



HAL
open science

Modélisation de dommages consécutifs aux séismes. Extension à d'autres risques naturels

Lucian Chiroiu

► **To cite this version:**

Lucian Chiroiu. Modélisation de dommages consécutifs aux séismes. Extension à d'autres risques naturels. Autre. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2004. Français. NNT: . tel-00004626

HAL Id: tel-00004626

<https://theses.hal.science/tel-00004626v1>

Submitted on 11 Feb 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS 7 – DENIS DIDEROT

Thèse pour l'obtention du Diplôme de

DOCTEUR EN GEOGRAPHIE

Présentée et soutenue publiquement par :

Lucian CHIROIU

Le 15 Janvier 2004

**MODELISATION DE DOMMAGES CONSECUTIFS AUX
SEISMES. EXTENSION A D'AUTRES RISQUES NATURELS**

VOLUME I

Thèse dirigée par

Mme le Professeur Catherine MERING

JURY

M. Guy BONNET	Président
Mme. Catherine MERING	Directrice
M. Pierre – Yves BARD	Rapporteur
M. Jean – François SEMBLAT	Rapporteur
M. Richard GUILLANDE	Examineur
M. Gérald GARRY	Examineur

« Les pertes économiques consécutives à des catastrophes naturelles, avec ou sans lien, avec le changement climatique, doublent tous les dix ans et pourraient approcher les 150 milliards de dollars par an dans la prochaine décennie si rien ne vient infléchir la tendance actuelle (...) A terme, les conséquences économiques de ces phénomènes pourraient ruiner les marchés boursiers et les places financières du monde ».

Extrait du Rapport des Institutions Financières du Programme des Nations Unies pour l'Environnement du 08/10/2002.

SOMMAIRE

VOLUME I

INTRODUCTION	1
--------------------	---

CHAPITRE 1. MODELES D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUES.

PRESENTATION ET ETAT DE L'ART	5
1.1 Introduction	5
1.2 Principaux paramètres.....	8
1.3 Limites de l'applicabilité des modèles	11
1.4 Le contexte français de gestion du risque sismique.....	12
1.5 Etat de l'art	13
1.5.1. Le modèle HAZUS TM	13
1.5.1.1 <i>Présentation générale</i>	13
1.5.1.2 <i>Inventaire des enjeux</i>	14
1.5.1.3 <i>Analyse de l'aléa</i>	15
1.5.1.4 <i>Dommmages physiques directs</i>	17
1.5.1.5 <i>Dommmages induits</i>	22
1.5.1.6 <i>Dommmages sociaux directs</i>	23
1.5.1.7 <i>Pertes économiques directes et indirectes</i>	23
1.5.1.8 <i>Commentaires et remarques</i>	23
1.5.2. Le modèle GEMITIS	24
1.5.2.1 <i>Présentation générale</i>	24
1.5.2.2 <i>Commentaires et remarques</i>	31
1.5.3 Le modèle RADIUS	32
1.5.3.1 <i>Présentation générale</i>	32
1.5.3.2 <i>Commentaire et remarques</i>	35
1.5.4 Le modèle RISK-UE	36
1.5.4.1 <i>Présentation générale</i>	36
1.5.4.2 <i>Commentaires et remarques</i>	37
1.5.5 Modèles à application locale	37
1.5.5.1 <i>Etude du cas de la ville de Quito, Equateur</i>	37
1.5.5.2 <i>Autres études locales</i>	40
1.6 Conclusions et perspectives.....	40

CHAPITRE 2. DEVELOPPEMENT DES COURBES DE CAPACITE PAR TYPE DE BATI

2.1 Introduction à la méthode « pushover ».....	44
2.2 Description de l'approche utilisée	48
2.2.1 Classification en types standard de constructions	48
2.2.2 Description des paramètres utilisés	50
2.3 Résultats	56
2.4 Analyse comparative des résultats	58
2.4.1 Analyse par rapport au HAZUS	58
2.4.2 Autre comparaison.....	62
2.5 Synthèse des résultats obtenus.....	63
2.6 Conclusions.....	64

CHAPITRE 3. ESTIMATION DE DOMMAGES CONSECUTIFS AUX SEISMES. APPLICATION DES COURBES DE CAPACITE.....	65
3.1 Introduction	65
3.2 Méthodologie utilisée.....	67
3.3 Application de la méthode du spectre de capacité à l'estimation de dommages sur la ville de Barcelone.....	70
3.3.1 Choix de l'action sismique	71
3.3.2 Calcul du point de demande	72
3.3.3 Application des courbes d'endommagement.....	73
3.3.4 Estimation de dommages.....	76
3.3.4. Analyse comparative des résultats.....	77
3.3.4.1 <i>Estimation de dommages utilisant les courbes de capacité issues de HAZUS</i>	77
3.3.4.2 <i>Estimation de dommages issue de l'utilisation de matrices d'endommagement</i>	79
3.4 Application de la méthode du spectre de capacité à l'estimation de dommages sur la ville de Nice	80
3.4.1 Choix de l'action sismique	82
3.4.2 Estimation de dommages.....	83
3.4.3 Analyse comparative des résultats.....	88
3.4.3.1 <i>Estimation des dommages par l'utilisation les courbes de capacité issues de HAZUSTM</i>	88
3.4.3.2 <i>Estimation de dommages issue de l'approche GEMITIS</i>	90
3.5 Synthèse des résultats obtenus.....	91
3.6 Conclusions.....	92
CHAPITRE 4. UTILISATION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE DANS LA GESTION DU RISQUE SISMIQUE. APPLICATION A L'ESTIMATION DE DOMMAGES.....	90
4.1 Introduction	90
4.2 Détection et cartographie rapide de dommages. Etat de l'art.....	91
4.2.1 Utilisation des images satellitaires à basse, moyenne et haute résolution.....	92
4.2.2 Utilisation des images satellitaires de très haute résolution	93
4.2.3 Utilisation de l'imagerie radar	97
4.3 Application de l'imagerie satellitaire à l'analyse de la vulnérabilité sismique urbaine	97
4.4 Utilisation de l'imagerie satellite à très haute résolution à l'estimation de dommages consécutifs au séisme de Bhuj, Inde (2001). Comparaison avec une simulation ex-ante.....	100
4.4.1 Contexte de l'étude.....	100
4.4.2 Présentation de l'architecture indienne.....	102
4.4.3 Cartographie et estimation de dommages.....	105
4.4.3.1 <i>Analyse préalable de la vulnérabilité urbaine</i>	105
4.4.3.2 <i>Détection et cartographie de dommages</i>	107
4.4.3.3 <i>Estimation de dommages</i>	110
4.4.3.4 <i>Validation de la détection et de l'estimation de dommages</i>	113
4.4.4 Simulation <i>ex-ante</i> de dommages. Comparaison des résultats.....	115
4.5 Application de l'imagerie satellite à très haute résolution à l'estimation de dommages suite au séisme de Boumerdes, Algérie (2003).	118
4.5.1 Contexte de l'étude.....	118
4.5.2 Analyse des dommages sur la ville de Zemmouri.....	119

4.5.2.1	<i>Détection et cartographie de dommages sur Zemmouri</i>	119
4.5.2.2	<i>Estimation de pertes à Zemmouri</i>	122
4.5.2.3	<i>Validation de la cartographie et de l'estimation de dommages sur Zemmouri</i>	124
4.5.3	Analyse des dommages sur la ville de Boumerdes	125
4.6	Synthèse de l'application de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique	129
4.7	Conclusions et perspectives de l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la gestion du risque sismique	132
CHAPITRE 5. ESSAI DE MISE AU POINT D'UNE ECHELLE D'INTENSITE MULTI - ALEA		
5.1	Introduction	136
5.2	Etapes de travail et méthodologie utilisée	139
5.2.1	Recensement des échelles existantes	139
5.2.2	Elaboration méthodologique des échelles	140
5.2.3	Prise en compte de l'extension spatiale des échelles	142
5.2.4	Elaboration des nouvelles échelles d'intensité	143
5.2.4.1	<i>Méthodologie commune à l'ensemble des échelles d'intensité</i>	143
5.2.4.2	<i>Méthodologie spécifique par aléa</i>	144
5.3	Développement de l'échelle d'intensité sismique en 5 niveaux	145
5.3.1	Recensement et analyse des échelles existantes	145
5.3.2	L'échelle d'intensité simplifiée en 5 niveaux	148
5.4	Application des échelles	153
5.4.1	Application de l'échelle d'intensité sismique	153
5.4.2	Application de l'échelle d'intensité d'inondations - crues lentes	157
5.4.3	Application de l'échelle d'intensité d'inondations - crues rapides et ruissellement	158
5.4.4	Application de l'échelle d'intensité des feux de forêts	159
5.4.5	Analyse des résultats de l'application des échelles d'intensité	161
5.5	L'apport des nouvelles échelles d'intensité	162
5.6	Perspectives d'extension du modèle sismique aux autres risques naturels	164
CONCLUSION		167
BIBLIOGRAPHIE		172
LISTE DES TABLEAUX		184
LISTE DES FIGURES		185

INTRODUCTION

La menace engendrée par les risques naturels reste présente partout dans le monde, accentuée par la croissance exponentielle de la vulnérabilité au niveau mondial. Entre toutes les catastrophes naturelles, les tremblements de terre ont été la cause des désastres des plus meurtriers, affectant plus de 80 pays et causant la mort de plus de 1,6 millions de personnes dans le dernier siècle (Coburn et Spence, 2002). Chaque année, environ vingt séismes importants, de magnitude supérieure à 7 secouent la terre, dans un contexte où environ la moitié des plus grandes villes du monde se situent aujourd'hui en zone à haut risque sismique (Bendimerad, 2002).

En 1976, un tremblement de terre a tué environ 200.000 personnes dans la ville de Tangshan, en Chine ; en 1995 le séisme de Kobe au Japon a causé plus de 6000 morts et environ 100 milliards de dollars de pertes économiques. Plus récemment, en août 1999, à Izmit, en Turquie, un tremblement de terre a provoqué la mort à plus de 20.000 personnes et des pertes économiques estimées à 12 milliards de dollars, ce qui représente environ 7% du produit national brut de ce pays (Bendimerad, 2002). Ces chiffres ne donnent qu'un aperçu des conséquences catastrophiques des séismes.

Afin de réduire les pertes consécutives à telles catastrophes, des chercheurs spécialisés dans différents domaines des sciences de la terre, du génie civil et des sciences sociales se sont regroupé à travers une science pluridisciplinaire, le génie parasismique. Aujourd'hui elle intègre plusieurs directions fondamentales de recherches : la géophysique, le génie civil, la géographie, l'économie et enfin la sociologie. La géophysique intervient notamment dans l'étude des phénomènes physiques qui sont à l'origine des tremblements de terre. La détermination des failles et régions actives, l'étude des contraintes tectoniques, l'enregistrement des séismes ou encore la définition du potentiel sismique représentent unes des principales applications de cette discipline au génie parasismique. A titre d'exemple, toutes les normes de constructions parasismiques sont basées sur le zonage sismique, qui détermine l'amplitude de la secousse contre laquelle les constructions doivent être protégées. Le génie civil intervient notamment dans la conception des mesures à adopter pour la protection du bâti et infrastructures, à travers la géotechnique et l'ingénierie des structures. La géographie apporte ensuite des informations importantes pour la prise en compte de la menace sismique notamment par les décideurs et les acteurs locaux. L'analyse spatiale des données à travers les systèmes d'information géographiques représente ainsi une composante fondamentale de la modélisation du risque. La gestion financière du risque représente un aspect considéré depuis peu dans le génie parasismique, suite aux dommages économiques importants consécutifs aux tremblements de terre des années 90 (Northridge, en 1994 ; Kobe, en 1995 ou Kocaeli, en 1999). Enfin, la sociologie intervient dans les aspects liés notamment à la gestion de la crise et de la post-crise.

La communauté scientifique a commencé à se pencher sur l'étude des séismes notamment aux catastrophes importantes engendrées par les secousses du début du siècle passé, telles que celle de San Francisco de 1906 ou de Tokyo en 1923. Pour la première fois, des méthodes de mitigation face à ce risque ont été développées en plusieurs pays, à travers des solutions techniques de prise en compte du mouvement sismique dans la construction traditionnelle de bâtiments ont été développées. Depuis, les règles de conception parasismiques n'ont pas cessé de s'améliorer, à travers le développement des procédés techniques ou encore des nouveaux

matériaux de construction. La création de la première association professionnelle de génie parasismique, en 1949 aux Etats – Unis¹, a contribué à l'organisation de la première conférence mondiale spécialisée dans ce domaine, en 1956. Cet événement a permis de poser les bases de la coopération scientifique internationale, appuyé quelques années plus tard, en 1963, par la formation de l'association internationale de génie parasismique. Les recherches commencent ainsi à avoir une dimension multidisciplinaire, portant sur la sismologie, la géotechnique et l'ingénierie structurale.

En 1990, le lancement de la Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles (DIPCN) sous l'égide des Nations Unies, a eu comme objectif de « faire en sorte que toutes les sociétés soient capables de résister aux catastrophes naturelles et aux catastrophes industrielles et environnementales connexes, de façon à réduire les pertes environnementales, humaines et sociales liées à ces catastrophes »². Durant cette décennie, de nombreux programmes de recherches se sont déroulés dans le monde entier, conduisant notamment à une sensibilisation sans précédent des autorités locales aux problèmes des risques naturels. Dans ce contexte, l'accent a été mis sur le développement et l'implantation des stratégies de mitigation du risque sismique dans les pays en cours de développement à travers des collaborations internationales, à l'image du programme RADIUS ou du Zonage Sismique International. Les approches deviennent de plus en plus diversifiées, proposant à travers des études d'estimation des dommages, des solutions concrètes de protection face à des scénarii potentiels de catastrophes.

Indépendamment, un travail important de recherche mené par des scientifiques nord-américains aboutit en 1997 au lancement d'un premier outil d'estimation du risque sismique³. A travers une méthodologie innovante du point de vue technique, l'approche offre des solutions à tous les niveaux d'analyse, en passant par l'estimation des dommages directs au bâti face à une sollicitation sismique simulée par l'utilisateur jusqu'à l'évaluation des pertes économiques indirectes. En même temps, une nouvelle technique de conception parasismique se développe parallèlement à ce travail. Le paramètre principal considéré traditionnellement pour la prise en compte de la sollicitation sismique, la force agissant sur le bâti, est remplacé par le déplacement du bâti, qui devient ainsi le nouveau critère de conception.

A la suite des séismes de Northridge, en 1994, et Kobe, en 1995, la communauté scientifique a porté son effort sur l'intégration d'outils économiques dans la gestion du risque, à travers le développement des évaluations des pertes financières. Un groupe de travail dédié à cet aspect a été fondé sous l'égide de la Banque Mondiale à la fin des années 90 par diverses organisations gouvernementales, institutions académiques ainsi que des centres de recherches privés et publics, ayant comme objectif principal la réduction des conséquences économiques consécutives aux catastrophes naturelles. Parallèlement, les groupes de recherche privés travaillent intensément pour trouver des nouveaux moyens économiques permettant la réduction des pertes en cas de séismes importants, aboutissant entre autres à la création d'un marché financier dédié aux échanges de polices d'assurance liées exclusivement aux catastrophes naturelles⁴.

Suite au développement général des techniques spatiales, des chercheurs se sont penchés depuis peu sur l'utilisation de la télédétection dans le génie parasismique. Les premières études consistantes ont été réalisées après le séisme de Kocaeli, de Turquie, en 1999, où l'imagerie radar et optique a été utilisée pour la détection des zones affectées. Avec le

¹ Earthquake Engineering Research Institute – EERI (www.eeri.org).

² Extrait du programme officiel de la DIPCN. www.unisdr.org

³ HAZUS – Hazard US

⁴ il s'agit de CATEX, créée aux Etats-Unis à la fin des années 90

lancement des satellites commerciaux à très haute résolution, on constate l'émergence de programmes de recherches multidisciplinaires, utilisant des techniques empruntées à l'analyse des images ainsi qu'au génie parasismique. Dans le cadre de l'EERI, la première association professionnelle spécialisée dans l'étude du risque sismique, la création d'un groupe de travail dédié à l'application des nouvelles techniques, et principalement de la télédétection, est envisagée pour la fin de l'année 2003.

En France métropolitaine, l'activité sismique demeure relativement modérée, au contraire de ce qui se passe dans les territoires d'outre mer, tels que les Antilles, soumises à un fort aléa sismique. Mais des zones à sismicité modérée telles que le sud de la France présentent des concentrations importantes d'enjeux sociaux et économiques. Dans le cas où se reproduirait un séisme tel que celui de Ligure (1887), des pertes très importantes affecteraient (au moins) tout le département des Alpes Maritimes (Arnal et Martin, 1999). L'occurrence d'un événement semblable est pourtant non négligeable, puisqu'il a une probabilité d'environ 10% sur 50 ans (Dominique et André, 1999). Les pertes économiques directes engendrées seraient de l'ordre de 1 à 3 milliards d'euros sur la commune de Nice, et de 2 à 5 milliards d'euros sur l'ensemble du département (Arnal et Martin, 1999). Ces chiffres justifient le besoin de prise en compte du risque sismique en France, souvent négligé ou sous – estimé, malgré l'existence des normes parasismiques depuis 1969⁵.

Les travaux que nous présentons ici abordent la question de la modélisation de dommages consécutifs aux séismes, sur un plan *ex-ante* ainsi qu'*ex-post*. L'approche a un caractère pluridisciplinaire, se situant entre les techniques propres au génie civil, à travers le calcul des structures, à la géographie, à travers l'analyse spatiale et à la télédétection, à travers l'utilisation de l'imagerie satellitaire.

Des estimations des niveaux d'endommagement suite à des scénarii d'événements sismiques ont été réalisées dans un premier temps sur la base du développement préalable d'un outil central de notre modélisation, qui est la courbe de capacité. Dans un deuxième temps, l'analyse des images satellitaires à très haute résolution a été appliquée à la détection de dommages consécutifs aux séismes, permettant aussi une comparaison avec une évaluation empirique des dégâts physiques au bâti.

La modélisation du risque sismique, malgré les imperfections qu'elle comprend, peut servir comme référence pour la gestion des autres risques naturels, tel que les inondations. Pour cette raison, nous proposons dans une dernière partie de cette recherche une base pour une prochaine extension du modèle sismique aux autres risques naturels, à travers le développement d'une échelle d'intensité multi aléa.

Le premier chapitre présente dans un premier temps les objectifs, le fonctionnement et les principaux paramètres des modèles d'estimation de dommages consécutifs aux séismes, ainsi que leurs limites d'applications. Le contexte français de gestion du risque sismique est analysé brièvement par la suite. Dans un deuxième temps, nous réalisons un état de l'art des modélisations existantes, à travers la présentation des principaux travaux tels que HAZUSTM, RADIUS ou encore GEMITIS. Le chapitre conclut par une analyse de l'ensemble des ces modèles et par les perspectives d'améliorations envisageables.

Le deuxième chapitre introduit premièrement une nouvelle méthode d'analyse des structures basée sur la prise en compte du déplacement. Ensuite, nous présentons la démarche utilisée pour le développement des courbes de capacité par type de bâtiments ainsi que les résultats

⁵ Les règles dites PS 69.

obtenus. Pour conclure le chapitre, nous réalisons une analyse comparative des résultats obtenus par différentes méthodes.

Dans le troisième chapitre nous utilisons les courbes de capacité développées au préalable pour l'estimation *a priori* de dommages potentiels suite à un scénario de séisme. Nous avons considéré pour cette application les villes de Barcelone et Nice. Les résultats obtenus sont comparés à d'autres travaux d'évaluation de dégâts réalisés antérieurement.

Le quatrième chapitre aborde l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans le génie parasismique. Nous réalisons dans un premier temps une présentation des principales recherches effectuées dans ce domaine. Nous utilisons dans un deuxième temps des images à très haute résolution pour la détection, la cartographie et la quantification de dommages suite aux séismes de Bhuj, en Inde, survenu en 2001 et de Boumerdes, en Algérie, survenu en 2003. Une comparaison par rapport à une évaluation *ex-ante* est réalisée pour le cas du séisme de Bhuj. En dernière partie, nous présentons les conclusions et les perspectives de l'application de la télédétection dans la gestion du risque sismique.

Dans le dernier chapitre nous réalisons une approche préliminaire en vue d'une extension du modèle sismique aux autres risques, à travers le développement d'une échelle d'intensité différents aléas naturels. Nous présentons ainsi l'ensemble de cette recherche, réalisée dans le cadre d'une étude financée par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Le contexte, les étapes générales de travail et la méthodologie utilisée constituent la première partie de ce chapitre. Le développement de la nouvelle échelle sismique, en cinq niveaux d'intensité suivant la grille multi-aléa, représente la deuxième partie. Dans une troisième partie, nous utilisons l'échelle sismique, l'échelle d'inondation et l'échelle de feux de forêts pour la classification de quelques événements récents. Enfin, nous terminons ce chapitre par la présentation des conclusions ainsi que des perspectives de développement envisageables pour la généralisation de l'approche utilisée en génie parasismique pour la gestion des risques naturels.

CHAPITRE 1. MODELES D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMQUES. PRESENTATION ET ETAT DE L'ART

La première partie de ce chapitre a comme objectif la présentation générale des modèles d'estimation de dommages sismiques : le fonctionnement, les paramètres requis, les limites d'application, les résultats d'une modélisation ainsi que les utilisateurs potentiels. La gestion du risque sismique dans le contexte français sera également présentée dans cette partie.

La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à l'état de l'art des modèles existants. Les principales méthodologies existantes ainsi que leurs applications sur divers sites sont analysées ici. Une présentation de quelques applications locales de modélisation de dommages est réalisée en fin de cette partie.

La fin du chapitre traite les perspectives et les directions envisageables pour une future amélioration des modèles.

1.1 Introduction

Un modèle d'estimation de dommages est un outil utilisé pour évaluer les pertes potentielles dues à la réalisation d'un risque (naturel ou autre). Pour ce qui est du risque naturel, il existe des modèles concernant les inondations, les tempêtes ou bien le risque sismique.

Suite à plusieurs tempêtes en Europe, à l'ouragan Andrew en 1992 et au séisme de Northridge en 1994 qui ont occasionné des pertes catastrophiques pour les assureurs et réassureurs mondiaux, cette industrie a reconnu l'utilité de tels modèles. Ces modèles ont alors connu un développement important (Clark, 2002). Ils permettent en outre une meilleure quantification des risques qu'ils couvrent et donc une meilleure connaissance de leur exposition.

Sur la base des croisements mathématiques "entre les paramètres caractérisant le phénomène naturel lui-même et les informations concernant les éléments exposés (tels que les typologies de bâtiments), les modélisations du risque fournissent ainsi des estimations *a priori* des dommages potentiels. Comme illustré par la figure 1.1, le diagramme de fonctionnement des modèles d'estimation de dommages sismiques (MEDS) présente les principaux paramètres intervenant dans ce type de démarches : la définition du risque, la définition des enjeux, le calcul des dommages physiques et le calcul des pertes économiques.

Les résultats fournis par les MEDS intéressent non seulement les assureurs et réassureurs mais tout autant les acteurs locaux tels que les responsables de la planification et du développement urbain ou régional, les gestionnaires d'un nombre important de bâtiments ou d'autres structures, les responsables de la sécurité civile, protection et secours ou encore les spécialistes parasismiques travaillant sur les normes de protection. Les modèles peuvent être ainsi utilisés pour l'analyse des éléments singuliers ou bien pour des analyses locales, régionales ou globales.

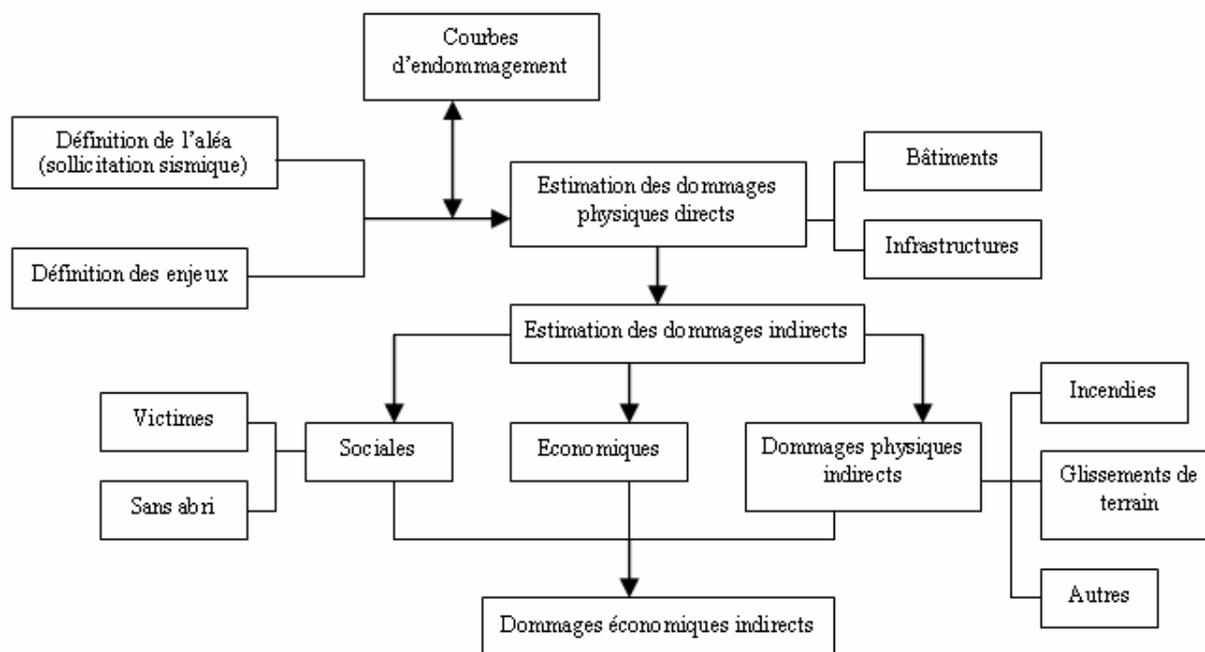


Figure 1.1 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages sismiques (source : Chiroiu et Michel – Kerjan, 2003)

Le tableau suivant, d'après Coburn et Spence (2002), résume le type d'information extraite des MEDS par type d'utilisateur.

Utilisateurs	Objectif	Information souhaitée
Urbanistes	Identification des zones à risque	Zonage du risque
Propriétaires	Identification des structures à risque	Etudes de vulnérabilité structure par structure
Ingénieurs d'études	Détermination de niveau optimum de résistance	Etudes coût - bénéfices
Protection civile	Identification des zones à risque ; Plans de gestion de crise	Estimation des dommages physiques et sociaux
(Re)Assureurs	Définition des primes ; Transfert du risque	Pertes « annualisées » ; Courbes de probabilité de pertes

Tableau 1.1 Type d'information fourni par les MEDS

En fonction de l'information souhaitée, les analyses effectuées à l'aide d'un MEDS peuvent être groupées en deux catégories principales : l'étude des conséquences des événements déjà réalisés (en cas de répétition) et l'étude des conséquences potentielles des événements probables.

Ainsi, une première catégorie des MEDS serait l'analyse des scénarios de séismes et l'étude de pertes possibles. Des événements remarquables survenus dans le passé sont introduits comme scénarii de base afin d'estimer les conséquences sur les enjeux d'aujourd'hui. Ceci représente en effet une analyse déterministe de l'aléa et des pertes.

Les méthodes déterministes d'analyse de l'aléa sont basées sur le traitement des événements passés bien déterminés ou bien des paramètres physiques conditionnant l'occurrence de l'événement (tels que la dimension de rupture des failles sismiques, reliée à la magnitude). Classiquement ce type d'analyse consiste à se poser le type de problème suivant : « que se passerait-il si le séisme de Ligure de 1887 se produisait aujourd'hui ? ». Un rôle important dans l'analyse déterministe est joué par les catalogues sismiques, qui décrivent toute la sismicité historique connue de la zone étudiée. A titre d'exemple, le zonage sismique français (G1)⁶ comptant pour les normes de constructions parasismiques est réalisé à l'heure actuelle sur la base d'une analyse déterministe.

Les résultats de ce type d'analyse peuvent être utilisées pour élaborer des plans de secours, de gestion de la crise ainsi que pour estimer les éventuelles pertes économiques des agents d'assurance. Des scénarios de séismes potentiels peuvent être analysés pour identifier les zones les plus exposées, résultats utiles pour ce qui est de la planification urbaine. Des analyses coût - bénéfiques concernant la nécessité de protection supplémentaire des bâtiments ou autres structures peuvent reposer également sur ces résultats.

Les estimations de dommages (physiques et/ou économiques) obtenues par ce type d'approche sont généralement associées à la notion de « *perte maximale probable* »⁷. Terme utilisé notamment dans la gestion financière du risque, cette notion fait l'objet de plusieurs définitions (Odeh et Zadek, 1997 ; SEASC, 1995 ; NDC, 1995 ; AON, 2003). Ici elle est considérée comme le maximum de pertes pour un type donné d'événement (associée éventuellement à une probabilité d'occurrence) (EERI, 2000 ; Stubbs, 1999). L'utilisation de différentes définitions de cette notion entraîne malheureusement des interprétations erronées des résultats issus des modèles d'estimation de dommages, car chaque outil peut avoir sa propre définition.

Un deuxième type d'analyse est le développement de scénarii probabilistes du risque. Ces scénarii sont basées sur le traitement statistique d'informations historiques, en fonction d'un ou plusieurs paramètres caractérisant l'événement (tels que la magnitude).

Il est usuel d'utiliser des lois déterminant la fréquence d'occurrence des séismes de diverses magnitudes, où le nombre d'événements est généralement exprimé suivant une distribution de Poisson :

$$\text{Log } N = a - b \times M \quad 1.1$$

Où : **M** est la magnitude et
a, b des constantes spécifiques à la zone d'étude.

Lorsque les données le permettent, il est possible d'appliquer des *modèles probabilistes à mémoire*, qui incluent le temps passé par rapport au dernier événement survenu. (Hitz et al, 2000 ; Hubert-Ferrari et al, 2000). En raison de l'accumulation des contraintes, la probabilité d'occurrence d'un futur séisme augmente avec l'intervalle de temps écoulé depuis le dernier événement. Récemment, ces modèles ont été améliorés en intégrant les interactions entre failles et tensions⁸ (Parson et al, 2000). Les résultats d'une étude comparative entre ces trois types d'études probabilistes sont présentés à titre indicatif dans l'annexe 1.1.

Les résultats de ce type d'approche sont des courbes de probabilité de « dépassement » d'un certain niveau de pertes, définissant ainsi différents niveaux de dommages associés à plusieurs

⁶ L'explication détaillée du terme « zonage sismique » est donnée dans le glossaire à la référence G1. Nous utiliserons le même système de notation (G2, G3, ...) pour le reste des termes détaillés dans le glossaire.

⁷ En anglais en original: *probable maximum loss*, ou PML.

⁸ En anglais en original : *stress - interaction* et *fault interaction*.

périodes de retour ⁹. A titre d'exemple, on peut exprimer les résultats de cette forme d'approche de la façon suivante : « il y a une probabilité de 20% de pertes économiques supérieures à 20 millions € sur une période de 50 ans » (c. f. figure 1.2).

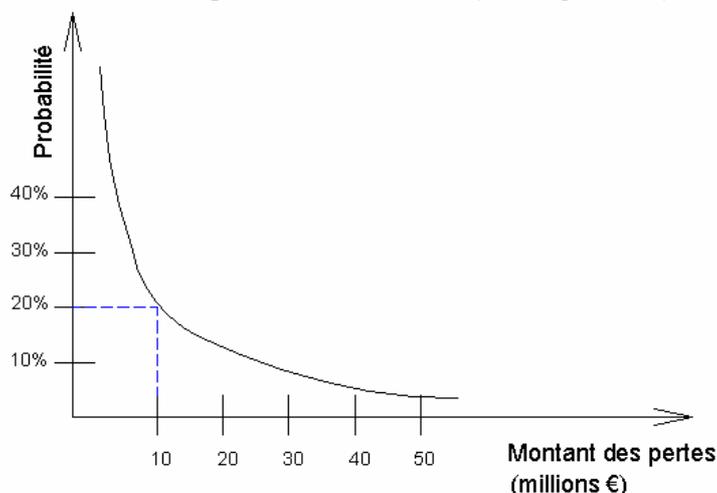


Figure 1.2 Exemple d'une courbe de probabilité de dépassement d'un niveau de pertes

Il est usuel d'exprimer cette courbe en fonction d'une période de retour de 1 an, en « annualisant » ainsi les pertes. Ce type de résultats sert principalement aux analyses de type coûts-bénéfices, dans le domaine de la protection parasismique ainsi que dans le domaine de la (ré)assurance.

1.2 Principaux paramètres

Trois types fondamentaux de paramètres interviennent dans la structure d'un MEDS : les informations relatives au mouvement du sol ; les informations relatives aux enjeux ; et enfin les informations relatives aux algorithmes d'estimation de dommages.

a) les informations relatives au mouvement du sol

Cette catégorie d'informations comprend toutes les données liées à la simulation d'un séisme, incluant un large éventail de paramètres : le type du sol, la topographie, le catalogue des failles existantes, le catalogue des séismes, des données accélérométriques (G2, G3), des spectres de réponse (G4), le zonage réglementaire, des relations d'atténuation (G5), les distances épacentrales probables ou encore les effets de site possibles (G6) sont tous requis pour une modélisation fiable de l'action sismique. Ces informations sont utilisées dans le calcul de l'aléa probable du site étudié.

En fonction du niveau de détail, les résultats seront plus ou moins fins. A défaut d'une grande quantité d'informations, des bases de données mondiales (publiques) peuvent être utilisées pour la définition d'une action sismique probable (c. f. annexe 1.15), notamment pour l'application d'un MEDS à un niveau régional. Généralement, des études locales de l'aléa sismiques ont été faites dans la plupart des zones urbaines exposées au risque sismique.

⁹ En anglais en original: *loss exceedance probability curve*

Pour ce qui est de l'utilisation des MEDS déjà développés, l'utilisateur a généralement le choix entre l'utilisation de scénarii prédéfinis (tels que des séismes historiques) et la création de nouveaux scénarii adaptés aux cas étudiés.

b) les informations relatives aux enjeux

Cette catégorie est représentée par une série d'informations relatives à tous types d'enjeux : bâtiments, infrastructures de transport et d'énergie, structures vitales et informations démographiques. Diverses classes de structures pour chaque type d'enjeux doivent être définies en fonction de leur comportement parasismique afin de quantifier les effets d'un séisme par groupes homogènes d'éléments exposés.

Plusieurs classifications standard de bâtiments d'habitations sont en effet disponibles aujourd'hui (NIBS 1997, Grunthal, 1998). En absence d'inventaires précis des types de bâtiments situés sur la zone d'étude, la date de construction des structures pourrait être un élément important permettant la définition d'une typologie approximative du bâti. Une autre méthodologie de détermination des classes de vulnérabilité peut être basée sur l'imagerie aérienne ou satellite. La haute résolution ainsi que l'analyse stéréoscopique peuvent apporter de nouvelles perspectives dans le futur proche (c. f. § 4).

Pour ce qui est des infrastructures de transport et d'énergie ainsi que des structures vitales, des classifications sont plus difficiles à réaliser, la seule existante (de nature publique) étant celle proposée par le modèle HAZUSTM (NIBS 1997).

Un paramètre très important est la répartition spatiale des classes sur le site analysé par le modèle. Généralement, cette information est disponible par zones homogènes de bâti, un inventaire structure par structure étant difficilement réalisable sur de grandes agglomérations urbaines. Une autre manière d'exprimer cette information est d'associer des proportions de surface au sol occupée par tel ou tel type de bâti¹⁰.

Des informations relatives aux éléments exposés sont également disponibles sur la base de données CRESTA (Catastrophe Risk Evaluating and Standardizing Target Accumulations), réalisée par les sociétés de (ré)assurances, dans le but de partager des informations concernant l'exposition au risque naturel. Mais ces informations restent néanmoins à titre informatif, indiquant les valeurs exposées à une échelle régionale.

