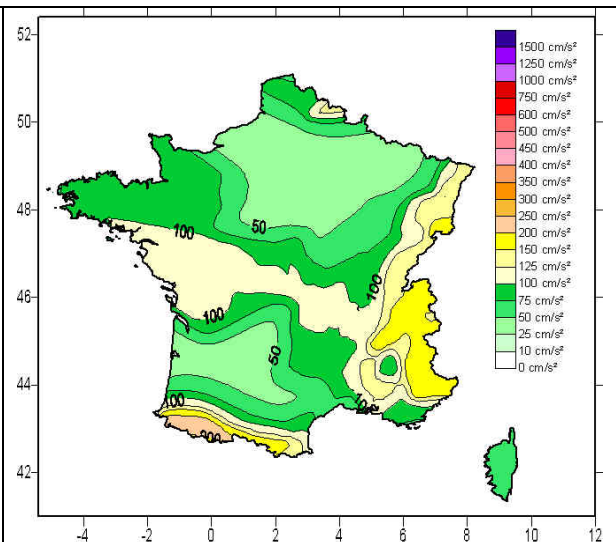


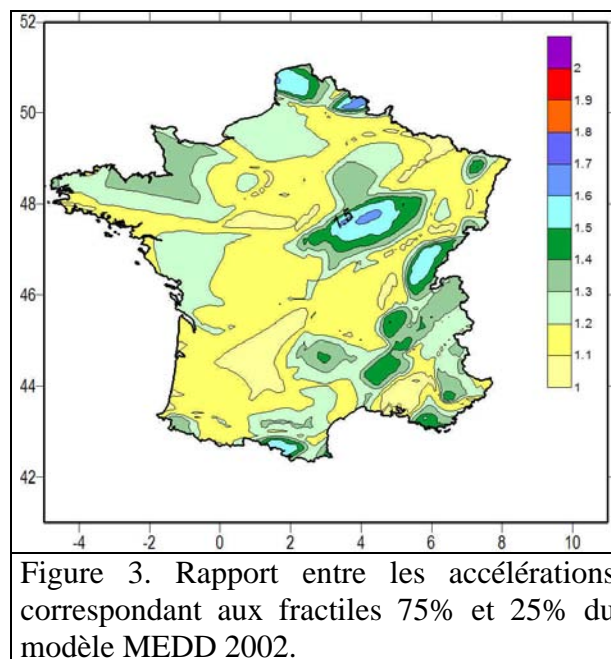
Figure 2. Carte des accélérations médianes du sol à 475 ans de période de retour du modèle MEDD2002, considérée dans le GT « Zonage » de l'AFPS. Cette carte est établie pour des sites "au rocher".

# 3 Points b et c : intervalles de confiance des valeurs et périodes de retour réalistes

## 3.1 Carte MEDD2002

Deux raisons essentielles ont conduit les membres du GT, après un examen attentif, à juger l'étude MEDD2002 impropre à fournir une estimation fiable de ces intervalles de confiance, bien qu'il ait été très clairement reconnu qu'elle a été menée en suivant les standards actuels des études probabilistes, avec une démarche d'ensemble très bien documentée.

- a) La première, déjà évoquée dans la section précédente, est liée à l'absence de conversion de magnitude  $M_{LDG} - M_S$ , qui induit une certaine surestimation moyenne
- b) La seconde est liée à la variabilité trop limitée des résultats MEDD2002, qui s'exprime par un rapport relativement faible entre les valeurs d'accélération correspondant au fractile 75% et celle correspondant au fractile 25% (Figure 3). Cette variabilité limitée s'explique par l'emploi, en métropole, de seulement deux lois d'atténuation, qui plus est très voisines l'une de l'autre pour ce qui concerne les accélérations maximales (la situation est différente pour les ordonnées spectrales à d'autres périodes)

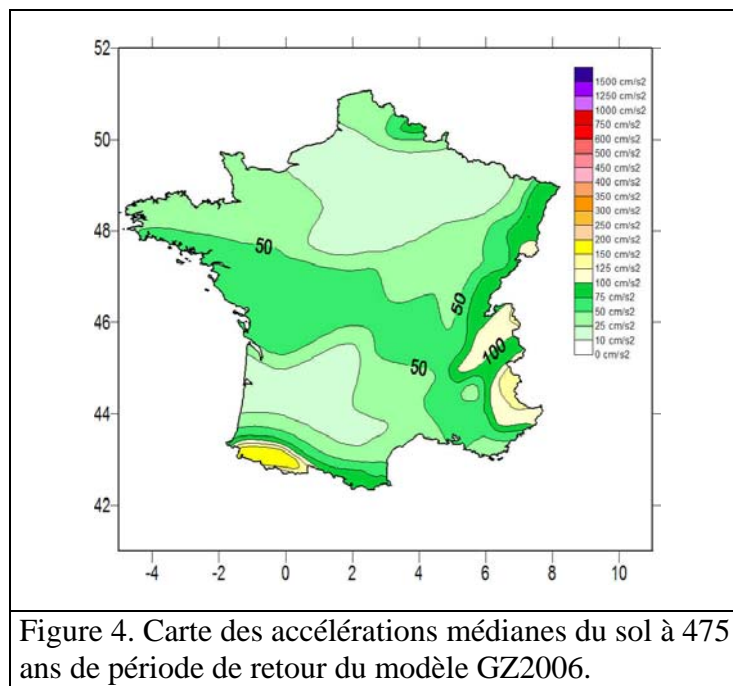


## 3.2 Le modèle GZ2006

Le GT a donc souhaité réaliser des études probabilistes complémentaires pour

- d'une part, obtenir une estimation "réaliste" (au sens anglo-saxon de "best-estimate", c'est-à-dire une estimation qui se veut "objective", en essayant de ne pas inclure, de manière implicite ou explicite, des coefficients de sécurité).
- D'autre part mieux appréhender les intervalles de confiance ou incertitudes associés

Dans cet objectif, le GT a demandé à la société GEOTER, d'effectuer, sur la base des mêmes données de sismicité que celles utilisées lors de l'étude MEDD2002 (même catalogue, même zonage sismotectonique, mêmes profondeurs des foyers), une nouvelle étude probabiliste intégrant un arbre logique plus fourni – tout en restant conceptuellement inchangé - avec d'autres branches et d'autres hypothèses, ainsi que diverses études de sensibilité particulières pour mieux appréhender l'influence de certains paramètres d'entrée différents, ainsi que les incertitudes associées. La carte obtenue, appelée GZ2006, est présentée sur le Figure 4 à 475 ans de période de retour.



Les principaux apports originaux de ces travaux - par ailleurs présentés un peu plus en détail dans l'annexe 2, et rapportés en totalité dans les documents GZ3 et GZ7 - peuvent se résumer comme suit:

- Prise en compte de quelques lois d'atténuation plus récentes publiées depuis 2002
- Réflexions sur les risques de prise en compte multiple de certaines incertitudes, et utilisation de moyens palliatifs au travers de l'écart-type sur les relations d'atténuation
- Adaptation des pondérations au niveau de l'activité sismique et à la période de retour considérée
- Essais de développement de modèles probabilistes en intensité
- Etudes de sensibilité associées
- Efforts de comparaison entre les niveaux prédits par les modèles et les observations instrumentales disponibles (Réseau Accélérométrique Permanent – RAP -, centrales nucléaires EDF – "REX" -).

Ce dernier point – une première mondiale dans les études probabilistes - a été jugé important par le GT car les observations disponibles sont les seuls éléments sur lesquels on

peut tenter une telle comparaison, mais sa valeur réelle a été appréciée assez différemment d'un membre du GT à l'autre.

### *3.2.1 Spécificités du Modèle GZ2006*

Dans le temps imparti au GT, il n'a pas été raisonnablement possible de construire un modèle entièrement nouveau : il a été délibérément choisi de partir du Modèle MEDD2002 et de profiter de l'important travail effectué pour le mettre au point. Pour cette raison, on a été contraint à utiliser la structure de l'arbre logique MEDD2002, sans possibilité de le faire évoluer. Le GT, dans lequel 6 personnes ont participé activement à cette phase, n'a pas de prétention à une quelconque « représentativité ».

Certaines hypothèses prises ont été l'objet de discussions, parfois vives, comme par exemple la troncature à 2 sigmas de l'atténuation ; les calculs de sensibilité ont montré que cette hypothèse diminuait l'aléa de 10% à 20% selon les zones par rapport au cas où l'intégration se faisait jusqu'à l'infini. Mais cette dernière hypothèse n'est pas, non plus, réaliste, car l'accélération qui se produit sur un site est certainement bornée. GZ2006 a considéré la relation de M. Nicolas et al pour la conversion des magnitudes  $M_s$  et  $M_L$ , alors que MEDD2002 avait identifiée ces deux magnitudes. Une branche « intermédiaire » aurait pu être introduite dans GZ2006.

Une branche avec un écart type diminué par rapport d'un tiers par rapport à la valeur donnée par la régression définissant la loi a également été proposée parce qu'il a semblé à certains que les variabilités ont pu être comptées plusieurs fois dans la définition de la relation d'atténuation car, dans les signaux des bases de données il y a une incertitude sur la position de l'épicentre et sur la magnitude qui sont occultées. Les membres du GT ont eu la possibilité de donner un poids fort ou faible à cette branche.

Enfin, la pertinence de la comparaison à des observations sur un temps limité (de l'ordre de la vingtaine d'années sur les sites instrumentés) a été l'objet de discussion au sein du GT, compte tenu du temps limité d'observation (environ 5 ans par station RAP – 107 ans en cumulé - et 20 ans par centrale nucléaire – 404 ans en cumulé). L'élément qui semble important est l'indépendance des observations sur les différents sites qui permet, dans l'hypothèse Poissonienne généralement retenue dans ces études, d'« ajouter » les temps d'observation, ce qui conduit à des durées « équivalentes » de l'ordre de 400 à 500 ans, ce qui devient pertinent.

A contrario, GZ2006 a été dérivé de MEDD2002 en ajoutant des hypothèses qui ont été jugées pertinentes pour le problème posé ; ceci donne une robustesse aux évaluations faites avec GZ2006 par rapport à celles de MEDD2002, en quantifiant l'effet de ces hypothèses qui ont été identifiées par le Groupe comme pouvant induire un biais. Il reste important de remarquer que, malgré des pondérations des différentes branches assez différentes d'un membre du GT à l'autre, les cartes médianes à 475 ans obtenues par 5 participants sur 6 sont tout à fait comparables. Il eût été intéressant de voir si les variabilités sont aussi comparables, et comment cela évolue pour des périodes de retour plus grandes. En conclusion, certains membres du Groupe considèrent que la Carte GZ2006 surestime le niveau sismique, alors que d'autres, au contraire considèrent qu'elle le sous-estime.

### *3.2.2 Comparaison par rapport aux observations instrumentales*

Une des originalités par rapport à MEDD2002 a été de calculer l'aléa à très faible période de retour (1, 5, 10, 20 ans) dans le but de le comparer avec les valeurs d'accélération observées sur 20 stations "rocher" du RAP et 20 sites nucléaires EDF.

Pour le modèle GZ2006, les chiffres apparaissent assez comparables pour les sites RAP, situés dans des zones actives, mais moins pour les sites EDF, situés pour l'essentiel dans des zones "stables" : le nombre de dépassements du seuil de déclenchement de 10 cm/s<sup>2</sup> prédits par le modèle GZ2006 reste supérieur aux observations.

Pour le modèle MEDD2002 (tableau 1bis) on observe que l'étude MEDD 2002 sur-estime significativement le nombre de déclenchement des stations RAP et des sites EDF.

Seuil en cm/s <sup>2</sup>	Sites RAP			Sites EDF				
	Observation	Prédiction			Observation	Prédiction		
		15%	<b>50%</b>	85%		15%	<b>50%</b>	85%
1	100	59	<b>92</b>	152	s.o.	s.o.		
5	23	26	<b>43</b>	62	s.o.	s.o.		
10	12	13	<b>22</b>	33	1	8	<b>16</b>	27
20	8	5	<b>9</b>	13	0	3	<b>6</b>	10

Tableau 1 : Nombre de déclenchements observés et nombre de déclenchements prédits par le modèle **GZ2006**

Seuil en cm/s <sup>2</sup>	Sites RAP			Sites EDF				
	Observation (événements M <sub>≥4</sub> cohérent avec relation d'atténuation)	Prédiction			Observation	Prédiction		
		<b>50%</b>				<b>50%</b>		
1	37	<b>253</b>			s.o.	s.o.		
5	13	<b>105</b>			s.o.	s.o.		
10	8	<b>54</b>			1	<b>67</b>		
20	6	<b>23</b>			0	<b>22</b>		

Tableau 1bis : Nombre de déclenchements observés et nombre de déclenchements prédits par le modèle **MEDD 2002**

### 3.2.3 Variabilité / Incertitudes des résultats GZ2006 et comparaison aux autres cartes

La prise en compte de plusieurs lois d'atténuation dans l'étude GZ2006 induit une variabilité importante des résultats, plus proche de ce qui est observé en général pour ces études. Les intervalles de confiance obtenus sont exprimés par les cartes des fractiles 15% et 85%. Le rapport entre les accélérations correspondantes (Figure 5) varie, sur l'ensemble du territoire, de 1.4 à 7, les valeurs les plus élevées correspondant aux zones "stables".

Néanmoins, malgré cette forte variabilité, la carte LDG2004 reste en dessous du fractile 15% de la carte GZ2006 (médiane), et la carte MEDD2002 médiane est généralement au dessus du fractile 85% (sauf dans les Pyrénées Occidentales). Le rapport entre les cartes médianes MEDD2002 et GZ2006 est compris entre 1.5 et 2.6, Les valeurs les plus élevées correspondant aux zones peu actives (Figure 6).

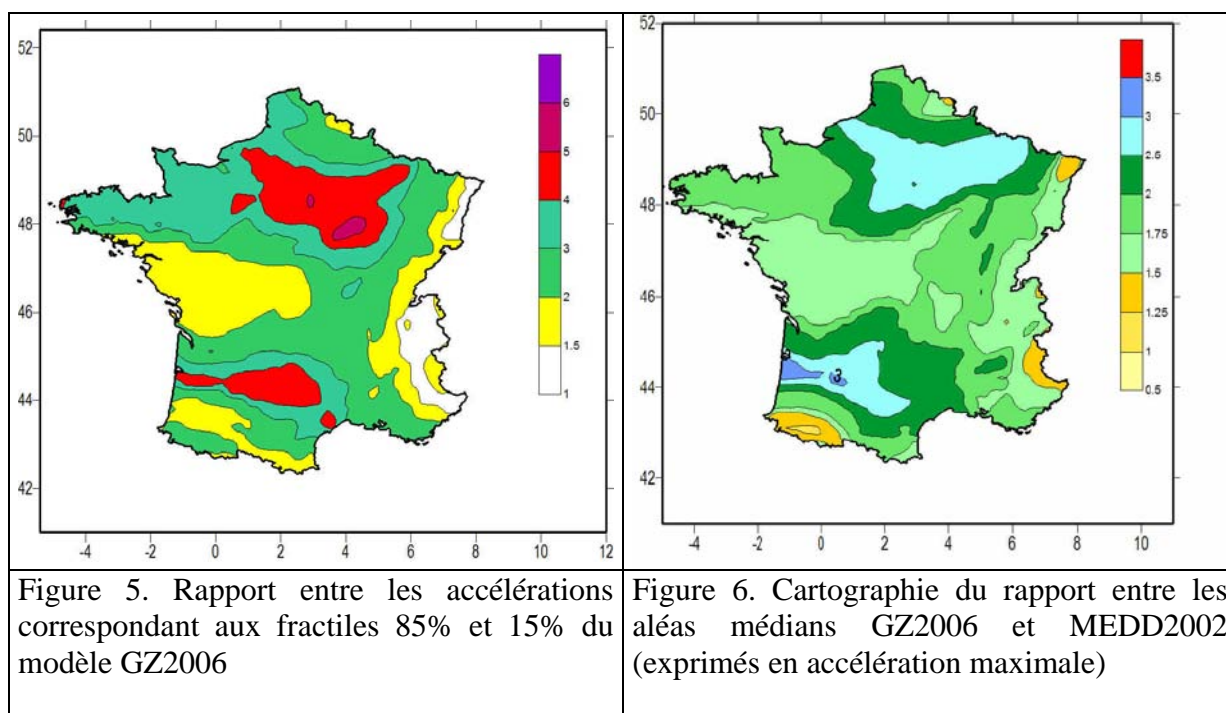


Figure 5. Rapport entre les accélérations correspondant aux fractiles 85% et 15% du modèle GZ2006

Figure 6. Cartographie du rapport entre les aléas médians GZ2006 et MEDD2002 (exprimés en accélération maximale)

De façon plus détaillée, les Figures A1 à A6 de l'Annexe 4, présentent les courbes d'aléa médianes pour les 6 villes suivantes, situées dans différentes zones d'activité sismique : Bordeaux Z1b, Limoges Z1b, Nice Z2b, Paris Z1a, Pau Z2b et Strasbourg Z2a, obtenues par les deux modèles MEDD2002 et GZ2006. Les 6 villes sont celles considérées dans l'article du CEA-LDG dans le BSSA qui fournit les courbes d'aléa. Pour les 6 sites, les ratios entre les accélérations médianes des deux cartes est indiqué sur le tableau 2. :

Ville	Bordeaux	Limoges	Nice	Paris	Pau	Strasbourg
Rapport MEDD2002/GZ2006	2.34	1.74	1.5	2.6	1.7	1.53
Rapport GZ2006/LDG2004	2.42	5.8	2.88	6.8	2.79	5.39

Tableau 2 Rapport des accélérations médianes des Cartes MEDD2002, GZ2006 et LDG2004

On peut également présenter une comparaison intéressante en termes de périodes de retour. En effet on peut observer sur les figures 7 et 8 la très grande similarité entre la carte médiane MEDD2002 à 475 ans de période de retour et la carte médiane GZ2006 à 1975 ans.

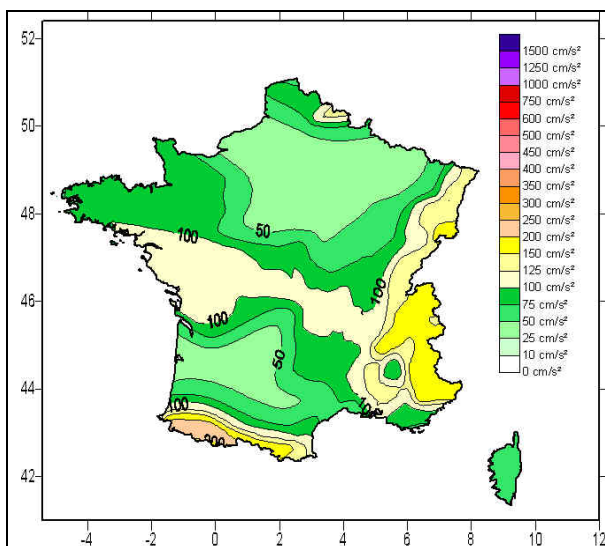


Figure 7. Accélérations médianes à 475 ans de période de retour du modèle MEDD2002

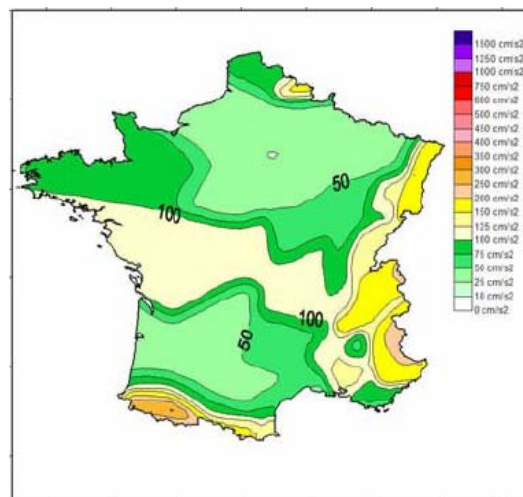


Figure 8. Accélérations médianes à 1975 ans de période de retour du modèle GZ2006

### 3.3 Projet de Zonage

A partir de la carte brute MEDD2002 a été défini un Projet de Zonage qui "interprète" les valeurs de la carte : découpage administratif, adaptation locale tenant compte de intensités ressenties, écart par rapport au zonage précédent, appréciations sur l'étude MEDD2002, nécessité d'un zonage simple en un nombre réduit de zones, traduction de la volonté de la puissance publique vis à vis de la protection parasismique.... Les plages de valeurs sont précisées sur le tableau 3. Les valeurs actuellement proposées sont les valeurs inférieures de la fourchette de chaque zone. Une description du zonage est donnée en annexe 7.

Zone	Z1a	Z1b	Z2a	Z2b
Accélération ( $m/s^2$ )	0 ou 0,4 <sup>1</sup>	0.7	1.1	1.6

Tableau 3 Accélérations maximales du Projet de Zonage

Afin de comparer le Projet de Zonage aux résultats des études MEDD2002 et GZ2006, on a considéré les grandeurs statistiques (médiane, fractiles 15% et 85%) correspondant à la distribution des valeurs médianes résultant de chaque modèle obtenues aux points de calcul situés respectivement dans chacune des 4 nouvelles zones réglementaires. Les Figures 9 à 12 présentent, pour chaque Zone, les valeurs médianes et les fractiles 15% et 85% de ces distributions pour 3 périodes de retour, 475, 975 et 1975 ans. Elles représentent seulement la variabilité géographique .

<sup>1</sup> 0 pour le bâti courant ; 0,4 pour les installations classées.