Pour une estimation fine de dommages, des inventaires complets et exhaustifs doivent être pris en compte lors de la modélisation. L'utilisation des bases de données urbaines telles que celles fournies par l'IGN en France peut représenter une perspective non négligeable. Ainsi, la Base de Données Cartographiques¹¹ offre sur le territoire métropolitain français une cartographie numérique au niveau du bâtiment près, avec des attributs associés tels que la hauteur, la surface au sol, le nombre d'étages ou encore le nombre d'habitants de chaque bâtiment. Une autre possibilité de développement d'inventaire est l'utilisation des modèles numériques d'élévation, commercialisés pour la plupart des grandes agglomérations urbaines au niveau international, mais qui restent aujourd'hui chers pour une utilisation dans le domaine de la recherche.

c) les informations relatives aux algorithmes d'estimation de dommages

La troisième catégorie d'informations est liée aux modèles mathématiques d'estimation de dommages. Les relations entre la sollicitation sismique et les dommages physiques associés

¹⁰ tel que: le quartier « vieille ville » présente X% de bâtiments de type A, Y% de bâtiments de type B et Z% de bâtiments de type C.

¹¹ plus de renseignements sur cette base de données se trouvent sur www.ign.fr

ont été développées depuis peu de temps. Ces relations, dénommées courbes de fragilité ou d'endommagement, ont été élaborées essentiellement sur la base d'extrapolations des données liées aux dommages observés après divers séismes, sur dires d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire (ATC 13, 1985 ; Coburn et Spence, 2002 ; NIBS, 1997).

En ce qui concerne le premier type, le document ATC 13 (1985) propose une première approche des courbes d'endommagement, en fournissant des niveaux d'endommagement pour différents types de constructions, en fonction de l'échelle MMI. Cette méthode est restée pendant longtemps comme la référence standard d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Après les séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994), les courbes de fragilité ont été re-calibrées, et une seconde approche a été développée. Celle-ci, apparue en 1997, est réalisée sous la forme d'un logiciel public d'estimation du risque sismique, HAZUSTM (NIBS, 1997) (c. f. chapitre 1.2.1). Le paramètre d'entrée n'est plus l'intensité macrosismique, mais des caractéristiques directement liées au mouvement du sol, représentées par le spectre de réponse ou bien par le PGA (G7). Ces données sont par conséquent associées à un niveau d'endommagement, défini et décrit pour chaque type d'enjeux analysé (c. f. fig. 1.3).

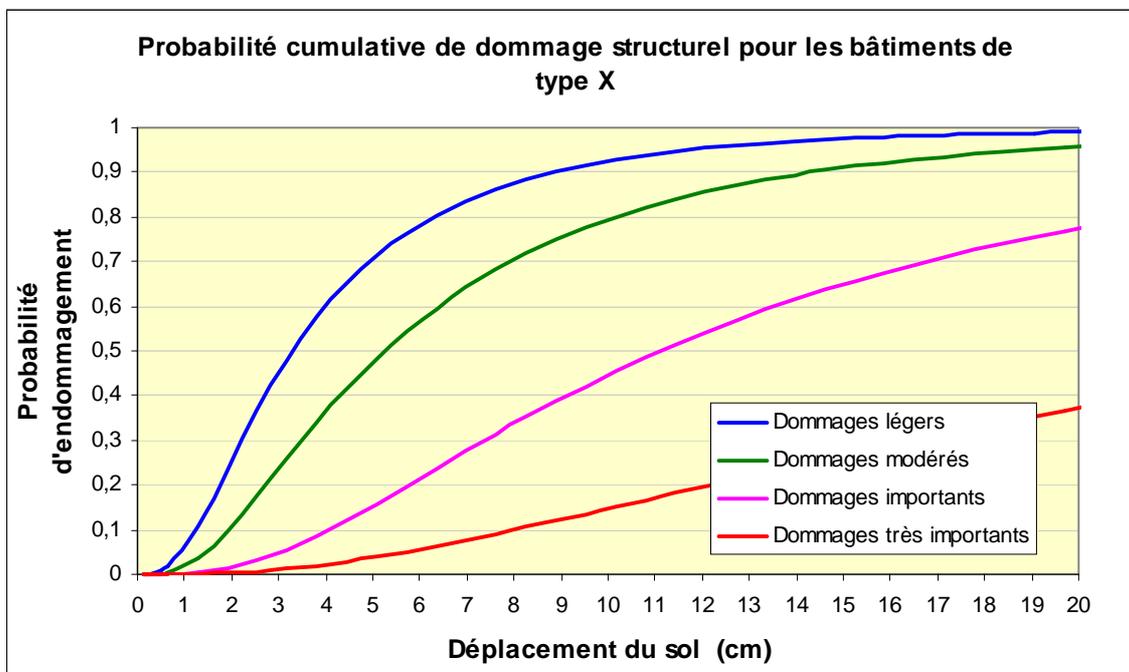


Figure 1.3 Exemple de courbe standard d'endommagement associant le déplacement du sol à une probabilité d'endommagement, par niveau de dommage

L'échelle macrosismique européenne, publiée en 1998, propose également d'autres courbes de fragilité, en reliant un niveau d'endommagement à une intensité macrosismique (paramètre toutefois implicite, car l'intensité est elle-même une mesure de l'endommagement, et non de l'action sismique). Un exemple de ces courbes est présenté ci-dessous (c. f. fig. 1.4).

Les courbes d'endommagement représentent une donnée d'entrée fondamentale dans un MEDS. En effet, elles permettent le calcul des estimations de dommages, et elles ne peuvent pas être contournées ou remplacées par d'autres types d'informations. La fiabilité d'un modèle dépend en grande mesure de la précision de ces données. Malgré leur importance, il existe relativement peu de méthodes proposant une définition des courbes d'endommagement

au niveau international. Ceci est dû aux difficultés liées à leur obtention ainsi qu'à leur validation.

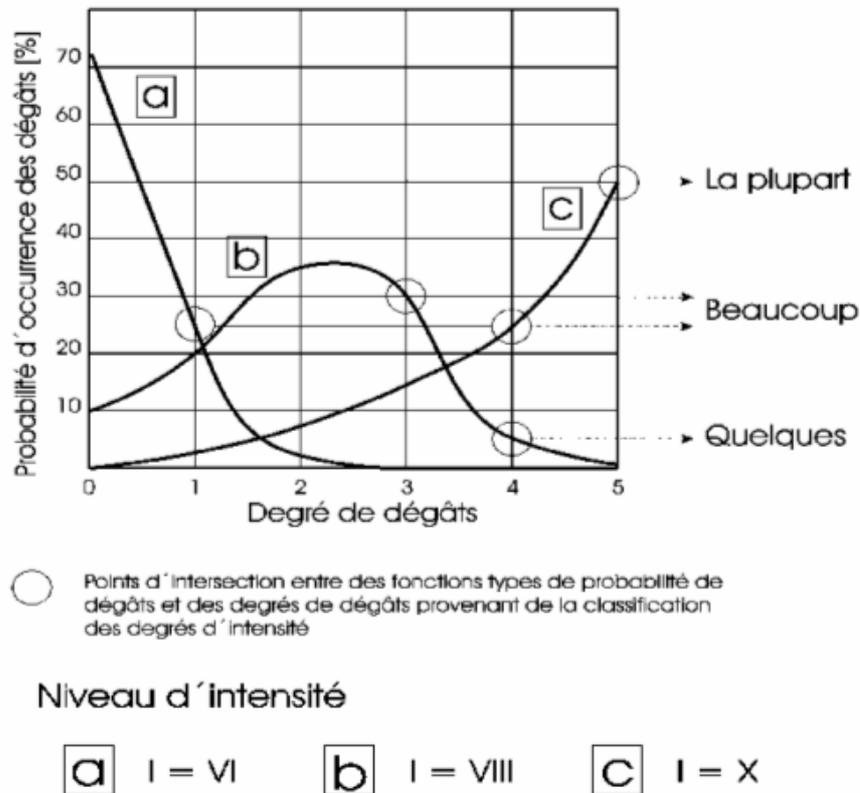


Figure 1.4 Courbe de fragilité issues de l'EMS 98 (Source : Grunthal et al, 1998)

1.3 Limites de l'applicabilité des modèles

Chaque étape du processus d'estimation des dommages présente toutefois des incertitudes relatives à la définition de l'aléa, à la définition des enjeux, à la définition de relations d'endommagement ainsi qu'aux calcul des pertes économiques. Concernant la définition de la sollicitation sismique, des incertitudes sont liées aux valeurs estimées de paramètres du sol, aux périodes de retour ainsi qu'aux effets de site. La définition des enjeux comporte également des incertitudes liées à l'absence de fiabilité de données existantes (lorsqu'elles existent), les inventaires précis des structures étant assez rares. Les courbes d'endommagement, basées essentiellement sur des observations faites suite aux divers séismes, présentent à leur tour des incertitudes liées à leur validité (mathématique et spatiale) ainsi qu'à leurs paramètres. Pour les diminuer, certaines courbes incluent un écart type qui tient en compte les variations possibles des paramètres. Les incertitudes du calcul de dommages économiques sont, quant à elles, liées à la diversité des activités humaines affectées par un séisme, ce qui rend difficile les essais de quantification de ces pertes. Le niveau global d'incertitude reste toutefois mathématiquement calculable, et généralement les résultats des MEDS présentent des estimations a priori des pertes dont l'ordre de grandeur est proche de la réalité. (Grossi, 2000).

Dans ce contexte, il serait souhaitable que les validations des modèles puissent être réalisées plus systématiquement, afin de réduire les incertitudes mentionnées ci-dessus, et par conséquent d'améliorer leur précision. Les missions en retour d'expérience organisées par les associations publiques de professionnels (telle que l'AFPS¹²) pourraient ainsi jouer un rôle très important dans le développement et la validation des méthodologies existantes.

Les MEDS permettent donc une meilleure connaissance des conséquences potentielles associées à différents scénarii d'événements. Ceux-ci permettent en effet d'améliorer les capacités de protection, notamment pour les acteurs de la sécurité civile. Pourtant, les modélisations du risque restent aujourd'hui relativement onéreuses pour un usage généralisé. La réalisation d'inventaires fiables, les microzonages ou encore les missions en retour d'expérience nécessaires pour l'amélioration des courbes d'endommagement engendrent des coûts assez importants, en termes de temps de travail ainsi qu'en termes économiques. De plus, le choix d'un modèle particulier joue considérablement dans l'obtention des résultats, et ces différences ne doivent pas être sous-estimées.

1.4 Le contexte français de gestion du risque sismique

L'activité sismique demeure relativement modérée en France Métropolitaine. Des zones à sismicité moyenne telles que le sud de la France présentent des concentrations importantes d'enjeux sociaux et économiques. Dans le cas de la manifestation d'un séisme similaire à celui de Ligure (1887), des pertes très importantes affecteraient (au moins) tout le département des Alpes Maritimes (Arnal et Martin, 1999). L'occurrence d'un événement semblable est pourtant non négligeable, de l'ordre de 10% de probabilité sur environ 50 ans (Dominique et André, 1999). Les pertes économiques directes engendrées seraient de l'ordre de 1 à 3 milliards d'euros sur la commune de Nice, et de 2 à 5 milliards d'euros sur l'ensemble du département (Arnal et Martin, 1999). D'après les mêmes sources, les conséquences financières induites correspondraient à un endettement de l'ordre de 150 millions d'euros pour la ville de Nice, à une perte de 10% à 100% du chiffre d'affaires pour les entreprises, et enfin à un endettement des particuliers pouvant atteindre 10 000 d'euros par foyer, après indemnisation.

Du point de vue de la prévention, il existe les PPR¹³ spécialisés en risque sismique.

Aujourd'hui il existe en France Métropolitaine environ 320 communes disposant d'un PPR, soit moins de 10% du nombre total de communes (et environ 25 dans les DOM – TOM). Pour les communes qui ne disposent pas d'un Plan de Prévention, le risque sismique est totalement ignoré, ce qui amplifiera considérablement les conséquences d'une éventuelle secousse. Certes, le risque sismique n'est présent que dans certaines régions, mais la forte concentration d'enjeux, notamment dans le sud de la France, accroît la vulnérabilité. Face à un séisme potentiel, qui peut arriver dans deux jours comme dans 200 ans, il serait préférable d'anticiper les mesures de protection nécessaires afin d'éviter des pertes importantes. Pour l'instant, mise à part quelques rares initiatives, la prise de conscience du risque est très réduite ; pourtant celle-ci apparaîtra certainement après un événement majeur, tel que cela a été le cas après le séisme de Boumerdes, en Algérie, en mai 2003, par exemple.

¹² Association Française de Génie Parasismique

¹³ Plan de Prévention des Risques

De surcroît, le système français d'assurance (connu sous le nom du régime CAT – NAT), qui est un système particulier, n'incite pas pour l'instant à une meilleure prévention au risque, sismique ou autre (Michel – Kerjan, 2001). La particularité de ce système tient au partenariat entre les sociétés privées d'assurance et l'Etat, qui joue un rôle de garant total face à tout événement naturel extrême. Ce système a pour conséquence que les assurés seraient remboursés intégralement, après à un tel événement, indépendamment de leur exposition au risque. Cette solution est rendue possible grâce au système de solidarité nationale, où chaque assuré a l'obligation de payer le même pourcentage¹⁴ de sa police d'assurance contre les risques naturels. L'aspect positif du système est évidemment cette garantie totale, prise en charge par l'Etat. Ceci constitue sans doute un des avantages du système. Mais son inconvénient majeur est que pour l'instant il n'y a pas de séparation des primes en fonction du risque réel. Un assuré à distance de tout risque naturel important est ainsi obligé de payer le même montant (voire plus) qu'un assuré situé dans une zone à fort risque sismique, ou bien dans le lit majeur d'une rivière, à fort risque d'inondation. L'absence de connaissance du risque facilite ainsi la solidarité nationale. « Le bonheur est-il dans l'ignorance ? », question posée par E. Michel-Kerjan dans un récent ouvrage concernant entre autres le système français CAT-NAT (Godard et al, 2002), résume la situation actuelle. Cette caractéristique du système français d'assurance n'incite pas vraiment à une réelle politique de prévention et protection, et ceci explique en partie le manque d'intérêt pour les MEDS en France.

1.5 Etat de l'art

Les principaux modèles sont aujourd'hui fournis par le marché international de la modélisation des risques catastrophiques, qui s'articule autour des trois leaders qui sont RMS, AIR et EQECAT. Aujourd'hui, leurs MEDS couvrent non seulement le risque sismique, mais tout autre type de risque naturel, proposant des modèles spécifiques par pays. En raison du caractère privé de ces données, les paramètres utilisés restent généralement confidentiels, non communiqués au public. Outre les modèles cités ci-dessus, les grandes compagnies privées de réassurances (telles que MunichRe ou SwissRe) ont également développé leurs propres modèles de quantification du risque, mais les paramètres sont toujours non divulgués, de même que le reste des modèles privés. Mais il existe également des MEDS publics, tels que HAZUSTM et RADIUS ainsi que divers modèles développés et appliqués à un niveau local, sur un site donné. Ces modèles seront présentés sommairement dans la suite du chapitre.

1.5.1. Le modèle HAZUSTM

1.5.1.1 Présentation générale

HAZUSTM est une méthode complexe d'estimation de dommages sismique, présentée sous la forme d'un logiciel¹⁵, développé par l'Institut National pour les Sciences de la Construction (des Etats Unis d'Amérique)¹⁶ pour l'Agence américaine de gestion de crise¹⁷. Réalisée dans

¹⁴ Au départ, en 1982, fixée à 4%, cette prime n'a cessé de monter, arrivant aujourd'hui à 12% de l'assurance habitation

¹⁵ Il est distribué gratuitement à tout public

¹⁶ NIBS : National Institute of Building Sciences

sa première version en 1997, l'approche a été revue en 1999. Une équipe pluridisciplinaire, composée d'ingénieurs, géologues, géographes, architectes, économistes et gestionnaires de crise a été réunie pour développer cette méthode. Initialement dédiée uniquement au risque sismique, elle fait aujourd'hui l'objet de développements concernant d'autres risques naturels, notamment d'inondations et de tempêtes.

Le programme est organisé en plusieurs modules interdépendants, permettant l'insertion de nouvelles données complémentaires ou de nouveaux modules de calcul. Ainsi, des améliorations peuvent être apportées notamment dans le cadre d'une application particulière, en fonction de données disponibles. Le caractère modulaire du modèle apporte à l'utilisateur la possibilité de limiter l'analyse à son niveau d'intérêt.

L'exploitation du modèle peut être divisée en six parties principales : l'inventaire des enjeux, l'analyse de l'aléa, l'estimation de dommages physiques directs, l'estimation de dommages physiques indirects, pertes économiques directes et indirectes. L'ensemble des modules, des informations ainsi que des résultats est présenté sous une forme cartographique et intégré dans un SIG. L'utilisation du modèle, ayant un caractère universel, n'est pas dépendante du SIG utilisé, mais la possibilité d'analyse spatiale représente toutefois un atout non négligeable.

Trois types d'analyse peuvent être réalisées avec HAZUSTM, en fonction du niveau de complexité de l'étude. Ainsi, un premier niveau d'analyse, basé sur les données contenues par défaut, fournit des résultats bruts. Un deuxième niveau d'analyse est basé sur des données fournies par l'utilisateur, car des informations complémentaires (notamment liés aux inventaires d'enjeux) sont requises pour un calcul fin. Enfin, un troisième niveau d'analyse avancée est défini à partir de données complémentaires relatives aux inventaires, aux paramètres techniques des constructions ainsi qu'aux coûts économiques. La distinction entre les trois niveaux d'analyse repose sur la nature des informations dont dispose l'utilisateur.

1.5.1.2 Inventaire des enjeux

Quatre types principaux d'enjeux sont considérés dans cette approche: le bâti courant, les constructions spéciales, les infrastructures de transport et enfin les réseaux d'eau, d'énergie et de communication. Chaque type d'enjeux est à son tour différencié en sous-types suivant plusieurs classes d'enjeux. Ainsi, pour le bâti courant sont définies 38 typologies différentes de constructions, sur la base notamment de leur système structural et de leur hauteur (c. f. annexe 1.2). A titre d'exemple, la distribution spatiale d'un type de bâti (S3) pour l'état de Santa Barbara est présentée ci-dessous (c. f. fig. 1.5).

Les constructions spéciales (les hôpitaux, les établissements d'enseignement, les stations de police et de pompiers) sont quant à elles différenciées en 8 classes, en fonction de leur affectation. On distingue également les infrastructures liées aux transports, c'est à dire les autoroutes, les chemins de fer, les transports publics, les ports et enfin les aéroports. Chaque infrastructure liée aux transports est également différenciée en plusieurs catégories et sous catégories, en fonction de leur destination ainsi que du type de structure. A titre d'exemple, pour les chemins de fer il existe 7 classes comportant un total de 56 sous-classes ; pour les aéroports, 7 classes et 87 sous classes (c. f. annexe 1.3). Enfin, les réseaux d'approvisionnement en eau, d'assainissement, de transport de pétrole et gaz naturel, électriques ainsi que de télécommunication sont regroupés dans la dernière catégorie. Evidemment, il existe également des sous classes pour les réseaux: 20 pour les réseaux en eau ou encore 12 pour réseaux électriques.

¹⁷ FEMA : Federal Emergency Management Agency

Toutes ces informations sont localisées dans l'espace géographique et intégrées dans le SIG de travail.

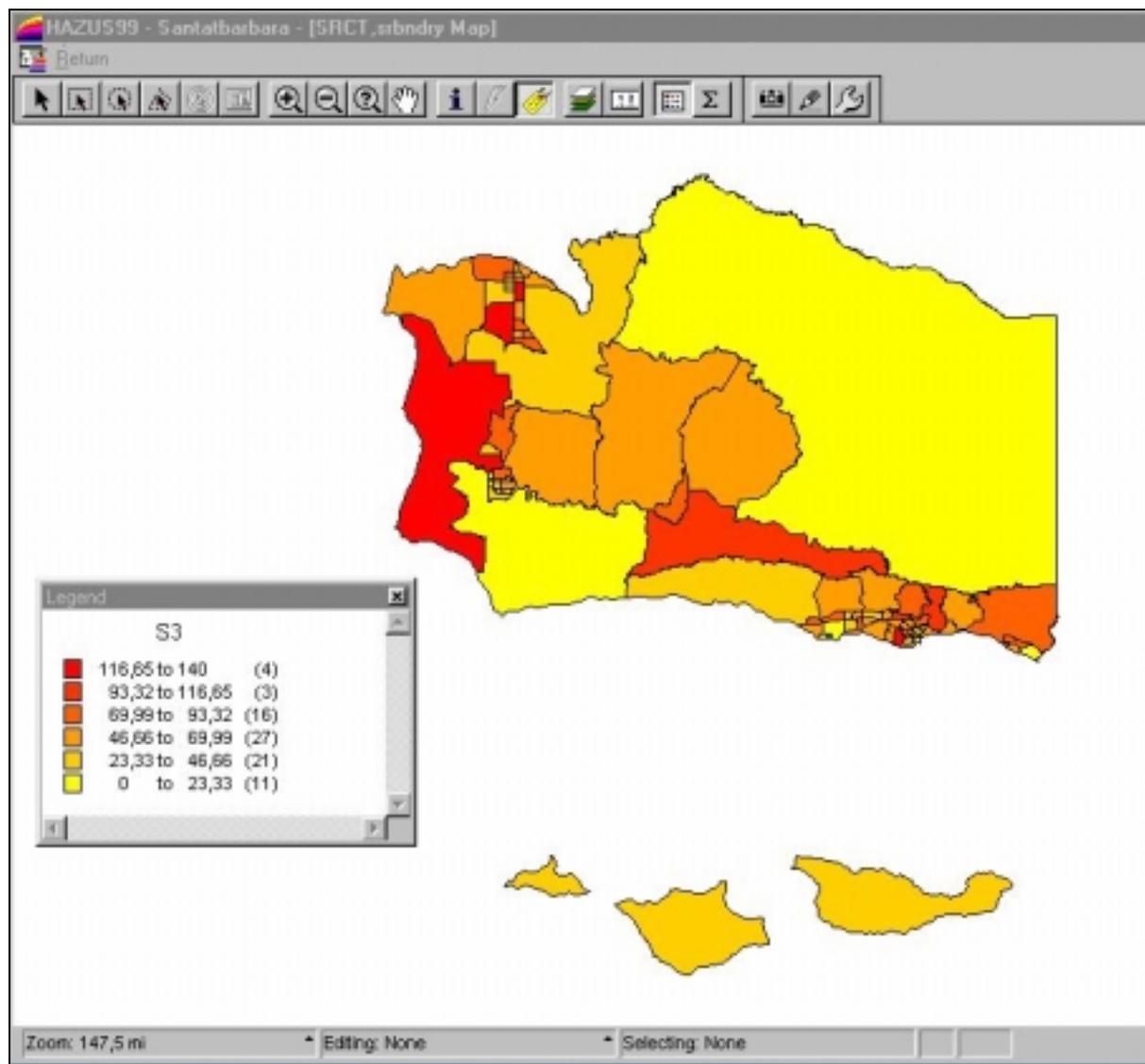


Figure 1.5 Répartition géographique de bâtiments de type S3 dans l'état de Santa Barbara aux Etats-Unis

1.5.1.3 Analyse de l'aléa

L'étude de l'aléa comprend, outre la détermination du mouvement du sol, une analyse du potentiel de liquéfaction, de glissement de terrain et de rupture de faille en surface.

Le mouvement du sol, représenté d'une manière cartographique, est caractérisé ici par la réponse spectrale, le PGA et le PGV¹⁸ (G7 & G8). Il est défini à travers une approche déterministe ainsi que probabiliste, l'utilisateur ayant le choix de la méthode. Ce module dispose également d'une option supplémentaire permettant l'utilisation de scénarii de séisme réalisés indépendamment de HAZUSTM (c. f. fig. 1.6). L'analyse est complétée par l'utilisation des relations d'atténuation ainsi que des possibles amplifications du signal dus au type du sol.

¹⁸ ces termes sont définis dans le glossaire, au niveau G7 et G8.

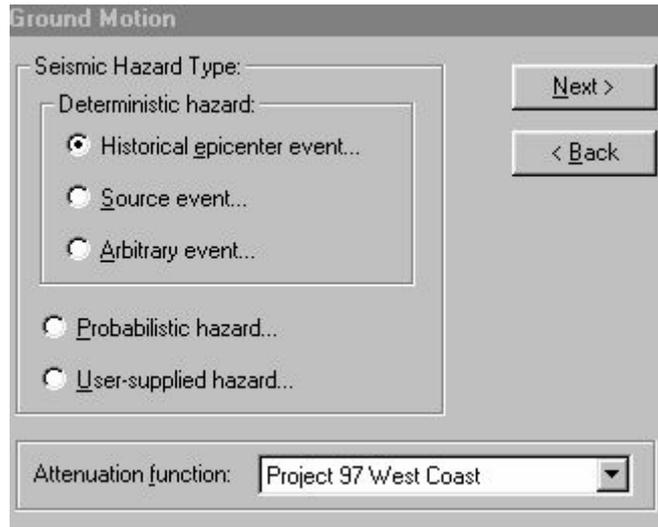


Figure 1.6 Choix du type d'analyse de l'aléa

L'approche déterministe est définie par trois possibilités de calcul. La première est basée sur le choix d'une source sismique à partir d'un inventaire exhaustif de toutes les failles sismiques existantes. Pour chaque faille, on doit disposer des informations telles que son type, la magnitude maximale enregistrée ou estimée, la période de retour pour cette valeur, le déplacement annuel, la largeur de la faille ou encore les coordonnées de ses limites (c.f. annexe 1.4). A titre d'exemple, un nombre de 180 failles sont répertoriées pour la région de la Californie (Etats Unis d'Amérique). La deuxième solution est le choix d'un séisme déjà réalisé. Cette option repose sur un catalogue des séismes d'une magnitude supérieure à 5 survenus entre l'année 300 avant JC et 1990.

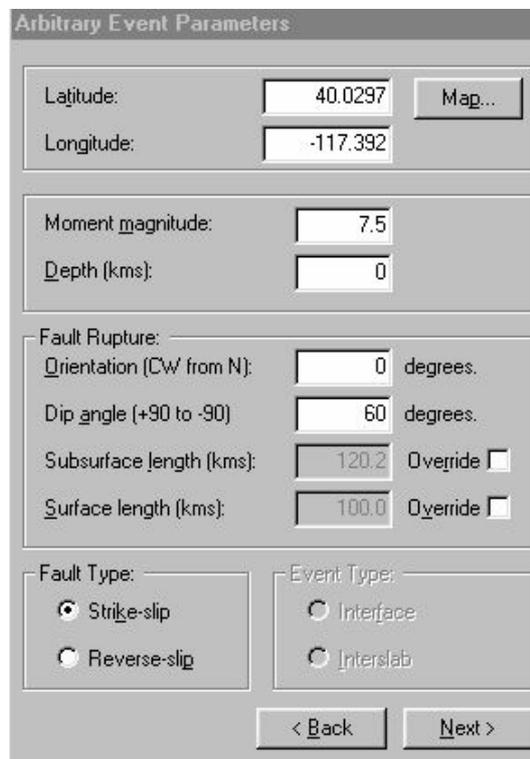


Figure 1.7 Choix d'un événement déterministe aléatoire

Enfin, une troisième possibilité consiste dans la définition d'un événement sismique arbitraire. L'utilisateur spécifie ainsi la position de l'épicentre, sa profondeur, le type et l'orientation de la faille ainsi que la magnitude souhaitée pour l'analyse (c. f. fig. 1.7)

L'approche probabiliste est définie à partir des cartes de zonage sismique développées par l'Institut Géologique des Etats Unis d'Amérique¹⁹. Plusieurs zonages sont ainsi disponibles, correspondant à une période de retour de 100, 250, 500, 750, 1000, 1500 et 2000 ans.

L'utilisateur dispose également, dans le cadre de l'approche probabiliste, de la possibilité d'introduction dans le calcul d'un spectre défini au choix.

Le mouvement du sol ainsi défini (de manière probabiliste ou déterministe) est atténué ensuite par rapport à la distance à l'épicentre, à travers des relations d'atténuation caractéristiques de différentes régions et différents types de sols. A titre d'exemple, pour l'ouest des Etats Unis la méthodologie utilise les relations de Boore, Joyner et Fumal (1993, 1994a, 1994B) ; Sadigh, Chang, Abrahamson, Chiou et Power (1993) ; Campbell et Bozorgnia (1994) ; Youngs, Chiou, Silva et Humphrey (1997).

Une amplification du signal sismique en fonction des conditions locales du site est considérée par la suite, suivant différentes classes du sol associées à des facteurs d'amplification. La distinction des classes ainsi que des valeurs de ces facteurs sont basées sur des rapports géologiques élaborés par la FEMA (1995). Six classes de sols sont ainsi définies (c. f. annexe 1.5), avec des facteurs d'amplification allant de 0,8 à 3,5.

La probabilité de liquéfaction est également analysée, en fonction notamment du type du sol, de la magnitude du séisme, du PGA et de la profondeur de la nappe phréatique. Des calculs concernant la probabilité de mouvement de la faille en surface (latéral ou vertical) et de glissement de terrain sont aussi disponibles.

1.5.1.4 Dommages physiques directs

Les dommages physiques directs concernent toutes les catégories d'enjeux définies dans les inventaires. Nous allons présenter notamment le calcul de dommages au bâti courant. En ce qui concerne les autres enjeux, la méthodologie est la même, seules les valeurs de paramètres pouvant changer.

L'objectif est donc d'estimer le niveau d'endommagement face à une sollicitation sismique donnée, pour un type standard de bâtiment. L'approche utilisée ici, basée sur la méthode du spectre de capacité (c. f. annexe 2.1), repose sur deux courbes (ou fonctions) : les courbes de capacité (c. f. § 2) et les courbes d'endommagement. La première catégorie de courbes indique le comportement d'une construction face à n'importe quelle sollicitation de type sismique. Celles-ci décrivent ainsi le niveau de dommages probables dus à l'action sismique imposée. La deuxième catégorie de courbes, celles d'endommagement, indique ensuite la probabilité d'atteindre un niveau donné de dommages.

Cinq niveaux de dommages ont été distingués dans cette méthodologie : D0, pour l'absence de dommages ; D1, pour les dommages légers ; D2, pour les dommages modérés ; D3, pour les dommages importants ; et enfin D4, pour les dommages très importants. Ces niveaux sont présentés en détail pour chaque type de structure considéré lors de l'inventaire. En complément à l'endommagement structurel, des classes d'endommagement non structurel sont également prises en compte, pour différents éléments non structurels, tels que les cloisons ou les équipements électriques (c. f. annexe 1.6).

¹⁹ USGS – United States Geological Survey

a) *Les courbes de capacité*

b)

Comme nous allons le voir en détails dans le chapitre 2, les courbes de capacité expriment une relation entre la force imposée au bâti par le séisme et le déplacement du bâti sous l'effet de cette force (c. f. fig. 1.8). Cette relation est spécifique à chaque type de construction, en raison notamment des caractéristiques structurales et géométriques différentes. Le déplacement d'un bâtiment peut ainsi être exprimé en fonction d'une sollicitation de type sismique et de sa résistance :

$$D = f(S, R)$$

1.2

Où :

S = la sollicitation imposée au bâti ;

R = la résistance du bâti.

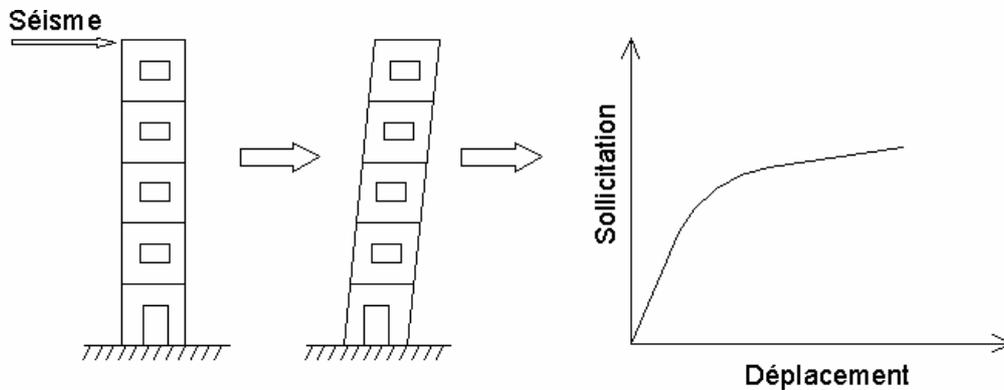


Figure 1.8 La représentation physique des courbes de capacité

Les valeurs définissant ces courbes ont été obtenues sur la base des calculs précis réalisés pour un grand nombre de structures, ramenés ensuite à travers des calculs empiriques à des valeurs moyennes par type standard de bâti. Nous présentons ces valeurs pour l'ensemble des types de bâtiments analysés dans HAZUSTM (c. f. annexe 1.7).

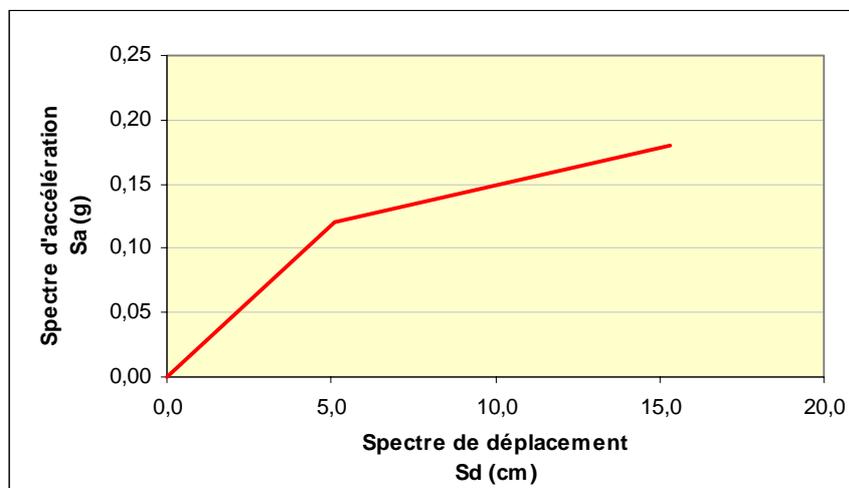


Figure 1.9 Exemple de courbe de capacité utilisée dans HAZUSTM

A titre d'exemple, on présente dans la figure 1.9 la courbe de capacité pour le type de constructions C1L (c. f. annexe 1.2) correspondant à des bâtiments en cadres en béton armé de plus de 8 étages.

La sollicitation sismique peut être basée soit sur un enregistrement réel d'un séisme²⁰ (c. f. G2 et G3), soit sur un spectre générique de réponse (c. f. G4). L'accélération du sol est ensuite représenté en fonction du déplacement (c. f. fig. 1.10), à travers la transformation standard :

$$S_d = S_a \times (1/\omega)^2 \quad 1.3$$

Où :

S_a = le spectre d'accélération ;
 ω = la pulsation²¹.

La plupart des zonages sismiques présentent la sollicitation de base face à laquelle on doit se protéger sous une forme spectrale.

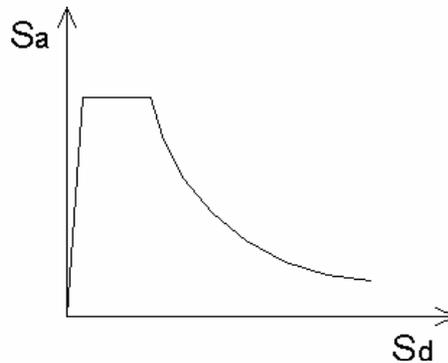


Figure 1.10 Exemple de sollicitation sismique

En fonction de la sollicitation sismique donnée, nous obtenons le déplacement susceptible de se produire dans le bâtiment, représenté par la translation au niveau du toit de la construction. Ce déplacement, considéré comme le facteur majeur conditionnant l'endommagement structurel, est donné par l'abscisse du point de croisement entre la courbe définissant les séisme et la courbe de capacité, appelé « *point de demande* » (c. f. fig. 1.11).

Les coordonnées du point de demande sont obtenues de cette manière pour le site analysé, en fonction de l'action sismique correspondante, pour le type d'enjeu considéré. Ceci représente le premier pas de la méthodologie d'estimation de dommages.

²⁰ une accélérogramme

²¹ ou l'inverse de la période T, soit $2\pi/T$.