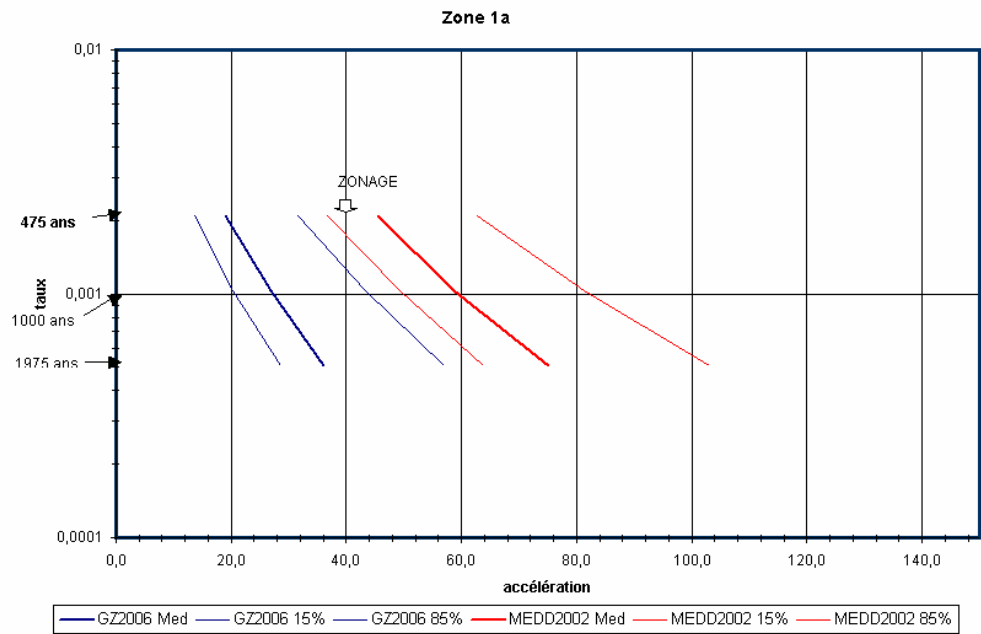


Figure 9 Courbes d'alea – Zone Z1a

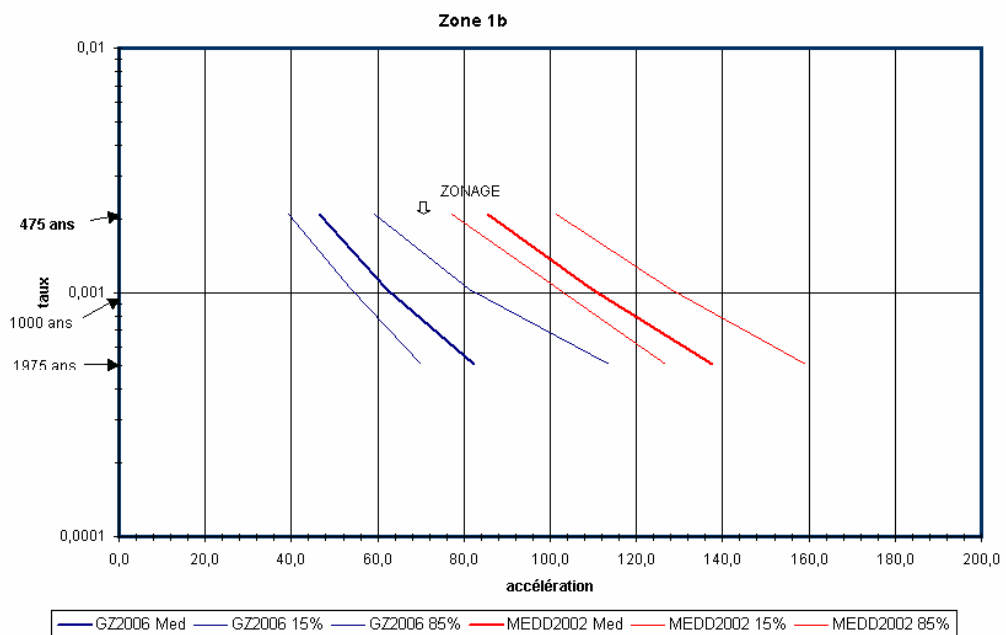


Figure 10 Courbes d'alea – Zone Z1b

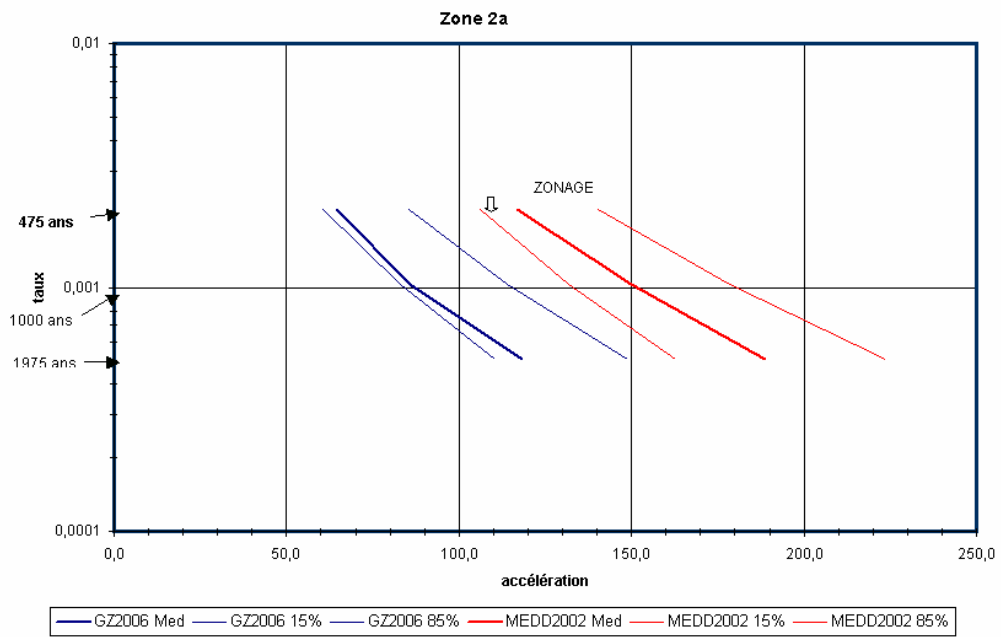


Figure 11 Courbes d'aléa – Zone Z2a

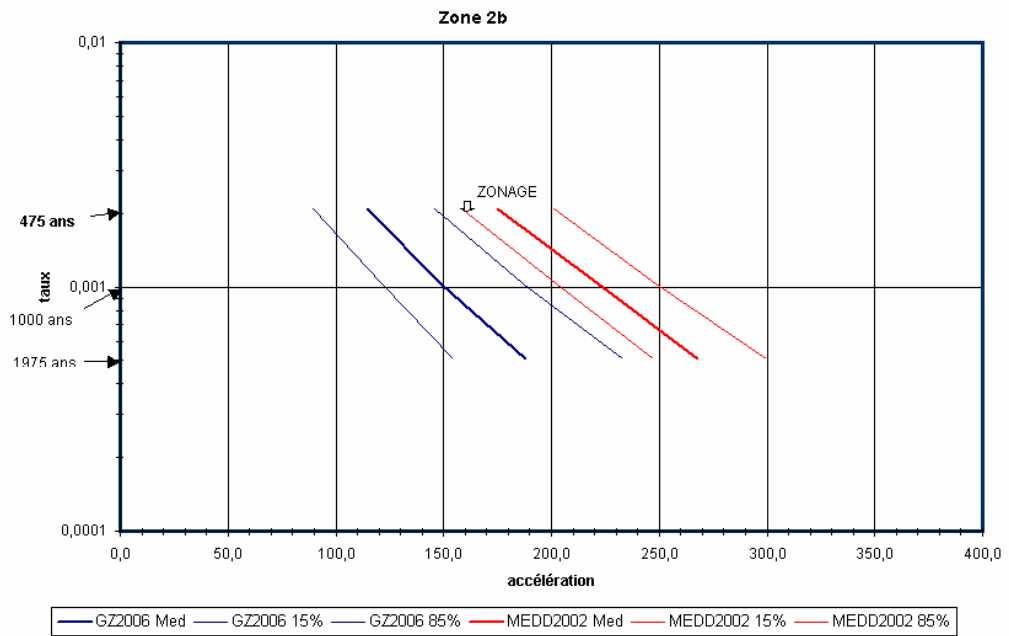


Figure 12 Courbes d'aléa – Zone Z2b

Le projet de zonage peut être examiné à la lumière des résultats de l'étude GZ2006 de diverses façons. En supposant le Zonage inchangé, on examine les périodes de retour comme cela est fait sur la figure 13. Pour établir cette figure on a, en chaque point de la grille d'analyse du territoire, recherché parmi les périodes de retour utilisées dans l'étude GZ2006 (200, 475, 975, 1975, 5000, 10000 ans) celle qui correspond au mieux à la valeur d'accélération affectée par le zonage en ce point (On a retenu la valeur 0,4 m/s<sup>2</sup> pour la zone Z1a). Par exemple, à Rennes, le zonage affecte une valeur 0,7 m/s<sup>2</sup> ; dans l'étude GZ2006, 975 ans est à Rennes la période de retour dont l'accélération associée est la plus proche de 0,7 m/s<sup>2</sup>.

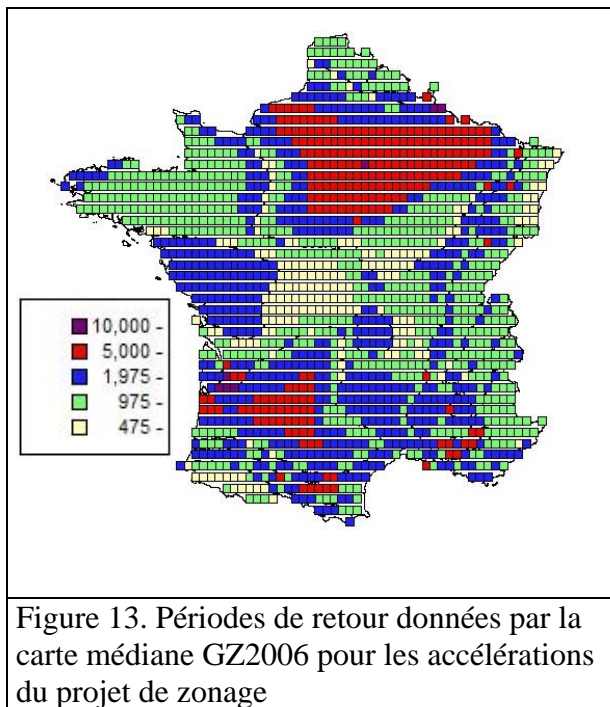


Figure 13. Périodes de retour données par la carte médiane GZ2006 pour les accélérations du projet de zonage

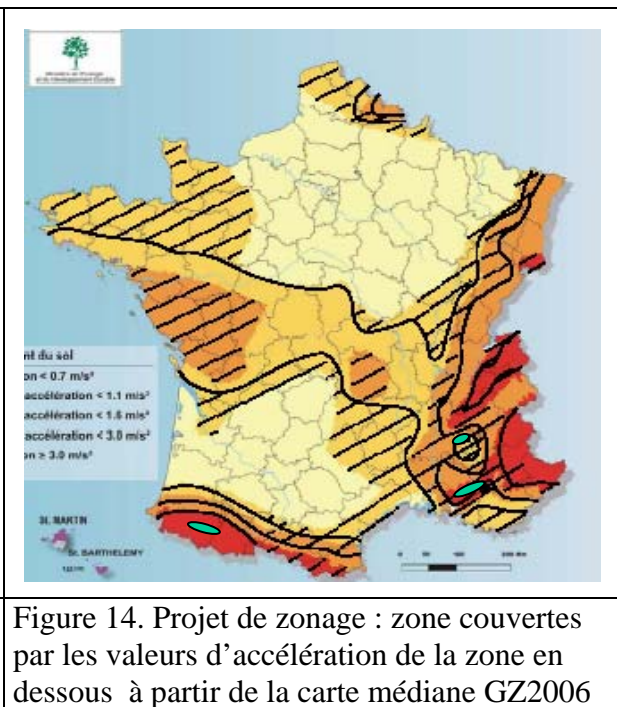


Figure 14. Projet de zonage : zone couvertes par les valeurs d'accélération de la zone en dessous à partir de la carte médiane GZ2006

Les résultats d'une carte de d'aléa présentent une variabilité, montrée par exemple sur les Figures 3 et 5, qui traduit les incertitudes « épistémiques » ou résultant des défauts de connaissance. La considération d'un Zonage ajoute une variabilité géographique supplémentaire, qui traduit les variations de l'aléa dans les différents points d'une Zone. La manière de traiter ces variabilités n'a pas fait l'objet de discussion approfondies pour dégager une approche consensuelle. mais reste une étape indispensable dans la définition d'un zonage officiel.

Une autre manière d'examiner le projet de zonage est la suivante : sur la Figure 14 les régions hachurées sont celles qui, au regard de l'étude GZ2006 seraient couvertes par la valeur d'accélération de la zone en dessous. Par exemple, pour la région englobant la Vendée et les Deux-Sèvres, qui dans le projet de zonage est en zone Z2a, la carte GZ2006 ne fait pas apparaître d'accélération supérieure à 0,7 m/s<sup>2</sup>. Si l'on prend pour base du zonage la carte médiane GZ2006, cette région serait donc couverte par une affectation en zone Z1b<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Remarques de détail sur la figure 14 :

- Pour des raisons de facilité d'exploitation des résultats GZ2006, les régions hachurées de la zone 1b sont celles qui sont couvertes par une accélération de 0,5 m/s<sup>2</sup> et non pas 0,4 m/s<sup>2</sup>.
- On voit apparaître sur la carte des régions de faible étendue de couleur verte qui correspondent à des cas particuliers : Par exemple une partie de la Drôme affectée à la zone 2a serait couverte par la zone 1a ; en revanche la zone située dans les Pyrénées apparaît comme non couverte malgré son classement en zone 2b.

## 4 Point d : niveau de protection atteint

L'objectif général des réflexions et travaux du GT était d'une part d'essayer de quantifier le niveau de risque final, en termes de probabilité de ruine, et d'autre part de voir si d'autres considérations que le seul niveau de dimensionnement ne devaient pas être prises en compte dans l'évaluation de cette probabilité de ruine, notamment celles liées à la qualité de conception et d'exécution.

Cet objectif était extrêmement ambitieux, et il faut bien considérer que les résultats mentionnés ci-dessous sont très préliminaires et partiels, et doivent donc être analysés avec beaucoup de prudence, compte tenu des grandes incertitudes liées à une méconnaissance du comportement des structures dans le domaine post-élastique, dans le contexte français, en particulier dans l'établissement des courbes de capacité et de fragilité et pour lesquelles les spécialistes étrangers ne sont pas non plus tous d'accord. Le faible nombre de réponses à l'enquête réalisée auprès de 22 experts et les piètres résultats obtenus montrent bien la difficulté d'estimer ce type de comportement par des ingénieurs structure, formés essentiellement à l'analyse et au traitement du comportement élastique des constructions.

### 4.1 Généralités

Le niveau de protection atteint au terme de l'ensemble de la démarche de conception d'un ouvrage a été quantifié par le Groupe en calculant la probabilité annuelle d'atteindre un dommage fixé sous l'action du séisme. Le calcul consista à faire la convolution entre l'aléa sismique et la fragilité de la structure, exprimant la probabilité conditionnelle d'atteindre le dommage visé en fonction du niveau du séisme, exprimé dans la même quantité que la courbe d'aléa.

Les courbes de fragilité ont été déduites des résultats obtenus dans le programme RISK-UE, qui n'incluait pas le bâti français. L'adaptation au contexte français a été menée en s'appuyant sur un questionnaire envoyé à des experts de structures – enquête dont le retour a cependant été assez maigre : 6 réponses sur 22 sollicitées - . Il visait en particulier à quantifier le comportement (exprimé en probabilité de dommage d'un certain degré) pour des niveaux de séisme plusieurs fois supérieurs au niveau de dimensionnement. Cette adaptation a consisté à . à modifier l'allure des courbes de capacité définies dans la méthodologie en adaptant les paramètres qui la définissent : augmentation de la « limite élastique » tenant compte des coefficients introduits dans le code et réduction de la ductilité ultime (cf Fig de l'Annexe 3). On ne s'est intéressé qu'à 2 types de structures : ossatures poutres-poteaux en béton armé (RC1) et structures en murs de refends en béton armé (RC2), pour une hauteur de bâtiment moyenne. La courbe de fragilité, dont la forme est donnée par la distribution d'une loi log-normale, est définie par deux paramètres : l'accélération médiane et la variabilité. La variabilité est censée couvrir toutes les incertitudes inhérentes au problème étudié. Pour l'étude d'une construction, la variabilité inclut le type d'analyse, le signal d'entrée, les paramètres structuraux, les marges, la qualité de l'exécution... Si on s'intéresse à un ensemble d'immeubles, la variabilité concerne, en plus des précédentes, les différences d'une construction à l'autre.

La Figure 15 présente une courbe de fragilité tracée avec une valeur médiane de 0.9g et un coefficient de variation de 0.9, ce qui selon les analyses courantes correspond au dommage de degré 4 pour une structure dimensionnée à 0.2g.

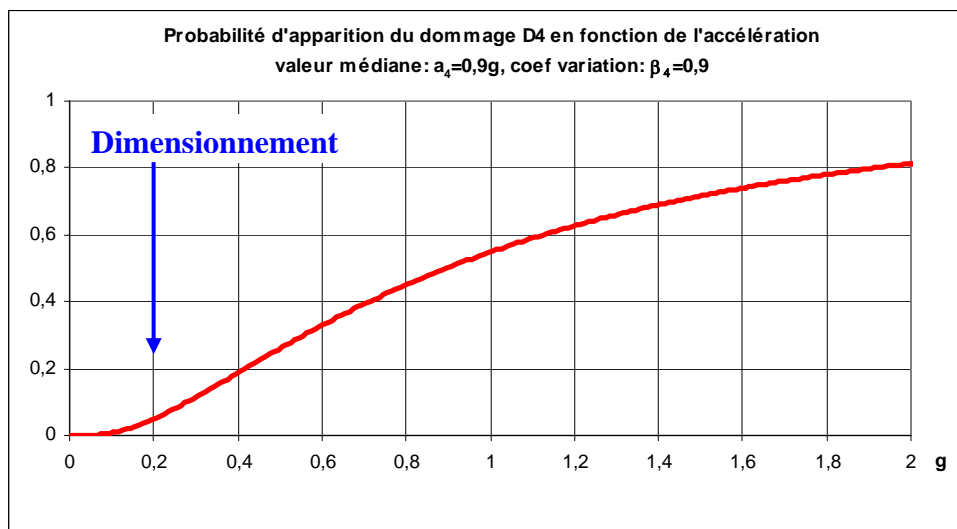


Figure 15 : exemple de courbe fragilité pour une structure dimensionnée à 0,2g

## 4.2 Analyses effectuées

Plusieurs étapes concernant les fragilités ont été réalisées :

- Détermination des fragilités à partir de l'approche RISK-UE avec des paramètres modifiés pour s'adapter au contexte français. Les structures sont supposées dimensionnées à 0.2g, valeur correspondant à la période de retour de 475 ans et résultant de l'application d'un coefficient de site..
- Adaptation des courbes de fragilité par comparaison à l'échelle d'intensité, ce qui a pour effet de diminuer la valeur numérique correspondant à la variabilité.
- Quantification du « gain » apporté par l'application des règles parasismiques en supposant qu'une structure non dimensionnée au séisme correspond à une structure dimensionnée à une accélération égale à  $0.4m/s^2$ .

## 4.3 Résultats et synthèse

Les résultats de ces analyses sont reportés dans le tableau suivant où on indique les probabilités de ruine. A titre de comparaison en matière d'exposition au risque, on présente aussi dans le tableau le taux de mortalité en France dû aux accidents de transport.

Cas	Hypothèses	Probabilité de ruine	Mortalité en France due aux accidents de transport
1	Approche RISK-UE adaptée au bâti français	2 à $7 \cdot 10^{-4}$	1. $10^{-4}$
2	Fragilité ajustée par référence à l'échelle EMS98	3 à $7 \cdot 10^{-6}$	
3	Bâtiment non dimensionné au séisme	2 à $3 \cdot 10^{-4}$	
Probabilité annuelle d'apparition de ruine sous l'effet du séisme pour des bâtiments des types RC1 et RC2 et comparaison au risque transport			

En regardant les deux premiers cas du tableau, on constate que la première ligne fournit une estimation qui paraît exagérée (comparable au risque routier) ; l'ajustement des courbes de fragilité par référence à l'échelle EMS98 (ce qui se traduit par une variabilité réduite) fournit un chiffre plus acceptable. Cependant, si on essaie de déduire de ces probabilités, le nombre de bâtiments détruits par un séisme sur un siècle, par exemple, ou le nombre de victimes, on trouve des chiffres beaucoup plus élevés que la réalité, alors même que dans la réalité la proportion de bâtiments bénéficiant d'une protection parasismique à 0,2g est extrêmement faible.

Cette surestimation du risque peut trouver son origine dans une surestimation soit de l'aléa soit de la fragilité, ou plus sûrement dans une combinaison des deux. De ce fait, les courbes de fragilité utilisées ont fait l'objet de discussions assez vives au sein du GT<sup>3</sup>, les valeurs utilisées étant contestées à la fois par ceux qui les trouvaient trop pessimistes et ceux qui les trouvaient trop optimistes.