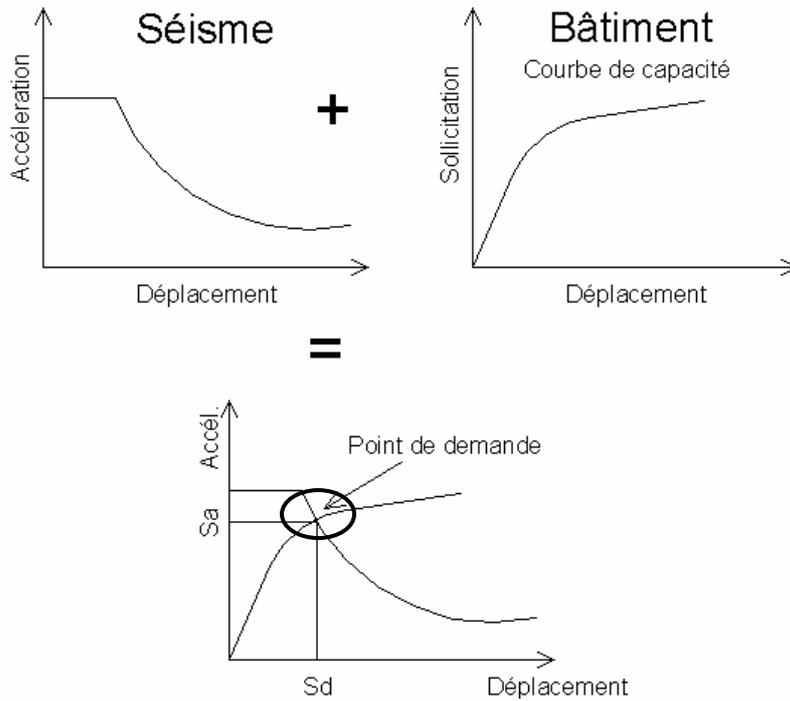


Figure 1.11 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel

b) Les courbes d'endommagement

Les courbes d'endommagement sont des fonctions calculant la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage, pour une valeur donnée du déplacement correspondant au point de demande (c. f. fig. 1.12).

Ces courbes, définies pour les dommages structurels ainsi que non structurels, ont été mises au point à partir d'extrapolations des données liées aux dommages observés, sur dires d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire (ATC, 1985). Elles ont été notamment calibrées avec de données consécutives aux séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994).

En plus de l'état d'endommagement structurel, HAZUSTM considère également les dommages des éléments non structurels, qui sont provoqués par deux facteurs : le déplacement et l'accélération (c. f. annexe 1.8).

L'endommagement est modélisé par une distribution normale cumulée du logarithme du déplacement (ou de l'accélération) spectrale. Pour le niveau de dommage ds provoqué par un déplacement spectral S_d donné, la probabilité d'endommagement s'exprime à travers la formule suivante :

$$P[ds/S_d] = \Phi(\beta_{ds}, S_{d,ds}) \quad 1.3$$

où

$S_{d,ds}$ est le logarithme de la valeur moyenne de déplacement pour le niveau d'endommagement ds

β_{ds} est le logarithme de l'écart type du déplacement pour le niveau d'endommagement ds .

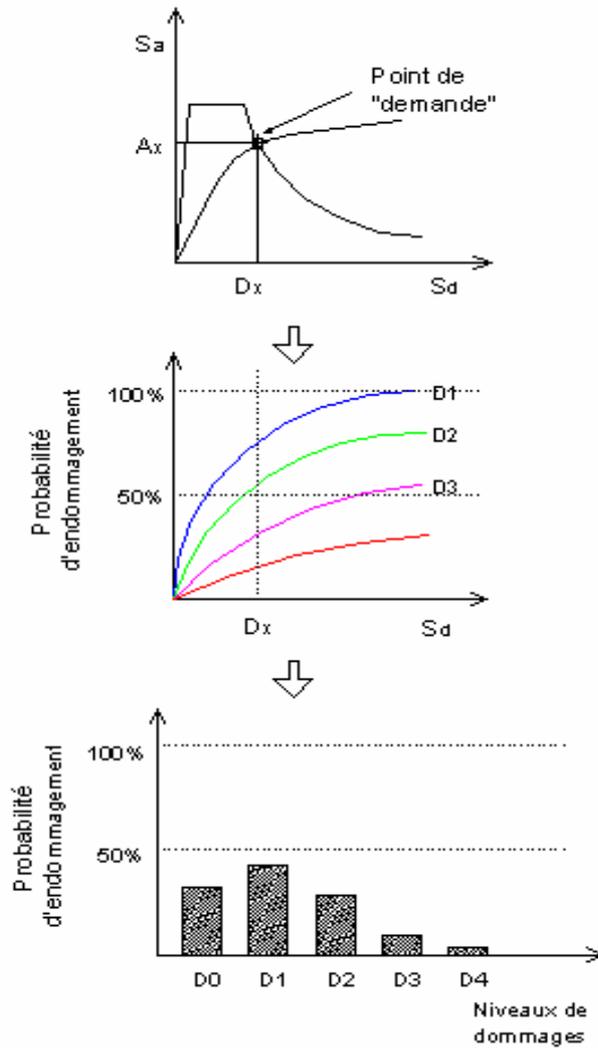


Figure 1.12 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel

Les valeurs moyennes du déplacement spectral sont obtenues à partir de l'observation des plages de déplacements associées à chaque niveau de dommage. L'écart type prend notamment en compte les incertitudes liées aux valeurs moyennes du déplacement ainsi qu'à la sollicitation sismique. Ces paramètres ont été développés principalement sur la base de diverses études synthétisant les informations sur les relations déplacements – dommages (Kustu et al, 1982 ; Whitman et al, 1977 ; Wong, 1975) ainsi que des observations en retour d'expérience suite au séismes tels que Loma Prieta (1985) ou Northridge (1994). L'annexe 1.9 présente ces deux valeurs pour l'ensemble des classes de bâtiments.

A titre d'exemple, nous présentons la courbe de fragilité pour la catégorie de bâti S1L (c. f. fig. 1.13).

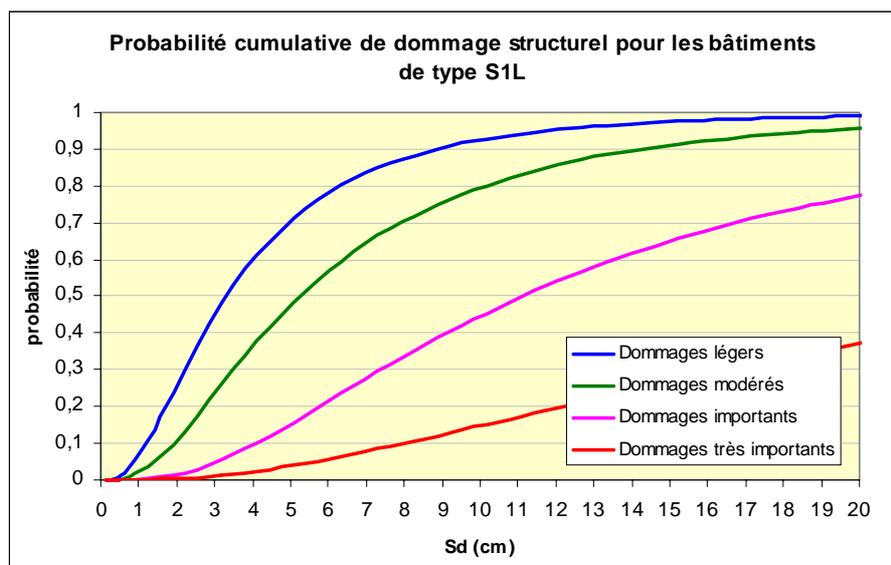


Figure 1.13 Courbes de fragilité typiques

Les résultats obtenus directement suite à l'utilisation de ces courbes d'endommagement sont exprimés d'une manière statistique : les bâtiments de type S1L auront, par exemple, « 30% de probabilité de se trouver dans un état de dommages modérés ». Cette forme de résultat est interprétée habituellement sous la forme suivante : « 30% du total des bâtiments de type S1L sont susceptibles de présenter des dommages modérés ». Sur la base de ce type de statistiques ainsi que d'inventaires de bâti, on peut produire une quantification des dommages subis après le séisme. Ces résultats sont présentés d'une manière cartographique, ce qui permet à l'utilisateur d'analyser leur répartition géographique.

Le même type de calcul est réalisé pour l'ensemble des enjeux définis dans les inventaires, à travers des courbes spécifiques, de capacité comme de fragilité. De la même façon, des estimations de dommages sont fournis pour les infrastructures de transport, d'énergie, pour les constructions vitales, etc.

1.5.1.5 Dommages induits

Des évaluations de dommages indirects sont également réalisées, notamment concernant les inondations par rupture de barrage, les incendies et les matériaux dangereux. Le premier type de dommage, les inondations par rupture de barrage, est estimé sur la base d'un inventaire de tous les barrages existants, avec leurs principales caractéristiques. Concernant les incendies, une relation entre le nombre de départ des feux et le PGA a été calculée sur la base des statistiques de trente séismes nord américains survenus entre 1906 et 1989. Ensuite, une simulation de l'extension de l'incendie et une évaluation du nombre de bâtiments touchés est réalisée suivant le modèle de Hamada (1975).

Enfin, un inventaire des dépôts de matériaux dangereux ainsi qu'une classification détaillée des produits servent à une estimation de la vulnérabilité par rapport à ce type de dommages induits.

1.5.1.6 Dommages sociaux directs

Une évaluation du nombre de victimes est réalisée par la suite, sur la base d'une relation avec les niveaux d'endommagement du bâti. Ce modèle a été réalisé suite à des statistiques concernant des séismes survenus aux Etats-Unis et dans le monde entier, ainsi qu' à partir des évaluations des professionnels spécialisés dans le domaine. Le résultat de ce module consiste en une estimation du nombre de victimes en fonction d'une échelle de dommages corporels, comportant 4 classes (c. f. annexe 1.10). Cette échelle a été développée sur la base de plusieurs études existantes (Durkin and Thiel, 1991; Coburn, 1992; Cheu, 1994). Trois options de scénarii sont disponibles, en fonction de l'heure présumée de la secousse : un séisme survenant à 2h, à 14h et à 17h. Les coefficients de distribution de la population diffèrent ainsi pour chaque scénario. Des ratios de victimisation sont ensuite donnés pour chaque niveau de dommages corporels, pour chaque niveau d'endommagement structurel et pour chaque type de bâti (c. f. annexe 1.11). Une particularité apparaît concernant les dommages très importants, où deux sous-niveaux sont distingués : dommages sans effondrement et dommages avec effondrement total; les ratios de victimisations sont ainsi différents pour ces deux sous-niveaux. Cette méthodologie est basée sur une compilation de modèles existants (Coburn and Spence, 1992; Murkami, 1992 ; Shiono, et. al., 1991 ; Stojanovski and Dong, 1994), et son schéma organisationnel se retrouve en annexe 1.11. Outre les victimes provoquées par l'endommagement du bâti, celles dues à l'endommagement des ponts sont également considérées.

1.5.1.7 Pertes économiques directes et indirectes

Le calcul de pertes directes concerne l'estimation de coûts de remplacement et de réparation, de valeurs de biens perdus, de l'interruption de l'activité économique, des délais nécessaires pour la reconstruction du bâti, des loyers perdus et de la délocalisation des activités. Ces estimations sont réalisées pour l'ensemble des enjeux (bâti, infrastructures, etc) à travers certains coefficients économiques d'endommagement (c. f. annexe 1.12), fournis sur la base de rapports et indices économiques officiels (ATC 13, 1985 ; Howe et Cochrane, 1983 ; Jackson, 1994 ; Phipps, 1992).

Les pertes économiques indirectes concernent notamment les effets en chaîne sur l'industrie et l'économie, tels que les relations fournisseurs - clients, les répercussions des pertes locales à un niveau régional, le flux inter industriel. Sont également considérés les coûts des emprunts et des reconstructions. La méthodologie d'estimation est basée sur des notions et théories exclusivement économiques.

1.5.1.8 Commentaires et remarques

HAZUSTM représente une première approche d'estimation de dommages sismiques de cette envergure, et reste pour l'instant la seule. Elle pose les bases d'une nouvelle méthodologie sur un plan technique, en introduisant la méthode du spectre de capacité. Celle-ci est devenue entre temps une référence au niveau mondial, et elle est de plus en plus utilisée pour les estimations de dommages dus aux catastrophes naturelles. Le caractère novateur de l'approche réside essentiellement dans l'utilisation des paramètres directement liés au mouvement du sol pour l'évaluation de dommages, à l'opposé des méthodes traditionnelles basées sur l'utilisation de l'EMS 98, telle que celle utilisée pour le programme GEMITIS

(Arnal et Martin, 1999). Ainsi, à travers les courbes de capacité, les dommages sont corrélés à l'accélération du sol ; généralement, ceux-ci étaient corrélés à un scénario défini par l'intensité de la secousse, et donc indirectement à des dommages.

Le caractère exceptionnel de cette méthode tient à l'exhaustivité des données fournies en entrée: inventaires de types d'enjeux, paramètres de l'aléa sismique, facteurs collatéraux à l'action proprement sismique, étude de dommages à toutes les catégories d'enjeux, prise en compte des effets induits (incendies, etc.), analyse des coûts économiques directs et indirects sur une gamme très vaste et hétérogène de paramètres. De surcroît, la distribution spatiale de tous les types de données n'est pas négligée, étant incorporée dans un SIG afin de permettre une analyse géographique de résultats. Ce dernier aspect est très important, car les inventaires incorporant l'aspect spatial sont très difficiles à réaliser.

Sur le plan technique, HAZUSTM introduit les courbes de capacité et de fragilité spécifiques à une trentaine de classes standard de bâti . Si les premières peuvent être obtenues suite à l'utilisation de logiciels de calcul, les deuxièmes reposent notamment sur des observations et statistiques réalisées suite à plusieurs séismes importants, et représentent un progrès majeur dans l'estimation de dommages. Ces courbes ont un caractère autonome, et peuvent être appliquées indépendamment du site étudié. Il faut noter également que cette démarche est généralisable à d'autres enjeux que le bâti, tels qu'infrastructures de transport ou d'énergie.

Un deuxième élément technique caractérisant le modèle est la classification de dommages sur une échelle à 5 niveaux, appliquée à toute la gamme des enjeux. Ces niveaux ne se réduisent pas à des descriptions générales, ils sont spécifiques à chaque type d'enjeux et sont décrit d'une manière claire et précise. Par ailleurs, en raison de son caractère universel, cette échelle a été prise comme grille de base pour les nouvelles échelles d'intensité applicables à l'ensemble des phénomènes naturels, développées dans le cadre d'un projet financé par le Ministère Français de l'Ecologie et de l'Environnement Durable (GSC, 2003 ; Bahoken et al, 2003).

Le modèle HAZUSTM connaît également des limites, liées notamment à l'impossibilité de validation à partir d'un séisme réel. Les courbes de fragilité, qui incorporent des données liées aux incertitudes des estimations, ne peuvent par conséquent pas être vérifiées ou re-calibrées, sur la base des informations acquises lors des séismes antérieurs.

L'aspect le plus important reste toutefois le caractère novateur de l'approche, caractérisé par la présentation et l'utilisation de la méthode du spectre de capacité, proposée ici pour la première fois à des fins d'estimation de dommages. C'est en raison de son exhaustivité que le modèle HAZUSTM représente aujourd'hui la référence internationale dans le domaine de la modélisation du risque sismique.

1.5.2. Le modèle GEMITIS

1.5.2.1 Présentation générale

L'étude, réalisée dans le cadre d'une opération engagée par le comité français de la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (1990 - 2000), a pour objet l'évaluation de dommages causés par un séisme. Plusieurs applications ont été effectuées, notamment sur les villes de Nice, Pointe à Pitre et Fort de France.

La ville de Nice a été choisie pour la réalisation d'une opération pilote, à caractère méthodologique, destinée à soutenir la politique de prévention face au risque sismique. Pour cette raison, nous allons présenter ici l'application du modèle à cette ville.

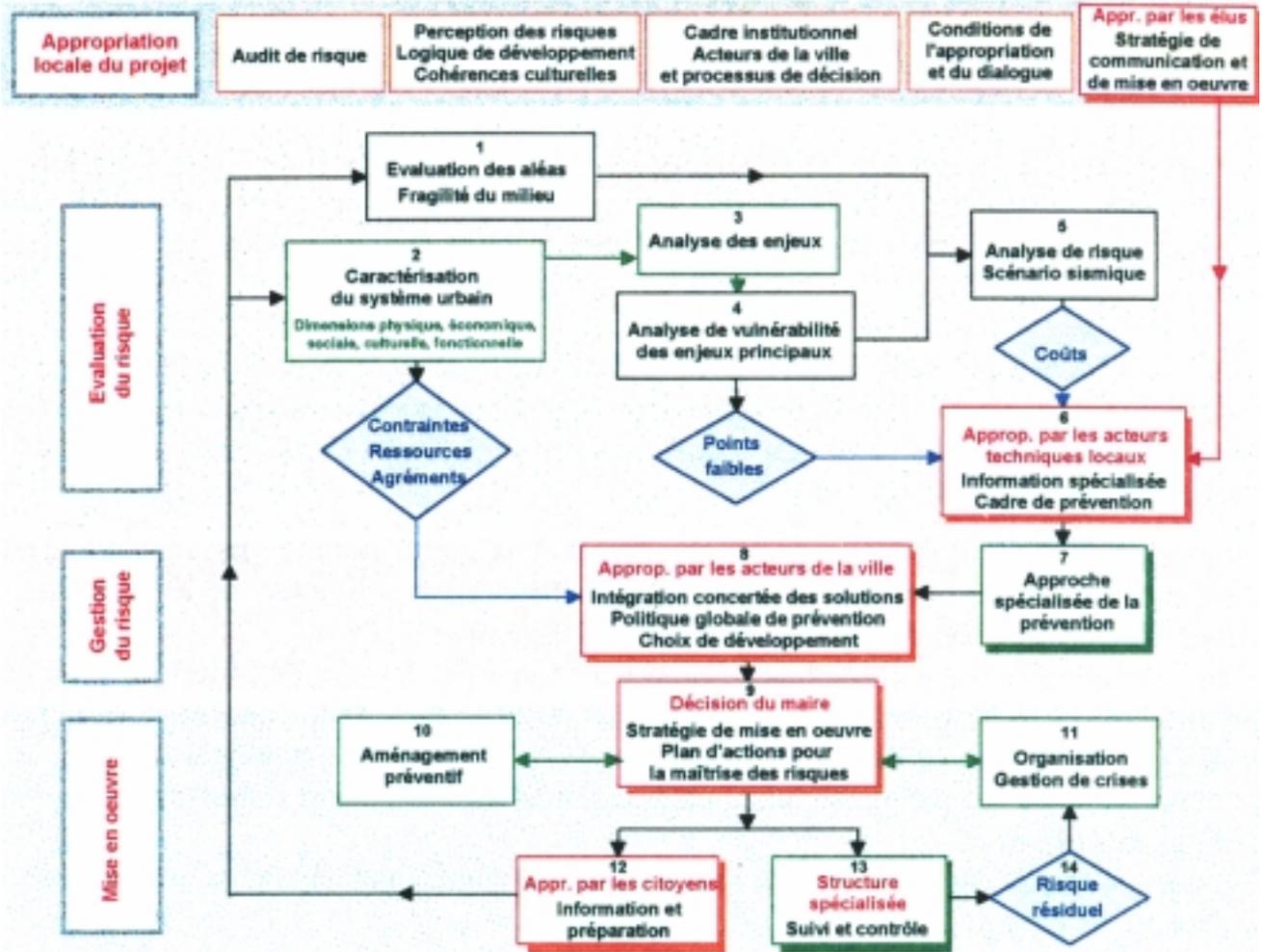


Figure 1.14. Organigramme du projet GEMITIS Nice (source : Arnal et Martin, 1999)

Cette opération porte notamment sur les aspects suivants : la description du milieu physique et l'identification du potentiel sismique ; l'analyse des enjeux humains, socio-économiques et fonctionnels ; l'élaboration de scénarios de crise et évaluation du coût d'une éventuelle catastrophe ; des propositions de mesures de protection contre le risque ainsi que de préparation à la gestion de crise ; la proposition d'actions pour l'information préventive de la population ; définition d'un plan d'action préventive à long terme. L'organigramme général de l'étude est présenté ci-dessus (c. f. fig. 1.14).

L'étude comporte donc plusieurs modules fondamentaux. Nous allons nous concentrer ici sur le module cinq, relatif à l'analyse du risque et du scénario sismique.

La méthodologie globale d'évaluation de dommages directs utilisée ici est présentée par le schéma de la figure 1.15.

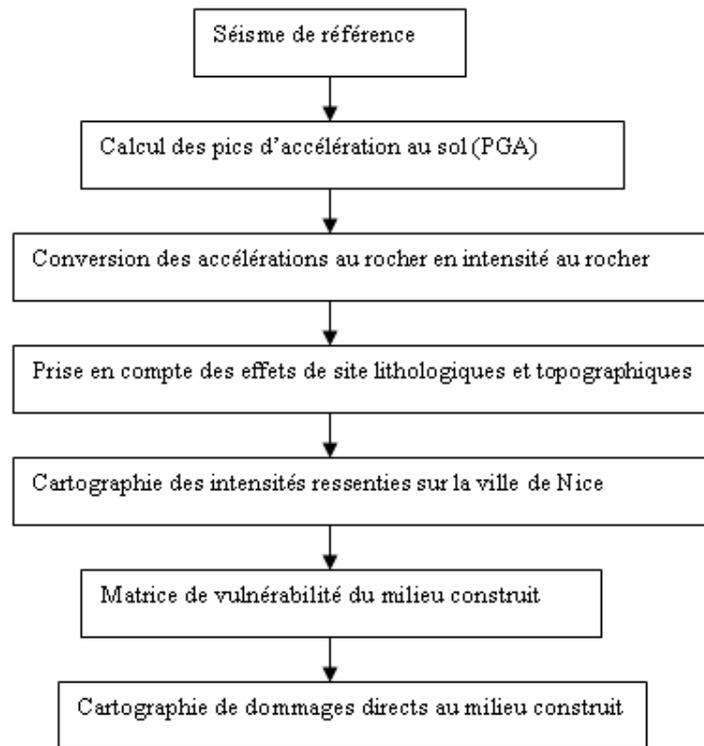


Figure 1.15 Méthodologie d'estimation de dommages directs (source : Arnal et Martin, 1999).

Le séisme de Ligure (1887) ramené à 30 km de Nice a été choisi comme séisme de référence, suite à une approche déterministe. Avec une magnitude estimée à 6.3, ce tremblement de terre a eu une intensité épicentrale de IX, et de VII à VIII à Nice. A partir de cet événement, deux scénarii ont été réalisés : un séisme qui se produirait à 3 heures, et un autre à 11 heures. Cette distinction a pour objectif de prendre en compte le flux de population, et sert essentiellement pour l'estimation du nombre de victimes et des impacts indirects.

Suite à la définition du scénario de référence, l'accélération maximale du sol a été calculée pour cet événement. Sa détermination s'est effectuée en calculant la moyenne entre les valeurs issues de quatre lois d'atténuation, sur des carrés de 100m par 100m (Sabetta & Pugliese, 1987 ; Tiento et al, 1992 ; Ambraseys et al, 1996 ; AFPS, 1998). Un PGA de 0,16g a ainsi été retenu sur le secteur de la gare de Nice.

Les valeurs d'intensité sismique selon l'échelle de Mercalli ont été déduites de l'accélération selon la loi de régression suivante :

$$I = 3.3 \text{ Log } a + 7 + \varepsilon \quad 1.4$$

Où : a est l'accélération au rocher, en m/s^2 ;
 et ε un facteur qui varie de 0 à 1, introduit pour prendre en compte les effets de site.

Ainsi, des intensités allant de VII à IX sont obtenues et cartographiées sur l'ensemble de la ville

En résumé, le modèle définit dans une première étape le scénario sismique de référence, caractérisé par sa magnitude. A cette magnitude il a été associée, dans une deuxième étape, une accélération maximale du sol, qui conduit ensuite au calcul d'une intensité sismique (c. f. fig. 1.16).

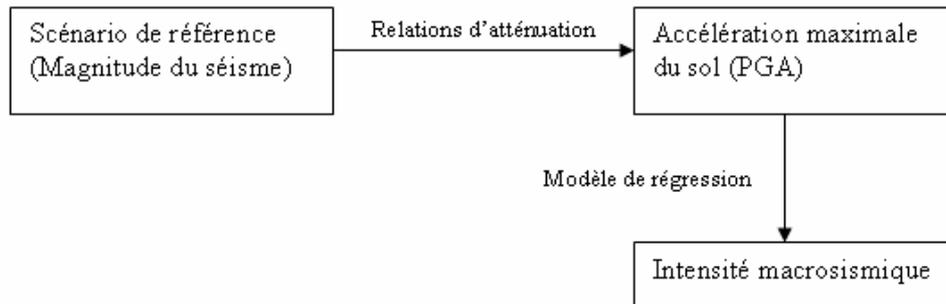


Figure 1.16 Détermination de la sollicitation sismique de référence

L'évaluation de dommages directs au milieu construit est réalisée par la suite. Les bâtiments sont tout d'abord différenciés selon leur classe d'importance (c. f. annexe 1_13), conformément aux normes parasismiques françaises PS 92 (AFNOR 1993). Pour les bâtiments de classe D (notamment la mairie et les casernes) les dommages ont été estimés à travers « la méthode de M. ZACEK » (Thiery et al, 1998). Pour ceux de la classe B (le bâti courant), l'évaluation est basée sur l'EMS 98. Enfin, pour les réseaux et infrastructures, les fonctions de vulnérabilité issues de HAZUS ont été adaptées aux données existantes sur Nice.

Pour les constructions de type D, l'estimation se faisant d'une manière individuelle, élément par élément, nous allons présenter ici le calcul de dommages aux bâtiments courants. Ces constructions ont été, à leur tour, différenciées en neuf classes distinctes, spécifiques à l'habitat niçois, en fonction notamment de leur âge et de leur destination. Chaque classe est mise en relation avec une courbe de vulnérabilité issue de l'échelle EMS 98 (c. f. fig. 1.17).

La répartition spatiale de ces types est réalisée d'une manière statistique, en pourcentages, par zone homogène de bâti. Ainsi, 27 secteurs homogènes de bâti ont été distingués (c. f. fig. 1.18). A titre d'exemple, la zone « Bord de Mer » présente 45,5% de bâtiments de type T3 et 54,5% de bâtiments de type T4 ; la zone « Nice Nord » présente 17,5% de bâtiments de type T1, 53,3% de bâtiments de type T3, 25,2% de bâtiments de type T4, 0,6% de bâtiments de type PN, 3% de bâtiments de type PA, 0,1% de bâtiments de type E1, 0,1% de bâtiments de type E3 et 0,2% de bâtiments de type E4.

Type de Bâti	Description succincte	Courbe de vulnérabilité
T1	Bâtiments collectifs anciens réalisés en maçonnerie, qui correspondent au type niçois construit entre 1880 et 1940.	B
T2	Bâtiments collectifs très anciens en maçonnerie qui ont été bâtis avant 1880.	A
T3	Bâtiment collectif en béton armé réalisé après la guerre jusqu'en 1969	C
T4	Bâtiments collectifs réalisés depuis 1969.	C+
PN	Logements individuels anciens réalisés en maçonnerie.	C
PA	Logements individuels récents associant la maçonnerie et le béton armé.	B
E1	Entrepôts, ateliers et locaux industriels en maçonnerie et toiture avec charpente bois, béton ou métal.	B-
E3	Entrepôts, ateliers locaux industriels en béton armé avec un système porteur constitué de poteaux – poutres ou portique béton.	C-
E4	Entrepôts, ateliers locaux industriels récents, avec une structure en général en acier et une peau en bardages métalliques.	C+

Figure 1.17 Types de bâtiments utilisés pour l'estimation de dommages, associés avec la courbe de fragilité correspondante (source : Arnal et Martin, 1999).

En fonction de l'intensité présumée du séisme, des courbes d'endommagement issues de l'EMS 98, associées à chaque type de bâti, estiment un pourcentage d'endommagement probable. Les pourcentages d'endommagement ainsi obtenus sont ensuite transformés en cinq niveaux de dommages. Ces classes sont les suivantes: dommages négligeables (associés à un pourcentage d'endommagement de 0 à 5%), dommages légers (endommagement de 5% à 20%), dommages modérés (endommagement de 20% à 50%), dommages graves (endommagement de 50% à 90%) et enfin effondrements partiels ou totaux (endommagement supérieur à 90%). La distribution spatiale de dommages, pour chaque type de construction, est ensuite représenté cartographiquement (c. f. fig. 1.19).

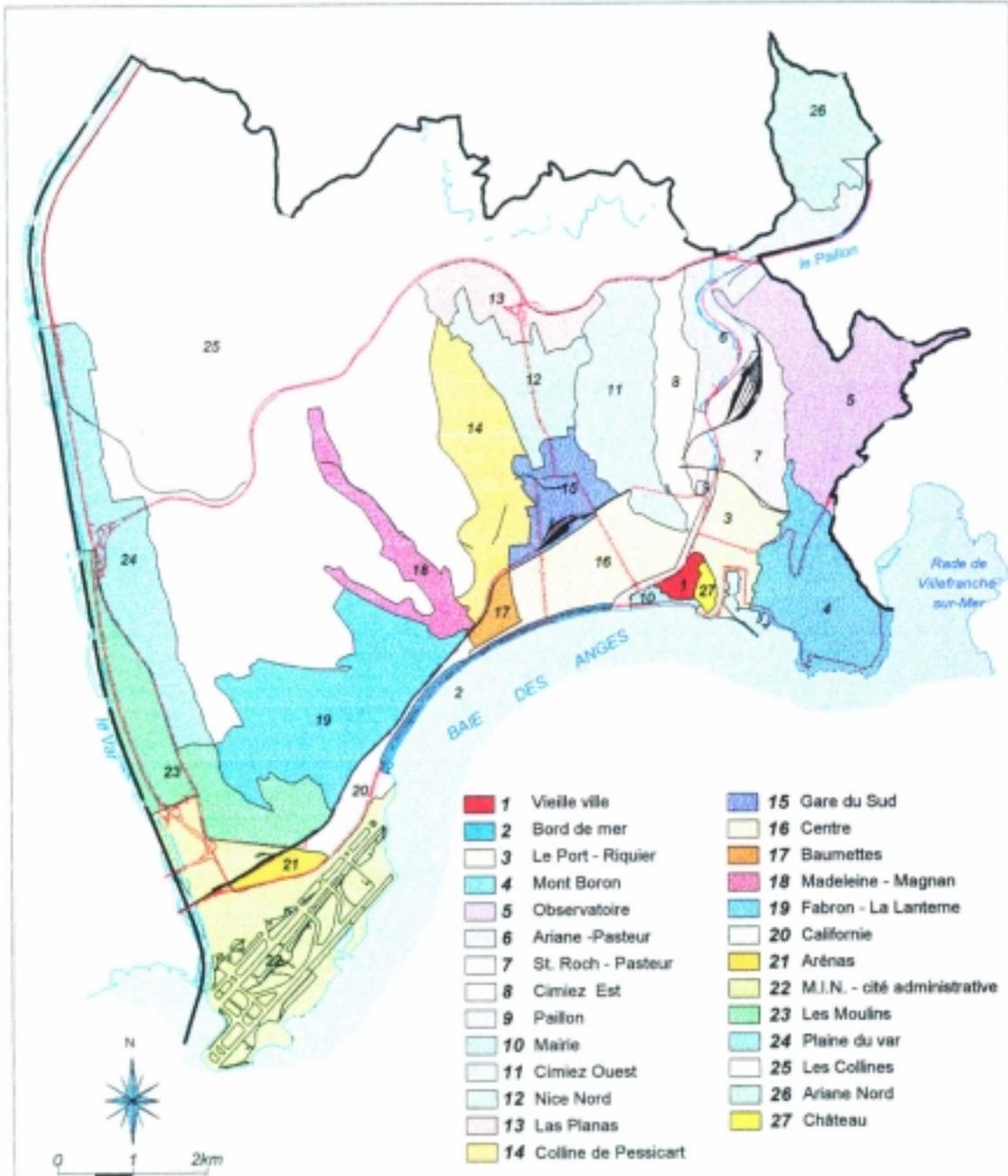


Figure 1.18 Secteurs homogènes de bâti sur ville de Nice (source : Arnal et Martin, 1999).

L'analyse détaillée des réseaux d'infrastructure est réalisée par la suite. Une évaluation de dommages est effectuée pour les réseaux d'eau potable et d'assainissement, les réseaux EDF et GDF ainsi que les télécommunications, les voiries et les voies ferrées. Les dégâts sont calculés à travers les relations d'endommagement (concernant ces infrastructures) fournies par HAZUS™ (NIBC, 1997). Les résultats obtenus ont un caractère quantitatif, exprimant par exemple le nombre de fuites ou bien le linéaire de voirie ou de conduite endommagée. Les conséquences indirectes du séisme, parmi lesquelles le nombre de départs de feux, sont analysées ensuite.

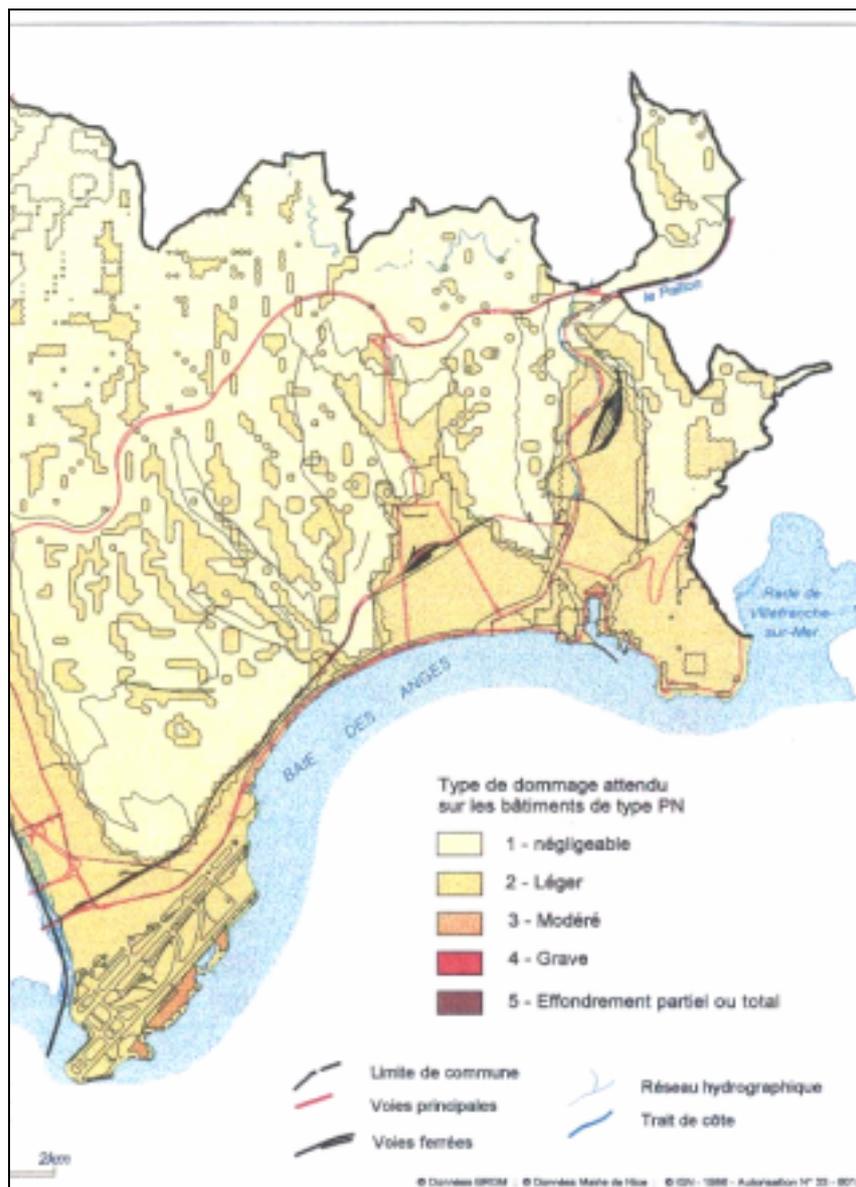


Figure 1.19 Exemple de cartographie de dommages sur la ville de Nice, pour les bâtiments de type PN (source : Arnal et Martin, 1999).