La dernière ligne du tableau est à prendre avec précaution. En effet

- D'une part la valeur d'accélération admissible de 0,04g est un bon ordre de grandeur de ce que les bureaux d'étude attribuent comme capacité de résistance à un bâtiment non dimensionné au séisme. Le gain relatif apporté 'sur le papier' par l'adoption de normes parasismiques (gain d'un facteur 100 en terme de probabilité annuelle de ruine) peut donc assez vraisemblablement être évalué sur cette base, par comparaison à une structure dimensionnée par exemple à 0,2g. On peut également rappeler que l'EC8-1 recommande pour la zone de très faible sismicité pour laquelle l'application de l'Eurocode-8 n'est pas requise, une valeur de 0.05g comme borne supérieure (effet de site compris).
- Mais d'autre part, il est clair que sur un plan réaliste (et donc pour une estimation raisonnablement fiable du risque) la valeur de 0,04g est sans doute trop faible. En effet, (sur la base d'une variabilité de 0,9, associée par RISK\_UE à un dommage de degré 4), elle correspond à une accélération médiane de ruine de l'ordre de 0,4g ; or à titre de comparaison, la valeur d'accélération médiane fournie par RISK\_UE pour des maçonneries conventionnelles est de 0,5g. Cette valeur de 0,04g illustre les précautions légitimes que prennent les bureaux d'étude pour répondre à la question de la tenue au séisme d'un bâtiment non conçu pour cela.

<sup>3</sup> Les courbes de fragilité utilisées ont été fortement questionnées par au moins deux membres du groupe de travail, P.-Y. Bard qui estime, d'après les observations de dommages somme toute relativement limités lors de séismes récents ayant produit des pga mesurés largement supérieurs aux valeurs de dimensionnement (Mexico, Northridge, Japon, Saintes 2004), que la fragilité réelle des structures est significativement inférieure à celle qui a été retenue, et W. Jalil qui estime au contraire que les structures construites sont nettement plus fragiles que ce qui a été retenu. En particulier W. Jalil conteste fortement le fait qu'un bâtiment dimensionné à 0,2g ait environ une chance sur deux de supporter un mouvement sismique à 0,8g.

Contrairement à d'autres pays les approches probabilistes du risque sismique ne constituent pas en France une pratique courante<sup>4</sup>, seuls quelques exercices ont été effectués dans ce domaine. Nous sommes donc confrontés à une certaine absence de maîtrise qui rappelle celle dans laquelle nous nous trouvions au sujet de l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique il y a quelques années. A cet égard, le retour d'expérience ayant montré qu'il était hasardeux de s'appuyer sur des méthodes peu maîtrisées ; les études de risques n'ont pas été utilisées dans l'élaboration de la carte GZ2006. Le GT considère cependant que les pistes ouvertes sont prometteuses et qu'il convient de continuer à les explorer de façon intensive. Un membre du Groupe n'a pas souhaité s'associer à ce Chapitre (cf Annexe M3).

---

<sup>4</sup> Dans certains pays, en particulier aux USA, elles sont de pratique industrielle courante dans le secteur de l'énergie nucléaire.

## 5 Propositions

En complément aux conclusions des points a) à d) évoqués ci-dessus, le groupe fait les constatations et propositions suivantes :

Le GT rappelle l'importance mais en même temps les difficultés d'une démarche de validation des études d'aléa par rapport au retour d'expérience. Une telle démarche a été initiée par le GT, en s'appuyant sur la sismicité historique, l'analyse du risque, et les déclenchements des instruments du RAP ou EDF, à des niveaux faibles d'accélération, en général.

Il est rappelé que les incertitudes sont importantes dans la quantification de l'aléa et induisent une grande variabilité, ce qui peut expliquer des interprétations significativement différentes ; de plus, les analyses du point d) montrent que les incertitudes sont également significatives dans le comportement des structures.

Les actions listées ci-dessous ont été identifiées comme devant être menées ; elles peuvent se regrouper sous un titre général qui serait :

- **Développer une approche probabiliste du risque sismique à l'échelle nationale.**

Ce programme engloberait des actions

➤ *Dans le domaine de l'aléa sismique :*

- Faire une évaluation probabiliste complète en intensité, afin de s'affranchir des conversions en Magnitude et d'étendre la période de temps sur laquelle on peut effectuer des comparaisons entre les modèles et l'observation
- Etablir un catalogue unique homogène en magnitude
- Elaborer des modèles d'atténuation par région validés sur une gamme de magnitude aussi large que possible
- Approfondir l'interprétation des résultats obtenus en effectuant des désagrégations aussi bien sur la carte MEDD2002 que sur la carte du GZ2006
- Approfondir et consolider la comparaison statistique aux observations à très faible période de retour sur les sites instrumentés, tant par des analyses théoriques que par des applications à des zones à forte activité sismique
- Entretenir en permanence une action de fond sur cette thématique de l'estimation probabiliste, car encore trop souvent un peu pauvre des recherches académiques, parapubliques et privées, et permettant d'intégrer facilement toute nouvelle avancée ou évolution dans la connaissance de l'aléa (catalogue de sismicité, failles actives, lois d'atténuation, traitement des incertitudes, ...)

Il pourrait s'avérer opportun d'établir une carte probabiliste "continue" du territoire métropolitain donnant point par point (maille autour de 5 km) la courbe d'aléa au rocher pour une large gamme de périodes de retour (5 à 10000 ans): cette carte pourrait alors servir de base pour les études particulières (risque spécial, PPRs), et permettrait de s'affranchir des effets indésirables de seuil propres à tout zonage réglementaire en un petit nombre de zones. Cela constituerait une excellente valorisation de l'expérience acquise à l'occasion des études MEDD2002 et GZ2006, même s'il est vraisemblable qu'il faille élargir un peu le groupe et l'arbre logique pour arriver à une estimation "best-estimate" à peu près consensuelle, ainsi qu'à des points de vue communs sur les façons de gérer les incertitudes inhérentes à l'approche probabiliste (médiane, moyenne, fractiles ?).

➤ *Dans le domaine de la fragilité des structures :*

C'est certainement dans ce domaine que l'effort le plus important est à accomplir. En effet, si nous disposons de descriptions de l'aléa sur le territoire national, nous ne disposons pas de courbes de fragilité (ou de capacité comme finalement adopté par le programme RISK\_UE) adaptées au bâti national ; il est donc urgent d'établir de telles courbes, aussi bien pour le bâti existant que pour les constructions neuves. Par ailleurs, nous observons que, tout aussi bien que pour l'évaluation de l'aléa, il y a de fortes divergences de vue dans l'estimation de la fragilité des structures. L'élaboration de telles courbes serait donc un moyen d'apporter de la clarté dans le débat en fournissant, par comparaison entre courbes, une représentation de ces divergences de vue. Il convient donc de

- **Bâtir un projet national de détermination des courbes de fragilité** (ou de capacité) par type de structures construites en France.

# ANNEXES

## Annexe 1 Modèle GZ2006

### A1.1 Généralités

Un des intérêts majeurs des études probabilistes est leur aptitude à prendre en compte à la fois les incertitudes "épistémiques" (défaut de connaissance), et les variabilités intrinsèques ou aléatoires inhérentes à certains phénomènes physiques. Même si la distinction entre ces deux types d'incertitude n'est dans la pratique pas toujours aisée, les premières sont généralement prises en compte par le biais d'un arbre logique dont les branches correspondent à différentes hypothèses, et dont la pondération fait appel à des "avis d'experts", alors que les secondes sont prises en compte par le biais d'une dispersion (écart-type) associée à certains paramètres ou à certaines relations (notamment celles reliant l'accélération à la magnitude et la distance).

Les résultats, pour une période de retour donnée, sont alors obtenus sous forme d'une distribution de valeurs (d'accélération), dont la dispersion peut être représentée par un certain nombre de valeurs statistiques, et notamment les fractiles : un fractile  $x\%$  égal à  $a(x)$  signifie que  $x\%$  des valeurs d'aléa sont inférieures à  $a(x)$ : en supposant la distribution des valeurs lognormales, on représente souvent les résultats sous forme de la valeur médiane (fractile 50%), et des fractiles 15% et 85% (correspondant sensiblement à la médiane +/- un écart-type).

On peut ainsi obtenir, pour chaque site, des courbes d'aléa exprimant la relation entre le fractile  $x\%$  et la probabilité annuelle de dépassement (inverse de la période de retour): l'intervalle de confiance en termes de période de retour associée à un niveau d'accélération donné peut alors être estimé en regardant la gamme de variation des probabilités annuelles associées à chaque fractile: les points  $b$  et  $c$  sont donc intimement liés et sont traités simultanément dans ce document de synthèse.

En tout état de cause, une bonne estimation des intervalles de confiance nécessite donc un bon échantillonnage de l'ensemble des hypothèses possibles,

### A1.2 Introduction

Le GT a fait une analyse critique du modèle MEDD2002. Il en a reconnu l'excellente qualité et la parfaite documentation des hypothèses prises et du suivi du projet. Cependant, il lui a semblé que certaines hypothèses prises pouvaient induire un biais dans les évaluations. De plus des résultats nouveaux sur des lois d'atténuation ont été publiés depuis la réalisation de MEDD2002, et il a paru important de les examiner. Enfin, le GT a recherché les moyens de se recaler aux observations, démarche fondamentale en génie parasismique – bien que non systématique parce que très délicate ! Les observations disponibles concernent les sites EDF et les sites du RAP. Le modèle GZ2006 a tiré parti de ces éléments.

### A1.3 Etudes paramétriques

Afin d'appuyer le réflexion du GT, il était nécessaire d'investiguer certaines pistes non encore examinées et d'avoir à leur sujet des résultats numériques. Cela a concerné la comparaison entre les cartes LDG et MEDD, des estimations complémentaires pour une gamme de périodes de retour plus importante, des résultats à des accélérations plus faibles et l'examen d'une plus large gamme de lois d'atténuation... Un des objectifs poursuivis par le GT était de pouvoir se comparer au retour d'expérience, en ayant cependant conscience de la difficulté et des limites de l'exercice. Une étude a été demandée par le GT à GEOTER afin d'appuyer ses réflexions. Elle est reportée dans les documents GZ3 et GZ7. Dans un premier temps, l'étude a abordé les points suivants :

- Comparaison, sur des jeux de données sensiblement équivalents, de l'impact des modèles MEDD 2002 et LDG2004 ;
- Développements de modèles dits « best estimate » prenant en compte la confrontation des nombres annuels de déclenchements observés en 40 stations (20 du RAP et 20 de centrales EDF), aux nombres annuels de déclenchement prédits par ces modèles ; avec des tests de nouvelles lois d'atténuation, notamment les lois d'Ambraseys et al. (2005) et de Bragato et Slejko (2005), qui permettent de tenir compte d'une variabilité de l'atténuation avec la magnitude, de Sabetta et Pugliese (1996) et de Marin et al. (2004) ; certaines de ces lois présentent l'intérêt de couvrir une plus grande gamme de magnitude pour couvrir en particulier les bas niveaux d'accélération et de s'affranchir de conversion en magnitude pour certaines d'entre elles (certaines sont en Ms, d'autres en Ml et d'autres regroupent les 2).
- Test de stabilité de la médiane permettant de justifier de travailler au stade des travaux exploratoires de phase 1, en paramètres d'entrée moyens.
- Vérification de la stabilité du nombre annuel de déclenchements (observés et théoriques) pour des seuils de dépassement de l'accélération : 1, 5, 10 et 20 cm/s<sup>2</sup> . Ceci implique des calculs à très faible période de retour. Les calculs sont ainsi réalisés à 10 périodes de retour et pour ce qui concerne le pic d'accélération Amax : 1, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5000 et 10000 ans.
- Appréciation de l'impact des lois d'atténuation utilisées dans l'étude LDG (Marin et al., 2004) et dans l'étude MEDD2002, pour des séismes identiques contenus respectivement dans les catalogues de chacune de ces 2 études ;
- Test de l'influence de la prise en compte, dans le calcul probabiliste, de la variabilité aléatoire de la relation d'atténuation, en réalisant des calculs avec une intégration variant de 0 à l'infini ;
- Test de l'influence de la valeur de l'écart type de la relation d'atténuation, dans le calcul probabiliste, en réalisant des calculs avec la valeur de l'écart type préconisé par la loi de la RFS 2001-01, et avec cette valeur réduite de 33% ;
- Vérification de l'intérêt du développement d'un modèle probabiliste en intensité, en s'appuyant sur un modèle développé par GEOTER dans les Pyrénées, et en comparant les prédictions en intensité aux observations macrosismiques ;
- Test de l'influence de la valeur de l'écart type de la relation d'atténuation en intensité, dans le calcul probabiliste, en réalisant des calculs avec une valeur de l'écart type de 0.5 et de 1 ;
- Test de l'influence de la prise en compte, dans le calcul probabiliste, de la variabilité aléatoire de la relation d'atténuation en intensité, en réalisant, des calculs avec une troncature de la relation d'atténuation à 1 et 2 écarts types.

## A1.4 Le modèle GZ2006

A l'issue de l'étude référencée GZ3, le Groupe de Travail a décidé qu'il serait important de continuer les calculs et de définir un arbre logique complet en partant des hypothèses de l'étude MEDD2002 et de celles examinées dans GZ3, en particulier pour évaluer les intervalles de confiance des résultats. Les membres du groupe ont proposé des pondérations pour les différentes branches de l'arbre logique, tout en regrettant, pour certains, que le temps soit limité et que la structure de l'arbre logique et certaines de ses modalités soient un peu trop figées. Parmi les critères évoqués pour le choix de la pondération des lois d'atténuation, il y avait la comparaison au retour d'expérience des déclenchements observés sur les stations du RAP et des centrales EDF. Dans la pondération, on a également partagé les zones en « actives » et « peu actives » à partir du taux d'activité sismique au km<sup>2</sup>. La carte présentant ces zones est donnée page 23/39 de la référence GZ7 (Figure 25). Le mode de prise en compte de cette pondération reste cependant très binaire et n'apparaît pas satisfaisant pour certains membres du GT.

Les différences essentielles entre le Modèle MEDD2002 et le modèle GZ2006 sont résumées ci-dessous.

- i. Lois d'atténuation :
  - a. Le modèle MEDD2002 utilise la loi de la RFS 2001-01 et la loi d'Ambraseys 1995. Ces deux lois, paramétrées en MS sont assez proches. L'incertitude épistémique sur les modèles d'atténuation est faible.
  - b. Le modèle GTAFPS2006 utilise 5 lois d'atténuation: RFS 2001-01, Bragato et Slejko (2005), Sabetta et Pugliese (1996), Ambraseys et al. (2005) et Marin et al. (2004). L'incertitude épistémique sur les modèles d'atténuation est plus grande.
- ii. Considération de la variabilité du mouvement sismique:
  - a. Le modèle MEDD2002 fait l'intégration sur la relation d'atténuation jusqu'à l'infini.
  - b. Le modèle GTAFPS2006 fait l'intégration jusqu'à 2 écarts types. La considération de cette hypothèse implique une réduction de l'aléa de 10 à 20% selon les régions.
- iii. Ecart type de la loi :
  - a. Le modèle MEDD2002 considère toujours l'écart type publié.
  - b. Le modèle GTAFPS2006 considère 2 branches : l'une avec l'écart-type publié, l'autre avec un écart type réduit aux 2/3. Même si le poids de cette branche est plus faible, cette hypothèse implique une réduction de l'aléa.
- iv. Transformation de magnitude :
  - a. Dans le modèle MEDD2002 une relation d'équivalence est adoptée entre ML et MS.
  - b. Le modèle GTAFPS2006 a adopté la transformation de Nicolas et al. (2000) entre ces deux magnitudes. Cette hypothèse implique une réduction de l'aléa par rapport au modèle MEDD2002, très variable selon la région considérée. Elle est plus importante dans les régions peu actives (jusqu'à 40%), où l'aléa est dominé par les faibles magnitudes et moins important dans les zones actives où l'aléa est dominé par des magnitudes plus élevées (jusqu'à 15%).
- v. Pondération en fonction des zones actives/peu actives
  - a. Le modèle MEDD 2002 ne fait pas de différence entre ces deux types de zones.
  - b. Dans le cas du modèle GTAFPS2006 un poids différent est adopté suivant l'activité de la zone et la période de retour considérée. Les lois d'atténuation mieux adaptées à chaque contexte ont un poids plus fort. Cette option implique

une diminution de l'aléa notamment dans les zones les moins actives. La différenciation de la pondération nécessiterait cependant d'être significativement améliorée

## A1.5 Résultats principaux

- Comparaison des modèles MEDD2002, LDG2004 et GZ2006 (chapitre 2). D'une manière générale, les variabilités, mesurées par les ratios des fractiles à 15% et 85%, sont importants dans GZ2006 : ils vont de 1.5 à 5, les valeurs les plus élevées correspondent aux zones les moins actives. Le fractile 85% de GZ2006 est inférieur à la médiane de MEDD2002.
- L'examen des résultats bruts obtenus permet de tirer les éléments suivants : l'hypothèse  $M_S=M_L$  faite dans l'étude MEDD2002 est conservatrice, en particulier pour les zones peu actives. Les ratios des accélérations de la carte MEDD2002 comparées à celle du GZ2006 à 475 ans varient entre 1.25 et 1.75 en zone active et entre 1.75 et 3.25 en zone peu active. Les valeurs des périodes de retour attachées aux accélérations des cartes médianes MEDD2002, se situent entre 1000 et 2000 ans en zone active et entre 2000 et 5000 ans en zone peu active dans l'étude GZ2006.
- Comparaison entre le nombre de dépassements prédits et les observations. Le modèle MEDD2002 traduit assez mal le retour d'expérience (en prévoyant des déclenchements plus nombreux qu'observés) et de façon plus marquée dans les zones d'activité sismique la plus faible (il faut cependant rappeler que le modèle MEDD2002 n'a pas été conçu pour les très faibles périodes de retour). La comparaison au REX fournie par GZ2006 est améliorée, bien qu'encore imparfaite dans les zones peu actives. D'une manière générale, le nombre de dépassements prédits par GZ2006 diminue sensiblement par rapport à ceux de MEDD2002, pour les sites RAP. Pour les stations EDF, le nombre de dépassements prédits par le modèle reste supérieur aux observations. Mais la signification statistique de cette comparaison reste sujet de débat.

## Annexe 2

# Évaluation du risque historique et comparaison au risque calculé

Dans un premier temps a été faite l'estimation de la période de retour des intensités V à VII sur le territoire national (réf GZ4), en s'appuyant sur les statistiques des intensités épacentrales et sur les aires moyennes des isoséistes déduites de l'analyse de séismes historiques<sup>5</sup>. En un point arbitraire du territoire, la période de retour de l'intensité V s'établit sur cette base à 120 ans en moyenne. De la même façon les périodes de retour des intensités VI et VII s'établissent respectivement à 1100 ans et 9000 ans en moyenne. Les périodes de retour varient beaucoup d'une région à une autre ; ainsi pour une intensité V on obtient 15 ans comme période de retour moyenne en un point arbitraire situé dans les Pyrénées-Atlantiques ou Hautes-Pyrénées et 840 ans pour un point arbitraire du bassin parisien. En utilisant les définitions d'échelles d'intensité, cette approche permet ensuite d'accéder à une évaluation du risque sismique observé historiquement en France ; le risque étant calculé comme la probabilité annuelle qu'un bâtiment en maçonnerie subisse un dommage de degré 2 ou 3 sous l'effet d'un séisme (ref GZ6)<sup>6</sup>.

Par ailleurs, l'estimation du risque sismique (GZ6) peut aussi s'appuyer d'une part sur des courbes d'aléa sismique déduites de la carte de zonage pour une période de retour donnée et d'une hypothèse sur la pente de la courbe, et d'autre part sur les courbes de fragilité tirées d'un document de l'IZIIS à Skopje, élaboré dans le cadre du projet RISK-UE. Par convolution, on obtient la probabilité d'apparition d'un dommage de degré 2 ou 3 déduite de chacune des deux cartes d'aléa. La comparaison aux dommages observés historiquement conduit alors aux principales conclusions suivantes :

Si on admet que la carte MEDD2002 est bien calée sur une période de retour de 475 ans, il faut conclure que les maçonneries construites en France sont beaucoup plus résistantes, d'un facteur 3, que celles considérées dans les études RISK-UE. Si on admet en revanche que la carte LDG est bien calée sur une période de retour de 475 ans, il faut conclure que les maçonneries construites en France sont de 30-40% moins résistantes que celles considérées dans les études RISK-UE ; comparé à celui de la France, le contexte de sismicité des Balkans plaiderait plutôt dans ce sens. Si les valeurs des accélérations médianes fournies par la documentation RISK-UE étaient confirmées pour les maçonneries construites en France, on devrait conclure de cette étude que la carte MEDD2002 correspond à une période de retour d'environ 10000 ans, et la carte LDG2004 à une période de retour de l'ordre de 100 ans.

---

<sup>5</sup>La détermination des aires moyennes s'appuie sur un siècle d'observation. La référence GZ4 discute le poids à accorder aux événements extrêmes des siècles passés dans l'évaluation de ces aires moyennes.

<sup>6</sup> Au moins un des membres du groupe a exprimé des réserves sur les résultats mentionnés dans les documents GZ4 et GZ6,

# Annexe 3

## Evaluation des courbes de fragilités et des probabilités de ruine des structures

### A3.1 Introduction

Une estimation chiffrée du niveau de protection d'une structure peut être obtenue en calculant sa probabilité d'atteindre un niveau de dommage donné sous l'ensemble des séismes possibles sur le site où elle est située. Cette probabilité peut être obtenue en faisant la convolution de la « courbe d'aléa sismique » avec la « courbe de fragilité ». Plus spécifiquement, on peut écrire :

$$P_f = - \int_0^{\infty} P_{f/a} \left( \frac{dH}{da} \right) da = \int_0^{\infty} \left( \frac{dP_{f/a}}{da} \right) H da$$

Où :

- $P_f$  est la probabilité annuelle d'atteindre le dommage visé.
- $P_{f/a}$  est la probabilité conditionnelle d'atteinte du dommage visé en fonction de l'amplitude du mouvement sismique,  $a$  (courbes de fragilité).
- $H(a)$  est la courbe d'aléa, exprimant la probabilité de dépasser le niveau  $a$  en un an. L'annexe 4 fournit des exemples de telles courbes. Elles sont obtenues à partir d'études probabilistes de l'aléa sismique.

Pour traiter la question des courbes de fragilité, le GT s'est appuyé sur des résultats d'un programme de recherche européen, RISK-UE, dont un des objectifs était précisément de déterminer des courbes de fragilités pour certains types de structures présents en Europe. Cependant on trouve pas dans RISK\_UE d'éléments sur des bâtiments correspondant à la pratique Française ; le GT a donc cherché à adapter l'approche RISK-UE au contexte français. Cela a permis de déterminer des probabilités de ruine pour diverses hypothèses sur les structures.

### A3.2 Courbes de fragilité

#### A3.2.1. Approche RISK\_UE adaptée au bâti français

Pour cet exercice on a considéré, en faisant référence à l'Eurocode\_8, que les structures étaient situées sur un sol de type B (ce qui fixe la forme du spectre) et dimensionnées à 0,2g.

Les courbes de fragilité ont été déterminées en se basant sur l'approche standard de RISK-UE, consistant à calculer la valeur médiane d'accélération de ruine à partir de la courbe de capacité et du spectre de dimensionnement.

La courbe de capacité RISK\_UE a été modifiée pour s'adapter au contexte français. Pour cela, un questionnaire a été rédigé et envoyé à 22 experts. Six réponses seulement ont été obtenues. On en a déduit un coefficient de sécurité global  $C_s$  et une réduction de la ductilité

ultime. La Figure A3.1 résume la procédure suivie. En définitive les courbes RISK\_UE ont été peu modifiées.

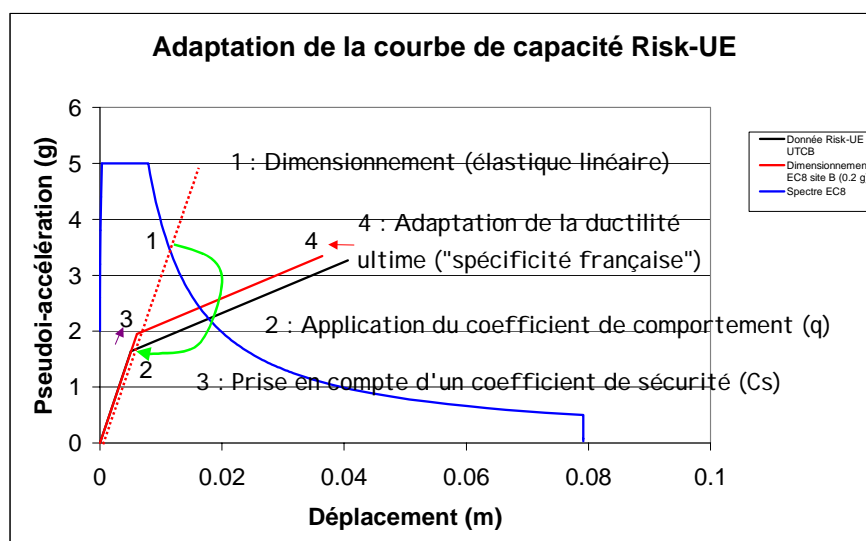


Figure A3.1 Adaptation de la courbe de capacité RISK\_UE  
 Nota : La ductilité ultime est notée  $\mu_u$  dans les figures suivantes

La variabilité adoptée pour la courbe de fragilité est celle spécifiée dans RISK-UE pour les structures considérées et pour le dommage correspondant à des dégâts importants ou ruine ; elle est voisine de 0.9. La figure A3.2 présente une courbe de fragilité obtenue par cette approche pour une structure en voiles en béton armé. Des variations de paramètres ont été faites (coefficient de comportement, ductilité ultime et coefficient de sécurité), elles se traduisent par les barres rouges. A titre d'illustration, la figure A3.3 présente deux courbes de fragilité obtenues avec une même valeur d'accélération médiane et de variabilités différentes.

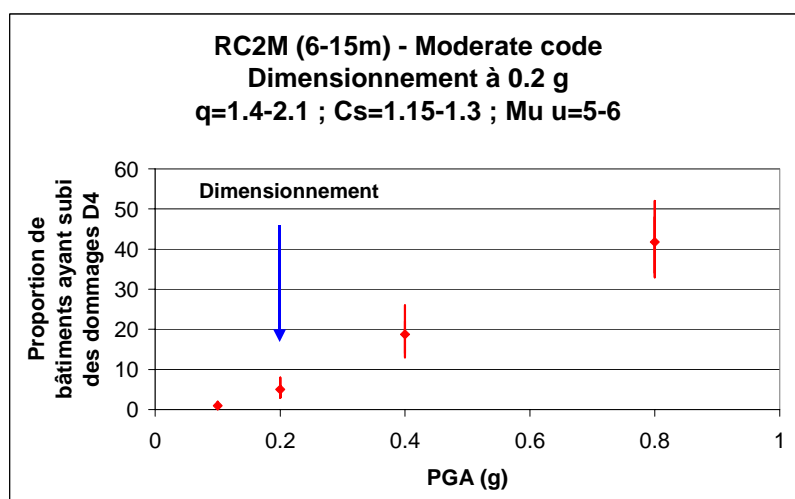


Figure A3.2 Courbe de fragilité, structure dimensionnée à 0,2g , variabilité 0,9.

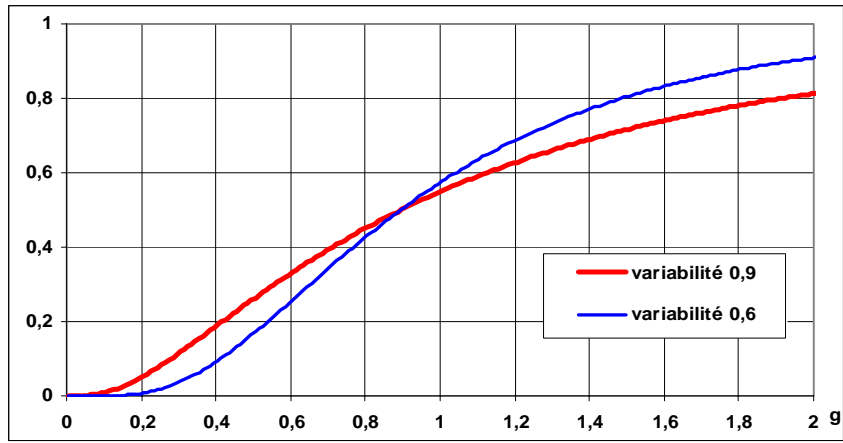


Figure A3.3 Exemples de courbes de fragilité pour le dommage D4, avec une accélération médiane de 0,9g et deux valeurs de variabilité

### A3.2.2. Ajustement des courbes de fragilité par référence à l'échelle EMS98

Les courbes de fragilité ont été comparées au retour d'expérience par l'intermédiaire de la définition de l'échelle d'intensité EMS98. Pour une intensité donnée, cette échelle définit le pourcentage de bâtiments ayant subi un dommage donné, ce qui est assimilé à une estimation de la probabilité de ruine. A une intensité donnée, on associe une fourchette d'accélération donnée par les corrélations classiques. On peut ainsi tracer des segments dans le plan probabilité – accélération ; ces segments peuvent être comparés aux courbes de fragilité.

Une adaptation des modèles a alors été jugée nécessaire pour améliorer la cohérence avec les éléments précédents. Cette adaptation a essentiellement porté sur la variabilité des courbes de fragilités. Une valeur de 0.6 a permis d'obtenir des résultats en accord nettement meilleur avec le REX (Intensité / PGA et dommages D4), tout en restant conservatifs, comme illustré sur la figure A3.4.

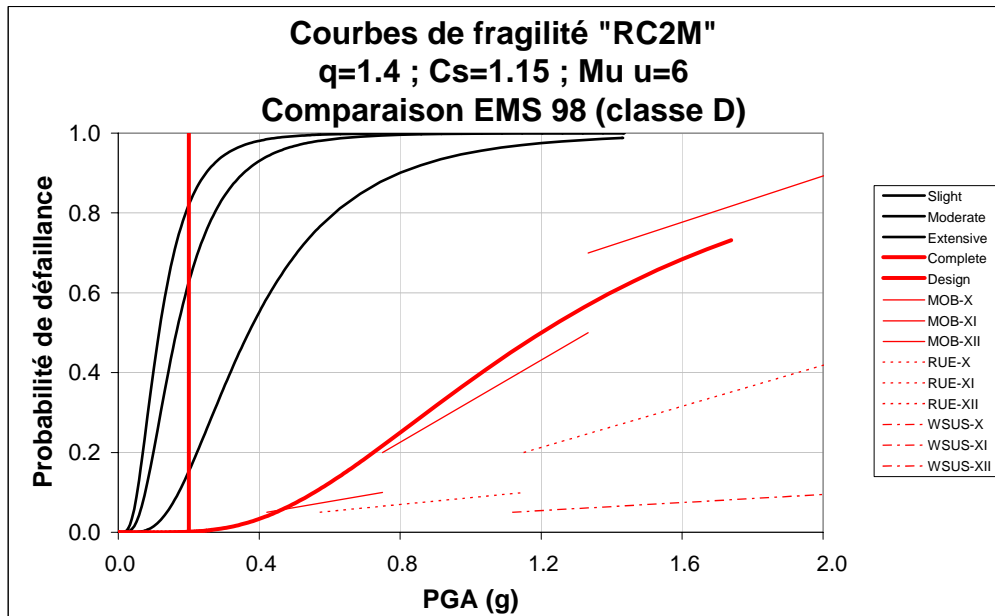


Figure A3.4 Courbe de fragilité ajustée (trait rouge épais)  
Voir Légende en fin de §

Enfin un travail complémentaire a été réalisé en considérant un bâtiment du même type que celui traité dans le cas précédent mais n'ayant pas fait l'objet d'un dimensionnement parasismique (niveau de tenue minimal fixé à 0.4 m/s<sup>2</sup> par application de l'EC2 uniquement, alors que le premier serait dimensionné à 2 m/s<sup>2</sup> par application de l'EC8). Le risque associé, par convolution aléa-fragilité se situerait alors à un facteur 100 supérieur à celui associé au bâtiment conçu en appliquant les règlements parasismiques. Cette situation placerait alors le bâtiment non conçu parasismique à un niveau de risque du même ordre de grandeur que le niveau de risque lié aux transports en France.

Légende de la Figure A3.4:

MOB : Loi de corrélation (Intensité / PGA) Murphy-O Brien

MOB-X : Intensité X

MOB-XI : Intensité XI

MOB-XII : Intensité XII

RUE : Loi de corrélation (Intensité / PGA) Risk-UE

RUE-X : Intensité X

RUE-XI : Intensité XI

RUE-XII : Intensité XII

WSUS : Loi de corrélation (Intensité / PGA) Wald-Shakemaps US

RUE-X : Intensité X

RUE-XI : Intensité XI

RUE-XII : Intensité XII

Echelle EMS 98 : Proportion de dommages

Un peu : de 5 à 10%

Beaucoup : de 20 à 50%

La plupart : de 70 à 100%

Bâtiments en murs ou ossatures conçus PS - Classe de vulnérabilité D

Proportion de dommages D4 par classe d'intensité

X : un peu

XI : beaucoup

XII : la plupart

## Annexe 4

### Courbes d'aléa

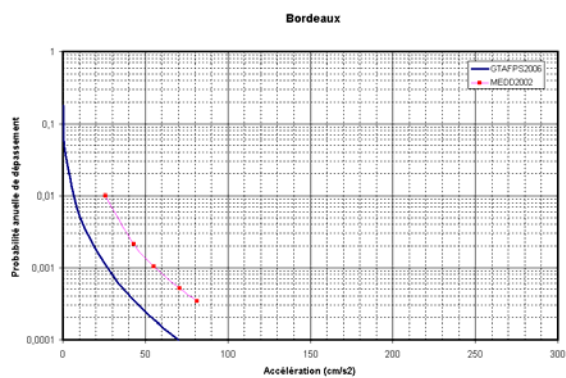


Figure A1. Bordeaux

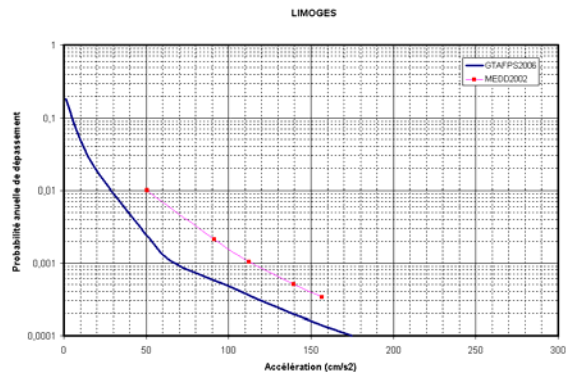


Figure A2. Limoges

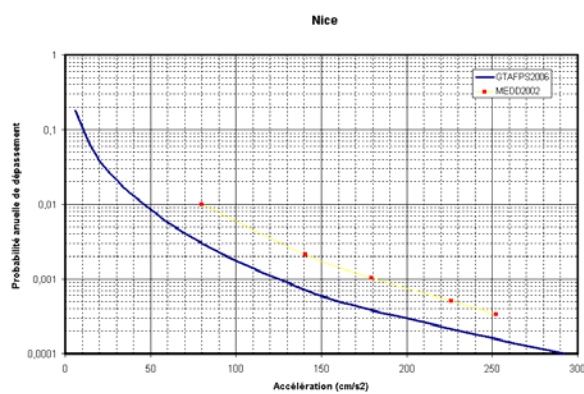


Figure A3 Nice

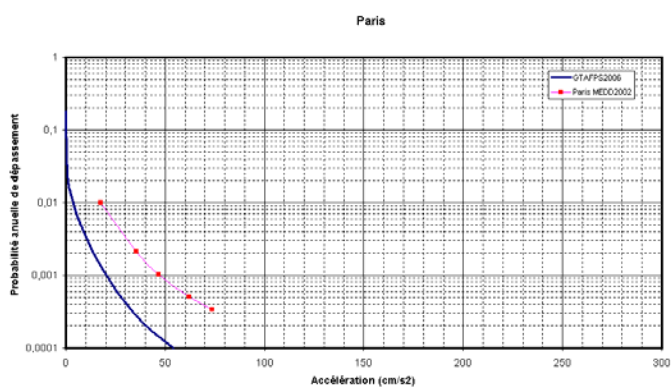


Figure A4 Paris

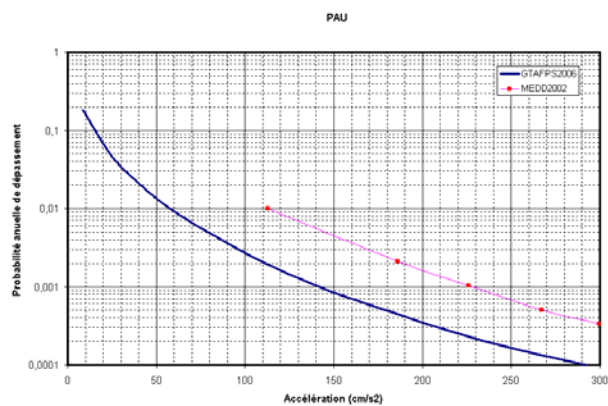


Figure A5 Pau

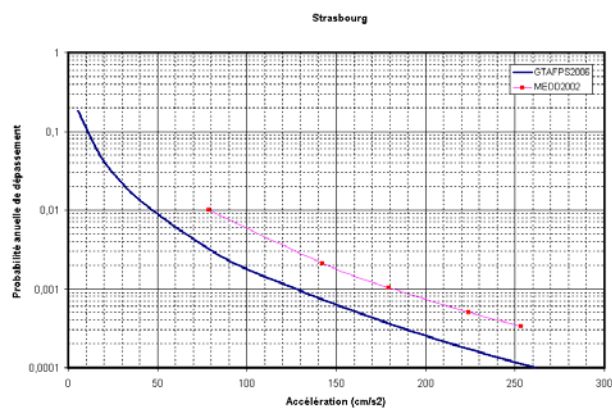


Figure A6 Strasbourg

## Annexe 5

### Documents émis par le GT

**GZ1** Comparaison des cartes MEDD2002 et LDG2004, cartes établis pour une période de retour de 475ans – Rev4 – 25.03.2006. P. Labbé

**GZ2** Identification de l'origine des écarts entre les différentes cartes d'aléa sismique disponibles. Version 3.0 P. Y. Bard

**GZ3** Développement d'un modèle probabiliste d'aléa sismique « best estimate » pour le territoire métropolitain et Annexe 2 : Tests de sensibilité aux lois d'atténuation  
Rapport GTR/CEA/1205-279 C Martin R Secanell

**GZ4** Estimation réaliste de la période de retour moyenne d'une secousse d'intensité V, VI ou VII en France métropolitaine sur la base de la sismicité historique – Rev5 – 25.03.2006 P. Labbé

**GZ5** Pas de document associé à ce numéro.

**GZ6** Exercice d'estimation du risque sismique en tenant compte des données d'aléa sismique et de fragilité des structures – Rev3 - 31.03.2006 P. Labbé

**GZ7** Développement d'un modèle probabiliste d'aléa sismique calé sur le retour d'expérience. Annexe 1 Calculs et cartographie suivant l'arbre logique défini pas le Groupe Zonage Rapport GTR/CEA/0306-294 C Martin R Secanell

**GZ8** AFPS- GT Zonage Bilan du point d . E Viallet

## Annexe 6

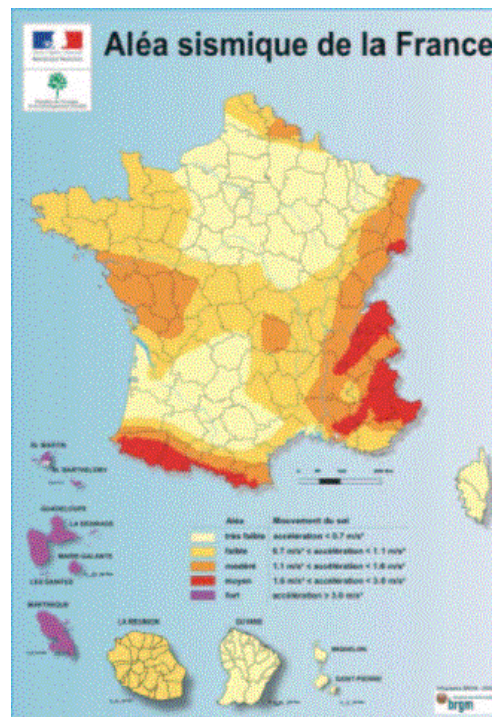
### Proposition de Zonage

Il est défini par les éléments suivants :

#### 1/ Les accélérations maximales de référence pour un sol de classe A : $a_{gR}$ (dénomination EC8):

- Zone sismicité très faible (appelé « Z1a » dans les documents du GEPP) : pas de prise en compte de l'aléa sismique dans les constructions à risque normal => pas de valeur d'accélération  $a_{gR}$  pour les bâtiments de classe I,II, III et IV.
- Zone sismicité faible (appelé « Z1b » dans les documents du GEPP) :  $a_{gR} = 0,7 \text{ m/s}^2$
- Zone sismicité modérée (appelé « Z2a » dans les documents du GEPP) :  $a_{gR} = 1,1 \text{ m/s}^2$
- Zone sismicité moyenne (appelé « Z2b » dans les documents du GEPP) :  $a_{gR} = 1,6 \text{ m/s}^2$
- Zone sismicité forte (appelé « Z3 » dans les documents du GEPP) :  $a_{gR} = 3 \text{ m/s}^2$

#### 2/ Une carte définissant les zones



Zone	Z1a	Z1b	Z2a	Z2b
Accélération ( $\text{m/s}^2$ )	$\text{acc} < 0.7$	$0.7 < \text{acc} < 1.1$	$1.1 < \text{acc} < 1.6$	$1.6 < \text{acc} < 3.0$

Plages d'accélération de la carte d'aléa

#### 3/ Les paramètres des spectres en fonction des classe de sol de l'EC8 (A, B, C, D et E)

		Classe EC8 de Sol				
		A	B	C	D	E
Paramètres spectraux	S	1,00	1,35	1,50	1,60	1,80
	T <sub>B</sub>	0,03	0,05	0,06	0,10	0,08
	T <sub>C</sub>	0,20	0,25	0,40	0,60	0,45
	T <sub>D</sub>	2,50	2,50	2,00	1,50	1,25

# Annexe M1

## Compléments de minorité

P.-Y. Bard, W. Jalil, P. Mouroux

### M1-1 Introduction

L'objectif principal de cette annexe "de minorité" est de fournir des éléments de réflexion permettant de regarder les résultats GZ2006, et ses enseignements pour les propositions de zonage, avec un peu de recul, de la même façon que les résultats de l'étude MEDD2002 ont été analysés et interprétés en vue des propositions de nouveau zonage faites au GEPP en juillet 2004, et présentées au CST sans remarques majeures.