L'endommagement global estimé pour le milieu bâti est utilisé pour l'évaluation du nombre de blessés dus aux effets directs du séisme. Comme dans le cas des infrastructures, les relations issues de HAZUSTM sont à la base de ces estimations. Deux scénarii de séismes ont été retenus pour cette application : une secousse se produisant de nuit, et une autre à 11h du matin. Le calcul du nombre d'habitants, par zone homogène de bâti et par type de bâtiment, a été réalisé sur la base des densités de population (issues de l'INSEE) par quartier, ainsi que des surfaces au sol et du nombre d'étages des constructions. A titre d'exemple, les résultats pour le cas du séisme survenu le jour sont présentés ci-dessous (c. f. fig. 1.20).

Nombre de personnes	Valeur retenue ou calculée
Exposées	
<i>dans les bâtiments</i>	
Actifs	115 000
Résidents	68 000
Touristes	850
Écoliers	60 000
<i>dans la rue</i>	
Résidents	110 000
Touristes	7 500
Total exposées	361 350
Sans abri	20 000-60 000
Blessés	
légers, ne nécessitant pas d'hospitalisation	1 500-3 000
légers nécessitant une hospitalisation	100-200
Blessés graves dans des bâtiments	<10
Morts dans des bâtiments	<10
Blessés graves ou morts dans la rue	30-80

Figure 1.20 Estimation du nombre de victime provoquées par un séisme survenu de jour (source : Arnal et Martin, 1999).

L'impact socio - fonctionnel sur Nice a été évalué ensuite, suivi par une extrapolation des résultats à l'ensemble du département des Alpes Maritimes, sur la base d'une approche qualitative, en utilisant les mêmes relations d'endommagement. L'impact financier et économique a également été évalué, dans le contexte économique de la région. La synthèse de pertes financières directes estimées sur le département est présentée ci-dessous (c. f. fig. 1.21).

	Coût en milliards F	
	Nice	Département
Dommmages aux bâtiments	3-9	6-16
Dommmages aux bâtiments ruraux		1-2
Réseaux, équipements en ville	1-5	2-8
Réseaux, équipements ruraux		1-2
Voirie endommagée par les glissements de terrain		1-2
Mobilier	1-3	2-6
Total	5-17	13-36

Figure 1.21 Estimation des dommages financiers directs sur le département des Alpes Maritimes (source : Arnal et Martin, 1999).

1.5.2.2 Commentaires et remarques

L'étude GEMITIS a le mérite d'être la première de ce type au niveau national. Comme on l'a vu plus haut, elle repose sur un modèle d'estimation de dommages sismiques, complétée par une évaluation des conséquences financières du séisme. Les résultats permettent notamment l'élaboration d'un plan de gestion de crise, mais également une meilleure connaissance du risque sur la ville de Nice comme sur tout le département des Alpes Maritimes.

Quelques aspects doivent néanmoins être améliorées. Si l'approche déterministe utilisée ici a permis sans doute une prise de conscience des autorités locales face à un événement déjà survenu, il serait très improbable que la prochaine secousse ait les mêmes caractéristiques²². Une approche probabiliste apporterait un complément d'information, très utile notamment pour les analyses coûts – bénéfices d'éventuelles mesures de consolidation pour les constructions anciennes, ainsi que pour les aspects assuranciers. Dans un second temps, l'utilisation des courbes de fragilité issues de l'EMS 98 ne considère pas l'intégralité des caractéristiques du séisme, en termes de déplacement et d'accélération. Un spectre de réponse spécifique pour différentes parties de la ville, prenant en compte les amplifications locales, définit d'une manière plus exacte un scénario de secousse. Des études approfondies pour la détermination des caractéristiques locales du sol devraient être menées dans le futur, afin de disposer de données plus précises sur cet aspect, permettant une estimation plus fine des dommages.

Malgré ces aspects négatifs, il serait intéressant d'expérimenter des modèles de même type sur d'autres villes françaises, tels que cela a été réalisé pour Pointe à Pitre ou Fort de France. Le développement des scénarii de risque permettrait ainsi une prise de conscience plus générale d'un risque bien réel, mais souvent négligé.

1.5.3 Le modèle RADIUS

1.5.3.1 Présentation générale

RADIUS²³ correspond à la mise en œuvre d'un programme lancé par la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (1990 - 2000), sous l'égide des Nations Unies, afin de contribuer à la réduction du risque sismique en zone urbaine, particulièrement dans les pays en développement. Sur la base d'une méthodologie commune, neuf études de cas ont été réalisées, sur des villes choisies sur une liste initiale de 58 candidates situées sur des zones à forte sismicité: Addis Abeba (Ethiopie), Antofagasta (Chili), Bandung (Indonésie), Guayaquil (Ecuador), Izmir (Turquie), Skopje (Macédoine), Tashkent (Ouzbékistan), Tijuana (Mexico) et Zigong (Chine). Ces applications, réalisées durant 18 mois sous la direction de trois organismes²⁴, ont permis le développement des stratégies de réduction du risque, appuyées par l'implication des décideurs et des scientifiques locaux, des représentants des gouvernements ainsi que des collectivités locales.

Les objectifs principaux de RADIUS ont été : la réalisation des scénarii de dommage et des plans d'action contre le risque sismique dans les neuf villes choisies; le développement d'un outil de gestion du risque sismique, applicable partout ; de comparer le risque sismique urbain à travers le monde ; et enfin promouvoir l'échange d'informations pour la réduction du risque au niveau d'une ville. Les résultats obtenus devraient être utiles notamment pour les décideurs de l'urbanisation et de l'aménagement urbain, pour la préparation d'une stratégie de renforcement du bâti existant et pour la préparation des plans de gestion de crise. Pour illustrer cette méthode, nous allons présenter son application au cas de Bandung, (Indonésie) ainsi que l'outil de gestion du risque développé dans le cadre RADIUS.

²² Cet aspect devrait être pris en compte dans le projet RISK-UE

²³ Risk Assessment Tools for Diagnostic of Urban Areas against Seismic Disasters

²⁴ Geohazards International (Etats-Unis), OYO Group (Japon) et BRGM (France)

a) Application à la ville de Bandung

Bandung, ville de plus de deux millions d'habitants et capitale de la province Java Barat en Indonésie, est soumise régulièrement à des inondations, qui est le risque naturel le plus courant et le plus catastrophique sur la ville. Pour cette raison, le risque sismique a été complètement négligé, du point de vue de sa connaissance comme de sa prise en compte. Le choix d'un scénario sismique de base s'est effectué sous la direction d'un comité de pilotage international aidé par des experts locaux. Une approche probabiliste a permis de définir un événement sismique avec un PGA maximum en surface de 0,238g, avec 60 % de probabilité d'occurrence sur une période de 200 ans. Des profils géologiques du sous-sol ont ensuite été réalisés, afin de déterminer les caractéristiques locales du site. L'ensemble des informations a été regroupé dans un SIG (c. f. fig. 1.22).

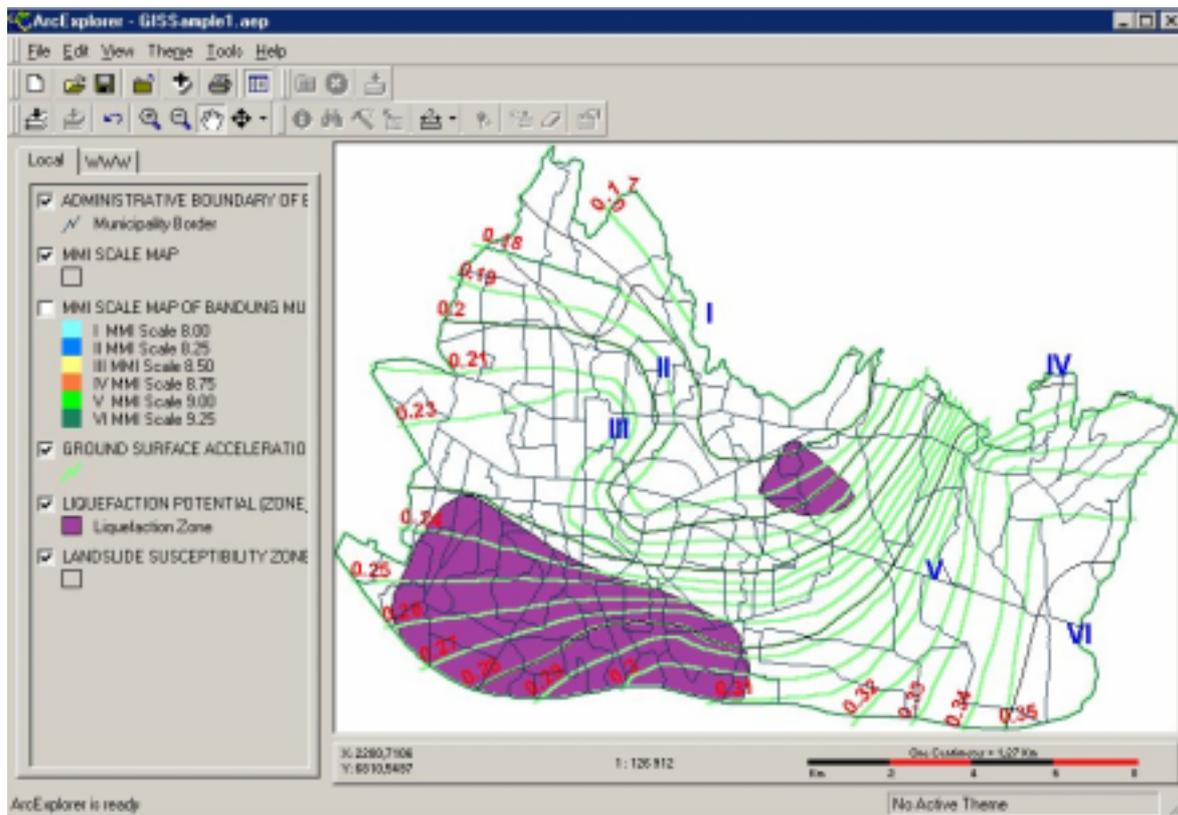


Figure 1.22 Cartographie des zones susceptibles de liquéfaction, représentées en mauve (source : RADIUS)

L'étape suivante a consisté dans le recensement des enjeux. Les différents types de bâti ainsi que des infrastructures de transport et d'énergie ont été inventoriées et cartographiées. L'estimation de dommages a été réalisée au moyen des courbes de fragilité basées sur ATC (1985), et les résultats, donnés sous la forme d'un zonage des intensités sismiques probables, ont été intégrés dans le SIG de travail. Les résultats ont permis l'élaboration des plans de gestion de crise et, sur un objectif à long terme, à améliorer la prévention et la préparation face au risque sismique.

b) Présentation du modèle d'estimation de dommages

Le modèle d'estimation de dommages est un outil indépendant, applicable à n'importe quelle ville. Réalisée sous l'interface Excel, il permet (sans pour autant être un SIG) de représenter spatialement, d'une manière simplifiée, la distribution des enjeux dans une ville, des types de sols et des estimations de dommages obtenues.

Les données de base sont, comme pour tous les modèles de ce type, les scénarii de séismes, les conditions locales du sol, l'inventaire des enjeux ainsi que les courbes d'endommagement. Le schéma ci-dessous présente l'organisation générale du modèle (c. f. fig. 1.23).

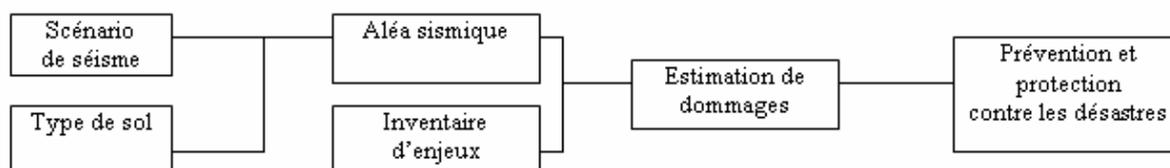


Figure 1.23 Schéma conceptuel du modèle RADIUS (source : RADIUS, 2002).

La dimension spatiale est donc réalisée sous la forme d'une grille à éléments carrés, dont la dimension est définie par l'utilisateur. Chaque cellule peut contenir des informations diverses, telles que des données relatives aux sols, aux enjeux ou encore aux dommages. En fonction de l'importance de chaque élément de grille, un poids peut lui être accordé. Des zones homogènes d'étude peuvent également être définies.

Des coefficients synthétisant les informations concernant le type du sol sont ainsi attribués à chaque cellule ou zone homogène, en fonction de type du sol choisi. Le modèle dispose de 4 catégories de sols afin de tenir en compte notamment des effets d'amplification. La première catégorie est représentée par les *roches dures*, qui correspond à des roches volcaniques (telles que le basalte ou le granit), ou à des roches sédimentaires. Le coefficient d'amplification prédéfini est de 0,55, mais l'utilisateur garde toutefois la possibilité de le modifier, comme pour le reste des coefficients. La deuxième catégorie est formée par les *roches légères*, qui correspond à des conglomérats ou à des sables tertiaires, avec un facteur d'amplification de 0,7. La troisième catégorie, les *sols moyens*, correspond à des sols alluviaux rigides, avec un facteur d'amplification de 1. Enfin, la quatrième catégorie, les *sols mous*, correspond à des sols alluviaux légers, et est associée à un facteur d'amplification de 1,3. Si l'utilisateur ne connaît pas exactement le type du sol, la valeur utilisée par défaut est 1.

Le définition du scénario sismique est basée sur deux options (c. f. fig. 1.24). La première est constituée par le choix d'un séisme majeur déjà survenu, comme par exemple le séisme de Kocaeli, (Turquie, 1999) ou Kobe (Japon, 1995). Le modèle dispose ainsi de neuf événements pré-définis. La deuxième option est la définition d'un séisme aléatoire, à travers des paramètres tels que la magnitude, la profondeur du foyer, la distance épacentrale et la loi d'atténuation.

Figure 1.24 Définition du scénario de séisme

Les loi d'atténuation de Joyner & Boore (1981), Campbell (1981) ou Fukushima & Tanaka (1990) sont utilisées pour l'estimation du PGA à partir de la magnitude. La valeur du PGA est convertie ensuite sur l'échelle d'intensité sismique MMI, suivant la loi de Trifunac & Brady (1975). Ces conversions sont nécessaires à l'estimation de dommages, réalisée sur la base de l'échelle MMI.

Le pas suivant du modèle est la classification des enjeux en plusieurs classes, ainsi que leur inventaire. Dix classes de bâti sont ainsi distinguées ici, en fonction de leur typologie structurale et de leur affectation. Cette classification a été réalisée principalement suivant les caractéristiques du bâti observées en Amérique Latine et généralement dans l'ensemble des pays en développement. L'utilisateur définit un pourcentage de chaque type de construction par zone homogène d'étude. Evidemment, la somme des pourcentages doit être égale à 100% pour chaque zone. En fonction de cette classification, des courbes de fragilité spécifiques seront appliquées à chaque type de bâti.

Les courbes de fragilité utilisées (c. f. annexe 1.14) dans ce modèle sont des relations « intensité – dommages », basées sur des observations réalisées après des séismes antérieurs. Un pourcentage d'endommagement est ainsi associé à chaque niveau d'intensité. Les résultats sont présentés sous forme cartographique ainsi que sous forme tabulaire. Une estimation du nombre des victimes vient compléter ce modèle, mais la méthodologie de calcul n'est malheureusement pas détaillée dans les textes de références.

1.5.3.2 Commentaire et remarques

Les résultats du programme RADIUS, appliqué sur les neuf villes mentionnées auparavant, permettent la prise en compte et la réduction du risque sismique, notamment dans les pays en développement. Les municipalités participant à l'étude peuvent ainsi développer ou améliorer leur stratégie de protection contre les séismes sur la base de ce modèle, notamment par la réalisation des plans de gestion et de préparation à la crise.

L'outil de modélisation de dommages développé par RADIUS représente également une approche intéressante et simplifiée d'estimation du risque. Il permet l'analyse des scénarii de séismes en milieu urbain, sans aucune difficulté de transposition d'un site à un autre. De plus,

le système de grille offre la possibilité d'une analyse spatiale simplifiée, indépendamment de l'utilisation d'un SIG.

Mais les aspects négatifs que l'on peut relever sont relatifs à la méthodologie d'estimation de dommages. Ainsi, les courbes de fragilité sur la base de l'échelle MMI sont présentées sans que soit explicitée clairement la méthode d'obtention. Les pourcentages d'endommagement qui sont calculés suite à des courbes ne sont pas traduits en niveaux d'endommagement, ce qui faciliteraient pourtant l'analyse des résultats. Enfin, en sortie du modèle on note également que l'on ne dispose pas d'informations concernant l'estimation du nombre des victimes.

Le modèle RADIUS représente toutefois, outre le modèle simplifié d'estimation de dommages, une initiative au niveau mondial très utile notamment là où sans des raisons économiques d'envergure n'a jusqu'ici pas été possible une réelle prise en compte du risque sismique. Il serait très intéressant d'envisager une future application à d'autres zones urbaines situées dans des zones à activité sismique importante, en même temps qu'une amélioration de la méthodologie d'estimation de dommages, qui pourrait rendre l'analyse plus riche.

1.5.4 Le modèle RISK-UE

1.5.4.1 Présentation générale

RISK-UE représente une étude de développement de scénarii de risque sismique appliqués à différentes villes européennes. Financé par la commission européenne, le projet a débuté en janvier 2001, pour une période de 3 ans (Mouroux et al, 2002 ; 2003). Réalisée par des institutions universitaires ou organismes de recherches, l'étude a comme objectif principal l'élaboration d'une méthodologie générale et modulaire d'analyse du risque sismique, considérant l'ensemble des caractéristiques urbaines spécifiques à l'Europe. Sept villes ont été considérées pour l'application de cette méthodologie : Nice (France), Barcelone (Espagne), Catania (Italie), Sofia (Bulgarie), Bucarest (Roumanie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine).

Le projet consiste en effet de mettre au point un modèle d'estimation de dommages sismiques adapté au contexte européen. Les résultats proposés sont des sorties habituelles de ce type de modélisation: des estimations de dommages physiques directs et indirects ainsi que des estimations des pertes économiques directes et indirectes.

Le projet étant actuellement en cours, nous allons présenter ici uniquement son organisation et les objectifs proposés.

L'étude est structurée en quatre étapes principales : l'inventaire de enjeux, le développement de la méthodologie de l'étude de scénarii de séismes, l'application aux villes mentionnées ci-dessus et enfin l'analyse des résultats. La première phase consiste plus précisément dans la réalisation d'un inventaire complet de tous les éléments à risque. La prise en compte des éléments spécifiques à chaque ville tels que les anciens centres urbains, les monuments et les bâtiments historiques, généralement négligés par ce type de modèles au niveau international, représente un des intérêts majeurs de cette étude. La deuxième phase (le développement de la méthode) est organisée en plusieurs points : l'analyse du risque sismique, qui définit ainsi tous les paramètres caractéristiques de l'aléa spécifique ; l'analyse du système urbain, qui hiérarchise les éléments urbains à risque ; l'analyse de la vulnérabilité du bâti courant, réalisée à travers des matrices d'endommagement ou des courbes de fragilité, sur la base des paramètres liés au mouvement du sol (tel que le PGA) ; l'analyse de la vulnérabilité des monuments historiques ; l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures de transport,

d'énergie et des structures spéciales ; et enfin, le développement des scénarii de séismes, basés sur deux événements : le scénario le plus probable et le scénario le plus catastrophique possible. La troisième phase du projet est constituée par l'application de la méthodologie élaborée auparavant à l'exemple des sept villes européennes que nous avons citées ci-dessus, dont leur sismicité varie entre faible-moderée (Nice, Barcelone) et élevée (Bucarest, Thessalonique). Dans la quatrième phase du projet il est prévu l'analyse et la présentation publique des résultats.

1.5.4.2 Commentaires et remarques

RISK-UE représente une première approche de développement d'un modèle d'estimation de dommages au niveau européen, considérant les caractéristiques sismiques et les enjeux spécifiques à ce contexte. Les objectifs proposés sont exceptionnels, permettant une analyse plus fine du risque et de la vulnérabilité suivant une méthode commune pour tous les pays participants au projet. Par sa complexité, il représente (du point de vue théorique pour l'instant) une première alternative méthodologique au modèle HAZUSTM. Bien évidemment, plus de commentaires pourront être apportés une fois que les résultats seront communiqués publiquement.

1.5.5 Modèles à application locale

En dehors des programmes américains et européens dont nous avons parlé plus haut, des études de prise en compte du risque sismique ont été réalisées sur la plupart des grandes agglomérations urbaines du monde entier, à sismicité modérée ou élevée. Ici nous allons présenter à titre d'exemple l'applications, sur Quito (Equateur), en nous contentant de mentionner l'existence d'autres études.

1.5.5.1 Etude du cas de la ville de Quito, Equateur

Au début des années 90, une initiative commune a été lancée par l'organisme ORSTOM²⁵ (France) et OYO (Japon) de création et développement d'une structure commune dédiée à la réduction du risque sismique dans les pays en développement (EPN et al, 1994 ; Villacis et al, 1997). La ville de Quito a été choisie pour l'application de ce projet, en raison notamment de son histoire riche en événements sismiques, mais également de la disponibilité et de l'ouverture de la communauté scientifique équatorienne face à cette initiative.

Le but de ce projet a été de fournir aux autorités locales ainsi qu'à un large public divers outils et recommandations permettant la réduction des conséquences d'un futur séisme majeur. Trois objectifs prioritaires ont ainsi été décidés : l'amélioration de la connaissance du risque, l'augmentation des mesures de protection et la réalisation d'une stratégie nationale de gestion du risque. Pour réaliser ces objectifs, le projet a été divisé en trois étapes : une première étape d'analyse des effets d'un éventuel séisme, une deuxième étape d'analyse de l'impact sur la société dans les mois suivant le séisme et une troisième étape d'élaboration de recommandations pour la gestion du risque.

²⁵ actuellement l'IRD

La première phase du projet a regroupé une équipe pluridisciplinaire, formée par plus de 40 scientifiques d'Equateur, Canada, France, Japon et des Etats-Unis, afin de déterminer la menace sismique. Sur la base d'une analyse des séismes historiques remontant jusqu'au XVI^{ème} siècle, ainsi que des failles connues, trois possibilités de séismes potentiels ont été retenues : un séisme au large du Pacifique, dans la zone de subduction, de magnitude 8.4 ; un séisme à l'intérieur de terres, à 80 km à l'est de Quito, de magnitude 7.3; et enfin, un séisme local, de magnitude 6.5, à 25 km au nord de Quito. Pour chacun de ces trois scénarii, des intensités sismiques ont été calculées en fonction des conditions locales du sol. En raison de la proximité de la capitale, ainsi que des sols mous concentrés dans la partie nord de la ville, le troisième scénario de séisme s'est avéré être le plus destructeur, en termes d'intensité (c. f. fig. 1.25).

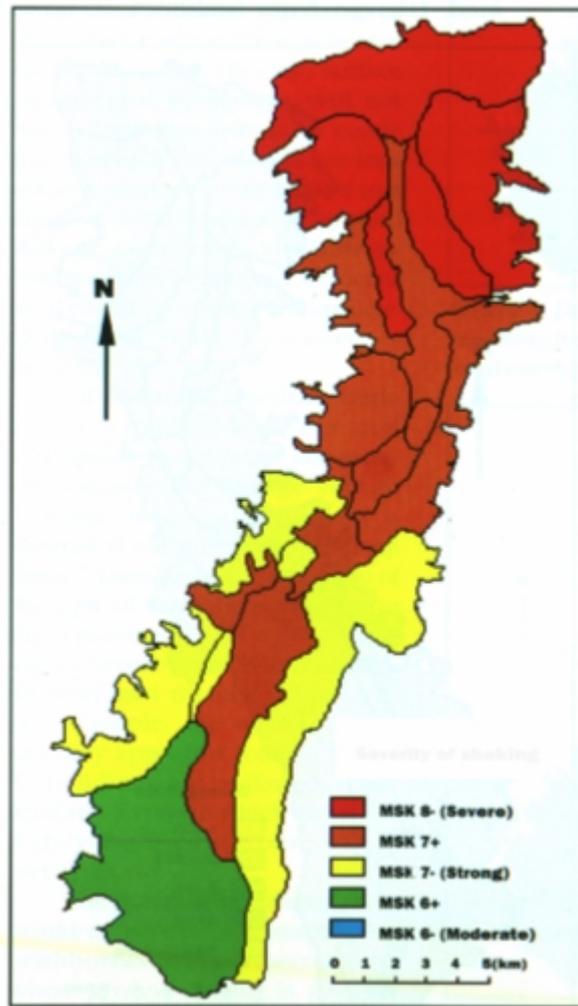


Figure 1.25 Intensité (sur l'échelle MSK) de la secousse sismique sur la ville de Quito, supposée à se produire à 25 km au nord de la ville, avec une magnitude de 6.3 (source : EPN et al, 1994).

A partir des valeurs des intensités sismiques, des estimations de dommages au bâti ainsi qu'aux infrastructures ont été réalisées par la suite. Les constructions ont été différenciées en 15 classes distinctes, en fonction des matériaux et du niveau de conception parasismique. Ces classes ont été simplifiées en 5 catégories : les constructions en adobe, en maçonnerie, en acier, en béton armé et enfin les constructions indépendantes. L'estimation de dommages au bâti a été réalisée à travers de courbes d'endommagement développées pour la Californie et

calibrées avec de données sur l'Amérique Centrale et de Sud ²⁶ (c. f. fig. 1.26). Des dégâts subis par les infrastructures ont été ensuite évalués à l'aide d'une méthodologie similaire. Les résultats sont exprimés en termes de « ratios de dommages », correspondant au ratio du coût de dommages par rapport au coût total de reconstruction du bâti. Une comparaison avec le séisme survenu en 1987, à 80 km à l'est de Quito, et de magnitude 6.9, a montré des pertes moins importantes que celles du séisme simulé.

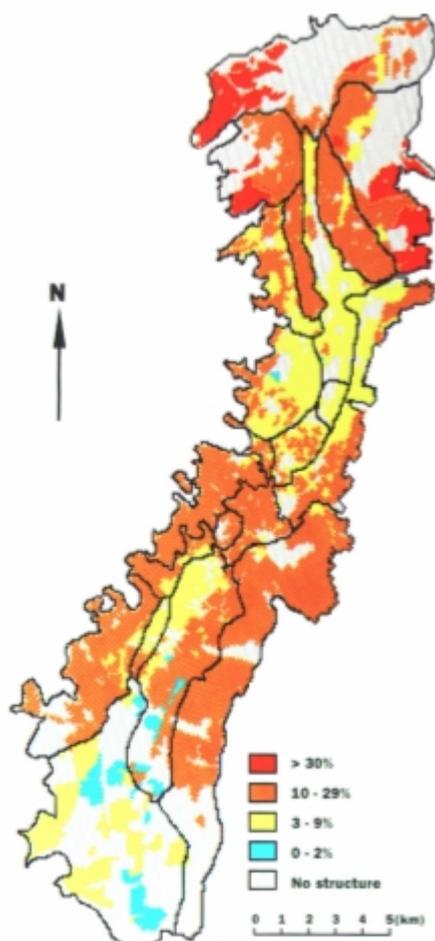


Figure 1.26 La distribution statistique des dommages au bâti attendus suite au scénario du séisme local (source : EPN et al, 1994).

Dans la deuxième phase du projet ont été analysées les conséquences sociales dans les semaines et mois qui suivraient le scénario de séisme. Une description hypothétique de la situation envisagée dans ces conditions est réalisée sur la base des études techniques de la vulnérabilité des services de la ville, des secours et des infrastructures. Ainsi, la situation de crise reviendrait à la normale après quelques mois (EPN et al, 1994)..

Enfin, dans la troisième phase du projet, un groupe des spécialistes internationaux ainsi qu'équatoriens se sont réunis pour mettre en place une stratégie de réduction du risque sismique. Ont été définies six recommandations principales pour l'amélioration de la sécurité urbaine de la ville : la création d'un comité local de conseil scientifique ; le renforcement du code de constructions parasismiques ; le support des futures recherches pour une quantification plus fine du risque ; l'amélioration des équipements et installations de secours

²⁶ les textes de référence ne précisent pas la source de ces données ; il s'agit probablement d'ATC 13 (1985).

et crise ; et enfin, d'établir la proposition d'une politique d'assurance en concordance avec les pratiques internationales.

A travers ce projet, qui a été une des premières initiatives de ce type au niveau mondial, et un précurseur du programme RADIUS, la ville de Quito était une des premières à mettre en place une vraie stratégie de protection contre le risque sismique. L'étude constitue un exemple réussi de collaboration internationale entre spécialistes multidisciplinaires.

1.5.5.2 Autres études locales

Nous mentionnons, à titre d'exemple, quelques études représentatives de prise en compte de la vulnérabilité sismique au niveau d'une ville, sur des importantes agglomérations urbaines.

En Europe, les villes sur lesquelles des modélisations de dommages ont été appliquées sont : Barcelone (Espagne) (Gonzales et al, 2001 ; Chavez, 1998) ; Lisbonne (Portugal) (Pais et al, 1995) ; Rome (Italie) (Rovelli et al, 1995) ; Istanbul (Turquie) (Erdik et al, 1995) ; Bâle, (Suisse) (Fah et al, 2000).

Enfin, les exemples en Asie et Amérique du Sud des villes ayant fait l'objet d'études de modélisations de dommage sont également nombreux: la région du Dagestan (Lutikov et al, 1995) et Irkutsk (Pavlov et al, 1995) en Russie; le région de Kanagawa (Enomoto et al, 1995) et Yokohama (Amakuni et al, 1995), au Japon ; Erevan, en Arménie (Balassanian et Manukian, 1995) ; Sylhet, au Bangladesh (Ansary, 2002) ; Manilla, au Philippines (Midorikawa et al, 2002) ; Seoul, en Corée (Kim et al, 2002) ; Manizales, en Colombie (Bonett el al, 2001) ; Bogota, en Colombie (Varella et al, 2002) ; Caracas (Enomoto et al, 2001) et Mérida (Castillo et al, 2001), au Venezuela.

1.6 Conclusions et perspectives

Comme nous l'avons vu plus haut dans le texte, un nombre important de modèles d'estimation de dommages sismiques a pu être réalisé dans les dernières années à travers le monde. Entre l'ensemble de ces modélisations, HAZUSTM se distingue par sa clarté et sa démarche directe permettant l'évaluation de dommages à partir du mouvement du sol. Contrairement à lui, la plupart des autres approches proposent des estimations réalisées d'une manière indirecte, à partir des valeurs de l'intensité sismique, qui est elle même une mesure des conséquences d'un séisme. On note également l'exhaustivité des données fournies en entrée à l'utilisateur par HAZUSTM, qui dépasse largement le choix existant ailleurs. Toutefois, la simplicité des autres modèles tel que RADIUS rend son application accessible à des non spécialistes, aspect très utile en vue de leur utilisation par des collectivités ou décideurs locaux. On remarque également la mise au point d'un modèle français, qui permet de mieux envisager la menace sismique, à travers une estimation des conséquences potentielles.

Une analyse comparative simplifiée de principaux modèles présentés ici est réalisée en annexe 1.15, afin de mettre en évidence les points communs ainsi que leurs spécificités.

Malgré les incertitudes inhérentes, qui varient d'un modèle à l'autre, une évaluation de dommages sismiques permet la connaissance de ce qui se passerait dans le cas d'un tremblement de terre, élément indispensable pour une meilleure prévention et protection face au risque sismique.

Les récents progrès scientifiques dans le domaine de la sismologie et du génie parasismique devraient faciliter l'homogénéisation des MEDS existants ainsi que leur développement sur des régions qui n'en possèdent pas, malgré le risque sismique présent. Leur mise en place permettrait, outre une meilleure connaissance du risque, une préparation adéquate face à une catastrophe possible et surtout une prise de conscience de la société avant l'occurrence de l'événement.

Une première perspective d'amélioration des modèles est la réalisation de microzonages sismiques, afin de disposer de plus de détails sur les caractéristiques locales du sol. Dans le cas où de telles études se révèlent économiquement onéreuses, les modèles peuvent utiliser le zonage sismique mondial, qui permet une analyse de dommages au niveau régional (c. f. annexe 1.16).

Une deuxième perspective d'amélioration est constituée par la définition de types standard de bâti au niveau mondial, afin de pouvoir disposer des classifications standard des enjeux en fonction de la région d'étude. Un premier pas dans cette direction est le développement en cours, suite à une initiative de l'Association Américaine de Génie Parasismique (EERI²⁷), d'une base de donnée internationale appelée « World Housing Encyclopedia » (c. f. annexe 1.17). Elle consiste en un inventaire de divers types de constructions utilisées en différents pays, en présentant leurs principales caractéristiques. Ce recensement permettra notamment le développement des modèles sur des régions où la connaissance du bâti est moindre.

Une dimension importante du futur développement des MEDS est l'amélioration des données relatives à la distribution spatiale des enjeux. Dans ce sens, il est envisageable d'utiliser l'imagerie aérienne ou satellite à haute résolution, qui pourrait apporter des informations très importantes et précises sur la nature du bâti. Nous allons détailler cet aspect dans le chapitre 4. Les modèles urbains d'élévation numérique réalisés à l'aide des outils tels que le laser aéroporté, offrent également des informations de première importance sur la vulnérabilité du bâti.

Enfin, une dernière perspective d'amélioration est liée à la validation et aux extensions des courbes d'endommagement à tous les types de bâti du monde, concernant en particulier les constructions moins prises en compte par les modèles communs, telles que celle en adobe. Pour l'instant, comme nous l'avons montré, les principales relations permettant l'estimation de l'endommagement sont développées notamment pour les constructions existantes aux Etats – Unis. Il existe également des initiatives en cours qui envisagent justement une adaptation de la typologie du bâti, tel que le projet RISK-UE. Mais il reste toutefois nécessaire de valider et calibrer ce type de données, à travers notamment les missions en retour d'expérience. On peut regretter qu'à l'heure actuelle il existe très peu de recherches engagées dans cette direction au niveau européen.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons décrire la mise au point des courbes de capacité pour quelques catégories standard de structures, afin de montrer que la réalisation de ce type de développement reste envisageable, malgré les difficultés techniques. Ces courbes seront appliquées ensuite à l'estimation de dommages au bâti, à travers les courbes d'endommagement de HAZUSTM, réalisées pour les typologies de constructions américaines et qui sont les seules disponibles aujourd'hui.

²⁷ Earthquake Engineering Research Institute

CHAPITRE 2. DEVELOPPEMENT DES COURBES DE CAPACITE PAR TYPE DE BATI

Ce chapitre a pour objet le développement de courbes de capacité (CC) caractérisant différents types standard de bâtiments, à partir d'une approche spécifique aux techniques de génie civil. Dans un premier temps nous présentons ces diagrammes, leur signification et leur utilisation, ainsi qu'une description des méthodes générales d'obtention. La méthodologie utilisée pour le développement des courbes de capacité est décrite dans un deuxième temps. Les nouvelles relations ainsi obtenues et leur interprétation sont exposées dans un troisième temps. Enfin, une analyse comparative des résultats est réalisée en fin de chapitre.

Aujourd'hui, beaucoup des modèles d'estimation de dommages sismiques correspondent à des approches basées sur l'utilisation des relations entre *intensité macrosismique et les dommages post sismiques*, telle que l'échelle EMS 98. Ces relations ont un fort caractère implicite, car la valeur de l'intensité est elle même une fonction de l'ampleur des dommages constatés ou supposés. Autrement dit, ceci revient à évaluer les dommages à partir des quantifications des niveaux de dommages. Les propriétés physiques de l'événement sismique ne sont donc pas prises en compte dans ce type d'approche, du moins d'une façon directe. C'est cette caractéristique des modèles existants qui a poussé la communauté scientifique à développer des méthodes alternatives, modélisant d'une manière *directe* l'influence des paramètres liés au mouvement du sol sur les dommages. Pourtant, la diversité des paramètres intervenant dans un séisme, tels que la magnitude, le PGA, la vitesse, la période ou la profondeur de l'hypocentre rend très difficile la formalisation des relations entre les caractéristiques strictement physiques du séisme et les dégâts qui lui sont consécutifs. C'est pour répondre à ce besoin qu'a été développée l'approche basée sur les CC, ou l'analyse « pushover ». Au contraire des relations précédentes, les CC ont la propriété d'exprimer un niveau d'endommagement directement en fonction de la sollicitation sismique spécifique à l'enjeu étudié. L'analyse « pushover » fait d'ailleurs aujourd'hui l'objet des discussions entre spécialistes de l'AFPS²⁸ afin d'introduire une norme de construction basée sur son utilisation.