Hormis quelques précisions que nous estimons utiles sur quelques paragraphes du rapport commun, les points essentiels abordés dans cette annexe concernent les éléments suivants :

- Limites actuelles des efforts légitimes de calibration par comparaison des estimations probabilistes à très faible période de retour avec les enregistrements accélérométriques disponibles sur le territoire métropolitain français.
- Discussion de quelques caractéristiques de l'étude GZ2006 qui nous amènent à considérer que ses résultats ont un léger biais "optimiste".
- Analyse du zonage géographique et des valeurs d'accélération associées à la lumière des résultats GZ2006 (et des débats en cours au niveau international sur l'utilisation pratique des études probabilistes)

La principale conclusion de cette analyse est qu'il existe un faisceau de raisons objectives, notamment grâce aux résultats de cette étude GZ2006, autorisant à considérer que les contours proposés pour le nouveau zonage en 2004, et les niveaux d'accélération associés, sont cohérents avec des estimations d'aléa à 475 ans de période de retour. Et ce malgré l'existence, dans l'étude MEDD2002, d'une tendance effective à la surestimation de l'aléa.

### M1-2 Point a : origine des écarts entre les différentes cartes

Plusieurs études probabilistes d'aléa sismique concernant le territoire métropolitain français ont été réalisées au cours de la dernière décennie. L'aléa y est représenté sous la forme d'une courbe reliant un niveau d'accélération (maximale ou spectrale) à sa probabilité annuelle de dépassement, niveaux d'accélération qui sont ensuite représentés sous forme cartographique pour une probabilité annuelle fixée.

Les principales études sont au nombre de cinq

- les cartes élaborées par le groupe EPAS de l'AFPS (Autrans et al., 1998; Dominique et al., 2001)
- les cartes élaborées pour l'Europe dans le cadre du programme GSHAP (Jimenez et al., 2003; Grünthal et al., 1999)
- les cartes élaborées dans le cadre de l'étude MEDD2002 (Martin et Combes, 2002)
- les courbes d'aléa élaborées dans le cadre de la thèse de C. Beauval (Beauval, 2003)
- celles publiées dans l'article Marin et al. (2004) suite à une étude du LDG.

Un rapide survol montre que les quatre premières indiquent des ordres de grandeur similaires pour la période de retour de référence de 475 ans, à savoir une accélération maximale (dénotée pga) autour de 0.5 m/s<sup>2</sup> dans les zones les moins actives (bassins parisien et aquitain), et autour de 1.5 à 2.5 m/s<sup>2</sup> dans les zones les plus actives (Pyrénées Occidentales,

Alpes internes).<sup>7</sup> La dernière au contraire indique – sous certaines hypothèses - des ordres de grandeur bien moindres (pga inférieur à 0.05 m/s<sup>2</sup> dans le bassin Parisien, de l'ordre de 0.25 à 0.5 m/s<sup>2</sup> au rocher dans les zones actives).

Parmi les différentes sources d'écarts entre études différentes mentionnées dans le document commun, on peut attirer l'attention sur l'actualité des discussions sur la prise en compte des incertitudes. L'importance cruciale de ce point vient d'être rappelée dans un article récent du BSSA (Bommer and Abrahamson, 2006), expliquant la tendance à l'augmentation de l'aléa dans les estimations probabilistes récentes par une amélioration de leur prise en compte des incertitudes, soulignant la nécessité absolue de prendre en compte la dispersion sur la loi d'atténuation, et l'absence de justifications scientifiques pour la tronquer ou la réduire trop brutalement. Il est utile de citer une partie de leur résumé : *"Probabilistic hazard studies performed in recent years have frequently resulted in appreciably higher design ground motions than had been obtained in previous assessments carried out in the 1970s and 1980s, often sparking controversial debate. Although several factors may contribute to the higher estimates of seismic hazard in modern studies, the main reason for these increases is that in the earlier studies the ground motion variability was either completely neglected or treated in a way that artificially reduced its influence on the hazard estimates"*. Le lecteur intéressé trouvera dans cet article des comparaisons fort instructives et matière à réflexion approfondie. Un autre sujet très débattu en rapport avec ces incertitudes, où il n'y a pas encore de consensus, concerne la façon de les prendre en compte dans l'interprétation des résultats finaux : doit-on se limiter à la valeur médiane des estimations probabilistes, préférer la moyenne (toujours supérieure à cause d'une distribution gross-modo log-normale des résultats), ou bien considérer les fractiles supérieurs ?

Quoi qu'il en soit, par rapport au "standard" actuel des études probabilistes, il apparaît pour la majorité des spécialistes que deux des principales options prises dans l'étude LDG concourent à réduire très fortement les valeurs de pga (choix de la loi d'atténuation LDG et non prise en compte de la dispersion dans la loi d'atténuation, dans la lignée de la pratique de l'approche déterministe utilisée en France pour le nucléaire), alors qu'une des options retenues dans l'étude GEOTER a au contraire plutôt tendance à les majorer (assimilation de la magnitude  $M_L$  à la magnitude  $M_S$ ). La très grosse différence dans les résultats finaux MEDD2002 et LDG2004, pour choquante qu'elle soit et propre à jeter le doute sur toutes les "élucubrations" des sismologues, est donc parfaitement compréhensible, et parfaitement cohérente avec le fait que les autres études probabilistes disponibles donnent des ordres de grandeur comparables à ceux de l'étude MEDD2002.

### **M1-3 Points b et c : intervalles de confiance des valeurs et périodes de retour réalistes**

Un des intérêts majeurs des études probabilistes est leur aptitude à prendre en compte les incertitudes, qu'elles soient "épistémiques" (défaut de connaissance), ou liées à des variabilités intrinsèques ou aléatoires inhérentes à certains phénomènes physiques. Les résultats, pour une période de retour donnée, sont alors obtenus sous forme d'une distribution de valeurs (ici d'accélération), dont la dispersion peut être représentée par un certain nombre de valeurs statistiques, et notamment les fractiles : un fractile x% égal à a(x) signifie que x% des valeurs d'aléa sont inférieures à a(x): en supposant la distribution des valeurs

---

<sup>7</sup> L'ordre de grandeur reste le même, mais il existe bien sûr des différences entre ces études : ainsi, les résultats EPAS sont plutôt légèrement supérieurs à MEDD2002, tandis les résultats GSHAP/SESAME sont légèrement inférieurs

lognormales, on représente souvent les résultats sous forme de la valeur médiane (fractile 50%), et des fractiles 15% et 85% (correspondant à la médiane  $\pm$  un écart-type).

On obtient ainsi, pour chaque site, des courbes d'aléa exprimant la relation entre le fractile x% et la probabilité annuelle de dépassement (inverse de la période de retour): l'intervalle de confiance en termes de période de retour associée à un niveau d'accélération donné peut alors être estimé en regardant la gamme de variation des probabilités annuelles associées à chaque fractile: les points b et c sont donc intimement liés et doivent être analysés simultanément.

Une bonne estimation des intervalles de confiance nécessite à la fois un bon échantillonnage de l'ensemble des hypothèses possibles, et des efforts maximaux pour éviter des biais systématiques, dans un sens ou dans l'autre. La multiplication des experts et des branches va certainement dans cette direction, à condition que l'on s'efforce d'avoir un panel représentatif; on n'est cependant jamais sûr d'éviter totalement les biais, et il faut donc se garder de ne considérer que les résultats médians, et au contraire prendre en compte, d'une façon ou d'une autre la dispersion des résultats.

### **M1-3.1 Carte MEDD2002**

Nous souscrivons totalement aux remarques sur les limites de l'étude MEDD2002, et apprécions les contributions de l'étude GZ2006 pour les confirmer et les quantifier. Nous rajouterons simplement que le groupe chargé d'utiliser ces résultats pour faire des propositions de zonage était conscient de la surestimation liée à l'absence de conversion de magnitude, et que si l'on reproche à MEDD2002 d'avoir une trop faible variabilité, il faut alors, dans un souci de cohérence, se donner les moyens de prendre en compte la variabilité des résultats GZ2006 si on veut les utiliser pour élaborer ou discuter un nouveau zonage.

### **M1-3.2 Le modèle GZ2006 et les efforts de "calibration"**

#### **M1-3.2.1 Le modèle GZ2006 et ses spécificités.**

Les différences essentielles entre les modèles GZ2006 et MEDD2002 sont explicitées dans l'annexe 1. Seront repris ici seulement les quelques points qui ont fait l'objet de discussions parfois vives et parfois, in fine, de désaccord:

- La décision de limiter la dispersion sur la loi d'atténuation tronquée à 2 écarts-types. Certes l'hypothèse de non-troncature aboutit, à très grande période de retour (plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'années), sur des niveaux apparemment irréalistes, mais dans la réalité la dispersion observée va au-delà de ces 2 écarts-types. Les calculs de sensibilité ayant montré que cette hypothèse diminuait l'aléa de 10% à 20% selon les zones, l'absence d'option dans l'arbre logique pour ne pas limiter cette variabilité aléatoire, a donc pu introduire un léger biais systématique dans les résultats finaux de GZ2006, dans le sens de la sous-estimation.
- L'introduction d'une branche avec un écart type réduit d'un tiers par rapport à sa valeur originale associée à la relation d'atténuation: l'objectif parfaitement légitime est d'éviter de compter plusieurs fois de mêmes sources d'incertitude (position de l'épicentre, valeur de la magnitude, ...). Il s'agit là d'une "pratique" effectivement parfois utilisée (Japon notamment) pour réduire arbitrairement les estimations d'aléa, et aboutir à des valeurs finales paraissant moins économiquement inacceptables avec les méthodes de dimensionnement actuelles. Mais il faut aussi avouer que le niveau retenu pour cette réduction n'est fondé sur aucun résultat scientifique (les seuls résultats, partiels, actuellement disponibles font état d'une réduction de 10-20%). Les membres du GT ont eu la possibilité de donner un poids fort, faible voire nul à cette branche, mais là aussi, cette décision peut avoir induit un certain biais "optimiste" (entre 5 et 10%) sur les estimations finales (compte tenu de toutes les pondérations).

- La prise en considération d'une relation de conversion de magnitudes  $M_{L,LDG}$  en  $M_S$  (pour l'utilisation de certaines lois d'atténuation en  $M_S$ ) est certainement une amélioration sensible en vue d'une estimation "best-estimate". Néanmoins, d'un point de vue strictement probabiliste, comme une telle relation comporte elle-même une (assez forte) incertitude, il eût théoriquement fallu y associer une légère augmentation de la dispersion sur la loi d'atténuation : cela n'a pas été fait, et pèse donc aussi légèrement sur les résultats finaux, à la baisse.
- La différenciation, dans les pondérations des différentes relations d'atténuation, entre zones actives et zones stables, et entre courtes et longues périodes de retour. Cette différenciation a son origine dans le fait que les domaines de validité des cinq différentes relations d'atténuation utilisées ne sont pas identiques: certaines ont été établies à partir de données enregistrées dans des zones sismiquement actives et pour des séismes de magnitude modérée à forte, d'autres dans des zones moins actives et sur des magnitudes faibles à modérées. Néanmoins, son mode d'implémentation trop binaire dans le code de calcul probabiliste ne nous satisfait pas, et nous semble propre à introduire, aux périodes de retour intermédiaires comme celle de 475 ans, un biais "optimiste". Biais qu'il n'a cependant pas été possible de quantifier "objectivement", le temps étant trop court pour faire évoluer la structure de l'arbre logique utilisé dans l'approche probabiliste, comme cela aurait été pourtant nécessaire pour une prise en compte correcte de cette légitime différenciation. Certains résultats intermédiaires suggèrent cependant une réduction dépassant 10%.
- Comme dans l'étude MEDD2002, une branche "lissage", ne nécessitant aucune hypothèse a priori sur la délimitation en zones à sismicité homogène, a été conservée dans l'arbre logique avec un poids global de 20%. Simplement, pour des questions de temps, il n'a pas été possible pour les membres du GT de donner leur coefficient de pondération pour cette partie de l'arbre logique. GEOTER a pris sur lui de retenir in fine seulement trois des cinq lois d'atténuation initialement retenues, et de leur attribuer un poids égal. Ce choix "forcé" apparaît à certains membres du GT (PYB + PM) comme susceptible d'introduire un léger biais "optimiste" (au maximum cependant de quelques % compte tenu du poids global de 20% de cette branche lissage)

Toutes ces remarques nous amènent donc à estimer que le modèle GZ2006 (cf. Figure 4 pour résultats médians) a un peu trop corrigé le conservatisme de l'étude MEDD2002 et versé dans l'excès inverse. Il est clair que, de par sa composition même (3 sismologues, 4 ingénieurs structure), le GT ne peut prétendre à une représentativité "exhaustive" de l'ensemble de la communauté, et ne peut non plus se proclamer totalement objectif : chacun reste influencé, malgré tous ses efforts d'objectivité, par sa propre expérience (les sismologues par les observations d'aléa dont ils ont connaissance, les ingénieurs structure par les dommages et performances constatées, et chacun par sa pratique professionnelle). Il en découle que les résultats "GZ2006" sont eux aussi, comme ceux de MEDD2002 et LDG2004, sujets à critiques et ne sauraient prétendre ni à une objectivité ni à une exhaustivité définitives. Et qu'il est donc plus prudent de ne pas se baser sur les seules cartes médianes pour tirer des conclusions sur un zonage réglementaire.

Bien sûr il faut aussi garder en mémoire le fait que quatre des cinq relations d'atténuation utilisées surestiment sans doute un peu le mouvement au vrai rocher par suite de défaut d'information quantitative sur les conditions géotechniques des sites d'enregistrement européen. Cette surestimation avait été estimée à environ 20% dans le cadre des travaux de la cellule aléa responsable des propositions de zonage, mais l'analyse des données numériques les plus récentes et les mieux renseignées (KNET) ont amené à remettre en cause ces valeurs et les réviser à la baisse, au moins pour ce qui concerne le paramètre pga considéré ici.

### M1-3.2.2 Comparaison par rapport aux observations instrumentales

Une des originalités par rapport à MEDD2002 a été de calculer l'aléa à très faible période de retour dans le but de comparer avec les valeurs d'accélération observées sur 20 stations "rocher" du RAP et 20 sites nucléaires EDF.

La pertinence d'une telle comparaison a été un sujet de discussions et d'appréciations diverses au sein du GT, compte tenu du temps limité d'observation (environ 5 ans par station RAP – 107 ans en cumulé - et 20 ans par centrale nucléaire – 404 ans en cumulé). On ne dispose en effet d'aucune étude de référence à ce sujet, et il a fallu "improviser". Quoi qu'il en soit, la comparaison "brute" résumée sur les Tableaux 1 (GZ2006) et 1bis (MEDD2002), appelle des avertissements et des commentaires incitant à une grande prudence avant de tirer des conclusions catégoriques.

- les chiffres indiqués sont à considérer uniquement en ordre de grandeur, car même les observations ont dû faire l'objet de pondérations avant comparaison avec les prédictions, compte tenu des domaines de validité différents de chacune des relations d'atténuation utilisées.
- Il faut aussi garder à l'esprit que les instruments EDF ne sont généralement pas placés en champ libre mais sur des radiers assez massifs, et que cela peut perturber (diminuer) l'amplitude des mouvements, surtout à haute fréquence (ce qui correspond aux niveaux faibles considérés). L'importance de cette réduction n'est cependant pas explicitement quantifiée (a priori inférieure à un facteur 2), et peut localement être partiellement ou totalement compensée par l'existence d'effets de site. On ne soulignera jamais assez l'intérêt de capteurs champ libre sensibles installés au rocher ou en fond de forage, qui bien souvent abrégeraient bien des interrogations et discussions.

Il est clair que la comparaison n'*apparaît* pas très flatteuse pour MEDD2002, ni même pour GZ2006 pour ce qui concerne les sites EDF situés en majorité dans des zones dites "stables". Mais, avant de sauter sur des conclusions hâtives, il faut apprécier la signification statistique d'une telle comparaison, et se poser la question de son impact sur les évaluations probabilistes à des périodes de retour bien supérieures.

Des simulations statistiques sur des modèles poissonniens (Beauval et al., 2006) montrent que, pour un site donné, une comparaison est fiable à 30% lorsque la durée d'observation est égale à 10 périodes de retour, 20% pour 25 périodes de retour et 10% pour 100 périodes de retour. Pour chacun des sites pris individuellement ici, cela voudrait dire que les comparaisons ne sont significatives (à 20% près) que pour les niveaux correspondant à une période de retour d'un peu moins d'un an pour les centrales nucléaires, et de 2 mois pour les sites RAP – en moyenne. Soit des niveaux d'accélération sensiblement plus faibles que ceux effectivement considérés (1 cm/s<sup>2</sup> pour le RAP, 10 cm/s<sup>2</sup> pour les sites EDF).

Cependant, l'idée sous-jacente à la prise en compte simultanée de plusieurs sites est qu'il est "équivalent" de comparer la courbe d'aléa prédite en un site avec les observations sur ce site sur une durée T, et n courbes d'aléa obtenues en n sites "indépendants" avec les observations sur ces n sites et une durée T/n. Les taux de dépassement  $\alpha_{ij}$  de certains seuils d'accélération  $a_j$ , observés sur ces n sites i d'aléa différents et sur des durées variant entre 1 et 25 ans sont comparés aux probabilités de dépassements  $p_{ij}$  calculées sur les mêmes durées aux mêmes sites. La comparaison est résumée en comparant  $\alpha_{\text{tot}} = \sum_i \alpha_{ij}$  avec  $p_{\text{tot}} = \sum_i p_{ij}$ . On peut utiliser les résultats "monosite" de Beauval et al. (2006) pour fixer un ordre de grandeur et dire que la comparaison ne sera significative (à 20% près) que si  $\alpha_{\text{tot}}$  est supérieur à 25, ce qui interroge sérieusement sur la portée de l'exercice en zone stable (sites EDF), et en limite la portée pour les sites RAP aux seules très faibles accélérations (< 5 cm/s<sup>2</sup>).

A titre d'illustration, on peut avancer que l'application "brute" de cette procédure de comparaison à la Guadeloupe conclurait vraisemblablement à une sous-estimation drastique de l'aléa, compte tenu de la crise des Saintes de novembre 2004 : les stations du RAP ont ainsi

enregistré, au cours d'un laps de temps très limité, des accélérations approchant (voire parfois dépassant) celles correspondant à une période de retour de 475 ans !

Par ailleurs, les processus à longue période ne sont pas obligatoirement poissonniens (par exemple avec l'existence possible de séismes caractéristiques dans certains contextes, ou bien les "clusters"), ce qui peut remettre en cause l'utilisation présente du REX, sur la base d'évènements à faible période de retour.

Enfin, il faut aussi bien prendre conscience du fait qu'un modèle (une relation d'atténuation) peut ne pas avoir la même performance à faible, intermédiaire et longue période de retour. Ainsi, trois des cinq relations utilisées dans GZ2006 ne sont pas correctes à faible niveau d'accélération (car basées sur des enregistrements dont le seuil de déclenchement est de 10 cm/s<sup>2</sup>), une est en principe adaptée uniquement aux faibles niveaux, et non extrapolable aux forts niveaux, une seule devrait être valide sur une large gamme de niveaux d'accélération. Une bonne calibration à très faible période de retour ne valide donc pas automatiquement l'utilisation à longue période de retour, et vice-versa, une mauvaise calibration à très faible période de retour n'invalide pas automatiquement l'utilisation à longue période de retour.

### **M1-3.2.3 Variabilité / Incertitudes des résultats GZ2006**

Si la présentation factuelle des différences entre GZ2006, MEDD2002, et LDG2004 n'est pas contestable, un avertissement s'impose cependant au sujet des 6 villes retenues à titre d'exemple, pour lesquelles les résultats du Tableau 2 indiquent effectivement que les résultats MEDD2002 sont sensiblement voire très supérieurs aux résultats GZ2006, et pour lesquelles aussi peuvent être mentionnées les périodes de retour "GZ2006" correspondant aux valeurs proposées dans le zonage.

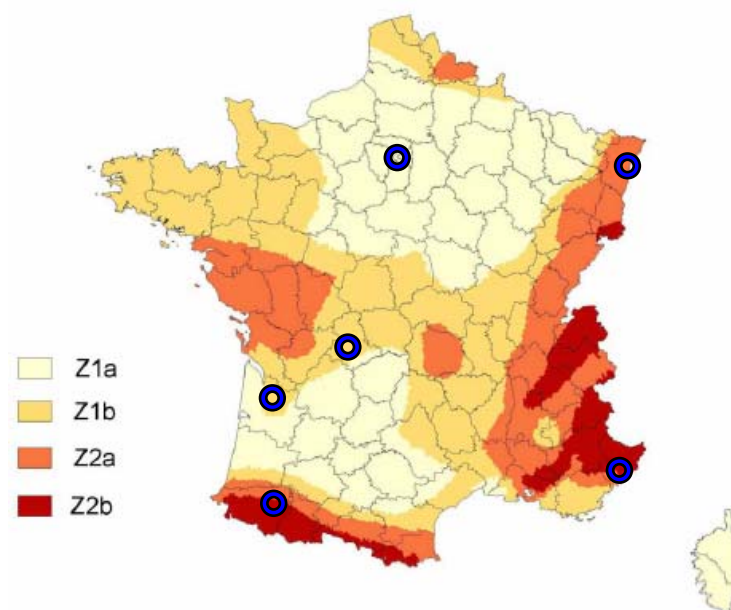
En fait, elles n'ont pas été choisies, elles résultent d'une solution de facilité, ces 6 villes ayant été retenues par un des participants pour un exemple d'étude de sensibilité. Le positionnement de ces villes sur la carte du zonage proposé (figure M1.1 ci-dessous) fait apparaître qu'elles ne sont pas représentatives de l'ensemble des situations possibles. En effet, sur ces 6 villes,

- Cinq (Bordeaux, Limoges, Pau, Paris, Nice) se trouvent de fait en limite "basse" de zone, et donc sont affectées, dans un zonage en un faible nombre de zones, par un coefficient de sécurité inéluctablement plus important que les villes situées en limite "haute" de zone.
- En outre, deux (Bordeaux et Nice) ont fait l'objet, dans les propositions de zonage GEPP/MEDD, d'un "surclassement", qui peut être discuté, mais qui avait suffisamment de légitimité pour être finalement entériné par le GEPP.

Cette constatation nous avait conduit à émettre le souhait qu'au minimum d'autres villes soient ajoutées à cette liste (par exemple Lourdes, ou bien Chamonix): cela n'a pas pu être fait et nous le regrettons, même si nous comprenons que ce non-choix a été de fait dicté par l'urgence des travaux du GT.

Nous regrettons par ailleurs que les courbes d'aléa de l'annexe 4 ne donnent pas d'indication sur la variabilité des estimations d'aléa au travers des courbes fractiles 15% et 85%, justement à titre d'exemple.

Figure M1.1 : Positionnement des 6 villes retenues dans le document commun (Bordeaux, Limoges, Nice, Paris, Pau, Strasbourg) par rapport aux propositions de zonage MEDD/GEPP.



Nous attirons enfin l'attention sur le fait que la comparaison des figures 7 et 8 met en relation seulement des cartes *médianes*, alors que la proposition de zonage GEPP/MEDD a été faite sur une base inférieure à la carte MEDD2002 médiane, que les résultats médians GZ2006 peuvent être considérés comme légèrement biaisés vers le bas, et qu'on peut légitimement se poser la question du fractile à considérer pour un zonage officiel. Ces aspects sont d'ailleurs repris dans la section suivante centrée sur le zonage en un nombre réduit de zones.

### M1-3.3 Projet de Zonage

Il existe au moins deux manières d'examiner les propositions de zonage GEPP/MEDD (annexe 6) à la lumière des résultats GZ2006 (et de leur analyse avec un certain recul) :

- on peut contester les limites de zones
- sans en remettre en cause les limites géographiques, on peut discuter la valeurs des niveaux proposés pour l'accélération d'ancrage  $a_g$

Même si le temps imparti au GT a été trop court pour aborder à fond ces deux points, il se trouve que la partie commune de ce document comprend des éléments de discussion sur ces deux points. Nous les aborderons donc successivement.

#### M1-3.3.1 Contours géographiques des différentes zones

Compte tenu des différences entre la carte médiane GZ2006 et la carte proposée pour le nouveau zonage, la figure 14 du document commun suggère, à accélération constante pour chaque zone, une réduction assez sensible des zones les plus sismiques. Il convient de rappeler ici les principes qui ont été retenus pour la délimitation des différentes zones de la proposition GEPP<sup>8</sup>:

- Les limites devaient correspondre à des lignes d'iso-accélération dans l'étude probabiliste
- Autant que possible, les seuils des différentes zones devaient former une série régulière, formant une progression géométrique ou arithmétique, la progression géométrique étant jugée préférable a priori puisque les actions sismiques sont modulées par des

<sup>8</sup> Ces principes sont détaillés dans le document "*Propositions pour un nouveau zonage sismique de la France*" (2004), qui n'a malheureusement pas encore fait l'objet d'une autorisation de diffusion générale.

coefficients multiplicateurs ( $S_1, S_2, \dots$ ). De plus, la raison de cette progression doit être comparable au coefficient d'importance pour les bâtiments de la classe la plus élevée (1.4 pour les EC8, classe IV).

- Le seuil séparant la zone Z1a de la zone Z1b devait permettre d'englober dans la zone Z1b tous les séismes historiques d'intensité ressentie supérieure ou égale à VII
- Le seuil délimitant les zones Z1b et Z2a devait permettre d'englober dans la zone 2 tous les séismes historiques d'intensité ressentie supérieure ou égale à VIII
- Le seuil délimitant les zones Z2a et Z2b devait optimiser la cohérence avec les zonages des pays limitrophes.

C'est sur cette base qu'avaient été retenus, après moult discussions et essais, et comparaison attentive entre cartes d'intensités maximales historiques et cartes d'isovaleurs de  $a_{max}$ , les seuils de 0.7, 1.05 et 1.6 m/s<sup>2</sup> (cf Figure M1.2):

- Z1a :  $a_{max,475}$  (MEDD2002) < 0,7 m/s<sup>2</sup> . Dans cette zone, (presque) aucune intensité VII n'a été ressentie (à part une exception notable: le Bordelais)
- Z1b :  $0,7 \leq a_{max,475} < 1,05$  m/s<sup>2</sup> . Dans cette zone, seules des intensités VII ont été ressenties, mais aucune intensité VIII
- Z2a :  $1,05 \leq a_{max,475} < 1,6$  m/s<sup>2</sup> . Des intensités VIII y ont été ressenties mais le niveau de sismicité reste modéré
- Z2b :  $a_{max,475} \geq 1,6$  m/s<sup>2</sup> . Le niveau de sismicité est significativement plus fort que la zone Z2a.

Si l'on faisait l'exercice de proposer un nouveau zonage sur la base des résultats GZ2006 en gardant ces mêmes principes, on obtiendrait quasiment les mêmes contours car ils sont conditionnés par le zonage sismotectonique (cf similarité des cartes MEDD2002 et GZ2006 sur les figures 7 et 8), mais avec des accélérations seuils différentes.

Si l'on se base sur la carte médiane d'aléa, on va obtenir des valeurs seuils réduites d'environ 1/3 à 1/2 (divisées par environ 1.5 dans les zones actives et environ 2 dans les zones faiblement actives). Cependant, comme en principe GZ2006 se veut "best-estimate", il faudrait alors prendre dans chaque zone les valeurs maximales, ce qui ne donne plus qu'un coefficient 3/4 à 1. Cette discussion est reprise dans le paragraphe suivant qui examine la distribution des valeurs d'accélération résultant de l'étude GZ2006 dans les différentes zones proposées par le GEPP pour le nouveau zonage.

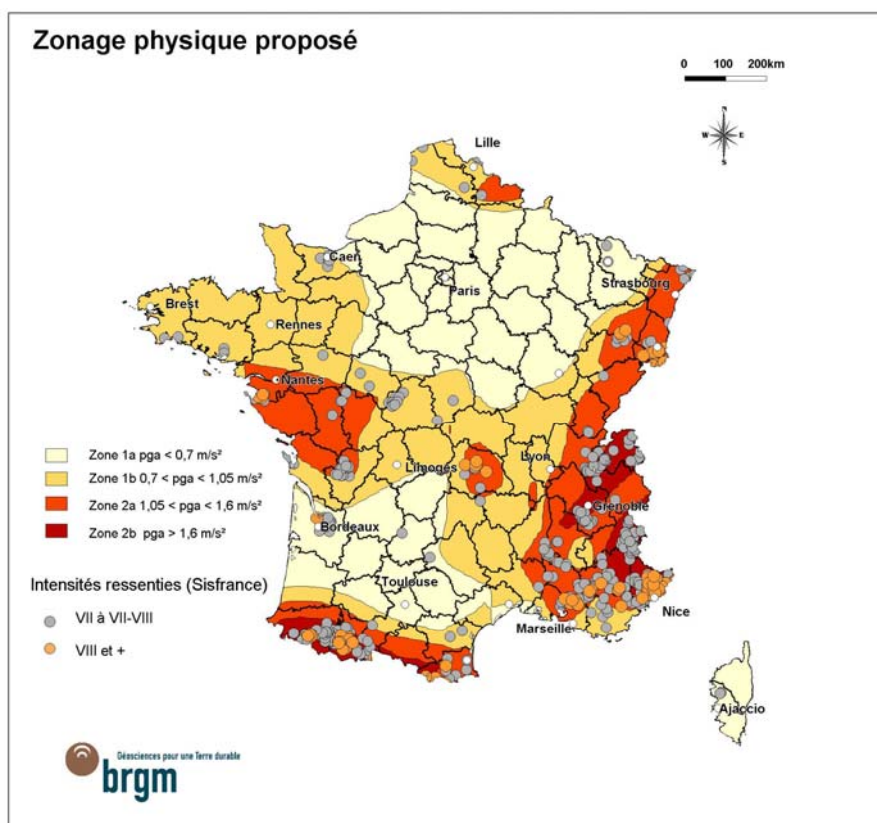


Figure M1.2 : Comparaison des intensités épacentrales historiques et des propositions de zonage MEDD/GEPP de 2004 (Extrait du document [10]).

### M1-3.3.2 Niveaux de l'accélération d'ancrage $a_g$ dans les zones de la proposition GEPP/MEDD (Annexe 6)

La comparaison entre ce projet de zonage et les résultats probabilistes GZ2006 peut alors être conduite de la manière suivante : pour chacune des 4 zones réglementaires ainsi délimitées, tous les points de calcul de l'étude probabiliste ont été considérés, et une statistique a été faite sur les valeurs d'accélération : ont ainsi été obtenus, pour chaque zone et chaque étude probabiliste, une accélération "médiane" et des fractiles "géographiques" 15% et 85%. Ces statistiques sont ici des statistiques géographiques, par zone : elles ne tiennent aucun compte de l'incertitude sur l'estimation probabiliste. Par contre, le même exercice de statistique géographique par zone peut être conduit non plus sur les cartes médianes, mais sur les cartes correspondant aux fractiles 15% et 85 % de l'étude probabiliste.

Nous avons repris sur les figures M1.3 à M1.6 les figures 9 à 12 du document commun, présentant, pour chaque zone, les valeurs médianes pour les cartes médianes GZ2006 et MEDD2002 correspondant aux 3 périodes de retour, 475, 975 et 1975 ans (traits épais bleu et rouge, respectivement), et les comparant aux valeurs proposées pour le zonage (barres verticales orange).

Par construction donc, les valeurs MEDD2002 à 475 ans (trait rouge continu, zone rosée pour les fractiles géographiques 15% - 85%) se situent quasiment toutes au-delà des valeurs proposées pour le zonage réglementaire.

Si l'on compare les valeurs médianes géographiques de l'aléa médian GZ2006 ( $a_{geo50,al50}$ , trait continu bleu), aux valeurs proposées pour le zonage réglementaire, il apparaît très clairement qu'elles se situent largement en dessous; cela est aussi vrai pour les valeurs médianes à 975 ans (voire même à 1975 ans pour Z1a). Et l'on pourrait alors en déduire que les niveaux réglementaires proposés correspondent à une période de retour largement supérieure à 1000 ans.

Mais il faut garder à l'esprit la définition des fractiles : 50% de la superficie d'une zone ont 50% de chances d'expérimenter un aléa plus fort que ces valeurs  $a_{geo50,al50}$  "médianes géographiques de l'aléa médian", ou qu'inversement on ne peut assurer qu'à 50% de la superficie d'une zone d'avoir 1 chance sur 2 d'expérimenter un aléa inférieur à  $a_{geo50,al50}$ : on serait alors très loin d'assurer à toute la population le niveau de sécurité recommandé par l'EC8 !

Il convient donc, dans une perspective réglementaire, de regarder les fractiles supérieurs. Cela peut se faire de plusieurs manières différentes :

- Considérer les fractiles géographiques de l'aléa médian,  $a_{geo85,al50}$  et  $a_{geo15,al50}$  (zone bleutée sur les figures): ce faisant, si l'on s'assure que 85% de la superficie d'une zone a 50% de chances d'expérimenter un aléa plus faible que  $a_{geo85,al50}$ , on accepte également que 15% de la superficie ait un chance sur deux d'expérimenter un aléa plus fort
- Considérer le fractile 85% de l'aléa, et son fractile 50% géographique  $a_{geo50,al85}$  (médiane géographique, trait vert continu): ce faisant, on s'assure que 50% de la superficie d'une zone a 85% de chances d'expérimenter un aléa plus faible, mais on accepte que 50% de la superficie ait 15% de chance d'expérimenter un aléa plus fort
- Considérer enfin, dans une perspective très sécuritaire, le fractile 85% géographique du même fractile 85% de l'aléa,  $a_{geo85,al85}$  (trait vert pointillé): ce faisant, on s'assure que 85% de la superficie d'une zone a 85% de chances d'expérimenter un aléa plus faible, mais on accepte que 15% de la superficie ait 15% de chance d'expérimenter un aléa plus fort
- (On aurait pu aussi calculer exactement, à partir des distributions statistiques complètes en géographie et en aléa, la probabilité totale (en terme géographique et d'aléa) de dépassement d'un certain niveau, et se fixer des seuils admissibles : cela n'a pas été fait dans le cadre de ce GT, le temps étant compté).

Si donc l'on compare les valeurs réglementaires proposées à ces valeurs  $a_{geo85,al50}$  et  $a_{geo50,al85}$  (aussi indiquées sur les Figures M1.3 à M1.6), on observe que les premières sont supérieures aux secondes d'un facteur variant entre 10 et 30%, mais sont inférieures aux valeurs correspondantes pour 975 ans de période de retour: on pourrait dès lors en conclure que le zonage réglementaire proposé correspond à une période de retour entre 475 et 975 ans.

Tableau M1.I : Comparaison des valeurs  $a_g$  proposées pour le nouveau zonage avec les fractiles de l'étude GZ2006 à 475 ans de période de retour

Zone	$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	$(a_{geo50,al50})_0$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{geo85,al50}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_g/a_{geo85,al50}$	$a_{geo50,al85}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_g/a_{geo50,al85}$	$a_{geo85,al85}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_g/a_{geo85,al85}$
Z1a	(0.4)	0.19	0.32	(1.27)	0.25	(1.63)	0.42	(0.95)
Z1b	0.7	0.46	0.60	1.18	0.64	1.09	0.82	0.86
Z2a <sup>9</sup>	1.1	0.65	0.86	1.29	0.91	1.21	1.06	1.05
Z2b	1.6	1.15	1.46	1.10	1.33	1.21	2.00	0.80

Compte tenu de la discussion rapportée plus haut (section M1 - 3.2.1) sur le modèle GZ2006 et son léger biais "optimiste", il ressort de cette nouvelle étude probabiliste que les valeurs proposées pour la réglementation risque normal sont tout à fait compatibles avec une période de retour de 475 ans, comme indiqué de façon parlante sur les figures M1.3 à M1.6 et le tableau M1.I: ces niveaux correspondraient à peu près à ces valeurs  $a_{geo50,al85}$  ou  $a_{geo85,al50}$ , corrigées de ce biais "optimiste" de 10 à 20%.

<sup>9</sup> Les valeurs un peu plus fortes des rapports  $a_g/a_{geoxx,alyy}$  dans le cas de la zone Z2a sont liées pour partie au fait que la proposition finale GEPP a préféré la valeur de 1.1 m/s<sup>2</sup> à la valeur "théorique" de 1.05 m/s<sup>2</sup>

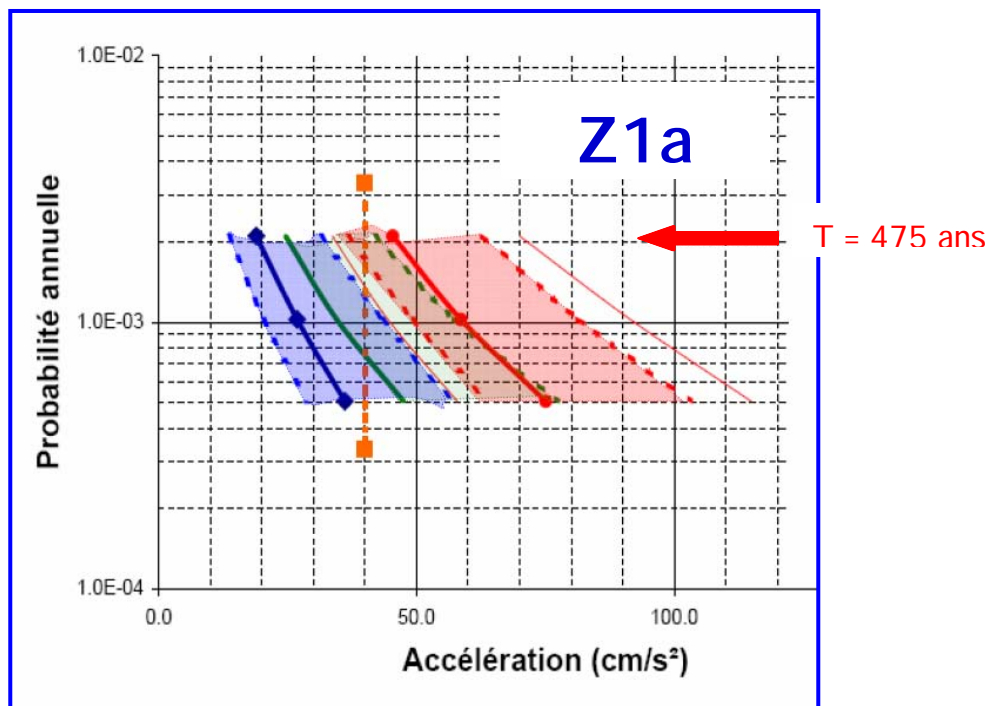


Figure M1.3 : Distribution statistique des courbes d'aléa dans la Zone Z1a pour les modèles GZ2006 et MEDD2002. La zone bleutée correspond aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian GZ2006 (courbe médiane en bleu épais), la zone rosée aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian MEDD2002 (courbe médiane en rouge épais), la zone verte aux fractiles 50% et 85% du fractile 85% de l'aléa GZ2006 (courbe médiane en vert épais). La barre verticale orange (à 0.4 m/s<sup>2</sup>) correspond à la valeur officielle associée dans le zonage à la zone Z1a, et proposée uniquement comme valeur de référence pour le risque spécial.

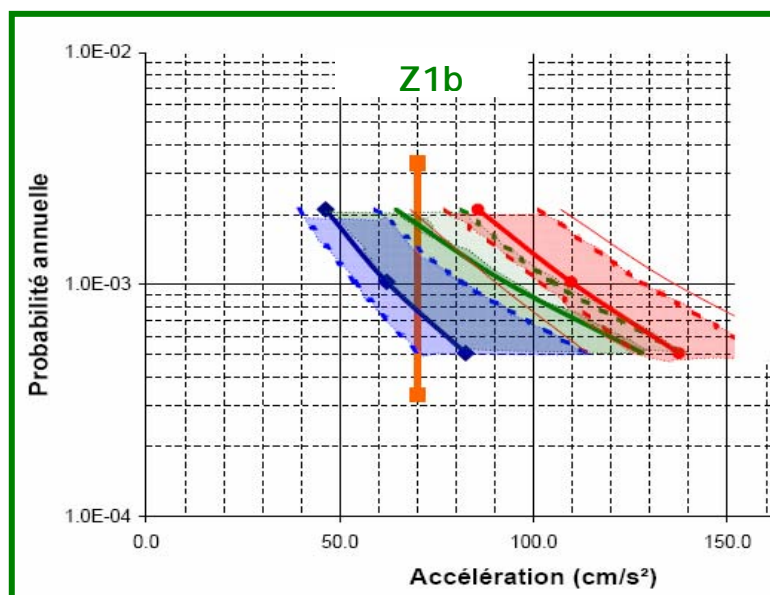


Figure M1.4 : Distribution statistique des courbes d'aléa dans la Zone Z1b pour les modèles GZ2006 et MEDD2002. La zone bleutée correspond aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian GZ2006 (courbe médiane en bleu épais), la zone rosée aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian MEDD2002 (courbe médiane en rouge épais), la zone verte aux fractiles 50% et 85% du fractile 85% de l'aléa GZ2006 (courbe médiane en vert épais). La barre verticale orange (à 0.7 m/s<sup>2</sup>) correspond à la valeur associée dans les propositions de zonage à la zone Z1b (cf annexe 7).

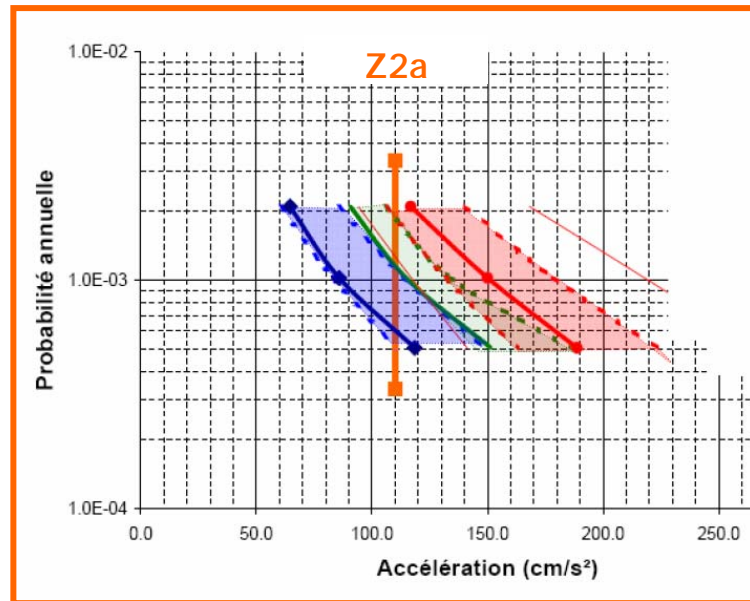


Figure M1.5 : Distribution statistique des courbes d'aléa dans la Zone Z2a pour les modèles GZ2006 et MEDD2002. La zone bleutée correspond aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian GZ2006 (courbe médiane en bleu épais), la zone rosée aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian MEDD2002 (courbe médiane en rouge épais), la zone verte aux fractiles 50% et 85% du fractile 85% de l'aléa GZ2006 (courbe médiane en vert épais). La barre verticale orange (à 1.1 m/s<sup>2</sup>) correspond à la valeur associée dans les propositions de zonage à la zone Z2a (cf annexe 7).