Les applications de ce type ne sont pas nombreuses, en raison du développement assez récent des approches basées sur les CC. En effet, très peu de documents proposent aujourd'hui des CC spécifiques à plusieurs classes de bâtiments ainsi que des courbes de fragilité adaptées. Ainsi, l'approche HAZUSTM représente la seule méthode (du moins publique) présentant à ce jour une approche de ce type. Son caractère exhaustif et notamment l'explicitation des relations utilisées ont imposé ce modèle comme une référence au niveau international. Ce statut lui est accordé d'autant plus que le développement des CC requiert des analyses très fines, accessibles uniquement aux spécialistes, car cette méthode novatrice diffère complètement d'un point de vue technique des approches traditionnelles. Plus récemment, le projet européen RISK-UE (c. f. § 1) a comme objectif le développement des CC spécifiques au contexte européen, mais pour l'instant les résultats restent confidentiels, le projet n'étant pas achevé.

Nous nous proposons dans ce chapitre de développer des CC dans le but notamment de disposer d'une alternative aux solutions proposées par HAZUSTM. Contrairement à ce qui s'est fait dans ce dernier, les types de constructions que nous allons considérer sont

²⁸ Association Française de Génie Parasismique

caractéristiques du bâti urbain européen. Seront notamment décrites les différentes étapes de calcul permettant d'obtenir des CC moyennes, par classe de bâti. Cette application mettra donc en évidence des difficultés techniques spécifiques, tout en proposant des solutions ou bien des axes principaux de futures recherches, contribuant à l'amélioration de l'approche. Sur un autre plan, pour ce qui est de l'estimation de dommages, notre approche diffère fondamentalement de celles basées sur l'EMS 98, généralement utilisées en Europe. Ainsi, nous nous attacherons de montrer qu'une évaluation **directe** des dégâts est possible, sur la base des paramètres liés uniquement au mouvement du sol. Une comparaison des résultats issus des deux types d'approche mettra en évidence leurs différences.

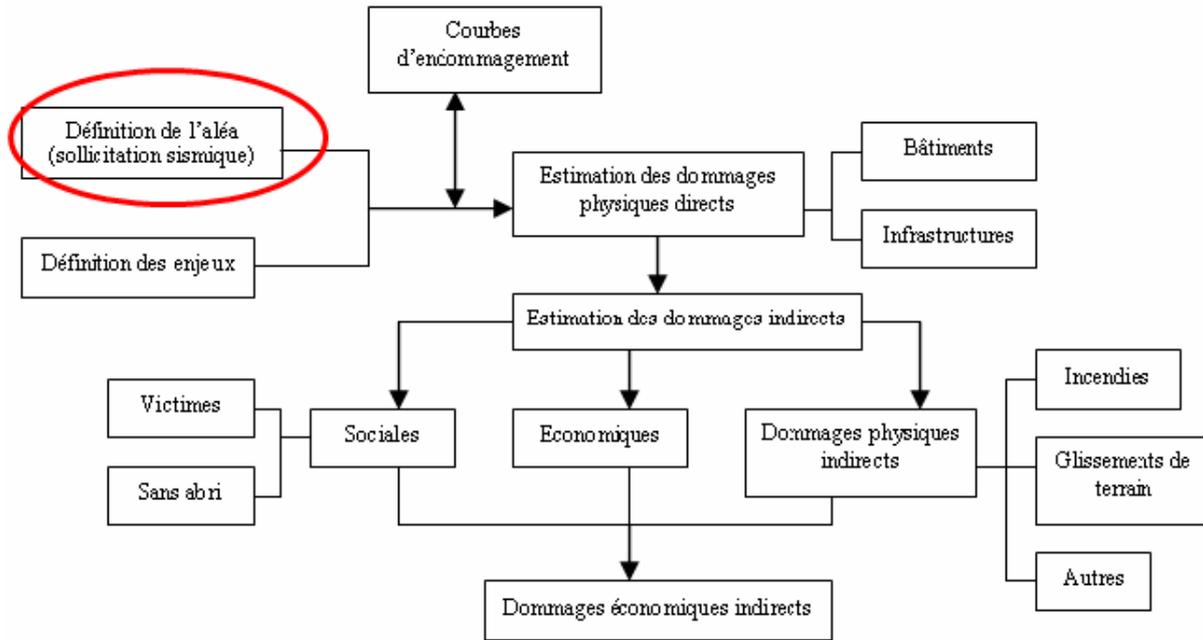


Figure 2.1 Position des courbes de capacité dans un modèle d'estimation de dommages sismiques

Pour situer ce chapitre dans le cadre de l'organisation générale d'un modèle d'estimation des dommages, le développement des courbes de capacité est intégré dans le module relatif à la définition de l'aléa sismique (c. f. fig. 2.1). La sollicitation sismique peut être définie ainsi en termes de déplacement, à travers des CC caractérisant différents types standard de bâtiments. Dans les chapitres suivants, nous allons utiliser dans un premier temps la sollicitation sismique définie de cette manière à l'estimation *a priori* de dommages physiques directes au bâti ; dans un deuxième temps, l'imagerie satellitaire sera utilisée pour l'estimation *a posteriori* de dommages directs et indirectes.

Des CC peuvent être réalisées pour toute sorte de constructions et infrastructures, tels que ponts, dépôts, etc. L'avantage apporté par cette approche réside dans la facilité d'interprétation de l'état d'endommagement de la structure. Néanmoins, d'un point de vue technique, les démarches à suivre pour leur développement requièrent souvent des analyses très complexes et coûteuses en termes de temps, mises en pratique essentiellement par des chercheurs ou des ingénieurs expérimentés. Si l'apparition des logiciels adaptés à ce type d'approche ne diminue pas le niveau de complexité de l'analyse, elle influe sur les temps de travail. En raison du caractère itératif du calcul, les moyens informatiques améliorent ainsi d'une manière conséquente les délais d'obtention des résultats.

Dans notre but d'estimation de dommages sismiques, des CC **moyennes** pour différents types de constructions seront nécessaires pour une étude globale du bâti. Par conséquent, de nombreuses analyses, pour le même type de constructions mais dans des configurations différentes, seront réalisées afin d'extraire des valeurs définissant des moyennes de ces courbes.

Le développement des CC présente d'un point de vue générale les mêmes étapes générales de calcul, indépendamment du type de construction. Toutefois, chaque type d'ouvrage a des particularités spécifiques, en fonction de sa structure.

Dans cette étude, nous avons fait le choix de traiter les constructions d'habitations, en structures métalliques et en béton armé de type « poutres – poteaux ». Cette option est basée sur l'importance et la prépondérance de ces constructions dans le milieu urbain, sur la compatibilité avec l'approche HAZUSTM ainsi que sur l'utilisation d'un logiciel spécifique à ces typologies de bâtiments. En raison notamment de ce dernier facteur, l'étude des constructions spécifiques à l'habitat rural ou urbain ancien (telles que des maisons en maçonnerie) n'a pas pu être réalisée. Nous n'avons pas considéré non plus les constructions en béton armé de type « voile », utilisées couramment en France et en Europe, en raison des contraintes liés au logiciel de calcul, permettant uniquement l'analyse pushover pour les éléments de type « poutres – poteaux », à travers le mécanisme de rotule plastique.

Pour les structures ayant un mécanisme de dissipation d'énergie autre que les rotules plastiques l'endommagement progressif est quantifiable à travers des analyses et modélisations plus approfondies. Ainsi, malgré son intérêt due à la présence d'un nombre important de bâtiment en « voile », des calculs plus complexes ne convenait pas à notre but d'obtention des CC moyennes, utiles notamment pour l'estimation de dommages à moyenne ou grande échelle.

Sur un plan plus général, la méthodologie présentée ici a un caractère indépendant des types de structures utilisées, et peut donc être appliquée pour tout type de constructions.

2.1 Introduction à la méthode « pushover »

L'obtention des CC repose sur une analyse de structures (G9) de type « pushover », ou la méthode du spectre de capacité²⁹. Méthode avancée de génie civil et développée initialement à la fin des années 70 (Freeman, 1975; Freeman, 1978), elle a pris son essor au milieu des années 90 (ATC 40, 1996 ; Chopra, 1995 ; Mahaney, 1993 ; Paret, 1996). Des détails techniques définissant cette méthode se retrouvent dans l'annexe 2.1.

Les techniques d'analyse de structures consistent essentiellement à comparer un paramètre de demande avec un paramètre de capacité. L'effort tranchant a été le paramètre utilisé traditionnellement pour la conception parasismique des bâtiments. L'ingénieur calcule la sollicitation (la force) provoquée par un séisme donné (ou plusieurs) à la base de l'édifice, et la compare avec la résistance du bâtiment. Dans le calcul traditionnel, les forces sont réduites d'une manière artificielle, afin de garder la conception dans le domaine élastique. Dans le domaine post - élastique, le dommage apparaît progressivement, en diverses parties du bâtiment, provoquant la plastification de certains éléments. Il apparaît par conséquent une

²⁹ En anglais: *capacity spectrum method*

redistribution des efforts, la demande dépendant ainsi du comportement de chaque composant. De cette manière, l'endommagement est plus sensible, en général, au déplacement qu'à la force. Ces facteurs ont conduit au développement des outils d'analyse non linéaire, tels que la méthode « de la sécante » ou l'analyse « time – history » non linéaire (ATC 40, 1996). Toutefois, les deux sont relativement complexes pour un usage généralisé. Pour faciliter l'accès à ce type d'analyse, plusieurs approches simplifiées ont été développées, telles que la méthode des coefficients de déplacement, du déplacement équivalent ou encore du spectre de capacité (ATC 40, 1996; Comartin et al., 2000; Fajfar, 1999 ; 2000 ; Chopra & Goel, 1999 ; 2002 ; Priestley, 2000).

La méthode du spectre de capacité est donc une méthode d'analyse pseudo-statique non-linéaire simplifiée. Ce n'est pas une méthode dynamique car la sollicitation ne varie pas dans le temps, et la déformation correspond uniquement au premier mode de vibration ; pourtant des paramètres propres à l'analyse dynamique sont pris en compte, tel que le facteur de participation modale, le coefficient de masse effective ou encore l'amplitude du mode de vibration. C'est la raison pour laquelle nous avons appelé cette méthode comme « pseudo-statique ».

Le caractère non linéaire est donné par la prise en compte du comportement plastique de la structure, où sa déformation n'est plus proportionnelle à la sollicitation. Le modèle mathématique de la structure est modifié afin de prendre en compte la diminution de la résistance des éléments plastifiés, suite à une dissipation importante d'énergie hystéretique. Ce comportement se traduit par des déformations très importantes suite à des incréments mineurs de la sollicitation. Dans le cas des structures « poutres – poteaux », l'endommagement se produit généralement à travers la formation des rotules plastiques.

Utilisant cette méthode, le déplacement devient le paramètre principale de dimensionnement, et non la force. Le critère est donc le déplacement maximum de la structure (la résistance) face à la sollicitation de référence imposée (la demande). La résistance doit être plus importante que la demande, mais le raisonnement se fait en termes de déplacement. La sollicitation est déterminée à travers la représentation du spectre de réponse, dérivé du format traditionnel « période – accélération » en « déplacement – accélération », à travers un simple changement de variable.

Une courbe de capacité représente d'une manière graphique le comportement d'un bâtiment soumis à une sollicitation horizontale statique (c.f. fig. 2.2).

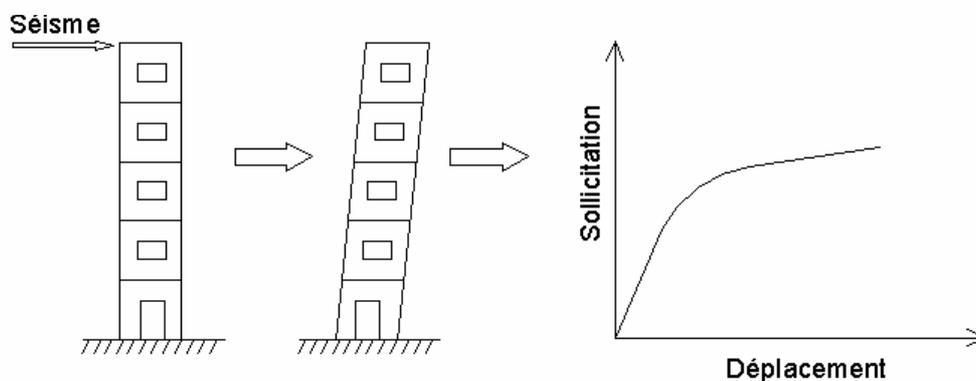


Figure 2. 2 Signification physique de la courbe de capacité

Le déplacement (généralement au niveau de la toiture) est représenté en fonction de la force sismique. Cette courbe indique donc **le comportement de la structure face à n'importe quelle sollicitation horizontale, indépendamment de son intensité**. Bien évidemment, le déplacement de la structure augmente avec la force, jusqu'au moment où celle-ci perd complètement sa capacité de résistance. Ainsi, plusieurs niveaux d'endommagement peuvent être distingués à travers cette représentation graphique (c. f. fig. 2.3). Le premier niveau (niveau I) correspond au comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception parasismique habituel. Il indique par conséquent un état d'endommagement superficiel (ou bien sans endommagement).

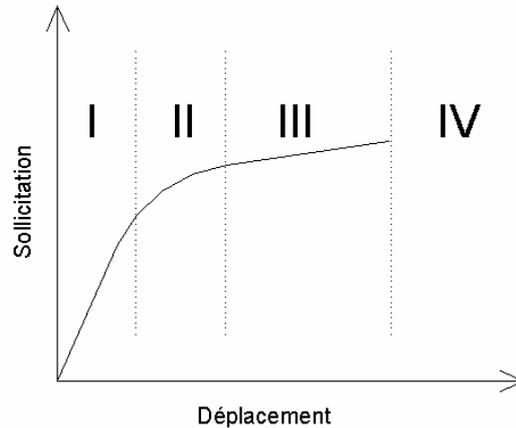


Figure 2.3 Niveaux d'endommagement représentés par la courbe de capacité

Le deuxième niveau d'endommagement (niveau II sur la figure 2.3) correspond à un niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais un endommagement mineur est susceptible de se développer. Le troisième niveau représente un état d'endommagement avancé, caractérisant une sécurité limitée de l'édifice, sa stabilité étant en danger. Au delà de ce niveau, la structure, ne présentant plus aucune capacité de résistance, est susceptible d'atteindre sa ruine.

De cette manière, le comportement d'un bâtiment face à un séisme donné peut être estimé à travers une analyse visuelle de la CC, en fonction de la position de la demande sismique. Le point de croisement de la demande et de la résistance (représentée donc par la courbe de capacité) décrit donc l'état d'endommagement de l'édifice (c. f. § 3).

Deux points sont nécessaires pour une caractérisation simplifiée de la courbe de capacité : le point A, qui représente l'entrée dans le domaine post - élastique, et le point B, qui représente la perte totale de la capacité de résistance de la structure (c. f. fig. 2.4).

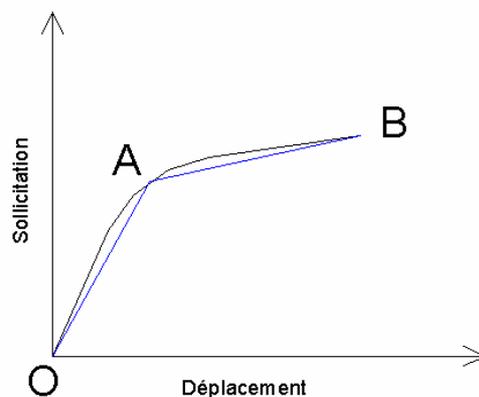


Figure 2.4 Représentation simplifiée de la courbe de capacité à travers les points A et B

Le comportement de la structure de type OA est donc un comportement parfaitement élastique. Si la sollicitation est arrêtée, la structure revient à son état initial, sans pertes de résistance. Au-delà de ce point, la déformation de la structure n'est plus proportionnelle à la sollicitation ; si la force est arrêtée, la structure ne revient plus à son état initial et présente des déformations rémanentes. Son endommagement progressif provoque une redistribution des efforts dans différentes parties de la construction, en plastifiant au fur et mesure les points vulnérables et créant donc des rotules plastiques. Le comportement entre le point A et B est donc complexe.

Pour notre analyse simplifiée, nous avons considéré uniquement ces deux points comme points de contrôle. Toutefois, dans le cas d'une analyse de la vulnérabilité d'une ou pour un dimensionnement suivant cette technique, il est très important de considérer une la courbe de capacité dans son ensemble, gardant sa forme exacte entre les points A et B.

Cette méthode d'analyse non linéaire (G10) correspond à une approche pseudo statique simplifiée (c. f. annexe 2.1). La force sismique ne varie pas en temps, donc l'analyse n'a pas un caractère dynamique (G11). En même temps, on approxime le comportement du bâtiment au premier mode de vibration (G12). Pour simplifier, l'obtention des CC consiste, du point de vue technique, en deux changements de variables (c. f. annexe 2.1).

Dans le cadre du premier changement de variable, la force sismique (considérée au niveau supérieur du bâtiment) est transformée en accélération, en la divisant par le poids de la construction :

$$\vec{F} = M \times \vec{a} \quad 2.1$$

où :

M est la masse de la construction ;

\vec{a} est l'accélération imposée à la structure par le séisme.

Pour ce qui est du second changement de variable, le déplacement réel au niveau de la toiture est transformé en déplacement spectral, en le divisant par deux paramètres : un facteur de participation modale et un facteur lié à l'amplitude du premier mode de vibration.

$$S_d = \frac{u_n}{\Gamma_1 \times \emptyset_{1,n}} \quad 2.2$$

où:

u_n est le déplacement au niveau du toit ;

$\emptyset_{1,n}$ est l'amplitude du premier mode de vibration, au niveau n du toit ;

Γ_1 est un facteur de participation modale correspondant au premier mode de vibration (c. f. annexe 2.1).

Nous obtenons, à travers ces transformations, une courbe de capacité dont les coordonnées sont : en abscisse, le spectre du déplacement (S_d), appelé également le déplacement spectral ; en ordonnée, le spectre de l'accélération (S_a), appelé également accélération spectrale.

2.2 Description de l'approche utilisée

2.2.1 Classification en types standard de constructions

Afin d'obtenir *des courbes moyennes* par type de construction, nous avons distingué plusieurs classes standard de bâtiments. Deux types fondamentaux de structures ont été retenus : les bâtiments en acier et les bâtiments en béton armé. Pour ce dernier type, seules les structures de type « poutres – poteaux » ont été analysées.

Cet exercice ne représente qu'un exemple de développement de courbes moyennes de capacité, en prenant en compte un nombre limité et non exhaustif de typologies distinctes de bâtiments. Il est à noter que de très légères variations des propriétés des structures ou bien des facteurs de l'analyse engendrent des variations importantes dans les résultats. Ces courbes ne peuvent pas, par conséquent, être appliquées pour des analyses ponctuelles de bâtiments donnés.

Les structures en acier et en béton armé ont été différenciées en trois classes, en fonction de leurs hauteurs : bâtiments de moins de 5 étages, de 5 à 8 étages, et plus de 8 étages. Cette distinction est approximativement homogène avec la plupart des classifications existantes des modèles d'estimation de dommages sismiques. Ainsi, 6 classes simplificatrices de bâtiments standard ont été analysées (c. f. tableau 2.1). Du point de vue de la conception parasismique, pour les 6 catégories, il a été présumé l'existence d'un certain niveau de protection (paramètre pris en compte lors de la modélisation des structures).

Description structure	Acronyme
Bâtiments en acier de moins de 5 étages	A1
Bâtiments en acier, de 5 à 8 étages	A2
Bâtiments en acier de plus de 8 étages	A3
Bâtiments en béton armé de moins de 5 étages	B1
Bâtiments en béton armé, de 5 à 8 étages	B2
Bâtiments en béton armé de plus de 8 étages	B3

Tableau 2.1 Types de bâtiments utilisés pour le développement des courbes de capacité

Plusieurs typologies de bâtiments ont été testées pour chaque classe, afin d'obtenir des résultats moyens. Ainsi, pour la même classe (telle que A1, A2, ...) diverses configurations de structures ont été analysées, en variant les dimensions ainsi que le nombre d'étages. Le nombre de bâtiments réalisé pour chaque classe est présenté ci-dessous (c. f. tableau 2.2).

Type de bâtiments	Nombre de bâtiments différents testés
A1	24
A2	36
A3	65
B1	24
B2	36
B3	65

Tableau 2.2 Nombre de bâtiments testés par type de constructions

A titre d'exemple, nous présentons ci-dessous les différentes configurations analysées pour les bâtiments de type A1 et B1. Pour les autres types, celles-ci peuvent être retrouvées en annexe 2.3.

Ouvertures	Portée (m)	Etages
1	3	4
1	3	3
1	3	2
1	4	4
1	4	3
1	4	2
1	5	4
1	5	3
1	5	2
1	6	4
1	6	3
1	6	2
2	3	4
2	3	3
2	3	2

2	4	4
2	4	3
2	4	2
2	5	4
2	5	3
2	5	2
2	6	4
2	6	3
2	6	2

Tableau 2.3 Liste des configurations analysées pour les constructions de type A1 et B1

Quatre paramètres seront calculés afin de déterminer les courbes moyennes de capacité : les valeurs spectrales du déplacement et de l'accélération, correspondants aux points A et B (c. f. fig. 2.5). Les résultats obtenus seront présentés dans les paragraphes suivants.

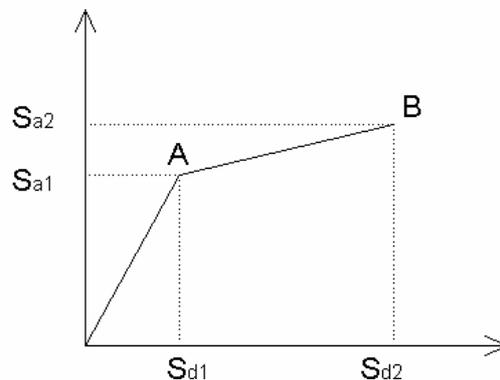


Figure 2.5 Les valeurs définissant la courbe de capacité

2.2.2 Description des paramètres utilisés

Dans cette étude, les CC ont été développées à travers une analyse directe, réalisée à l'aide du logiciel spécialisé Robot Millenium (c. f. annexe 2.1).

Plusieurs étapes de travail sont nécessaires pour le déroulement d'une telle application : la modélisation de la structure du bâtiment, la définition des charges agissantes sur lui, la définition des rotules plastiques, la définition du type d'analyse et enfin le choix des résultats souhaités et leur interprétation.

La modélisation du bâtiment représente le premier pas. Nous avons utilisée ici une analyse bidimensionnelle, malgré la capacité de modélisation en 3D du programme de calcul utilisé (c. f. fig.2.6).

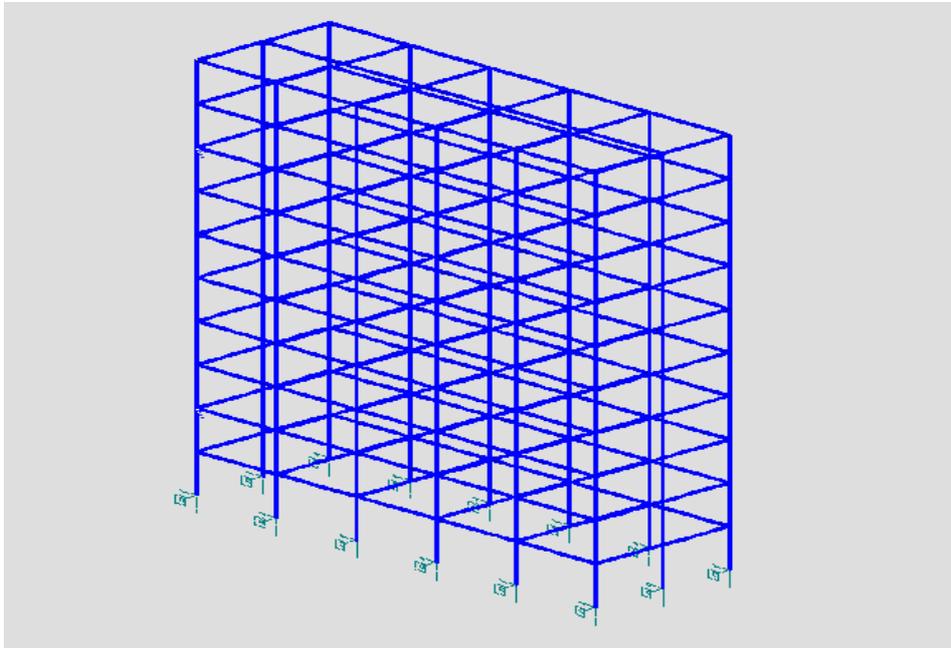


Figure 2.6 Modélisation en 3D de la structure d'un bâtiment avec le logiciel Robot Millenium

Le choix de ce type d'analyse a été fait en raison du caractère bidimensionnel des courbes de capacité. Elles représentent ici le comportement du bâtiment dans la direction la moins rigide, et non une moyenne. Il est habituel de considérer qu'un bâtiment présente généralement deux directions principales. La direction **la moins rigide** est supposée ici comme la plus défavorable, la plus vulnérable face à une action sismique. Pour simplifier, elle est généralement marquée par le côté le plus court du bâtiment, soit la direction OZ de l'exemple de ci-dessous (c. f. fig. 2.7).

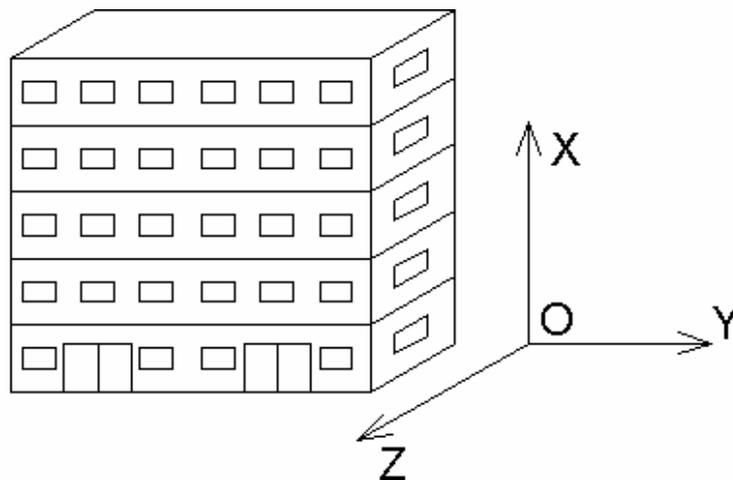


Figure 2.7 Le comportement du bâtiment face à une sollicitation de type sismique se manifeste suivant deux directions principales, OY et OZ

La structure se définit à travers un certain nombre de points (les nœuds) et de barres (les poteaux et les poutres). Chaque barre est caractérisée par une section, qui, d'un point de vue technique, assure la stabilité de l'édifice. Nous avons choisi, en fonction de la configuration de la structure, de sections standard d'éléments des bâtiments. A titre d'exemple, pour une structure à 3 étages et 2 ouvertures de 4m, nous avons utilisé une section de type HEA 300 pour les poteaux et IPE 180 pour les poutres.

La deuxième étape est représentée par la définition des forces agissant sur le bâti. L'analyse « pushover » est indépendante de toute autre force ; toutefois, le poids de la structure a été pris en compte afin de bien vérifier le dimensionnement de ses éléments. Deux types de charges gravitationnelles sont couramment utilisées dans le génie civil : une charge permanente³⁰, correspondant aux poids des éléments de la structure (murs, poteaux, etc...) et une charge d'exploitation, correspondant aux poids de personnes et des équipements présents dans le bâtiment³¹.

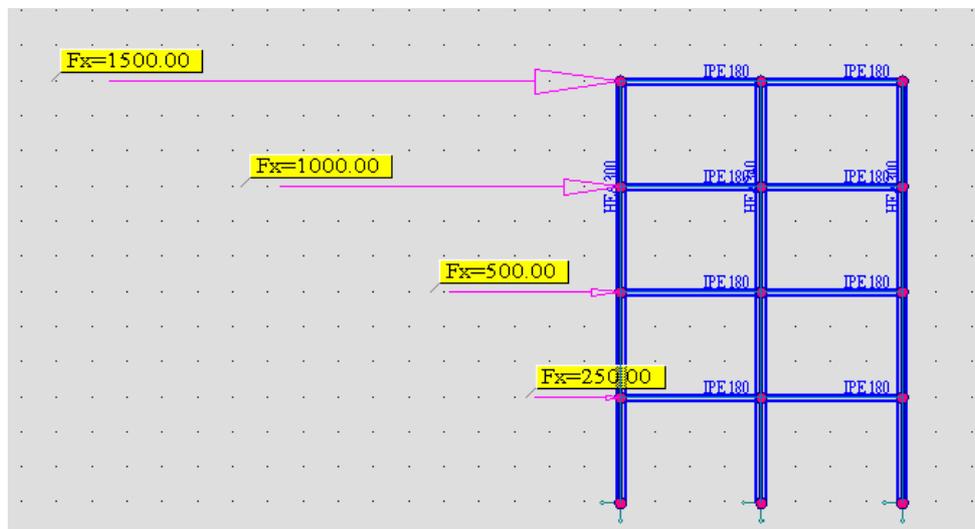


Figure 2.8 Définition d'une sollicitation de type sismique

Nous avons également introduit une légère sollicitation sismique, afin d'attribuer un certain caractère parasismique au comportement du bâtiment (fig. 2.8).

La troisième étape de l'application est représentée par la définition de « rotules plastiques ». Ces rotules plastiques sont des zones qui, sous une sollicitation quelconque, perdent leur capacité de résistance et deviennent une sorte d'articulation, permettant la rotation de l'élément (c. f. fig. 2.9). La rotule plastique définit en effet le comportement post-élastique de l'élément considéré, permettant la dissipation d'une quantité importante d'énergie avant la rupture totale de l'élément. Cette propriété de dissipation d'énergie est connue également sous le « ductilité » des matériaux (Bruneau et al, 1997 ; Goel et Chopra, 1991 ; Paulay et Priestley, 1992 ; Paret et al, 2002).

Le comportement global non-linéaire d'une structure de type « poutres - poteaux » est décrit donc par la formation des mécanismes de rotule plastique en un ou plusieurs de ses éléments.

³⁰ nous avons considéré 200 kg/ml

³¹ nous avons considéré 50kg/ml

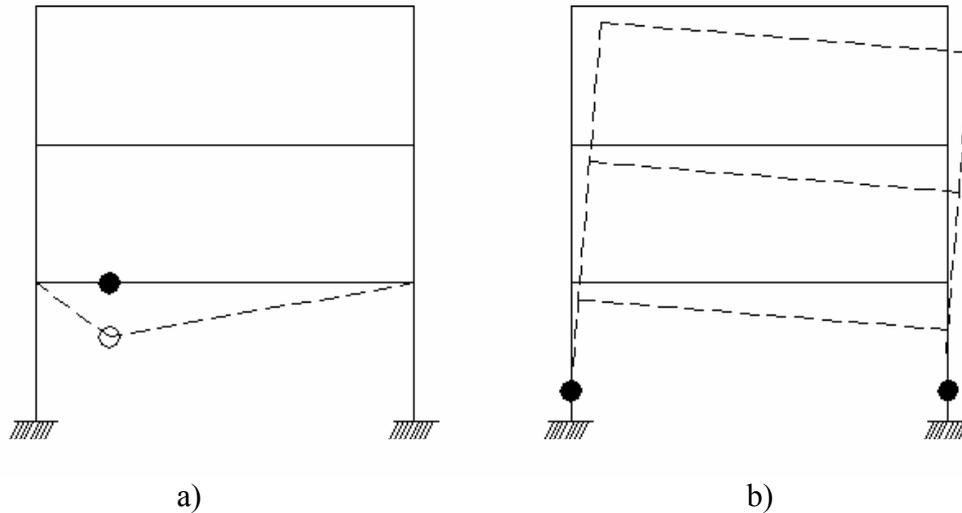


Figure 2.9 Exemple de rotules plastiques, formées sous une force de type sismique. a) formation d'une rotule au niveau de la poutre du premier étage. b) formation de deux rotules au niveau des poteaux au rez-de-chaussée.

Dans cette étude nous avons considéré que la formation des rotules apparaît toujours aux nœuds (c. f. fig. 2.10), où ce phénomène se localise généralement. Mais en réalité, ces rotules apparaissent une après l'autre, dans les points « faibles » de la structure, et la plastification se produit d'une manière progressive. Pour simplifier l'analyse, nous avons considéré que les rotules apparaissent instantanément dans ces nœuds ; toutefois, une analyse pas à pas serait nécessaire pour une analyse plus exacte.

Autres logiciels de calcul (tel que SAP 2000) estiment directement l'ordre de formation ainsi que la position des rotules qui apparaissent progressivement, en fonction des propriétés géométriques ainsi que de la résistance des éléments.

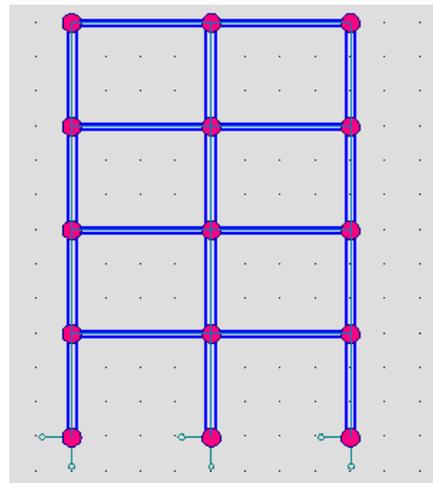


Figure 2.10 Définition des rotules plastiques, au niveaux des noeuds

Ces rotules plastiques sont caractérisées par certains paramètres qui définissent la capacité de déplacement ou de rotation de la rotule, avant sa rupture. Pour les structures en acier, nous avons utilisé les paramètres par défaut du logiciel, qui sont issus des deux normes de constructions (ATC 40, 1996 ; FEMA 273, 1997). Nous avons considéré donc une rotule de type “moment – rotation” (c. f. fig 2.11, a). Pour ce qui est des constructions en béton, en absence des coefficients par défaut, nous avons utilisé une rotule de même type “moment –

rotation” sur la base des paramètres proposés par les mêmes documents (c. f. fig. 2.11, b). Les valeurs caractérisant les rotules plastique définissent le mécanisme global de ruine de la structure, et donc représentent des éléments fondamentaux de la modélisation non linéaire. Il faut noter que le comportement de type rotules plastique caractérise uniquement les structures de type “poutres – poteaux”. Pour d’autres types de structures, la dissipation de l’énergie se produit d’une manière diffuse dans toute la structure (Bisch et Coin, 2002; Raguenaud et al, 2003; Combescure et al, 2003), et donc l’analyse pushover ne passera plus par la modélisation à travers les rotules plastiques.

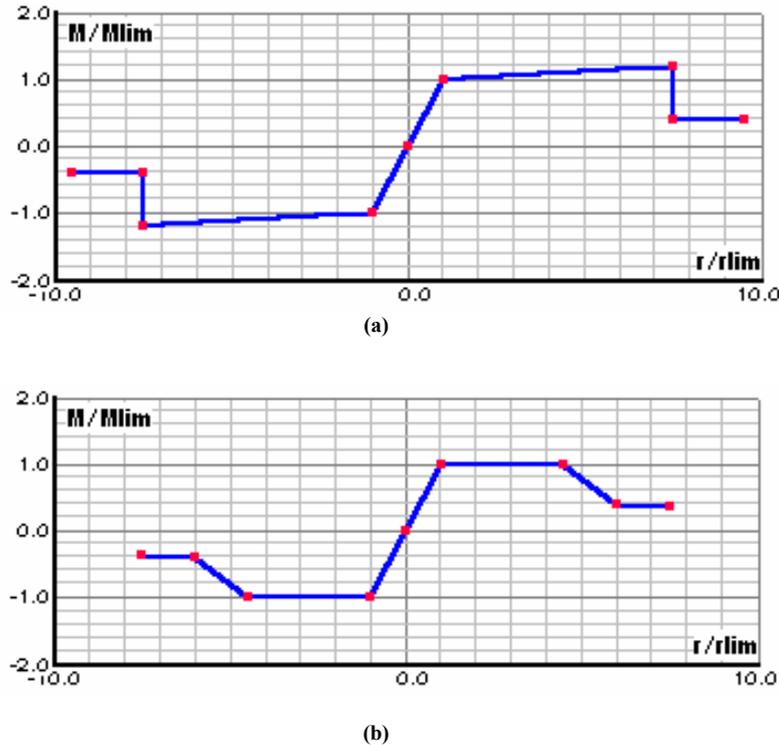


Figure 2. 11 Définition de la rotules plastique de type « moment – rotation » pour les structures en acier (a) et béton (b).

Une rotule plastique est une fonction des caractéristiques des éléments correspondants (résistance du matériau, section, ...). Elle change donc pour chaque type d’élément et de structure. Nous avons introduit toutefois une autre simplification, en considérant le même type de rotule pour l’ensemble des structures en acier et respectivement pour les structures en béton. En réalité, les rotules plastique ne peuvent pas être de même type, et une analyse détaillée en fonction de chaque type d’élément et de structure est requise pour un résultat exact.

En raison de ces multiples simplifications, nos résultats représentent uniquement un exemple d’application de la méthode, et doivent être retenus avec réserve.

La valeur du chargement de type “pushover” imposé ensuite à la structure n’a pas d’importance, car d’un point de vue théorique la CC décrit le comportement de la structure face à toute sollicitation horizontale. Nous avons vérifié également en pratique cet aspect, la variation de la force horizontale ne modifiant pas la CC obtenue.

Après la modélisation, la définition des charges et des paramètres des rotules plastiques, la structure est prête à l’analyse. Quelques paramètres sont requis par ailleurs pour la définition du type de calcul souhaité (dans notre cas, « pushover »), tel que le nœud piloté dans l’analyse, le nœud d’application de la sollicitation pushover ou encore le déplacement

maximum accepté du nœud choisi³². Ces paramètres constituent la quatrième étape de l'analyse.

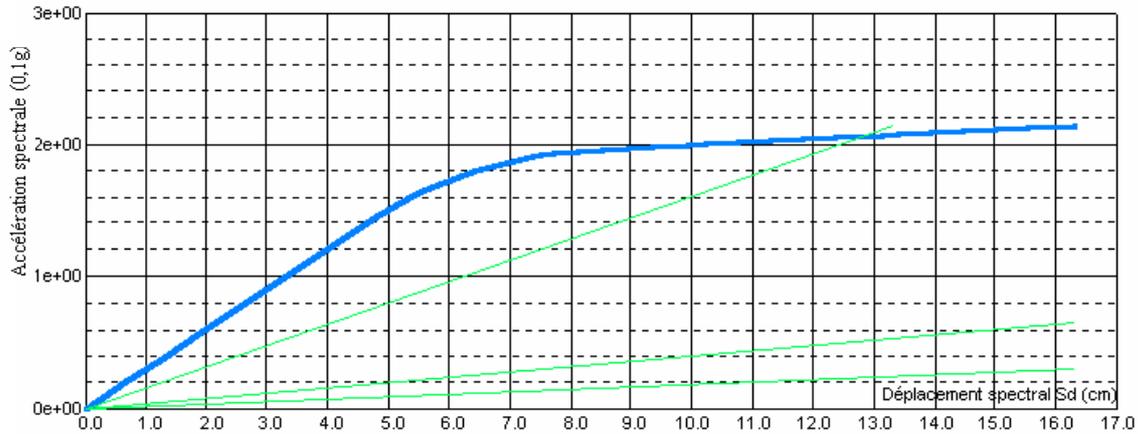


Figure 2.12 Exemple de courbe de capacité standard. Les lignes en vert correspondent aux valeurs des périodes constantes (0,5s, 1s et 1,5s).

La cinquième étape de la modélisation est représentée par le choix des résultats et leur interprétation. Nous allons vérifier tout d'abord la stabilité de la structure, afin de nous assurer que sa modélisation est correcte, notamment du point de vue de la section attribuée à chaque élément.

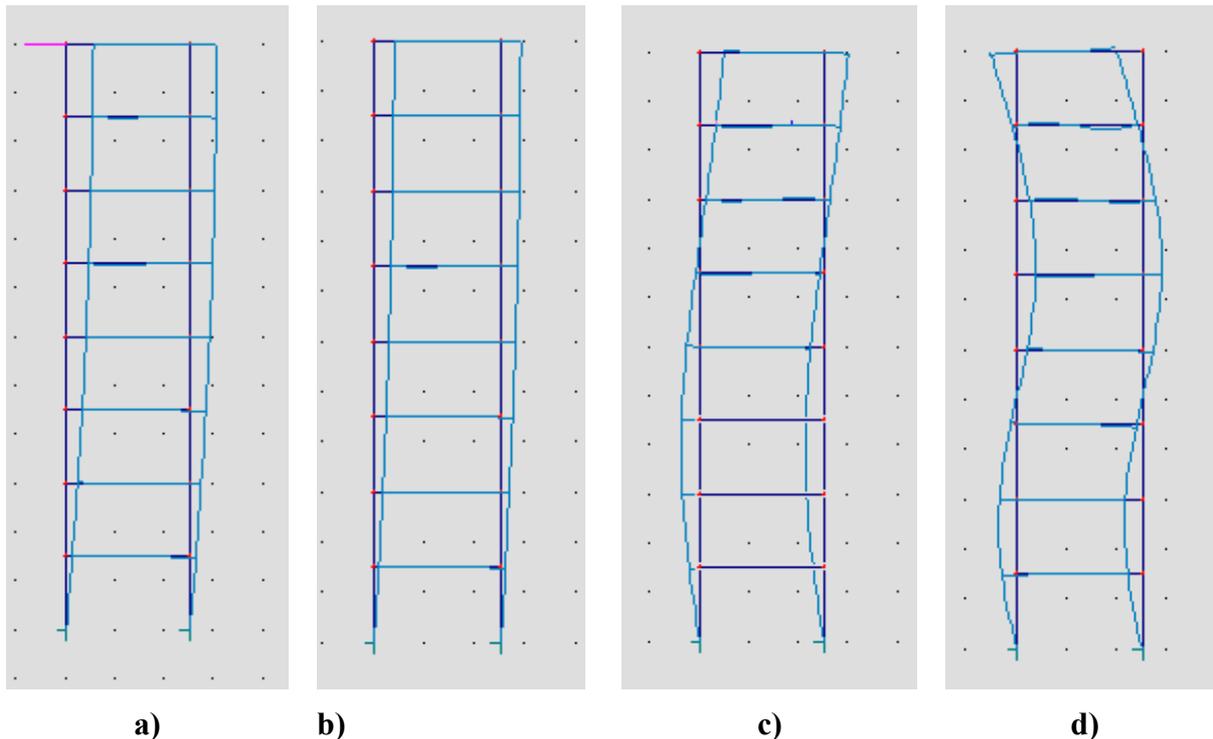


Figure 2.13 Déformées de la structure correspondante (a) à une force de type « pushover » ; (b) au premier mode de vibration ; (c) au deuxième mode de vibration et (d) au troisième mode de vibration

³² Nous avons défini ici 25 cm ; mais ce paramètre est spécifique au logiciel de calcul, car l'analyse pushover ne dépend pas en théorie du déplacement maximum.

Après cette validation, nous pouvons visualiser le résultat qui nous intéresse, la courbe de capacité (c. f. fig. 2.12) en coordonnées spectrales S_d et S_d . Nous pouvons ainsi observer la similitude entre la déformée sous la force pushover et celle correspondante au premier mode de vibration .

2.3 Résultats

Les résultats obtenus sont les valeurs moyennes ainsi que les écarts type pour S_{d1} , S_{d2} , S_{a1} et S_{a2} . Ces moyennes ont été réalisées sur 24 bâtiments de moins de 5 étages, sur 36 pour ceux entre 5 et 8 étages, et sur 64 pour ceux de plus de 8 étages.

		Bâtiments à moins de 5 étages (A1)	Bâtiments entre 5 et 8 étages (A2)	Bâtiments à plus de 8 étages (A3)
S_{d1} (cm)	Moyenne	5,11	7,56	9,05
	Ecart - type	0,8	0,51	1,21
S_{d2} (cm)	Moyenne	15,29	17,04	19,53
	Ecart - type	1,22	1,04	0,78
S_{a1} (g)	Moyenne	0,12	0,10	0,05
	Ecart - type	0,02	0,02	0,005
S_{a2} (g)	Moyenne	0,19	0,14	0,065
	Ecart - type	0,03	0,03	0,01

Tableau 2.4 Valeurs moyennes et écart types des points définissant les courbes de capacité des bâtiments en acier.

		Bâtiments à moins de 5 étages (B1)	Bâtiments entre 5 et 8 étages (B2)	Bâtiments à plus de 8 étages (B3)
S_{d1} (cm)	Moyenne	4,20	6,50	7,59
	Ecart - type	0,60	0,54	0,47
S_{d2} (cm)	Moyenne	12,28	15,03	17,91
	Ecart - type	0,66	1,00	0,69
S_{a1} (g)	Moyenne	0,1	0,06	0,3
	Ecart - type	0,01	0,007	0,004
S_{a2} (g)	Moyenne	0,16	0,11	0,05
	Ecart - type	0,007	0,02	0,006

Tableau 2.5 Valeurs moyennes et écart types des points définissant les courbes de capacité des bâtiments en béton.

Les résultats sont présentés ci-dessus, pour les constructions en acier (c. f. tableau 2.4) et en béton armé (c. f. tableau 2.5).

Nous pouvons observer, pour ces deux types de bâtiment, une différence importante de comportement apportée par le nombre d'étages. Ainsi, le déplacement spectral ultime (S_{d2}) augmente avec la hauteur, pour les constructions en acier comme en béton. Il en est de même pour le déplacement du domaine élastique (S_{d1}). Ceci est expliqué par le fait que le déplacement au niveau du toit est proportionnel aux déplacements de chaque étage, et par conséquent au nombre d'étages.

Un exemple de courbe de capacité pour l'une des structures analysées se retrouve en annexe 2.2. Les résultats complets, pour tous les types de structures analysées, se trouvent dans l'annexe 2.3.

La différence entre les trois types de construction en acier comme en béton armé est mieux exprimé à travers une représentation graphique (c. f. fig. 2.14 et 2.15). Les écarts-types ont été figurés en annexe 2.4.

Nous pouvons remarquer en même temps des périodes très importantes correspondantes aux couples S_d et S_a , avec des valeurs supérieures à 1s pour les bâtiments de moins de 4 étages (c. f. annexe 2.3)³³.

En raison de ce facteur ainsi que des incertitudes liées aux caractéristiques des rotules plastiques, nous recommandons que ces résultats soient considérés avec précaution.

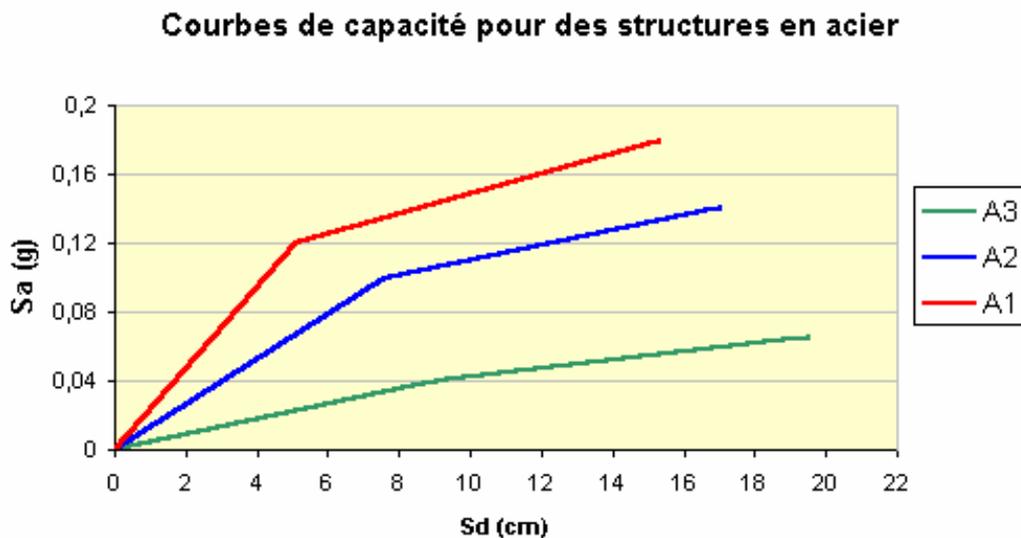


Figure 2.14 Courbes de capacité pour les structures en acier

³³ Ces valeurs sont relativement anormales pour des bâtiments courants ; nous n'avons pas réussi à déterminer ici leurs sources

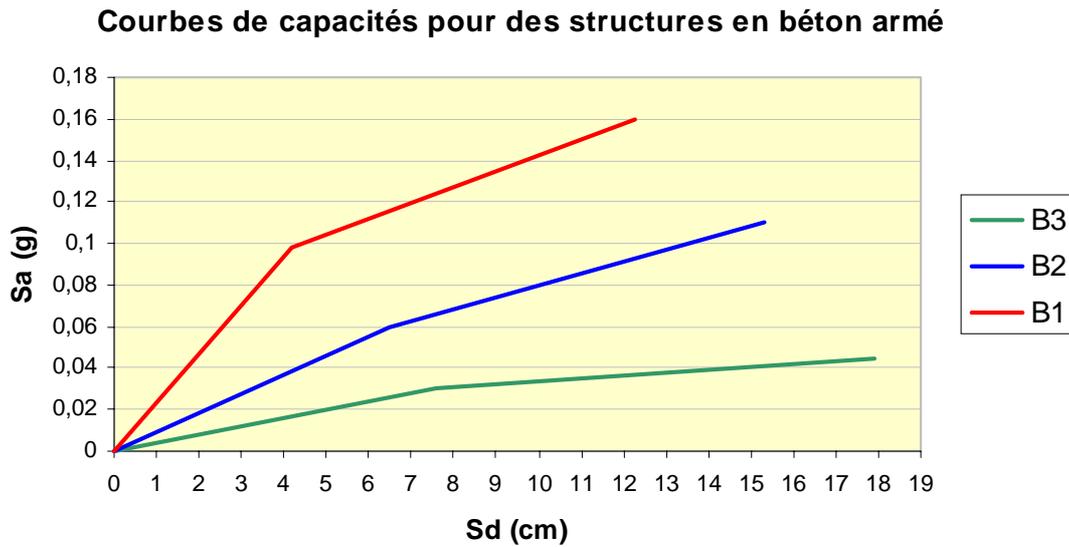


Figure 2.15 Courbes de capacité pour les structures en béton armé

2.4 Analyse comparative des résultats

Une analyse comparative des résultats est réalisée ensuite par rapport à d'autres courbes de capacité, notamment par rapport à celles issues de HAZUSTM. Les principales différences ou points communs sont examinés d'un point de vue théorique ainsi que pratique, à travers les conséquences induites sur leur application.

2.4.1 Analyse par rapport au HAZUS

L'approche HAZUS représente la référence internationale concernant l'estimation de dommages à travers des courbes de capacité (voir §1.5.1). Une comparaison avec celle-ci nous permet notamment de valider d'une manière générale nos résultats, ainsi que d'analyser les conséquences des éventuelles différences.

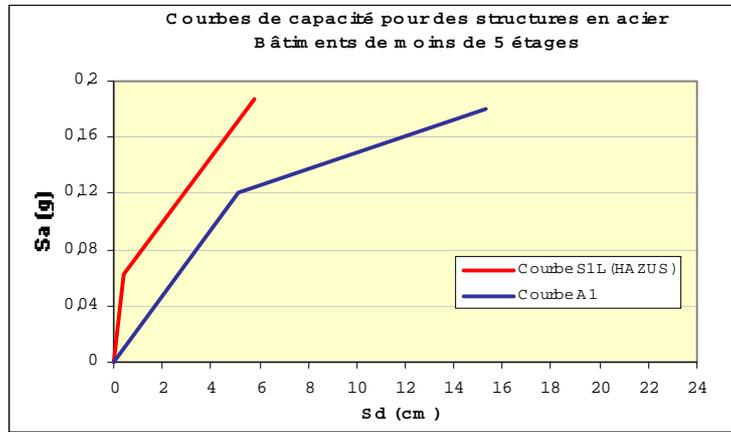
Tout d'abord nous rappelons brièvement les classes de bâtiments de HAZUS considérées afin de pouvoir comparer les résultats de notre développement.

Nous avons pris, pour les constructions en béton, l'équivalence avec le type C1. Dans cette catégorie entrent les structures « poteaux – poutres », avec un caractère parasismique pouvant varier entre un faible et un très fort niveau de résistance. Les murs extérieurs peuvent être en tout matériel (maçonnerie, béton préfabriqué ou autres éléments). Les constructions récentes de ce type présentent un comportement ductile, qui permet des grandes déformations sans pour autant entraîner le collapse de l'édifice.

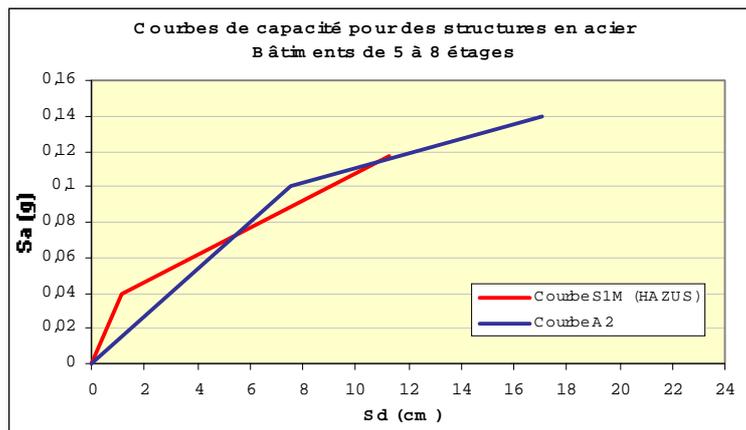
Ce type C1 est différencié en 3 sous-classes, en fonction du nombre d'étages : C1L, C1M et C1H, pour des bâtiments de moins de 1 à 3 étages, de 4 à 7 étages et de plus de 7 étages. La classe C1L est assimilée ainsi avec B1, C1M avec B2 et enfin C1H avec B3.

En ce concerne les bâtiments en acier, nous avons considéré la catégorie S1 de HAZUSTM comme équivalente au type A, définissant des cadres en acier avec une certaine résistance

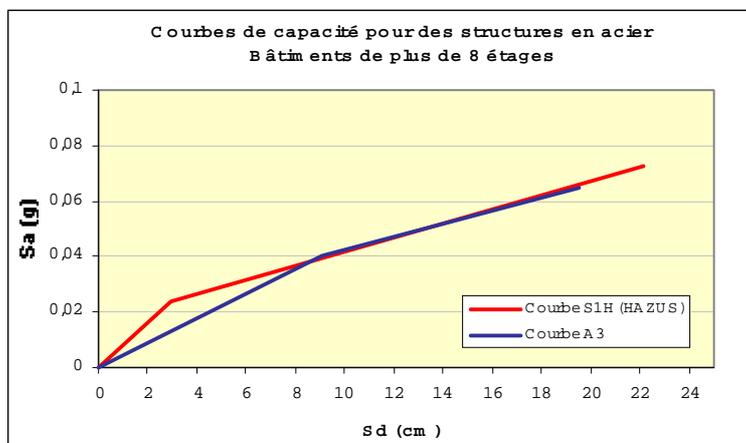
parasismique. La même distinction que les édifices en béton armé est réalisée par rapport à la hauteur : la classe S1L est assimilée à A1, S1M à A2 et S1H à A3. Les valeurs définissant les CC issues de HAZUSTM pour ces catégories de structures dont données en annexe 2.5. Leur représentation graphique met en valeur les différences entre les deux approches, pour les constructions en acier (c. f. fig. 2.16) ainsi que pour les constructions en béton armé (c. f. fig. 2.17).



a)



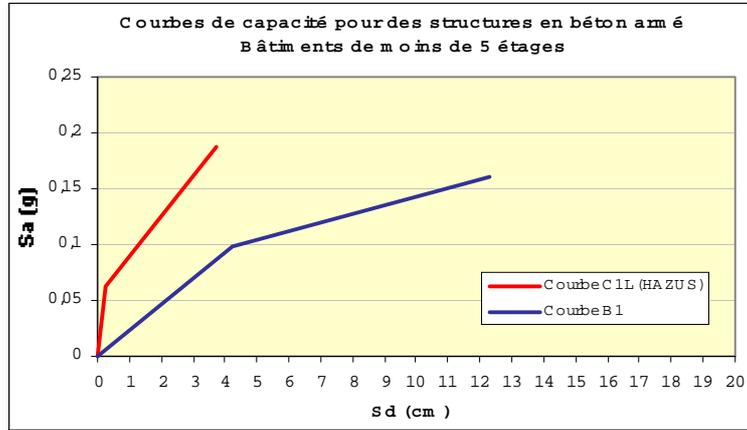
b)



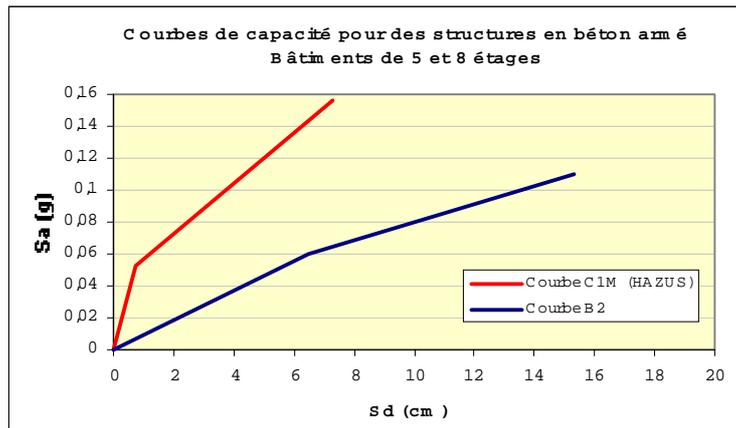
c)

Figure 2. 16 Comparaison de courbes de capacité des structures en acier avec l'approche HAZUS pour les bâtiments a) de moins de 5 étages, b) de 5 à 8 étages et c) de plus de 8 étages.

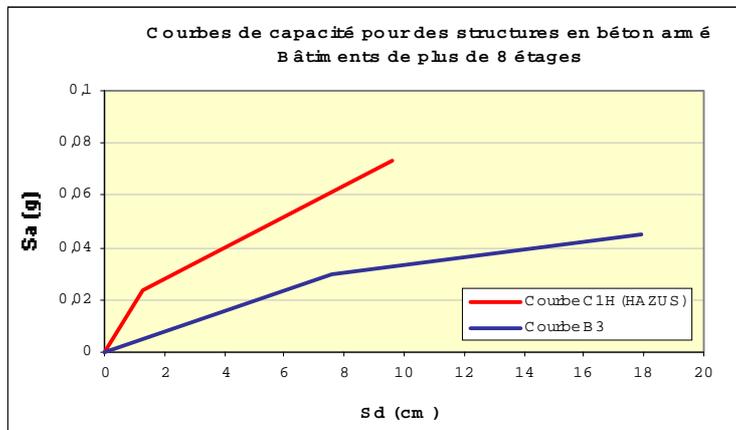
Considérant les bâtiments en acier, nous pouvons remarquer une différence importante concernant le point S_{d1} ; la valeur obtenue à travers notre approche étant 2 à 3 fois supérieure. A l'exception des bâtiments de moins de 5 étages, une légère différence apparaît quant au point S_{d2} . Concernant le point S_{a1} , on retrouve également des valeurs supérieures à celles issues de HAZUSTM. Une certaine concordance peut être remarquée quant au point S_{a2} .



a)



b)



c)

Figure 2. 17 Comparaison des courbes de capacité des structures en béton armé avec l'approche HAZUS pour les bâtiments) de moins de 5 étages, b) de 5 à 8 étages et c) de plus de 8 étages.

La même tendance générale peut être remarquée (c. f. fig. 2.17), considérant les structures en béton armé, entre les 3 types de bâtiments. Ainsi, on observe des valeurs issues de notre approche de l'ordre de 2 à 3 fois plus élevées pour les points S_{d1} et S_{d2} ; une légère différence sur le point S_{a1} ; enfin, quant au point S_{a2} , contrairement aux structures en acier, des valeurs plus basses.

Globalement, nous pouvons observer un aspect général relativement similaire entre les courbes issues des deux approches (c. f. fig. 2.18).

Les différences entre nos courbes et celle issues de HAZUSTM peuvent être dues à plusieurs facteurs, dont nous citons notamment les caractéristiques géométriques différentes des bâtiments nord-américains et les paramètres des rotules plastiques utilisés. Le nombre des bâtiments pris en compte pour réalisation de la moyenne et de l'écart type peut avoir également une certaine influence, la précision augmentant avec le nombre des cas analysés. Une autre source de ces différences pourrait être donnée par les incertitudes liées aux caractéristiques des rotules plastiques, qui définissent le mécanisme de rupture des structures.

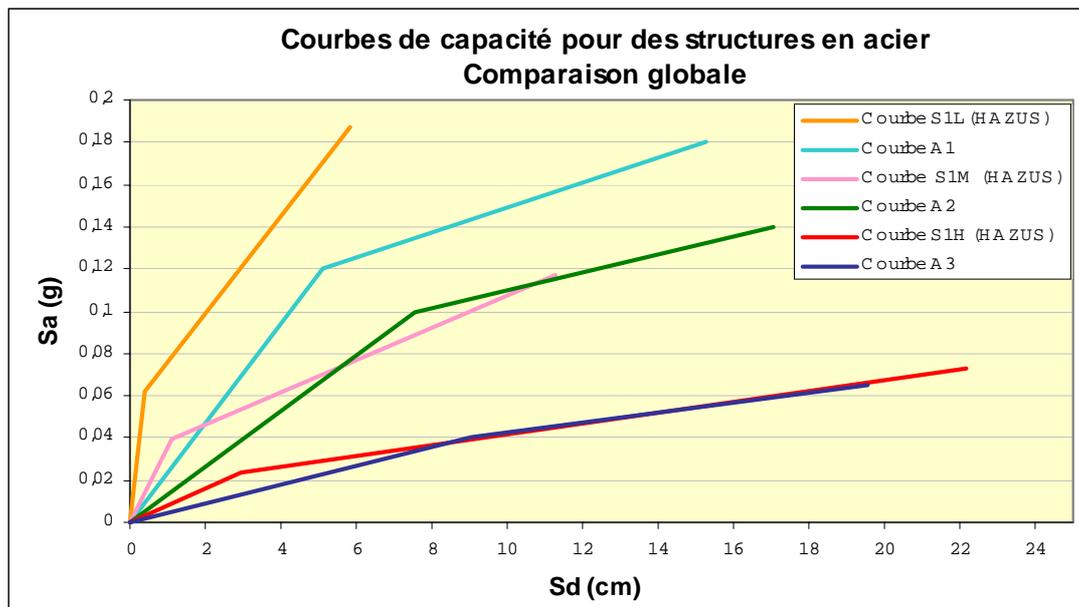


Figure 2. 18 Comparaison globale des courbes de capacité des structures en acier

Mais d'un autre point de vue, les différences qu'on a pu remarquer, exceptées les valeurs du point S_{a2} , n'entraînent pas de variations importantes pour une évaluation de dommages, tel que nous allons le voir dans le chapitre 4. Des différences peuvent être induites notamment par le point S_{a2} , car des valeurs plus petites de l'accélération engendrent un point de demande dont le déplacement sera plus important, et donc le dommage plus sévère.

Ce comportement est susceptible de se produire notamment pour les constructions en béton armé (c. f. fig. 2.19).

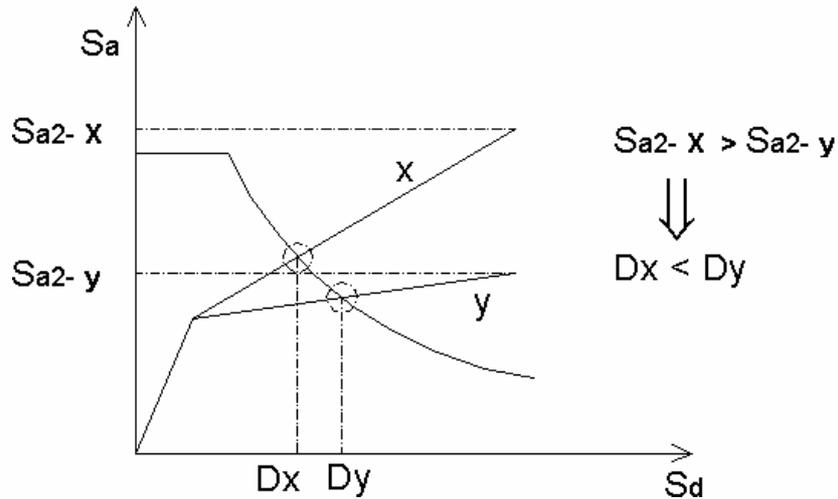


Figure 2. 19 Comparaison du déplacement du point de demande pour des coordonnées Sa_2 différentes

2.4.2 Autre comparaison

En raison du caractère privé de la plupart des modèles d'estimation de dommages sismiques utilisant les courbes de capacité (contrairement à l'utilisation de l'échelle EMS 98), très peu de CC développées pour la caractérisation générale d'un type de bâti sont aujourd'hui disponibles. Nous avons trouvé ainsi un seul exemple des CC, à l'exception de HAZUSTM. Il s'agit de CC développées par la société AIR, spécialisée dans la modélisation du risque, dans le cadre de leur approche ACMTM (Kishi et al, 2001).

Ainsi, des CC pour plusieurs types de bâtiments en acier de 5 étages ont été proposées (c. f. fig. 2.20).

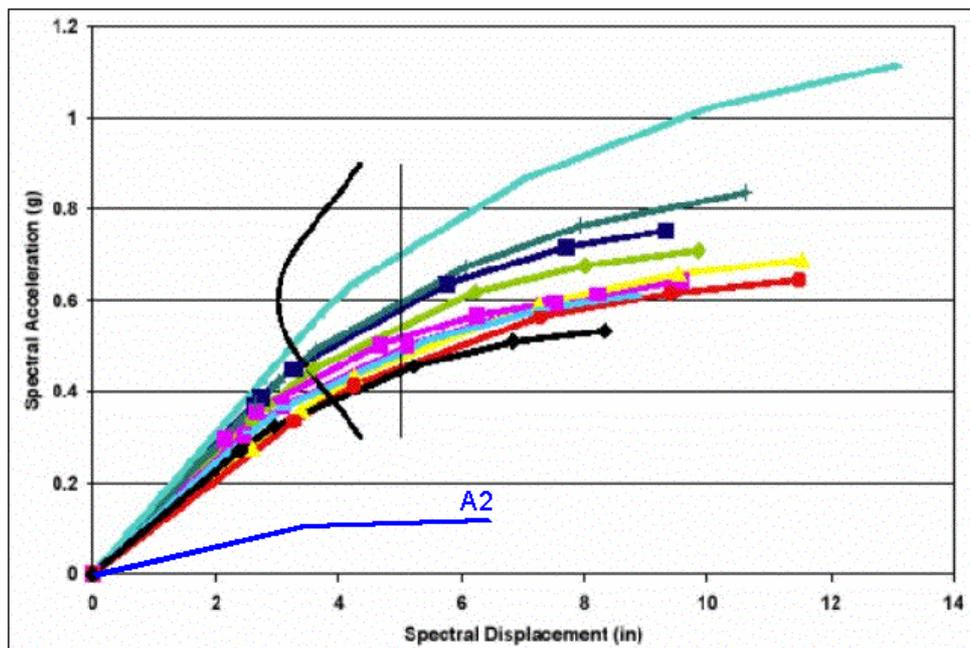


Figure 2. 20 Courbes de capacité développées par AIR, pour différents types de bâtiments en acier de 5 étages (source : Kishi et al, 2001).

On peut observer des valeurs relativement semblables en ce qui concerne les points S_d1 (et donc supérieure à celles de HAZUSTM) ; il n'en est pas de même pour les points S_d2 , S_a1 et S_a2 , qui présentent des valeurs sensiblement plus élevées. Les accélérations spectrales arrivent ainsi jusqu'aux valeurs de 1g, alors que dans notre approche ces valeurs ne dépassent pas 0,2g. Nous ne pouvons pas toutefois analyser ces différences importantes, en raison de l'absence d'informations relatives à l'obtention de CC proposées par AIR.

2.5 Synthèse des résultats obtenus

Les CC obtenues représentent donc une moyenne des comportements simplifiés des constructions de type « poutres – poteaux » en acier et béton armé face à une sollicitation de type sismique. Elles ont été développées dans le but d'évaluation *a priori* de dommages aux bâtiments, à grande ou moyenne échelle, au niveau d'une agglomération urbaine. Plusieurs simplifications ont été considérées lors ces modélisations, afin de pouvoir considérer plus de deux cents structures différentes ; les résultats doivent par conséquent être retenus avec précaution.

Nous avons synthétisé les principaux résultats obtenus dans le tableau 2.6 afin de pouvoir disposer d'une vue générale sur ce chapitre.

Position des courbes de capacité dans un modèle d'estimation de dommages	Les courbes de capacité sont intégrées dans le module de définition de la sollicitation sismique. Elle permettent le calcul de la demande, en termes de déplacement.
Typologies standard de bâtiments considérés	Nous avons considéré uniquement les bâtiments de type « poutres – poteaux », en acier (A) et béton armé (B). Une distinction a été faite en fonction de la hauteur des constructions : immeuble de moins de 5 étages (A1, B1), de 5 à 8 étages (A2, B2) et de plus de 8 étages (A3, B3).
Hypothèses de modélisation	Plusieurs hypothèses ont été faites pour l'analyse de type pushover. Ainsi, on suppose notamment que : - l'endommagement se produit suivant l'axe de faible rigidité ; - le premier mode de vibration est la réponse prédominante de la structure ; - le comportement post-élastique des structures est défini à travers des rotules plastiques de type moment – rotation ; - les rotules plastiques se forment au niveau de tous les nœuds de la structures.
Résultats	Les résultats obtenus montrent une variation importante de la courbe de capacité avec la hauteur du bâtiment. Le déplacement spectral maximum varie entre 15 et 19 cm, pour les structures en acier, et entre 12 et 18 cm pour celles en béton armé. L'accélération spectrale maximum varie entre 0,07 et 0,19g pour les structures en acier, et entre 0,05 et 0,16g pour celles en béton armé.
Comparaison avec d'autres courbes de capacité	Une comparaison a été réalisée dans un premier temps avec HAZUS TM . Des différences importantes ont été constatées notamment concernant les valeurs des déplacements correspondants aux points caractéristiques. Une deuxième comparaison a été réalisée avec des courbes de capacités proposées par Kishi et al (2001) ; des différences notables apparaissent concernant notamment les valeurs de l'accélération.

Commentaires	<p>Les points caractéristiques des CC correspondent à des périodes de vibrations relativement longues, de plus de 1s pour les bâtiments de moins de 5 étages.</p> <p>Pour d'autres types de structures, la modélisation du comportement non linéaire à l'aide des rotules plastiques n'est plus possible.</p> <p>Malgré ces limitations, l'analyse pushover nous paraît une méthode adaptée pour l'estimation a priori de dommages.</p> <p>La validation de ces courbes devrait être réalisée à travers la modélisation d'un nombre plus important de structures.</p>
--------------	---

Tableau 2.6 Synthèse des principaux résultats obtenus

2.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons montré comment on pouvait développer des CC pour plusieurs types standard de bâtiments, en utilisant des paramètres de calcul spécifiques aux structures. Les courbes obtenues représentent, pour chaque type, une moyenne entre plusieurs configurations de bâtiments ; elles caractérisent ainsi d'une manière générale le comportement d'un bâtiment donné face à une sollicitation de type sismique. En raison de ces aspects, elles sont très utiles pour l'estimation *a priori* de dommages.

A travers les CC développées ici, nous proposons une alternative aux courbes issues de HAZUSTM. Si elles présentent généralement le même aspect, nous avons pu observer toutefois certaines différences, notamment par rapport aux valeurs caractéristiques de ces courbes. Ces différences peuvent être dues notamment aux paramètres de modélisation utilisés, des légères variations de ceux-ci entraînant de fortes différences dans une CC.

En raison des multiples incertitudes liées au développement des CC, nos résultats doivent être considérés avec réserve. Les paramètres utilisées notamment pour la définition des rotules plastiques, qui influent considérablement sur le comportement post-élastique de structures, restent à être testés et validés lors des prochaines études.

Afin de valider ces résultats, le développement des CC à travers des moyennes réalisées sur un nombre beaucoup plus important de constructions serait nécessaire. Il reste également intéressant de produire des CC caractérisant d'autres types standard de bâti, notamment ceux en maçonnerie, adobe ou encore les anciens bâtiments collectifs.