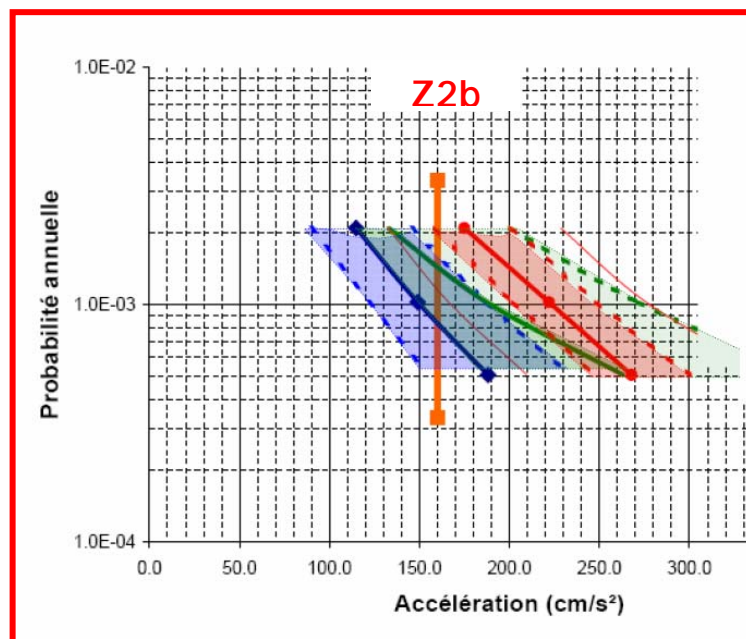


Figure M1.5 : Distribution statistique des courbes d'aléa dans la Zone Z2b pour les modèles GZ2006 et MEDD2002. La zone bleutée correspond aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian GZ2006 (courbe médiane en bleu épais), la zone rosée aux fractiles géographiques 15% et 85% de l'aléa médian MEDD2002 (courbe médiane en rouge épais), la zone verte aux fractiles 50% et 85% du fractile 85% de l'aléa GZ2006 (courbe médiane en vert épais). La barre verticale orange (à 1.6 m/s<sup>2</sup>) correspond à la valeur associée dans les propositions de zonage à la zone Z2b (cf annexe 7).

Ceci étant, il est clair qu'un point situé très près d'une bordure "inférieure" de zone (comme cela est le cas de 5 des 6 villes retenues à titre d'exemple) a un aléa à 475 ans qui peut être sensiblement inférieur à la valeur réglementaire de la zone : c'est l'inconvénient des modèles discrets et est inévitable dès lors que l'on veut un nombre réduit de zones ! Il est clair également que les différences entre modèles probabilistes sont plus prononcées dans la zone la moins active (Z1a).

Pour terminer sur cette partie, nous ferons remarquer que les commentaires figurant dans le rapport commun se fondent exclusivement sur la carte GZ2006 *médiane* (fractile 50% de l'aléa). La littérature scientifique récente témoigne des débats assez vifs actuellement en cours dans la communauté "probabiliste" sur la façon de prendre en compte la dispersion des résultats probabilistes: il y a les tenants de la moyenne, et il y a les tenants des fractiles supérieurs; mais il n'y a que très peu de personnes prônant de considérer la médiane. Or, compte tenu de la distribution plutôt log-normale des résultats probabilistes, la moyenne est assez sensiblement supérieure à la médiane, et ce d'autant plus que la dispersion est élevée.

#### **M1-4 Point d : niveau de protection atteint**

Outre les avertissements de prudence figurant en introduction de cette section dans le document commun, nous souhaitons simplement attirer l'attention sur l'arbitraire du choix de la valeur de 0.04 g comme "valeur de dimensionnement" pour l'estimation de la courbe de vulnérabilité d'un bâtiment non-dimensionné: il s'agit là d'une hypothèse très forte qui vraisemblablement sous-estime la résistance réelle, sinon il serait difficile d'expliquer la relativement bonne tenue de nombre de bâtiments des Saintes et de Basse-Terre en novembre 2004 et février 2005 (forte réplique ayant donné lieu à plus de 0.6 g).

L'argument avancé selon lequel cette valeur "illustre les précautions légitimes que prennent les bureaux d'étude pour répondre à la question de la tenue au séisme d'un bâtiment non conçu pour cela" (document commun, p. 19), aurait plutôt tendance à accréditer l'idée selon laquelle les méthodes de calcul actuelles ne rendent pas bien compte du comportement réel sous séisme des bâtiments existants.

Enfin, il semble utile aussi de rappeler une fois de plus à la fois l'énorme dispersion et les limites des domaines de validité des différentes corrélations proposées entre intensité et pga, qui sont très souvent en filigrane derrière les courbes de fragilité probabilité de défaillance / pga, et sur l'utilisation erronée voire abusive qui peut en être faite, de façon souvent inconsciente et involontaire. A titre d'exemple, on peut considérer la figure A3.4 qui compare les courbes de fragilité estimées pour "RC2M" avec celles déduites des échelles d'intensité et de corrélations intensité – pga. Les courbes "WSUS" sont censées intégrer les corrélations intensité – pga utilisées en Californie pour les "shake-maps". Elles sont données ici pour des intensités X, XI, et XII (avec des pga allant jusqu'à 2 g...). Or l'examen des documents de base (<http://pasadena.wr.usgs.gov/shake/pubs/regress/node1.html>) montre que leurs auteurs ne les recommandent que pour des intensités inférieures à VIII, et ne donnent que des valeurs indicatives à intensité IX et X, où de toute façon ils recommandent de considérer des indicateurs plus basse fréquence. Et pourtant, on n'hésite pas à utiliser leur extrapolation à des intensités X, XI, et XII...

Il est très probable que la situation est identique pour les deux autres lois mentionnées dans cette figure, à savoir RISK-UE et Murphy-O'Brien, les données disponibles pour de telles intensités étant très peu nombreuses. L'emploi d'une telle corrélation I – pga se trouve notamment derrière les courbes de fragilité utilisées dans le document GZ6.

## M1-5 Conclusions / Propositions

Nous souscrivons totalement aux propositions d'études et recherches listées dans ce paragraphe de conclusion.

Nous tenons aussi à souligner l'intérêt et l'utilité de ces études complémentaires GZ2006 (et remercier au passage le CEA et EDF de les avoir financées), qui finalement ont joué, avec un décalage de quatre ans, le rôle de l'étude probabiliste parallèle qui était souhaitée par l'AFPS lors du lancement de l'étude GEOTER / MEDD2002, souhait qui n'avait pu être satisfait faute de financement suffisant. Nous avons ainsi maintenant deux études, l'une légèrement biaisée vers le haut, l'autre vers le bas, et les niveaux proposés pour le nouveau zonage se trouvent exactement entre les deux.

## M1-6 Références

- [1] Autrans, A., Blès, J. L., Combes, Ph., Cushing, M., Dominique, P., Durouchoux, Ch., Gariel, J.C., Goula, X., Mohammadioun, B., Terrier, M. (1998). Probabilistic seismic hazard assessment in France: Part one: Seismotectonic zonation. Proc. 11th Europ. Conf. on Earth. Eng., CD-ROM, Paris, Sept. 1998
- [2] Beauval, C. 2003. Analyse des incertitudes dans une estimation probabiliste de l'aléa sismique, exemple de la France. Thèse UJF, décembre 2003, 161 pages.
- [3] Beauval, C., P.-Y. Bard, S. Hainzl & P. Guéguen, 2006. Limited constraints on probabilistic seismic hazard estimates. Soumis au BSSA, décembre 2006, 20 pages.
- [4] Bommer, J.J., and N. A. Abrahamson, 2006. Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates, Bull. seism. Soc. Am., 96-6, 1967-1977.
- [5] Dominique P. , André E. et Charléty J. (2001) – Synthèse des travaux réalisés dans le cadre de la Convention 37/99. BRGM/RP-50740-FR, 194 pages, 2 fig., 4 annexes, 1 Tabl.
- [6] Grünthal, G., C. Bosse, S. Sellami, D. Mayer-Rosa and D. Giardini, Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East, Annali Geofis., 42, 1215-1223, 1999.
- [7] Jimenez, M.-J., Giardini, D., Grünthal, G., 2003. The ESC-SESAME Unified Hazard Model for the European- Mediterranean region, CSEM-EMSC Newsletter N° 19. April 2003, 2-4, 2003.
- [8] Marin, S., J.-P. Avouac, M. Nicolas and A. Schlupp, 2004: A Probabilistic Approach to Seismic Hazard in Metropolitan France, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 6, pp. 2137–2163, December 2004.
- [9] Martin, C, et Ph. Combes 2002. "Révision du zonage sismique de la France, Etude probabiliste". *Rapport final*, Contrat GTR / MATE / 0701-150.
- [10] "Propositions pour un nouveau zonage sismique de la France" (Recommandations de la cellule "aléa sismique" amendées d'une réunion "Pré-GEPP" tenue le 10/05/2004, 162 pages, rédacteurs principaux : P.-Y. Bard et B. Lebrun).

## Annexe M2

### Compléments « de minorité »

#### B. Hernandez

**Ce commentaire se rapporte au chapitre 2 Point a : origine des écarts entre les différentes cartes.**

#### **1 – Contexte de l'étude LDG et méthodologie.**

L'article Marin et al., 2004 est une étude probabiliste effectuée hors de tout cadre réglementaire ayant pour principal objectif de proposer une approche cohérente en terme d'homogénéité des données (catalogues de sismicité, magnitude, relation d'atténuation ...) et en adéquation avec le cadre géographique. La prise en compte des incertitudes sur les différentes données n'a pas pleinement été analysée mais par contre une étude de sensibilité (zonage et failles notamment) a été effectuée dans cette étude.

Il n'y a pas de différences fondamentales entre l'étude MEDD-2002 et l'article LDG du point de vue méthodologique. Seules les hypothèses concernant les données diffèrent (catalogues de sismicité, zonage sismotectonique, magnitude, relations d'atténuation, forme des lois de Gutenberg-Richter (paramètres a, b,  $M_{max}$ ), prise en compte ou non de l'effet de la géologie de surface, propagation ou non des incertitudes ...).

#### **2 – Choix des hypothèses ayant un impact de premier ordre sur le résultat.**

##### a- homogénéité des magnitudes (catalogues de sismicité et relation d'atténuation)

L'hypothèse  $M_S=M_L$  (choisie dans l'étude MEDD-2002) conduit à des différences de premier ordre par rapport à l'étude LDG qui utilise des magnitudes homogènes ( $M_L$ ).

##### b- choix de la relation d'atténuation

L'étude MEDD-2002 utilise pour prédire le mouvement sismique deux relations d'atténuations voisines calées sur des données d'Europe, d'Asie, d'Afrique du nord et de Californie dans des contextes tectoniques parfois relativement éloignés du notre (aucune donnée française). Les deux relations utilisées sont semblables et ne rendent pas compte de l'incertitude épistémique.

A ce propos, le cahier technique n°23 de l'AFPS (Jacques Betbeder-Matibet et Myriam Bour) conclue : « Il est préférable de choisir des lois établies pour un contexte tectonique, voire un domaine géographique, similaire à celui caractérisant la région où se trouve le site étudié » ; c'est ce qui a été fait dans l'étude LDG. Ce choix n'est toutefois pas idéal car la France métropolitaine est une région à sismicité modérée et les données récentes ne permettent pas de contraindre une relation d'atténuation au-delà de  $M_L=6$ .

##### c- la propagation des incertitudes

Le LDG a utilisé une méthode probabiliste « best-estimate » utilisant par exemple la valeur médiane de la relation d'atténuation pour ce qui concerne la prédiction du mouvement sismique. La prise en compte des incertitudes sur les différentes données n'a pas pleinement été analysée dans cette étude.

L'étude MEDD-2002 prend en compte, dans un arbre logique, les incertitudes liées aux relations d'atténuation (aléatoire et épistémique), au  $M_{max}$ , aux paramètres a et b des lois de Gutenberg-Richter et à la profondeur des séismes en négligeant les covariances entre ces paramètres. Les valeurs extrêmes de chacun des paramètres sont ainsi prises en compte

conjointement et les incertitudes sont alors cumulées. Considérer les paramètres comme indépendants, n'est souvent pas réaliste. Pour illustrer cette remarque, prenons le cas des incertitudes associées au couple magnitude-profondeur d'un séisme historique. Il existe des incertitudes sur chacun de ces paramètres mais elles ne sont pas indépendantes car si la magnitude est sous-estimée la profondeur devra être réévaluée à une valeur plus importante pour continuer à expliquer les données macrosismiques.

Dans l'étude MEDD-2002, des incertitudes sont comptées plusieurs fois. Par exemple, l'incertitude sur la magnitude est prise en compte à la fois dans l'écart-type de la relation d'atténuation, dans l'incertitude sur  $M_{\max}$  et sur le paramètre  $a$  de la loi de Gutenberg-Richter.

## Annexe M3

### Compléments « de minorité »

W. Jalil

#### Ce commentaire se rapporte au chapitre 4 Point d : niveau de protection atteint

Ce chapitre applique comme méthode, la convolution de l'aléa et des courbes de fragilité. L'objet est d'évaluer la marge apportée par la réglementation technique, lorsqu'on se donne le niveau de protection visé par le choix de l'aléa, pour les bâtiments courants du risque normal et pour le risque spécial. Ce qui correspond en terme de probabilité à  $1/T$ , soit  $1/475=2^{E-3}$ . La probabilité globale de dommage D4, ou D5 est alors connue si on se donne les courbes de fragilité. A cet effet la démarche RISK-UE a été adoptée, en choisissant les éléments instruits par l'équipe de Bucarest/UTCB, pour les bâtiments à murs en béton armé. Pour adapter les résultats Risk-UE au contexte français, un questionnaire adressé à des experts extérieurs devait pouvoir fournir les données servant à ancrer les paramètres de calculs, en France, en particulier :

- 1.2 quantifier la probabilité de dommages (D4 ou D5) pour une population de 100 bâtiments dimensionnés à 0.2g, lorsque le niveau sismique est 0.1g, 0.2g,.....0.5g
  - 1.3 estimer le coefficient de marge globale
  - 1.4 estimer le coefficient de sécurité Cs
- Etc ... (...18 questions)

Sur 22 experts questionnés, seulement 5 experts ont *essayé* de répondre (plus 1 expert du GT); le questionnaire et les réponses figurent dans le document GZ8...

L'exploitation des réponses a été très décevante. D'ailleurs le CST avait demandé de poursuivre cette enquête, certains membres ont également demandé d'y associer le CSTB (qui figurait cependant dans la liste des destinataires de l'enquête initiale et n'avait pas répondu).

Exemples :

- Pour la question a), seuls deux experts externes ont répondu, et ont donné des réponses très différentes (à .3g, près de 100% des bâtiments attendraient le dommage de niveau 4 pour l'un, 0% pour l'autre; le graphique p.27 donne 30%). Ce ne sont pas des évaluations fiables puisque contradictoires
- Question b) : un seul expert externe s'est prononcé !
- Question c) : les valeurs estimées pour le coefficient Cs varient de 1 à 1.15, avec 2 cas particuliers 1.30 à 1.5. **Mais ces coefficients Cs ne sont pas les coefficients de sécurité attendus par le GT, car ce sont des coefficients partiels de sécurité**, tenant compte de la dispersion des propriétés des matériaux, et de leurs écarts types, ils ne portent que sur la résistance du matériau, ce n'est pas un coefficient global de sécurité

#### ADAPTATION AU CONTEXTE FRANÇAIS

##### *Courbes de capacité*

###### LES MURS

Les murs conformes au DTU 23,1 ne sont pas tous armés, ce sont des murs NON ARMES, sauf le dernier étage avec un chaînage de 2 barres de 10mm, pour la température

**Ils ne peuvent pas être comparés à ceux de l'Europe**, où le minimum exigé hors séisme est de l'ordre de 50 kg d'acier au m<sup>3</sup>

**Les courbes de capacité utilisées, bien que réduites par une prise en compte d'un coefficient de ductilité légèrement réduit (?), ne sont pas transposables au contexte national. Cela avait d'ailleurs été acté lors du colloque international de Nice, il y a 3 ans.**

LES BATIMENTS EN PORTIQUES (poteaux-poutres)

Le BAEL permet de construire des poteaux avec des armatures longitudinales de 0,20% de la section, soit 18 kg/m<sup>3</sup> d'acier. En Europe le minimum se situe autour de 80 kg/m<sup>3</sup>, soit plus de 400%

Ainsi les courbes de capacité RiskUE ne sont pas transposables en France

### ***Courbes de fragilité***

Les courbes de fragilité utilisées présentent des pentes trop abruptes, avec discontinuités brutales. Un calcul de sensibilité aurait dû être effectué pour apprécier la marge d'erreur. Par ailleurs l'écart type caractérisant les courbes de fragilité (la variabilité), a été calé sur les résultats du REX, eux-mêmes critiquables (cf. plus haut)

Ces courbes de capacité ont été modifiées par les résultats du questionnaire des experts, questionnaire très peu renseigné et sujet à caution.

### **CONCLUSION**

La méthodologie utilisée pour apprécier le gain apporté par les normes techniques, manque de données françaises. C'est une voie intéressante mais qui ne peut encore être prise en compte. La recherche est à développer dans ce sens avant de pouvoir communiquer sur ce sujet

En effet les résultats trouvés à ce jour sont plutôt irréalistes : on trouve ainsi que par rapport au niveau de protection visé par le choix de l'aléa, l'application des normes réduit le risque par un facteur de 3 à 10 (Cf. Annexe 4 p. 33)

La page 27 présente le cas d'un ouvrage calculé (avec son coefficient de comportement) à 0.2g, et qui a une probabilité de résister jusqu'à 0.8g, soit 400% plus !

Diffuser ce chapitre 4 serait très regrettable pour notre Association, car aucun spécialiste de structures ne peut croire un instant à ces résultats.

C'est pour toutes ces raisons que je demande de retirer du rapport ce chapitre 4.

## Annexe M4

### Compléments « de minorité »

E Viallet

#### M4 - 1 Commentaire sur le §3.4 : Projet de Zonage

J'estime nécessaire d'apporter ici un complément sur le paragraphe 3.4, non pas que je sois en désaccord avec ce qu'il contient, mais plutôt car je considère que l'analyse des résultats n'a pas été poussée jusqu'à son terme, alors que les enseignements à tirer sont potentiellement très importants. Je présente ci-après mon analyse personnelle.

##### M4 - 1.1 Précision préalable : Périodes de retour attendues pour le zonage

Il paraît important de situer en préalable les périodes de retour attendues sur la base de l'objectif de 475 ans fixé par l'EC8 et du passage d'une évaluation continue (étude MEDD 2002) à un zonage discret (projet de zonage). En effet, le passage continu / discret conduit à un effet de seuil (augmentation du PGA de 1.5 au franchissement d'une zone) qui se traduit de fait par une évolution brutale de la période de retour résultante. En transposant le rapport de 1.5 sur le PGA (valeur de seuil proposée pour le zonage) en rapport de période de retour au moyen de la relation  $PR2 / PR1 \sim (PGA2 / PGA1)^3$ , et en considérant que le point le moins protégé de la zone conduite à une période de retour de 475 ans, on doit alors observer que le point le mieux protégé de la zone conduit à une période de retour de 1600 ans environ (soit un rapport 3.4 environ).

##### Périodes de retour attendues pour le zonage : 475 ~ 1600 ans

Cette plage de valeurs de périodes de retour attendues résulte du choix du nombre de zones (plus le nombre de zones est important, plus la plage de variation des périodes de retour sera faible) et conduit alors à une in-homogénéité du niveau de protection sur le territoire qui peut être jugée raisonnable.

##### M4 - 1.2 Lecture des figures 6 à 9

Les figures 6 à 9 peuvent être lues de 2 façons différentes. D'une part, à période de retour constante (ordonnées constante), il est possible de comparer les résultats des études MEDD 2002 et GZ 2006 en terme de PGA, et de repositionner ces valeurs par rapport à celles proposées pour le zonage. D'autre part, à PGA constant (abscisse constante), il est possible de comparer les résultats des études MEDD 2002 et GZ 2006 en terme de période de retour, et de repositionner ces valeurs par rapport à celles attendues pour le zonage (475 ~ 1600 ans). Par ailleurs, pour interpréter en détail les figures précédentes, il aurait été nécessaire d'ajouter sur chaque figure un pointeur matérialisant la valeur de PGA correspondant à la valeur proposée pour la zone inférieure à la zone considérée (c'est à dire pointer la valeur de 1.1 m/s<sup>2</sup> sur la figure relative à la zone 2b, 0.7 m/s<sup>2</sup> figure relative à la zone 2a etc ...). L'analyse qui suit intègre cela.