Les CC développées ici serviront par la suite de notre étude à l'estimation *ex ante* de dommages consécutifs à des scénarii de séismes. Afin de mettre en évidence les conséquences des différences présentées par rapport à celles issues de HAZUSTM, une estimation de dommages sur la base de ces dernières sera également réalisée.

CHAPITRE 3. ESTIMATION DE DOMMAGES CONSECUTIFS AUX SEISMES. APPLICATION DES COURBES DE CAPACITE.

Dans ce chapitre nous allons appliquer les courbes de capacité (CC) que nous avons mise au point dans notre recherche (c. f. § 2) à l'estimation *ex-ante* de dommages physiques directs au bâti consécutifs aux séismes. Les résultats seront comparés dans un premier temps avec une évaluation des dégâts utilisant les CC issues de HAZUSTM (c. f. chapitre 1.2.1) et dans un deuxième temps avec des résultats fournis par d'autres études déjà réalisées basées sur des approches différentes. Deux sites ont été choisis pour cette étude : Barcelone et Nice.

3.1 Introduction

Différentes méthodes d'estimation a priori de dégâts sont disponibles aujourd'hui, permettant ainsi la réalisation des scénarii de catastrophes, très utiles d'un point de vue humanitaire, social ou économique pour la gestion d'une éventuelle crise,. Généralement les méthodes existantes sont basées sur l'application de l'échelle EMS 98, qui associe un niveau d'endommagement à un niveau d'intensité. Mais l'intensité macrosismique exprime les conséquences du séisme, et non ses caractéristiques physiques. Comme nous l'avons vu lors des chapitres précédents, contrairement à ce type d'approche, l'utilisation des CC pour l'estimation de l'état de dommages prend directement en compte les paramètres liés au mouvement du sol, tels que l'accélération et le déplacement. Par ailleurs, nous avons pu constater (c. f. §2) une forte dépendance du comportement parasismique avec la hauteur des constructions, aspect non considéré par l'EMS 98. Ainsi, l'application des CC pour les différents types de bâtiments proposés dans notre recherche permet une évaluation de dommage d'une manière différente, en analysant des points souvent négligés dans la méthode classique.

En raison du développement relativement récent (1997) de la méthode permettant l'évaluation globale de dommages à travers les CC, son application dans le contexte européen est aujourd'hui assez peu répandue. Le projet européen RISK-UE (c. f. chapitre 1.2.4) se propose d'adapter cette approche aux spécificités européennes, dans tous les aspects sismiques, tels que les caractéristiques de bâtiments, le zonage sismique, etc.... Mais les résultats ne sont, pour le moment, pas communiqués publiquement, le projet n'étant pas achevé. Notre approche, développée parallèlement à ce projet tout en restant d'une envergure inférieure, s'inscrit néanmoins parmi les premières tentatives de ce type au niveau européen.

Dans le contexte français de l'étude du risque sismique, il existe bien sûr des études d'estimation de pertes consécutives à un éventuel tremblement de terre. Elles sont réalisées notamment sur des sites à haute sismicité (par rapport au contexte français) tels que Nice, Pointe-à-Pitre ou Fort de France (c. f. chapitre 1.2.2). L'application d'un modèle radicalement différent permet soit de valider ces estimations, soit de mettre en évidence les éventuels points faibles des approches utilisées, et par conséquent de signaler des orientations pour de futures améliorations. C'est pour ces raisons que nous avons choisi la ville de Nice comme l'un des sites test de l'application de l'approche que nous proposons.

Le diagramme de ci-dessous (c. f. fig. 3.1) indique la position de ce chapitre dans le cadre de l'organisation générale d'un modèle d'estimation de dommages. Suite à l'application d'un

scénario de sollicitation sismique, défini à l'aide des courbes de capacité, nous allons obtenir ici, à travers des courbes d'endommagement, une évaluation *a priori* de dommages physiques directs aux bâtiments.

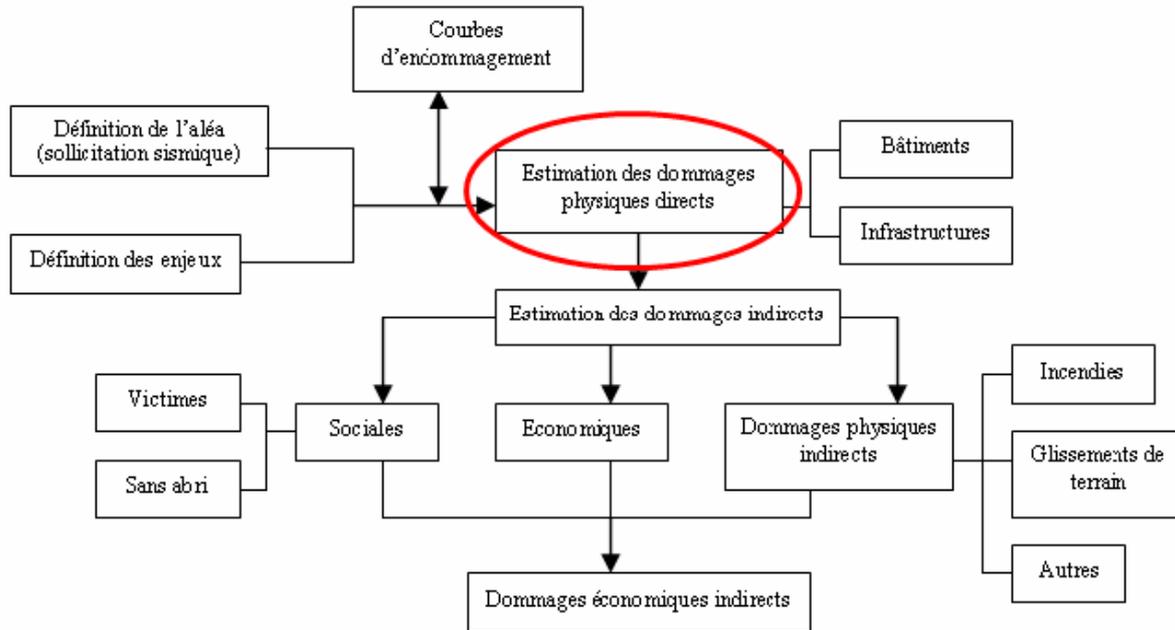


Figure 3.1 Position du module relatif à l'évaluation de dommages directs dans le cadre d'un MEDS

D'un point de vue théorique, les MEDS doivent être validés par le recensement de dégâts suite aux séismes réels. Mais, dans la pratique, les missions en retour d'expérience faites habituellement après un important événement sismique (AFPS, 1997 ; 1999a ; 1999b ; 2001a ; 2001b) s'intéressent souvent à d'autres aspects, tels que l'étude de la sismicité de la zone, les paramètres du mouvement du sol ou bien le comportement de bâtiments, par l'observation des causes de leur destruction (souvent spécifiques à chaque construction). Ainsi, malgré l'existence d'une sismicité élevée en Europe et la présence de zones à enjeux importants, il n'existe presque pas de cartographie de dommages. La cartographie de dommages ne se réalise ainsi que très rarement, malgré la sismicité élevée sur des régions à enjeux importants tels que l'Italie, la Grèce ou encore la Turquie. Une des rares exceptions a été le séisme de Kocaeli, en Turquie (1999) où des missions privées en retour d'expérience ont réalisé une cartographie de dommages sur quelques sites fortement touchés (RMS, 1999 ; AIR, 1999). Il devient donc très difficile (voire impossible) de valider aujourd'hui un MEDS par rapport à un séisme déjà survenu, en raison de ce manque d'informations concernant la quantification et la cartographie de dégâts. Pour obtenir une validation incluant l'aspect spatial, il faudrait encore que l'inventaire de destructions soit cartographié. De plus, cet inventaire devrait être rapporté au recensement de bâtiments d'avant le séisme, pour pouvoir disposer des valeurs statistiques de dommages. Dans le domaine de la recherche privée, certains MEDS sont calibrés après chaque séisme, mais ces rapports ne sont pas accessibles au domaine public dans ce contexte.

En raison de la difficulté de validation par rapport à la réalité, le choix des sites considérés pour l'application de notre estimation de dommages est basé notamment sur la possibilité de comparaison des résultats avec des études antérieures. Nous avons considéré ainsi dans un

premier temps la ville de Barcelone, site sur lequel plusieurs études ont déjà été réalisées. Dans un deuxième temps, nous avons choisi d'étudier le cas de la ville de Nice, choix justifié également par la forte concentration d'enjeux socio-économique.

L'absence d'inventaires fiables de constructions implique des estimations de dommages à caractère qualitatif. Les résultats sont exprimés ainsi en pourcentage de bâtiments (ou autres éléments) endommagés, sans pouvoir proposer des valeurs exactes. A titre indicatif, les résultats sont généralement du type suivant : « 40% de bâtiments de classe X présenteraient un niveau d'endommagement D2 ». De même, la composante spatiale des évaluations de dégâts reste également très peu exploitée, du fait de l'absence des données cartographiques précises sur les constructions.

Ces problèmes sont dus à une difficulté réelle d'accéder à un recensement des classes parasismiques du bâti. Si les indications sur ces typologies peuvent être apportées par la donnée de l'année de construction, mais l'information reste néanmoins à un niveau de fiabilité assez relatif. Dans le futur, l'utilisation de l'imagerie satellite peut s'avérer très prometteuse (c. f. §4). L'utilisation des images à très haute résolution, même si pour l'instant elle reste à un stade expérimental, semble pouvoir offrir des nouvelles solutions concernant la réalisation d'inventaires de tous types d'enjeux, intégrés de plus directement dans un SIG (Eguchi et al, 2001).

3.2 Méthodologie utilisée

L'approche utilisée pour l'estimation de dommages repose sur la méthode du spectre de capacité, définie par quatre étapes principales (c. f. fig. 3.2) : la définition de la courbe de capacité, la définition du scénario sismique, l'obtention du point de demande et l'application des courbes de fragilité. Cette méthode, basée sur l'utilisation de courbes de capacité, a été développée en même temps que ces dernières (Mahaney, 1993 ; Paret, 1996 ; Chopra et Goel, 1999 & 2001 ; Fajfar, 1999 & 2000 ; Comartin et al, 2000) pour estimer l'endommagement consécutif à un séisme.

a) la définition de la courbe de capacité

La courbe de capacité a un rôle déterminant dans l'estimation de dommages, car elle décrit le comportement du bâtiment face à toute sollicitation sismique. Elle conditionne ainsi, en fonction de la demande imposée au bâti, le niveau d'endommagement.

Nous allons utiliser les CC que nous avons développées (c. f. § 2) dans un premier temps, puis celles issues de HAZUSTM dans un deuxième temps, afin de comparer les résultats induits par l'application de chaque type de courbe.

b) la définition du scénario sismique

La définition du scénario sismique peut être représentée par un signal accélérométrique enregistré durant un séisme, par la sollicitation de référence proposée dans la norme de construction ou encore par un événement avec une probabilité d'occurrence choisie, conformément au zonage sismique. Dans les approches utilisées traditionnellement, la demande sismique est considérée à travers une magnitude potentielle, transformée ensuite en intensité. La méthode du spectre de capacité, que nous allons utiliser ici, considère comme sollicitation donnée le spectre sismique (G4). Pour notre application à la ville de Barcelone, nous allons utiliser un spectre sismique de réponse spécifique à cette ville (ICC, 98) ;

concernant l'application à la ville de Nice, le spectre de référence donné par la norme française parasismique PS 92.

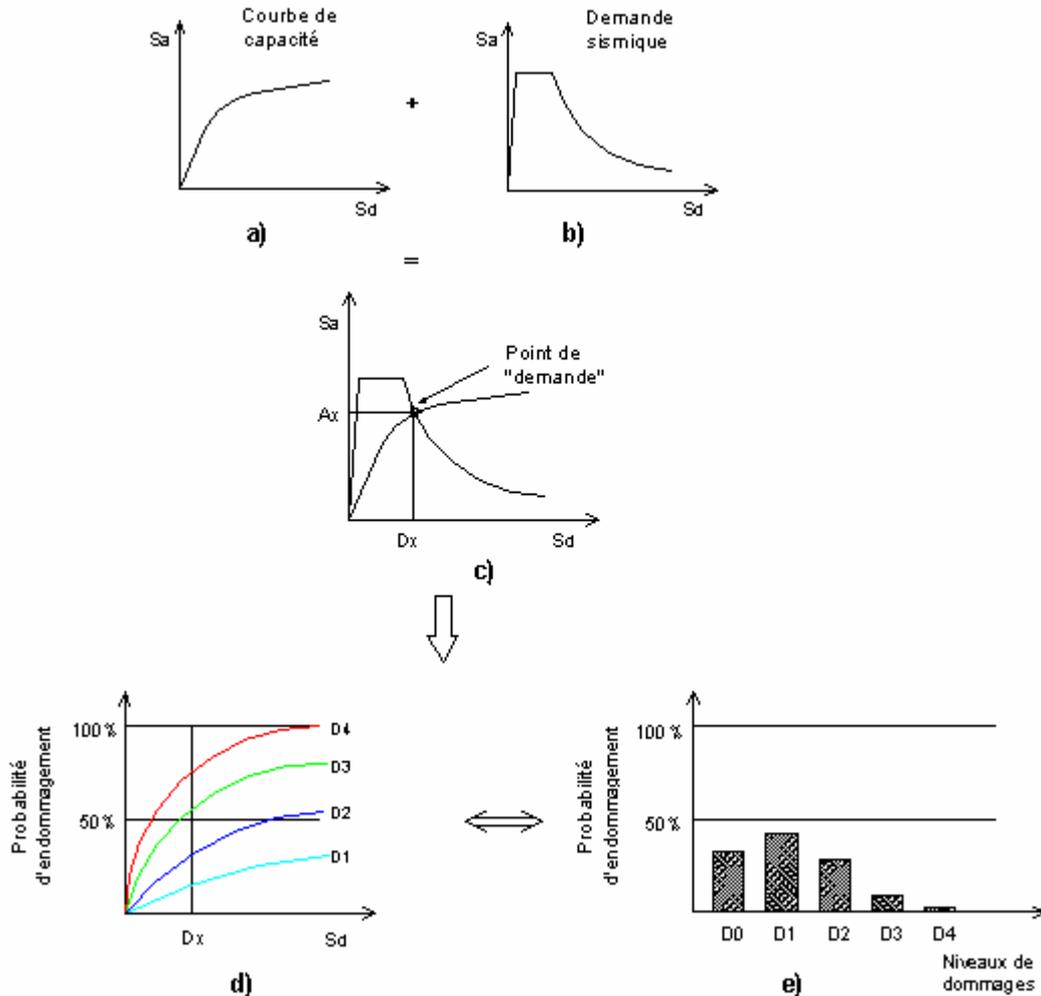


Figure 3.2 Schéma conceptuel d'estimation de dommages utilisant la méthode du spectre de capacité. Le croisement de la courbe de capacité (a) avec la demande sismique (b) permet l'obtention du point de demande (c). A partir des courbes d'endommagement (d), qui ont en entrée les coordonnées du point de demande, on obtient les probabilités d'endommagement pour chaque niveau de dommages (e).

c) l'obtention du point de demande

Nous allons déterminer ensuite la position du « point de demande », défini par le croisement de la courbe de capacité avec la sollicitation sismique (c. f. §1). Nous rappelons que sur la courbe de capacité, la position de ce point détermine un certain niveau de dommage (c. f. fig. 3.3). Ainsi, plusieurs niveaux d'endommagement peuvent être distingués à travers cette représentation graphique. Le premier niveau correspond au comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception parasismique habituel. Il indique par conséquent un état d'endommagement superficiel (ou bien de non endommagement). Le deuxième niveau d'endommagement correspond à un niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais toutefois un endommagement mineur est susceptible de se développer. Le troisième niveau représente un état d'endommagement avancé, la stabilité de la structure étant en danger. Au delà de ce niveau, la structure est susceptible de s'effondrer, ne présentant plus de capacité de résistance.

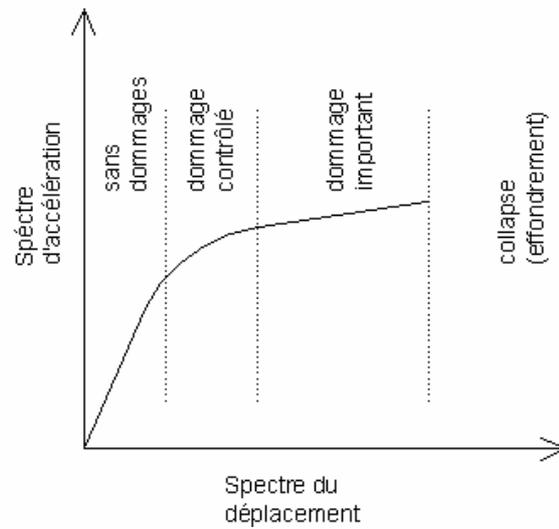


Figure 3.3 Signification physique de la courbe de capacité (l'état d'endommagement du bâtiment).

d) l'application des courbes de fragilité

Nous allons ensuite appliquer des courbes de fragilité (ou d'endommagement), afin de calculer la probabilité d'endommagement associée à différents niveaux de dégâts.

Ces courbes sont des relations issues de HAZUSTM (c. f. § 1.5.1), développées essentiellement sur la base d'extrapolations des données liées aux dommages observés, sur dires d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire. Le paramètre d'entrée n'est plus l'intensité macrosismique, mais des caractéristiques directement liées au mouvement du sol, telles que le déplacement ou l'accélération spectrale.

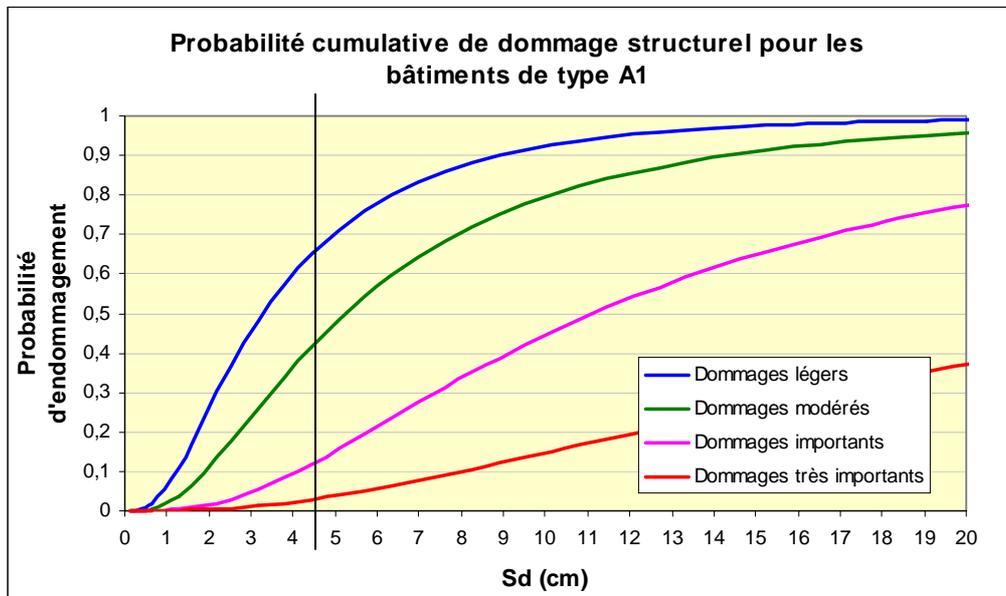


Figure 3.4 Aspect général des courbes d'endommagement

A partir des coordonnées du point de demande, (telle que par exemple un déplacement de 4,5 cm), nous allons obtenir la probabilité d'endommagement d'un type de bâtiments donné, en

Le séisme survenu en 1428 dans la région de Gérone, près de la frontière franco – espagnole, avait provoqué la destruction de villages entiers, des églises et des châteaux, ainsi que la mort de quelques centaines de personnes. L'ensemble des municipalités de Catalogne serait atteint, dans le cas de la répétition d'une telle catastrophe, par des intensités sismiques au moins égales à 5. Les dommages engendrés aujourd'hui par un scénario semblable ont été estimés à environ 23000 bâtiments détruits, 135000 personnes restées sans abri et à des pertes économiques directes d'environ 5 millions d'euros (Gonzalez et al, 2001).

Du point de vue des enjeux socio-économiques, Barcelone représente la deuxième ville d'Espagne en importance, et la capitale économique et administrative de la Catalogne, avec 1,5 millions d'habitants et plus de 10 millions de touristes par an. Tout au long de son histoire, elle s'est constituée en un centre industriel, commercial et de services, en fournissant près de 67% du Produit Intérieur Brut de la Catalogne. Important centre d'affaires, la bourse de Barcelone, avec un volume de transaction d'environ 350 millions d'euros, joue un rôle majeur dans l'économie du pays³⁴. La ville de Barcelone correspond par conséquent à un centre important, pour lequel un éventuel événement sismique pourrait engendrer des conséquences très graves.

3.3.1 Choix de l'action sismique

De même que pour l'application que nous avons réalisée sur Nice, le scénario sismique est défini directement en fonction du mouvement du sol, à travers le spectre sismique de réponse. Ce spectre a été pris en concordance avec celui proposé dans le rapport issu du projet européen EUROSEISMOD (ICC,1998) comme caractéristique pour le centre de la ville de Barcelone, pour des sols de type intermédiaire (c. f. fig. 3.6).

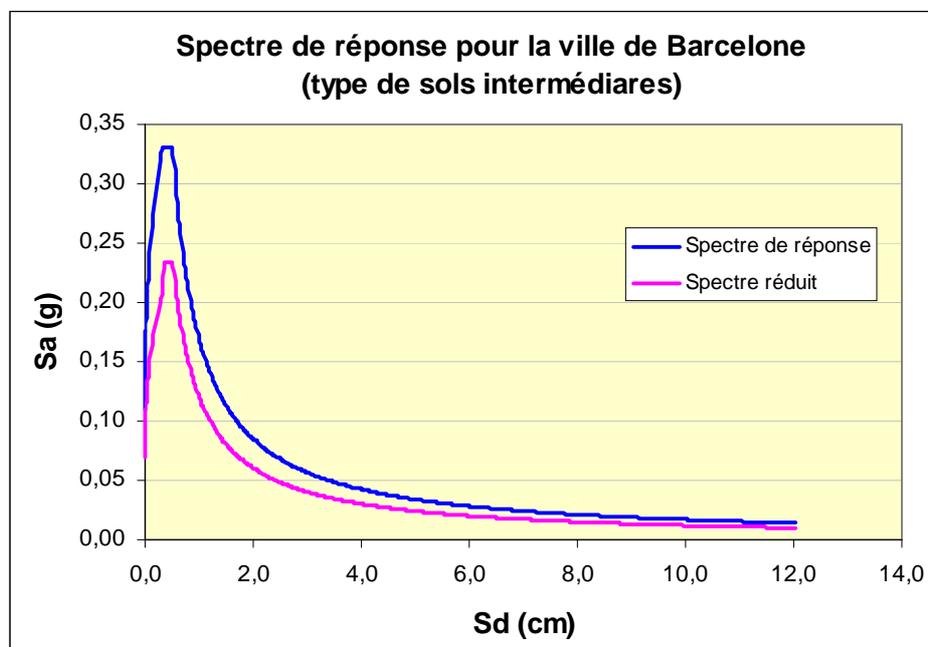


Figure 3.6 Spectre de réponse caractéristique pour Barcelone, réduit pour un amortissement effectif de 16%, correspondant aux structures de type A1.

³⁴ Source de données : Anuario Estadístico de la Ciudad de Barcelona, 2002

Il a été dérivé d'une accélération maximale de 0,11g, scénario qui correspond à une intensité de VI (MSK). D'un point de vue probabiliste, cette sollicitation sismique est associée à une période de retour d'environ 500 ans (soit 10% de probabilité de dépassement de cette valeur sur 50 ans).

Une réduction de ce spectre suivant l'indice d'amortissement proposé dans la norme française parasismique PS 92 (1994) a été réalisée pour prendre en compte la capacité de dissipation de l'énergie sismique, en appliquant la formule suivante:

$$\rho = \left[\frac{5}{\zeta} \right]^{0,4} \quad 3.1$$

où ρ = l'indice d'amortissement
et ζ = l'amortissement effectif.

Le calcul de l'amortissement effectif a été réalisé selon les procédures ATC 40 (1997). Cette valeur diffère en fonction du type de structure, dépendant notamment des propriétés du comportement post élastique des bâtiments. Les courbes de capacité nous ont permis le calcul de cet indice pour chaque type des structures analysées (c. f. annexe 3.1). Nous avons considéré pour l'estimation de dommages les catégories de bâtiments présentées lors du développement des CC (c. f. § 2).

3.3.2 Calcul du point de demande

Premièrement nous allons rappeler les six classes standard de constructions définies lors de la réalisation des courbes de capacité. Nous avons distingué les constructions en acier et celles en béton armé de type « voile », différenciées ensuite en fonction de leurs hauteurs (c. f. tableau 3.1).

Type du bâti	Acronyme
Bâtiments en acier de moins de 5 étages	A1
Bâtiments en acier, de 5 à 8 étages	A2
Bâtiments en acier de plus de 8 étages	A3
Bâtiments en béton armé de moins de 5 étages	B1
Bâtiments en béton armé, de 5 à 8 étages	B2
Bâtiments en béton armé de plus de 8 étages	B3

Tableau 3.1 Rappel des types standard de bâti utilisés pour l'estimation de dommages.

Nous avons calculé les coordonnées des points de demande spécifiques à chaque type de bâti, à travers la superposition de la sollicitation sismique (présentée ci-dessus) et des courbes de capacité correspondantes, issues du développement réalisé dans le chapitre 2. A titre d'exemple, ci-dessous l'obtention du point de demande pour les constructions de type A1 (c. f. fig. 3.7).

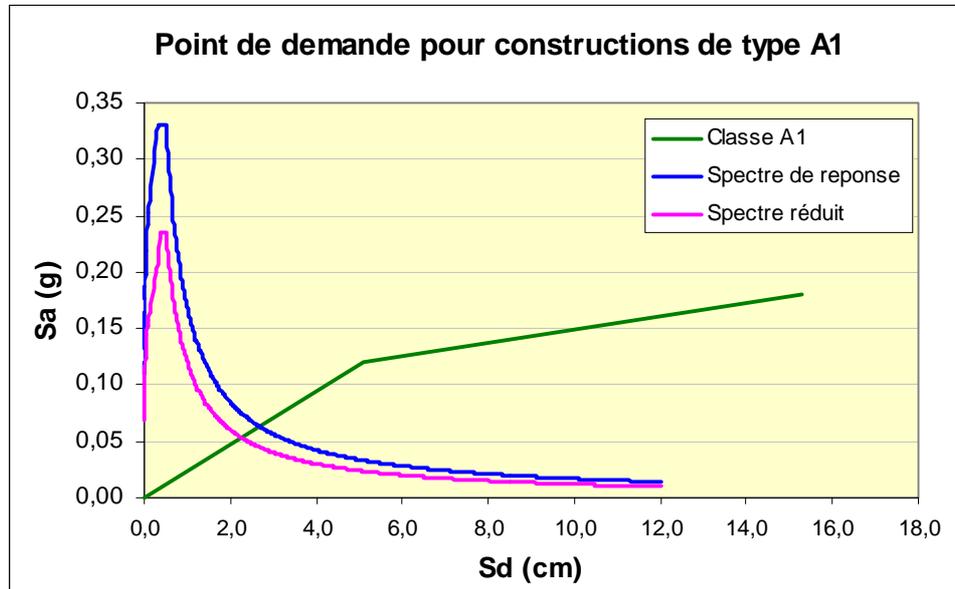


Figure 3.7 Obtention du point de demande pour les constructions de type A1 pour le cas de Barcelone

Les coordonnées de l'ensemble des points de demande sont groupées dans le tableau suivant (c. f. tableau 3.2).

Type de bâtiments	S_d (cm)	S_a (g)
A1	2,4	0,05
A2	3,26	0,04
A3	5,02	0,03
B1	2,42	0,05
B2	3,94	0,04
B3	6,22	0,02

Tableau 3.2 Coordonnées des points de demande pour chaque type de structure

3.3.3 Application des courbes d'endommagement

L'application des courbes d'endommagement représente la dernière étape de l'estimation de dommages. Celles-ci, telles que présentées auparavant (c. f. chapitre 3.2), relient l'action sismique à plusieurs niveaux d'endommagement, à travers les coordonnées du point de

demande. Le déplacement spectral nous indiquera ainsi la probabilité d'atteindre un certain niveau de dommage.

Dans cette étude nous avons utilisé les courbes d'endommagement issues de HAZUSTM (c. f. chapitre 1.2.1), définies pour 4 niveaux de dommage : faibles, modérés, importants et très importants. Ces niveaux sont présentés en détail pour chaque type de structure utilisée, pour les dommages structurels ainsi que non structurels.

Nous allons réaliser notre estimation de dommages concernant uniquement les dégâts structurels, car ceux-ci entraînent directement la ruine des bâtiments. Afin de présenter les niveaux d'endommagement qui correspondent à nos types de bâti, nous avons du faire une équivalence entre nos classes et celles proposée par HAZUSTM (c. f. annexe 1.2.1). Ainsi, le type A (A1, A2 et A3), représenté dans notre étude par des constructions en acier, avec un certain niveau parasismique, a été assimilé avec le type S1 de HAZUS, correspondant à des structures en portiques métalliques ayant également une protection parasismique ; le type B (B1, B2 et B3), représenté dans notre étude par les structures en béton armé de type poutres – poteaux, a été associé avec la classe C1 de HAZUS, correspondant à des structures en portiques en béton armé (les deux présentant une protection parasismique). Nous présentons ci-dessous les différents niveaux de dommages structurels pour ces deux catégories de constructions (c. f. tableau 3.3) :

Type de structure	Niveau de dommage	Description des caractéristiques du niveau de dommage
A (bâti en acier)	D0	Sans dommage
	D1	Dommages légers. Déformations mineures dans les nœuds de la structure. Fissures minces dans les soudures.
	D2	Dommages modérés. Déformations importantes dans quelques nœuds; fissures importantes dans quelques soudures.
	D3	Dommages importants. La plupart des nœuds ont dépassés la limite élastique, présentant des déformations permanentes. Des éléments de la structure peuvent se trouver dans un état de ruine partielle.
	D4	Dommages très importants. La plupart des éléments n'assurent plus la stabilité de la structure ; le bâtiment est dans un état de ruine.
B	D0	Sans dommage
	D1	Dommages légers. Des fissures minces apparaissent dans quelques poutres ou poteaux.
	D2	Dommages modérés. La plupart des poutres et poteaux présentent des fissures. Quelques éléments ont atteint leur limite élastique.
	D3	Dommages importants. Quelques éléments ont atteint leur capacité ultime de résistance, étant en ruine partielle. L'armature de résistance dans certains éléments est endommagée, déformée ou cassée.
	D4	Dommages très importants. La plupart des éléments n'assurent plus la stabilité de la structure ; le bâtiment est dans un état de ruine.

Tableau 3.3 Niveaux d'endommagement structurel

Les fonctions d'endommagement sont représentées par des courbes calculant la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage, pour une valeur donnée du déplacement spectral. Cette courbe est modélisée à travers une distribution normale cumulée du logarithme du déplacement spectral.

Pour le niveau de dommage ds et pour un déplacement spectral S_d donné, la probabilité d'endommagement est exprimée (NIBS, 1997) à travers la formule 3.2 :

$$P[ds/S_d] = \Phi(\beta_{ds}, S_{d,ds}) \quad 3.2$$

Où

$P(ds/S_d)$ est la probabilité d'obtenir un niveau d'endommagement ds pour un déplacement spectral S_d ;

Φ est la distribution normale cumulée ;

$S_{d,ds}$ est le logarithme de la valeur moyenne du déplacement d pour le niveau d'endommagement ds

et β_{ds} est le logarithme de l'écart type du déplacement pour le niveau d'endommagement ds .

La formule exacte de la distribution normale cumulée ainsi que de ses paramètres se retrouve en annexe 3.2, ainsi que les valeurs que nous avons utilisées, telles que proposées par HAZUSTM (NIBS, 1997). A titre d'exemple, pour les bâtiments de type A1 nous obtenons les courbes d'endommagement structurel suivantes (c. f. fig. 3.8) :

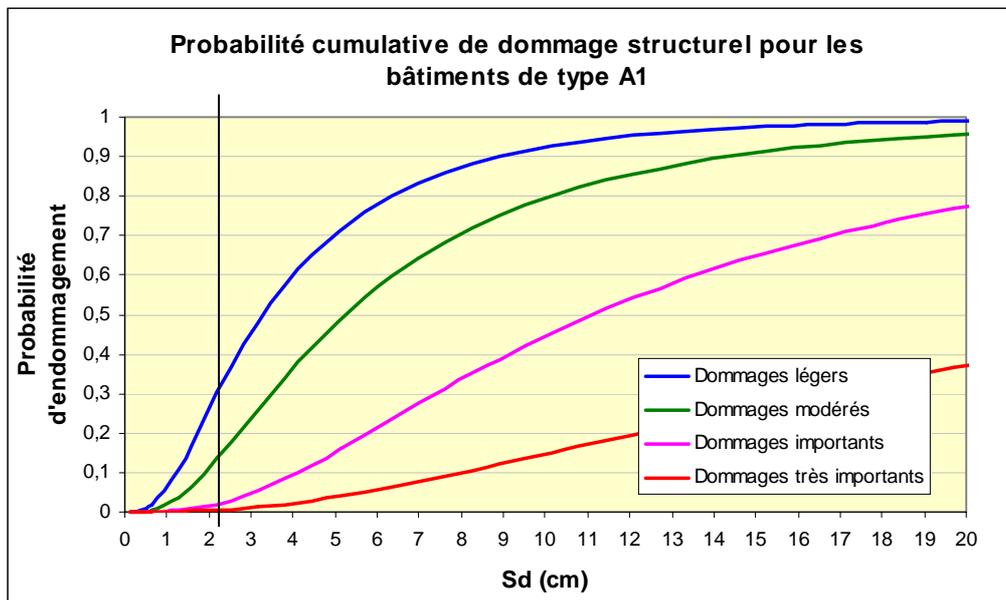


Figure 3.8 Courbes d'endommagement structurel pour les structures de type A1 pour le cas de Barcelone

Avec un déplacement spectral de 2,4 cm (correspondant au déplacement du point de demande pour le type A1), nous obtenons que les constructions de type A1, par exemple, ne présentent pas de dégâts dans 66% des cas; présentent des dommages légers dans 18% de cas; de dommages modérés dans 14% de cas et des dommages importants dans 2% de cas.

3.3.4 Estimation de dommages

Les résultats obtenus correspondent à des pourcentages d'endommagement structurel, en fonction de chaque niveau de dommages (c. f. tableau 3.4). Les constructions de type B1, par exemple, ne présentent pas de dégâts dans 75% des cas; présentent des dommages légers dans 14% de cas; des dommages modérés dans 10% de cas et des dommages importants dans 1% de cas.

Type de structure	D0	D1	D2	D3	D4
A1	66%	18%	14%	2%	0%
A2	77%	11%	8%	1%	0%
A3	72%	17%	10%	1%	0%
B1	75%	14%	10%	1%	0%
B2	48%	24%	22%	5%	1%
B3	43%	24%	30%	2%	1%
Moyenne	63,5	18,5%	15,7	2%	0,3

Tableau 3.4 Estimation de dommages structurels, par type de construction

Les pourcentages d'endommagement structurel sont représentés graphiquement afin de faciliter leur interprétation en fonction du type de construction (c. f. fig. 3.9 et 3.10).