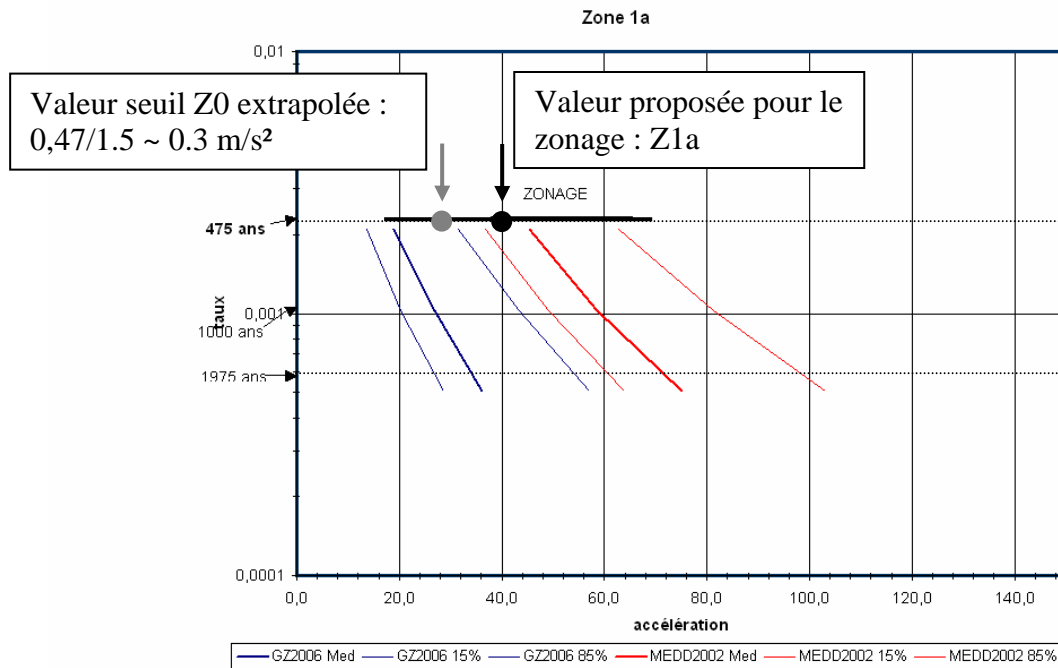


Figure 6 Courbes d'aléa – Zone 1a

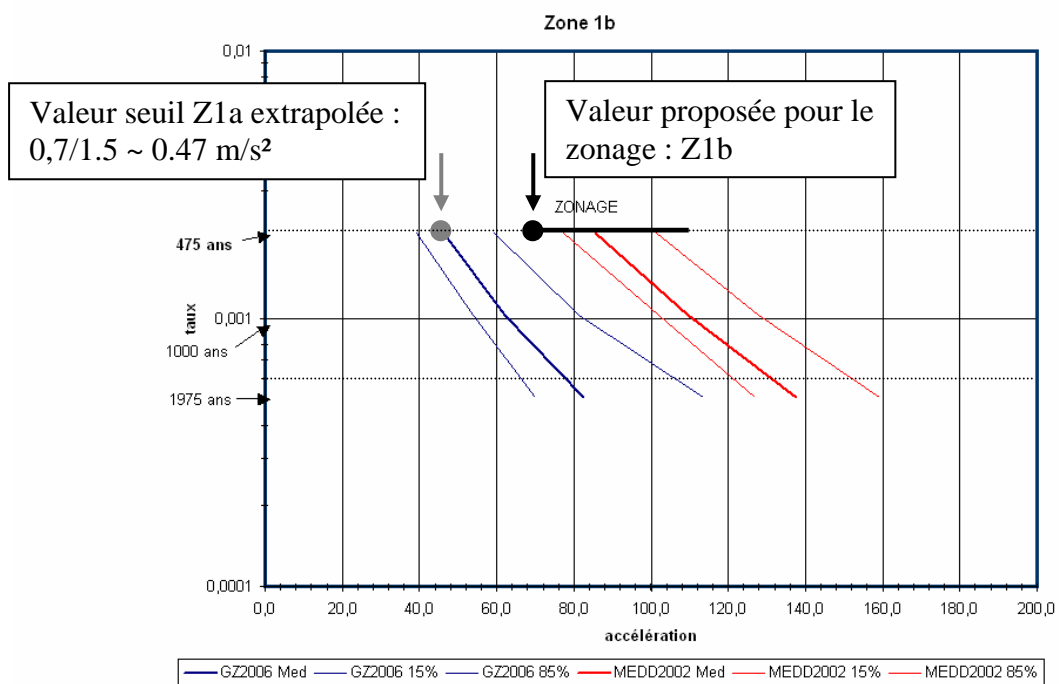


Figure 7 Courbes d'aléa – Zone 1b

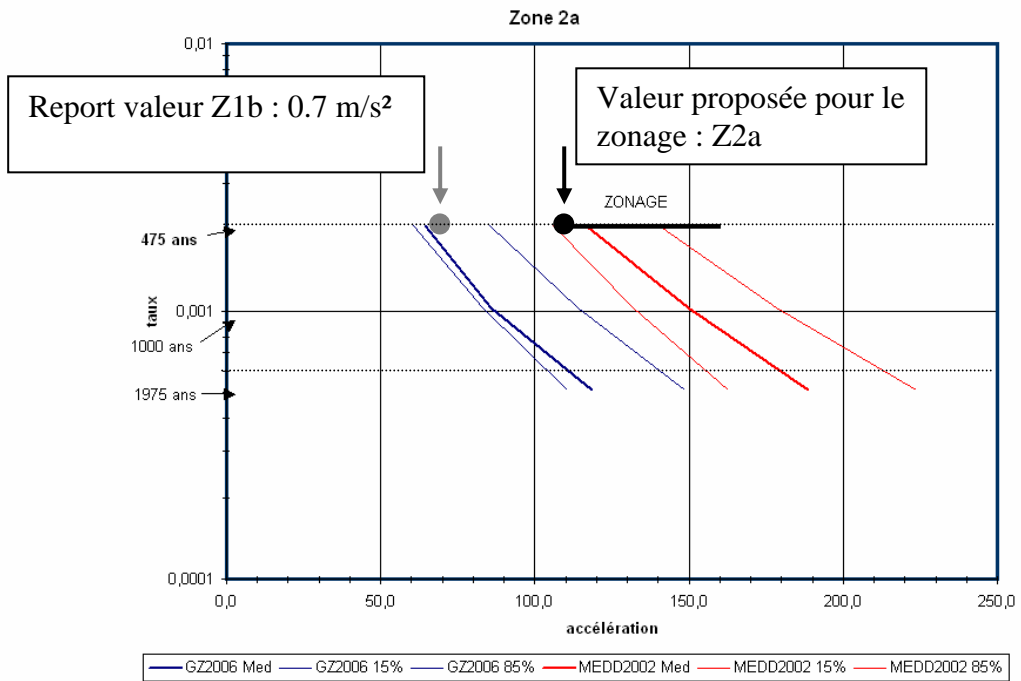


Figure 8 Courbes d'aléa – Zone 2a

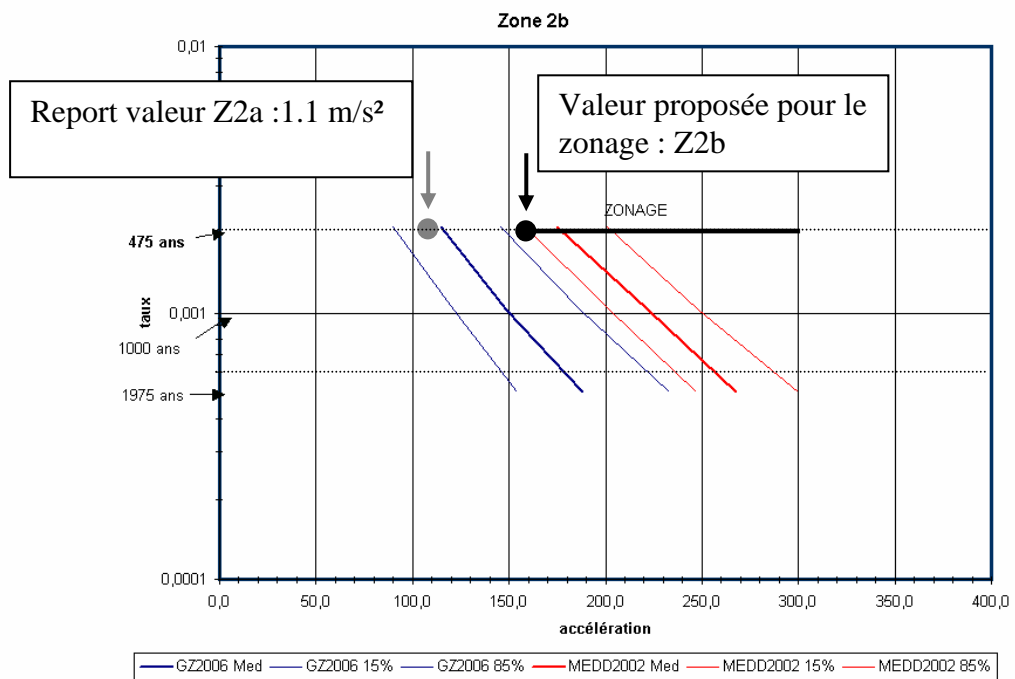


Figure 9 Courbes d'aléa – Zone 2b

### M4 - 1.3 Analyse des informations présentées dans les figures

En s'appuyant sur les résultats présentés dans les figures 6 à 9, on peut estimer les périodes de retour correspondants aux valeurs retenues dans le projet de zonage sur la base de l'étude GZ 2006. On observe que :

#### - Z2b :

- sensiblement plus de 50% des points de la zone conduisent à des périodes de retour comprises entre 475 et 1600 ans,
- environ 40% des points de la zone apparaissent «sur-protégés» et devraient être affectés à la zone inférieure (Z2a) pour rester cohérents avec l'objectif EC8.
- le rapport des périodes de retour entre le point le mieux protégé de la zone et le point le moins bien protégé de cette même zone est très supérieur au rapport 3.4 exprimé plus haut.

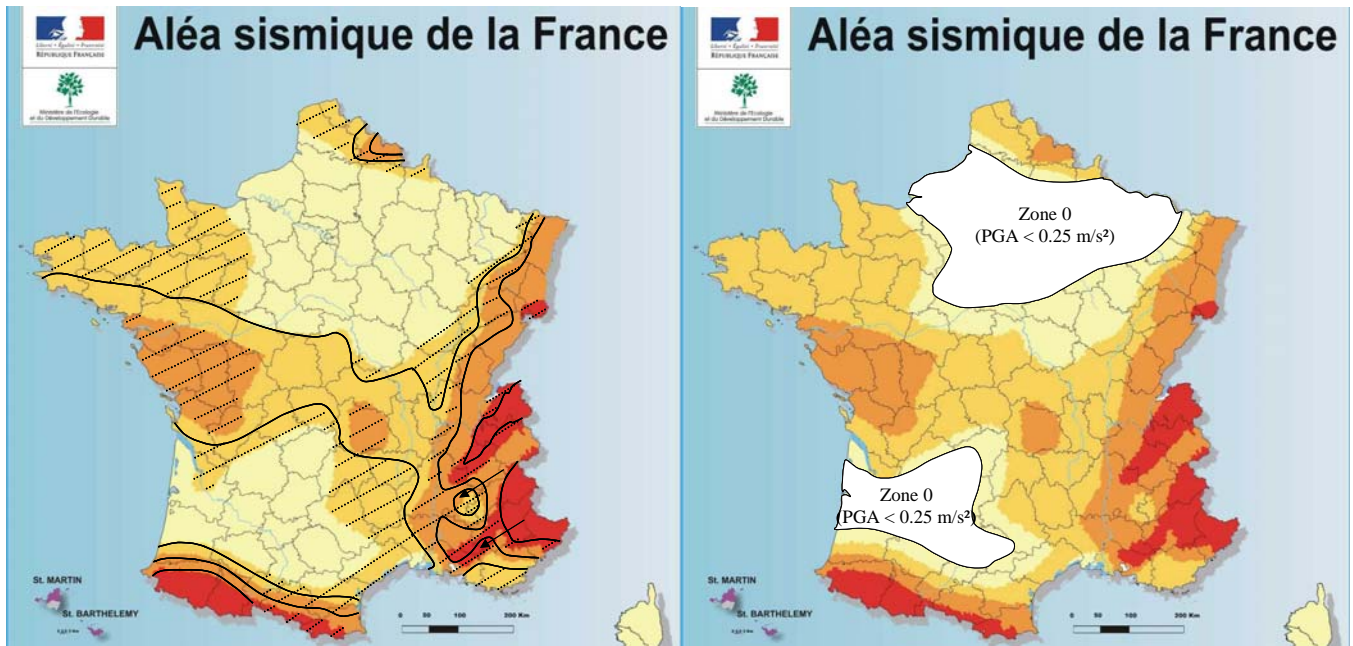
#### - Z2a :

- environ 50% des points de la zone conduisent à des périodes de retour comprises entre 475 et 1600 ans,
- 50% des points de la zone (voire plus) apparaissent «sur-protégés» et devraient être affectés à la zone inférieure (Z2a) pour rester cohérents avec l'objectif EC8,
- le rapport des périodes de retour entre le point le mieux protégé de la zone et le point le moins bien protégé de cette même zone est probablement très supérieur au rapport 3.4 exprimé plus haut (rapport déjà égal à 3.4 entre les fractiles 15 et 85%).

#### - Z1b :

- environ 50% des points de la zone conduisent à des périodes de retour comprises entre 475 et 1600 ans,
- près de 50% des points de la zone apparaissent «sur-protégés» et devraient être affectés à la zone inférieure (Z2a) pour rester cohérents avec l'objectif EC8 (on fait ici l'hypothèse que le seuil relatif à la zone Z1a serait égal à  $0.7 / 1.5 = 0.47 \text{ m/s}^2$ , en cohérence avec le coefficient retenu pour le zonage),
- le rapport des périodes de retour entre le point le mieux protégé de la zone et le point le moins bien protégé de cette même zone est probablement très supérieur au rapport 3.4 exprimé plus haut (rapport déjà égal à 3.4 entre les fractiles 15 et 85%).

De cette exploitation factuelle des résultats précédents, il résulte que près de 50% du territoire métropolitain (hors zone Z1a) apparaît «sur-protégé» et devrait être affecté à la zone inférieure. Cet ordre de grandeur est confirmé (et illustré) dans la figure suivante (partie gauche). Les zones hachurées sont les zones qui apparaissent «sur-protégées» sur la base de l'étude GZ 2006. Les 2 flèches indiquent que certaines zones (localisées toutefois) pourraient être «sur-protégées» de 2 niveaux. Dans la même logique, on peut considérer qu'une proportion non négligeable du territoire pourrait prétendre à une appellation «zone 0» étant donné que l'aléa attendu est inférieur à 0.3 m/s (valeur obtenue en suivant la progression des zones via le coefficient de 1.5 sur le PGA) ce qui peut être considéré comme un aléa négligeable mais non nul, cf. figure suivante (partie droite).



#### M4 - 1.4 Conclusion personnelle

En conclusion, il me semble important de sensibiliser les pouvoirs publics sur ce résultat.

En effet, le projet de zonage actuel conduit à une protection qui n'est absolument pas homogène sur le territoire et conduirait à sur-protéger certaines zones (~ 50 % du territoire métropolitain) à un niveau non seulement nettement supérieur à l'objectif visé par l'EC8 mais à un niveau nettement supérieur à celui attribué à d'autres zones du territoire qui respecteraient quant à elles l'objectif EC8 (475 ans). Ceci pourrait alors avoir des conséquences multiples, en termes économiques évidemment mais surtout sociologiques et politiques :

- Est-il acceptable par la société de ne pas être protégée de manière homogène contre un risque (quelle réaction des citoyens, de la profession, des élus locaux ...) ?
- Est-il raisonnable de sur-protéger certaines zones, au risque de rendre la réglementation trop contraignante inappliquée ce qui aurait alors l'effet contraire à celui escompté ?
- Ne devrait-on pas plutôt faire porter l'effort sur le contrôle de l'application des règlements (cf. point d) ?

N.B. : L'analyse précédente s'appuie sur les résultats de l'étude GZ 2006 en valeurs médianes. Les conclusions de cette analyse seraient atténuées en s'appuyant sur les résultats correspondant au fractile 85% et seraient amplifiées en s'appuyant sur le fractile 15%. De la confrontation au REX (cf. tableau 1), il ressort que les résultats GZ 2006 médians restent significativement enveloppés du REX, le fractile 15% serait quant à lui en meilleur accord global sur le REX et pourrait alors être jugé plus représentatif de l'aléa sismique tel qu'enregistré sur le territoire. En revanche, le fractile 85% devient quant à lui très enveloppe du REX. En conséquence l'analyse précédente peut être considérée enveloppe sur la base de la démarche mise en œuvre par le GZ 2006.

#### M4 - 2 Commentaires sur le §4.3 : Résultats et Synthèse du Point d

Les résultats présentés dans ce paragraphe (point d) sont évidemment à considérer comme partiels et préliminaires, comme cela a été précisé en préambule. Je tiens toutefois à apporter ici quelques compléments par rapport à ce qui est présenté plus haut.

- D'une part, l'un des résultats principaux de ce travail est l'évaluation du niveau de protection apporté par l'application des règlements parasismiques intégrant toute la chaîne (aléa et conception des structures). Il est important de retenir que ce gain, qui

correspond à un facteur 100 en terme de probabilité annuelle de ruine, est indispensable pour placer le risque sismique à un niveau suffisamment faible par rapport aux autres risques.

- D'autre part, par rapport à certaines remarques, parfois vives, qui ont pu être exprimées dans le cadre de ce GT, je tiens à préciser que la capacité des bâtiments à résister (dans une certaine mesure) à des niveaux sismiques potentiellement très supérieurs au niveau pour lequel ils ont été dimensionnés est en parfait accord avec le retour d'expérience. En conséquence, toute remise en cause de ce résultat ne semble pas crédible. Cependant, il ne faut pas conclure pour autant que cette capacité puisse dispenser d'un dimensionnement parasismique. Bien au contraire, c'est plutôt un maillon indispensable de la chaîne de protection, en complément d'un niveau de dimensionnement adapté.
- Enfin, il ressort également que la bonne application des règlements (notamment au niveau de la réalisation) semble poser question dans la profession. En conséquence, un réel effort dans le sens de la vérification de la bonne application des règlements constitue un élément majeur de la démarche de protection parasismique. Il semble important de sensibiliser les Pouvoirs Publics sur ce point.

## Annexe M5

### Compléments « de minorité »

#### P Sollogoub

##### M5 - 1 Commentaire sur le §3.2.1 : Spécificités du Modèle GZ2006

Ce commentaire vise à apporter quelques éléments sur la pertinence de la comparaison au « retour d'expérience » des déclenchements des capteurs d'accélération. Les deux hypothèses à la base de cette approche sont, d'une part, le caractère Poissonien des événements sur un site et, d'autre part, l'indépendance des sites eux-mêmes. La première hypothèse est à la base de l'approche probabiliste de détermination de l'aléa. La seconde découle du fait que les stations sont suffisamment éloignées pour qu'un événement sur l'une d'elle ne soit pas ressenti sur une autre. Etant donné les faibles niveaux d'accélération escomptés, cette hypothèse paraît « correcte ». Dans ce cas, on peut déduire des Tableaux 1 et 1bis, des périodes de retour moyennes. En se limitant aux sites EDF (REX), pour lesquels la durée d'observation cumulée est 404 ans, la période de retour moyenne de l'accélération égale à  $10\text{cm/s}^2$  est :

$$T_r = 404/67 = 6 \text{ ans} \quad \text{pour la carte MEDD2002}$$

Et

$$T_r = 404/16 = 25 \text{ ans} \quad \text{pour la carte GZ2006}$$

On peut affiner cette estimation en regardant les 7 sites les « plus sismiques » du REX ; ils ont tous, sur la carte GZ2006, une période de retour du niveau d'accélération égal à  $10\text{cm/s}^2$ , comprise entre 10 et 20 ans ; cette dernière valeur sera prise par la suite.

En faisant les deux hypothèses « Poissoniennes » évoquées ci-dessus, on peut déterminer la probabilité de ne pas observer le niveau considéré, par exemple sur les 6 sites les plus sismiques, en excluant Fessenheim, qui a vu un événement.

La loi de Poisson dit que cette probabilité est :

$$P_0 = \exp(-t/T_r)$$

En prenant  $t = 120$  ans et  $T_r = 6$  ans puis 20 ans, on a :

$$P_0 = 2.10^{-9} \quad \text{pour MEDD2002}$$

$$P_0 = 2.5 \cdot 10^{-3} \quad \text{pour GZ2006}$$

Ces chiffres illustrent la pertinence de la comparaison aux observations pour les durées dont on dispose et pour les niveaux d'accélération évoqués. Il est quasiment improbable qu'il n'y ait pas eu de déclenchement selon MEDD2002 sur l'un au moins des 6 sites REX considérés. Pour GZ2006, la situation est meilleure, tout en étant conservatrice. Si l'on considère une accélération double, les conclusions sont les mêmes. Il est rappelé que l'on ne cherche pas à déterminer la période de retour d'une accélération donnée à partir des observations, ce qui

demanderait des durées très importantes, mais la cohérence entre un modèle et des observations.

Il conviendrait de vérifier précisément les hypothèses statistiques à la base de ces évaluations et évoquées ci-dessus ; ces chiffres sont à considérer comme des ordres de grandeur.