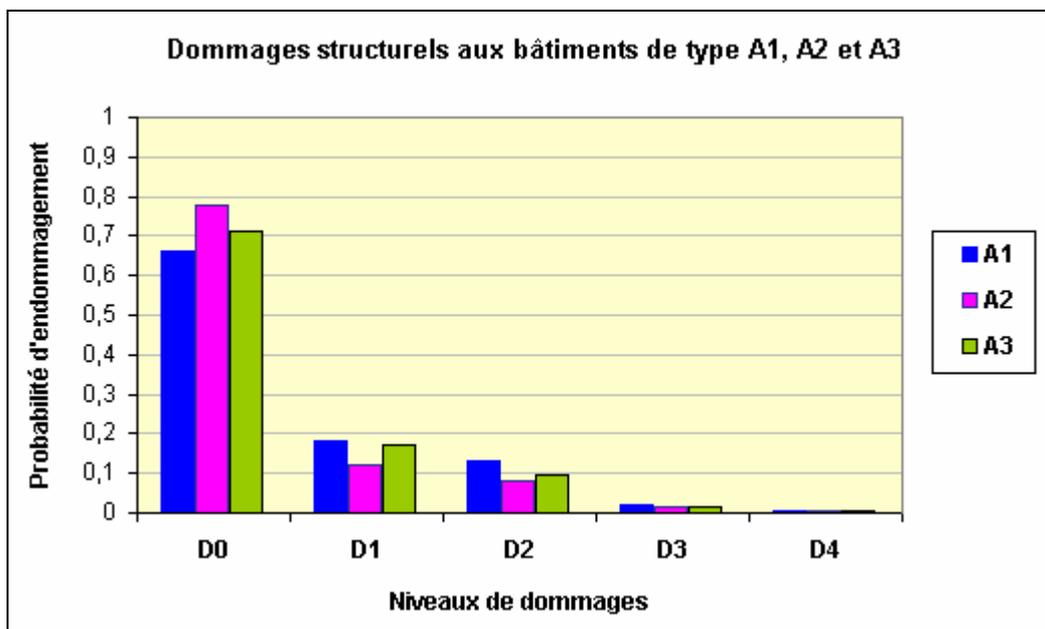


Figure 3.9 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en acier pour la ville de Barcelone

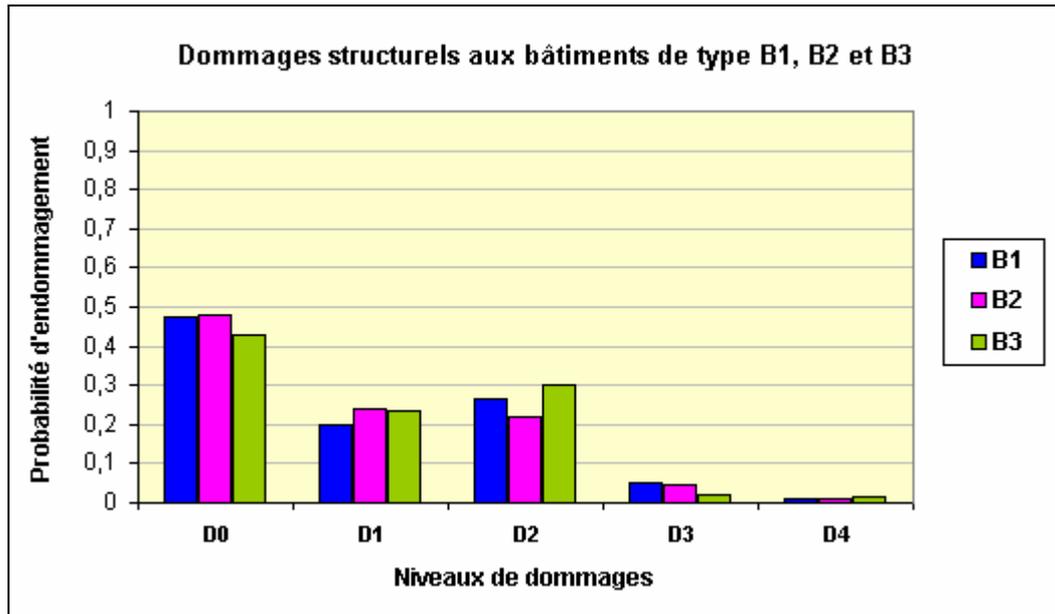


Figure 3.10 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en béton pour la ville de Barcelone

Nous pouvons observer sur l'ensemble de la ville des conséquences modérées, dues à une sollicitation sismique relativement faible. Toutefois, on note un pourcentage non nul des dommages très importants (1% pour les bâtiments en béton de plus de 4 étages). Le pourcentage moyen sur l'ensemble de classes étant de 0,33%, soit 3 bâtiments complètement détruits sur 1000. En ce qui concerne les dommages modérés, le pourcentage est d'environ 15%.

3.3.4. Analyse comparative des résultats

3.3.4.1 Estimation de dommages utilisant les courbes de capacité issues de HAZUS

Une analyse comparative des résultats est réalisée tout d'abord par rapport à une estimation de dommages basée sur le même type d'approche, mais en utilisant les courbes de capacité issues de HAZUSTM. Les résultats obtenus dans une étude antérieure sur la ville (Chiroiu, 2000 ; Chiroiu et al, 2001) ont été comparés avec ceux obtenus dans notre recherche.

Nous avons considéré, de même que pour l'application sur Nice, les mêmes équivalences avec les classes de structures de HAZUSTM. Ainsi, S1L, S1M, S1H (structures en acier) ont été associées avec A1, A2 et A3 ; C1L, C1M, C1H (structures en béton armé) associées avec B1, B2 et B3. L'estimation de dommages structurels est présentée ci-dessous (c. f. tableau 3.5).

Si l'on peut observer globalement la même évaluation d'endommagement pour les constructions en acier, de légères différences apparaissent toutefois pour ceux de moins de 5 étages ; il n'en est pas de même pour les bâtiments en béton, pour lesquels on peut observer des écarts assez importants entre les deux approches. Des dégâts plus sévères sont ainsi estimés pour ce type de construction en utilisant les courbes de capacité développées dans notre recherche. A titre d'exemple, une différence de 37% apparaît sur le type B2, concernant le pourcentage de bâtiments non endommagés. Ces écarts sont distribués notamment entre les niveaux d'endommagement D0 et D3 ; pour les niveaux plus forts, les différences sont moindres.

Type de structure	D0	D1	D2	D3	D4
A1	86%	9%	4%	1%	0%
A2	86%	8%	5%	1%	0%
A3	73%	17%	9%	1%	0%
B1	75%	14%	10%	1%	0%
B2	85%	10%	5%	1%	0%
B3	71%	15%	14%	0%	0%
Moyenne	79,3%	11,7%	9,2%	0,8%	0%

Tableau 3.5 Estimation de dommages structurels en utilisant les courbes de capacité de HAZUSTM sur la ville de Barcelone

D'un point de vue global, les endommagements moyens sont supérieurs en utilisant notre approche ; plus précisément, les estimations dépassent celles de HAZUSTM de 6,8% pour les dommages légers, de 6,5% pour les dommages modérés, de 1,2% pour les dommages importants et de 0,3% pour les dommages très importants. La représentation graphique de l'analyse comparative met en évidence ces différents aspects (c. f. fig. 3.11 et 3.12).

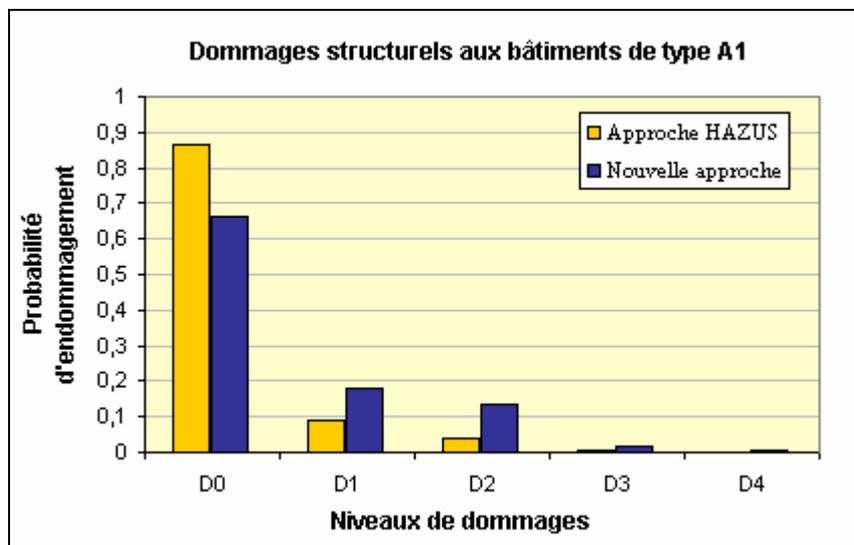


Figure 3.27 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUSTM et celles basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type A1 pour la ville de Barcelone

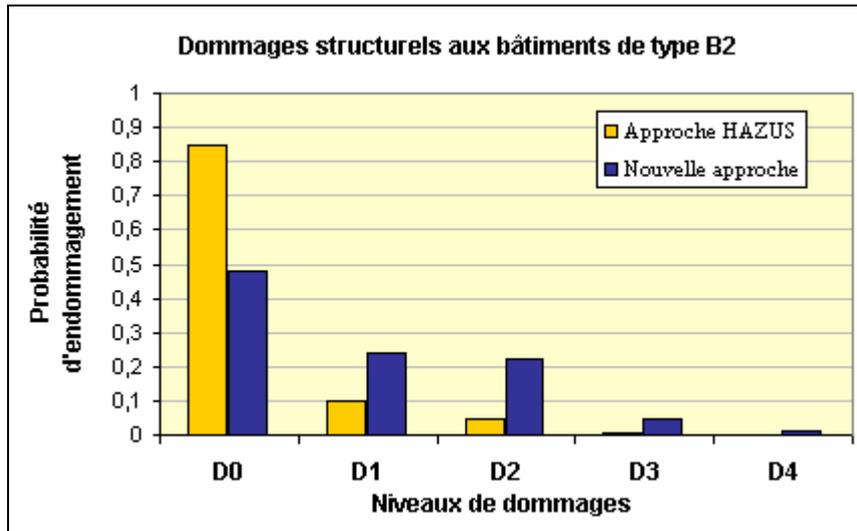


Figure 3.12 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS™ et celles basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type B2 pour la ville de Barcelone.

3.3.4.2 Estimation de dommages issue de l'utilisation de matrices d'endommagement

Une importante étude d'estimation de dommages a déjà été réalisée sur la région de Catalogne et plus particulièrement sur la ville de Barcelone. L'étude est basée sur l'utilisation de matrices d'endommagement développées sur des données relatives aux dommages constatés suite au séisme de 1980 d'Irpinia, en Italie. La méthodologie a été organisée en quatre étapes : la classification des constructions existantes en classes de bâti, l'estimation de dommages directs, l'analyse des victimes potentielles ainsi que l'évaluation des pertes économiques. Les résultats sont basés sur un inventaire détaillé des types de constructions, réalisé suivant l'âge, la hauteur et la position géographique des bâtiments. Ils présentent donc un caractère quantitatif. Des chiffres exacts concernant la distribution spatiale des classes (suivant les classes de vulnérabilité de l'EMS 98) ont pu être déterminés de cette manière. Les fonctions d'endommagement, issues de corrélations statistiques de dommages observés, ont conduit à des estimations suivant 6 niveaux d'endommagement : niveau 0, sans dommage ; niveau 1, dommages légers ; niveau 2, dommages modérés ; niveau 3, dommages importants ; niveau 4, destruction partielle ; niveau 5 : ruine totale. Par rapport à notre recherche, cette étude fournit des résultats qualitatifs, que nous avons transformé en pourcentage, afin de permettre une comparaison avec nos résultats. Les niveaux 4 et 5 de cette étude sont assimilés à notre niveau 4, qui correspond à une destruction totale ou partielle de la construction.

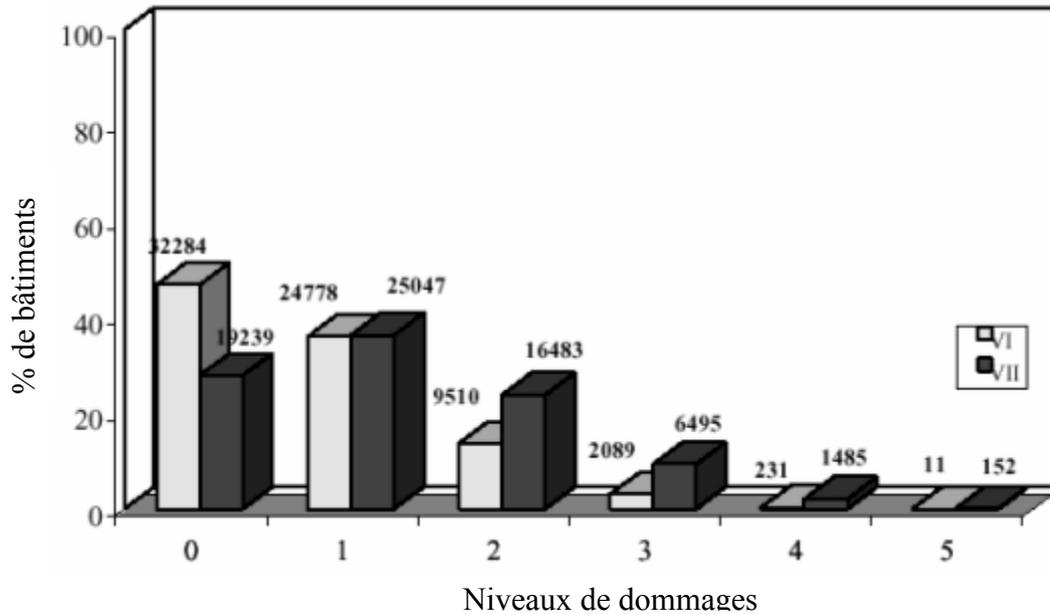


Figure 3.13 Estimation de dommages sur la ville de Barcelone suite à un événement d'intensité sismique VI et VII.

L'estimation globale de dommages (c. f. fig. 3.13) est légèrement supérieure à celle issue de notre étude, différence qui peut s'expliquer par la non considération ici des bâtiments autres que ceux en béton ou en acier, avec un certain niveau parasismique (notamment des constructions en maçonnerie). Ainsi, nous pouvons remarquer qu'environ seulement 50% des constructions ne présentent pas de dégâts (pour une intensité VI), par rapport à une moyenne de 63,5% issue de notre approche. De même subissent des dégâts légers environ 40% des constructions pour l'étude Chavez (1998), contre environ 18% pour notre recherche.

3.4 Application de la méthode du spectre de capacité à l'estimation de dommages sur la ville de Nice

La ville de Nice a été choisie pour une deuxième illustration de notre approche, en raison de sa sismicité non négligeable et de la concentration des enjeux socio-économiques. Ce choix est basé sur l'existence d'études d'estimation de dommages sur cette ville, ce qui nous permet d'effectuer une comparaison de nos résultats avec ceux déjà obtenus par d'autres approches. Nice appartient à une zone sismique II, conformément au zonage sismique en vigueur (c. f. fig. 3.14), degré de sismicité maximal en France Métropolitaine.

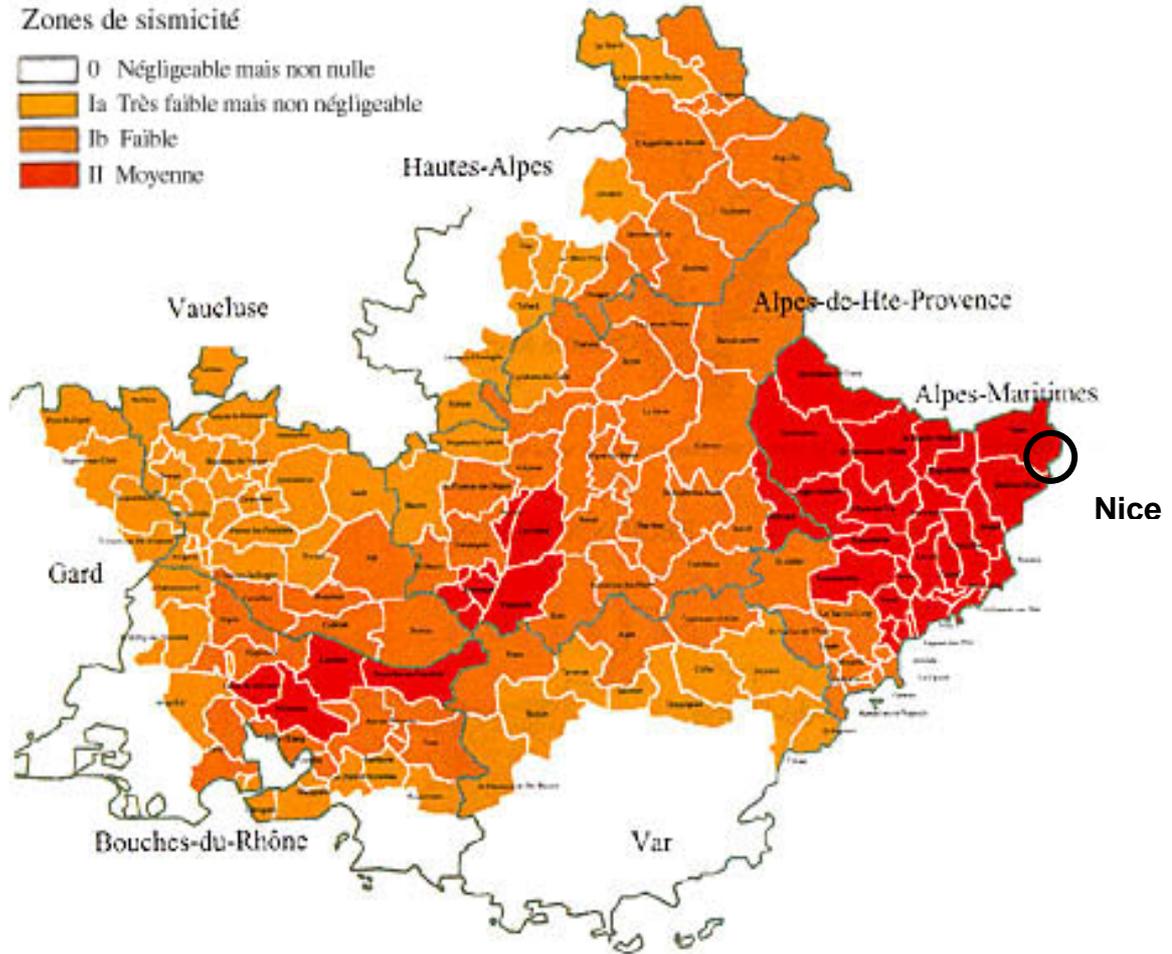


Figure 3.14 Zonage sismique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (source : www.prim.net)

La région maritime située au sud de la ville est une zone relativement active du point de vue sismique. De nombreux séismes s'y sont déjà produits, dont un particulièrement fort à la fin du XIX^{ème} siècle : le matin du mercredi 3 février 1883, une secousse de magnitude 6.5 s'est produite au large de la riviera italienne, entraînant des dommages très importants ainsi que de nombreuses victimes, principalement dans le nord de l'Italie mais également dans sud de la France. L'épicentre du séisme, ressenti à plus de 300 km, se situait en mer, au large de Diano Marina et Impéria.

A Nice, des dommages très forts ont été enregistrés essentiellement dans le quartier Saint-Etienne et au sud de la Gare, où de nombreux immeubles ont été partiellement ou totalement détruits (c. f. fig. 3.15).

Plus récemment, des secousses significatives se sont produites en 1989, 1990, 1995 ou encore en 2001, d'une magnitude inférieure à 5, sans engendrer de victimes. L'occurrence d'un événement fort est pourtant non négligeable, avec une probabilité de l'ordre de 10% sur environ 50 ans (Dominique et André, 1999). Cet événement correspond à un séisme dont le PGA serait d'environ 0,16g.



Figure 3.15 L'école maternelle communale du quartier Saint-Etienne à Nice, lors du séisme de 1883.
(source : <http://azurseisme.free.fr>)

Du point de vue des enjeux socio-économiques, Nice représente la 5^{ème} ville de France en nombre d'habitants, avec une population de plus de 300 000 personnes, auxquelles il faut ajouter une partie des 9 millions de touristes qui fréquentent chaque année l'ensemble du département des Alpes Maritimes. La région accueille des centaines d'entreprises spécialisées dans des domaines pointus de la recherche, tels que les technologies de l'information ou les télécommunications. Plus de 90 000 entreprises forment le tissu économique de la Côte d'Azur, réalisant un chiffre d'affaires annuel d'environ 46 milliards d'euros³⁵. Ces données présentent brièvement l'importance des enjeux économiques situés dans la région de Nice, situation qui pourrait être fortement perturbée par un éventuel séisme (Arnal et Martin, 1999).

3.4.1 Choix de l'action sismique

Le scénario sismique est défini directement en fonction du mouvement du sol, à travers le spectre sismique de réponse, sans utiliser une intensité ou une magnitude probable ou historique. Nous avons utilisé ainsi une approche probabiliste, en retenant comme valeur d'entrée un PGA associé à une période de retour d'environ 500 ans (soit 10% de probabilité de dépassement de cette valeur sur 50 ans).

L'action sismique spécifique à cette ville a été choisie sur la base d'un PGA caractéristique de 0,16 g (Dominique et André, 1999 ; Arnal et Martin, 1999). En retenant cette valeur, le spectre issu de la norme parasismique française PS 92 a été considéré comme sollicitation sismique d'entrée, pour un sol de type S2 (c. f. annexe 3.3). La représentation graphique de la demande est présentée ci-dessous.

³⁵ Source de données : Chambre de Commerce et de l'Industrie de Nice – Côte d'Azur. www.cote-azur.businessriviera.com

Nous avons utilisés ici le même type de réduction de ce spectre suivant l'indice issue de la norme française PS92, ainsi que les amortissement effectifs proposés dans le cas de Barcelone, afin de simplifier l'analyse³⁶.

A partir des valeurs des spectres normalisés et considérant une valeur de l'accélération nominale de 0,16 g (équivalente à l'action sismique spécifique, définie auparavant), nous avons obtenu la sollicitation sismique de référence (c. f. fig. 3.16). Nous pouvons remarquer le PGA de 0,16 (qui correspond à l'abscisse $S_d = 0$) et une amplification de celle-ci de 2,25 atteignant ainsi une valeur maximale de 0,36g.

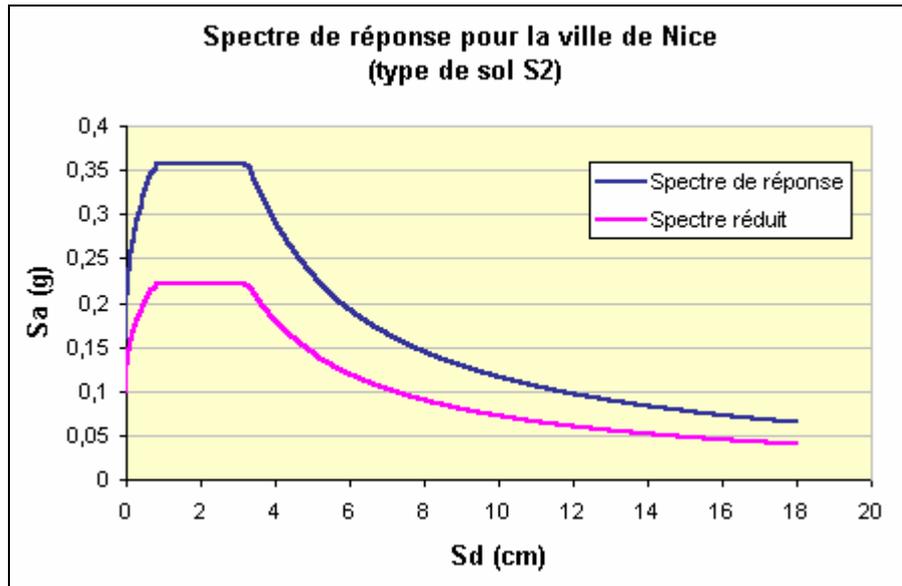


Figure 3.16 Spectre de réponse pour la ville de Nice (en bleu), réduit par l'indice d'amortissement (en magenta), correspondant à un amortissement effectif de 16%

3.4.2 Estimation de dommages

Nous avons procédé ensuite au calcul des dommages à travers la méthode du spectre de capacité, en passant par les mêmes étapes de calcul décrites dans l'application pour Barcelone. Le seul facteur qui change est la demande sismique, caractéristique du site d'application. Ceci induit des coordonnées des points de demande différentes, et donc une estimation de dommages spécifique ici pour la ville Nice.

Nous avons calculé par conséquent les coordonnées des points de demande, pour chaque classe de constructions. De la même manière que pour l'application réalisée pour le cas Barcelone, les courbes de capacités sont superposées à la demande sismique.

A titre d'exemple, ci-dessous le point de demande correspondant aux bâtiments de type A1 (c. f. fig. 3.17).

³⁶ En réalité, le coefficient d'amortissement effectif dépend également de la sollicitation sismique.

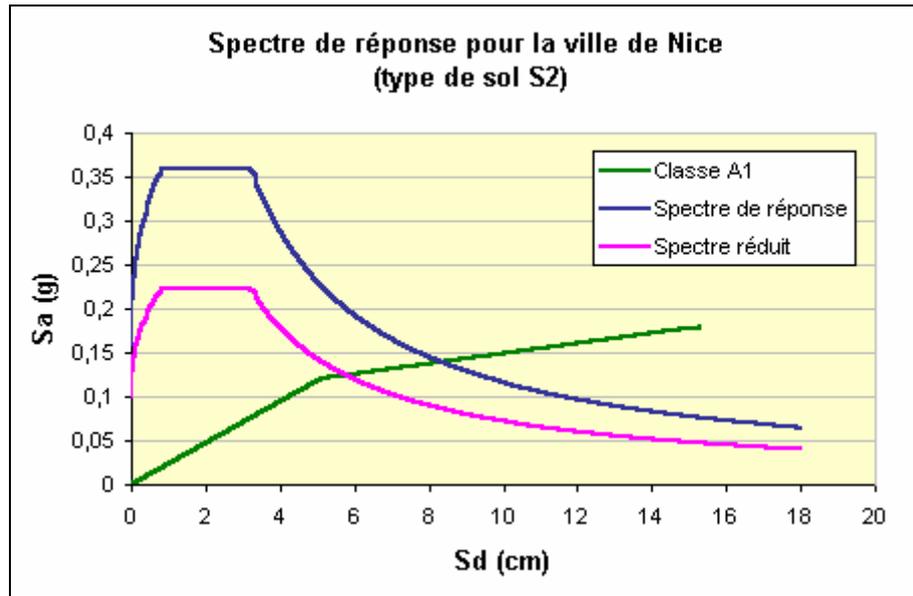


Figure 3.17 Obtention du point de demande pour le type de bâti A1 pour la ville de Nice

Les coordonnées du point de demande pour l'ensemble classes de constructions considérées sont présentées dans le tableau 3.6 :

Type de bâtiments	S_d (cm)	S_a (g)
A1	5,91	0,12
A2	7,9	0,01
A3	15,06	0,05
B1	6,82	0,11
B2	10,05	0,08
B3	18,04	0,04

Tableau 3.6 Coordonnées des points de demande pour chaque type de structure

Les estimations de dommages obtenues, exprimées en pourcentages de bâtiments endommagés, ont un caractère qualitatif, en l'absence d'inventaires de constructions par type de bâtiments.

Les résultats correspondent donc à des pourcentages d'endommagement structurel par niveau de dommages, pour chaque type de bâtiments. En utilisant les relations mentionnées plus haut dans le texte, nous avons obtenu les résultats présentés ci-dessous (c. f. tableaux 3.7). A titre d'exemple, les constructions de type A3 sont susceptibles de ne pas présenter de dommages dans 20% des cas ; de présenter des dommages légers pour 24% de cas ; dommages modérés dans 36% des cas ; dommages importants dans 15% des cas ; et enfin dommages très importants dans 5% des cas.

Type de structure	D0	D1	D2	D3	D4
A1	22%	22%	35%	15%	6%
A2	30%	25%	29%	12%	4%
A3	20%	24%	36%	15%	5%
B1	12%	12%	39%	26%	11%
B2	8%	17%	44%	23%	8%
B3	5%	14%	42%	26%	13%
Moyenne	15%	20%	39%	19%	7%

Tableau 3.7 Pourcentage d'endommagement structural, par type de construction.

La représentation graphique des résultats facilite l'analyse comparative des dégâts par type de constructions (c. f. fig. 3.18 et 3.19). Nous pouvons tout d'abord observer que les bâtiments à hauteur moyenne (de 5 à 8 étages) présenteraient des dégâts moindres que le reste. Deuxièmement, les édifices en béton armé ont une vulnérabilité globalement plus élevée que ceux en acier, avec des estimations de dommages plus forts.

Nous pouvons observer ensuite que les dommages engendrés par une sollicitation sismique avec une probabilité d'occurrence non négligeable (10% sur 50 ans) seraient très importants. Nous les estimons ainsi à une moyenne de 7% de constructions totalement détruites (niveau D4), soit 70 bâtiments sur 1000, ou encore plus d'un tiers de constructions avec des dommages modérés, D2.

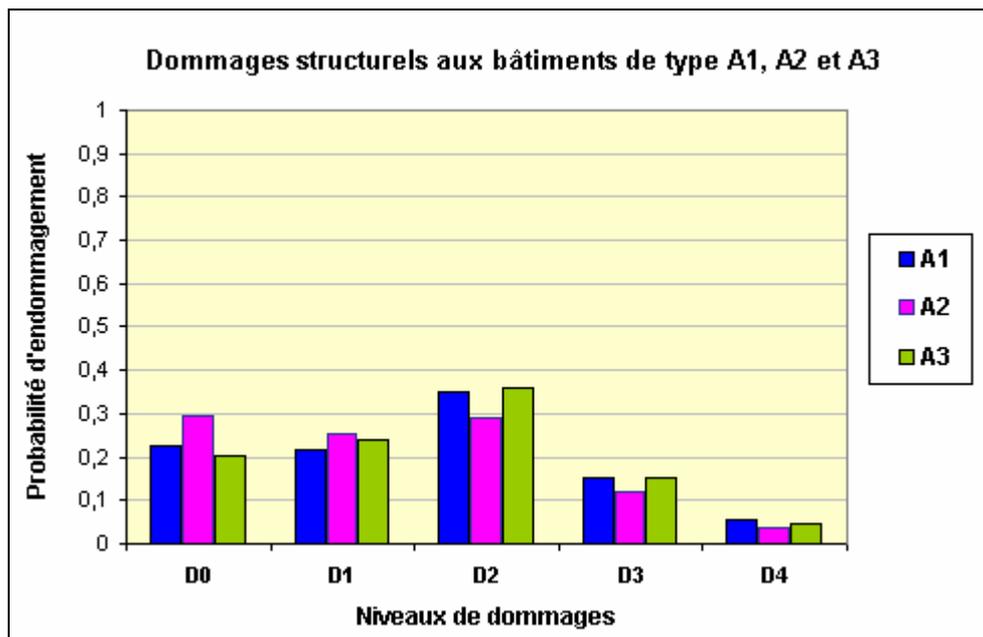


Figure 3.18 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en acier, pour la ville de Nice.

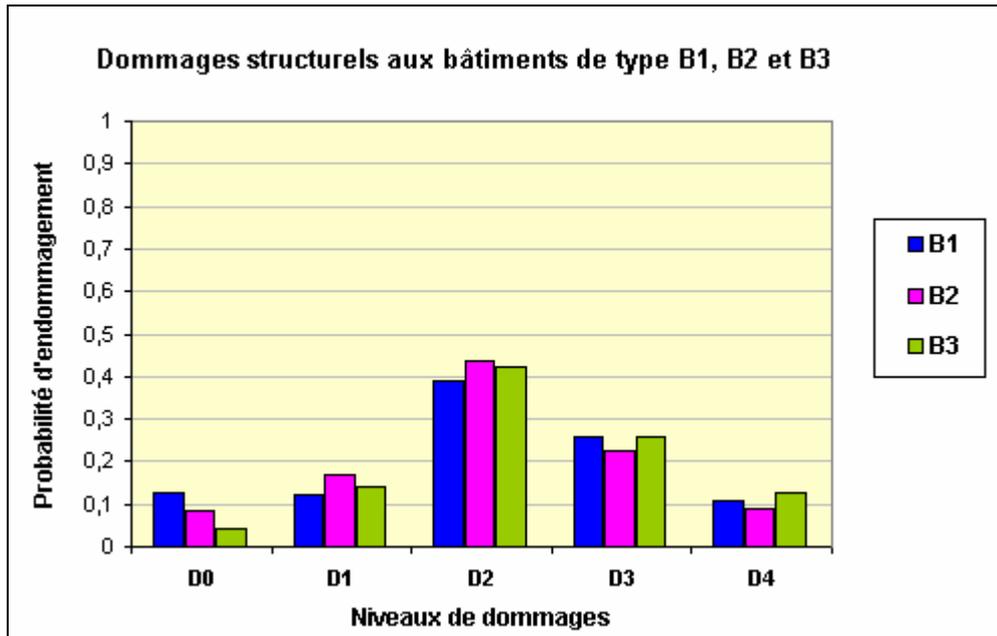


Figure 3.19 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en béton armé, pour la ville de Nice

En l'absence d'un inventaire précis des types de bâti, nous avons effectué une cartographie simplifiée du bâti, en effectuant un croquis issu de l'analyse stéréoscopique d'un couple des photos aériennes de l'IGN, acquises en 1995, à une échelle de 1/20000. Cette analyse a été validée sur la base des informations fournies dans l'étude GEMITIS (Arnal et Martin, 1999). L'occupation du sol nous a permis de différencier plusieurs types d'habitat : une zone pavillonnaire, un centre ville ancien, une zone à bâtiments réalisés en général en maçonnerie, et enfin une zone comprenant du bâti majoritairement en béton armé (c. f. fig. 3.20) .

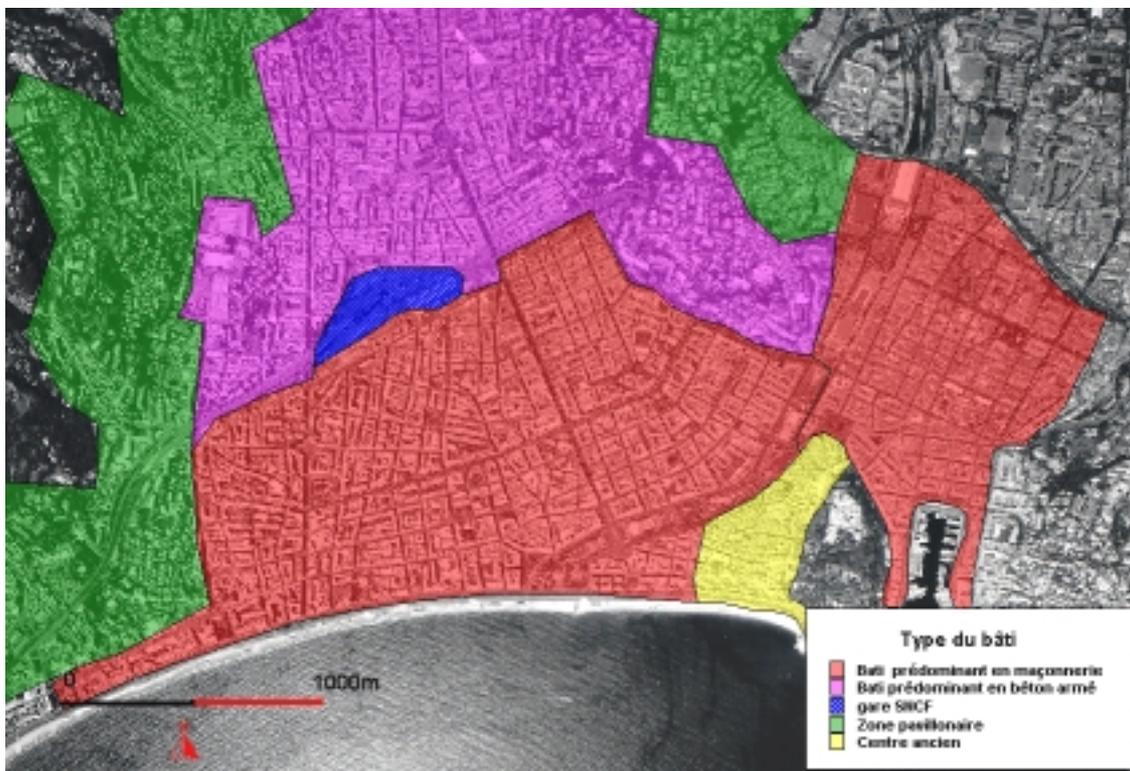


Figure 3.20 Cartographie des différents types de bâti sur une partie de la ville de Nice

Ce zonage nous permet ensuite une distribution spatiale simplifiée des dégâts estimés. Le bâti collectif, avec des bâtiments généralement supérieurs à 3 niveaux, peut être associé, en termes de dommages probables, à une moyenne entre les résultats obtenus pour nos types A2, A3, B2 et B3. Le bâti mixte peut être associé à notre moyenne générale de dégâts. Toutefois, les dégâts seraient probablement plus importants en cas de séisme réel, car nous avons supposé pour nos classes de constructions un certain niveau de conception parasismique, ce qui n'est pas le cas pour la majorité de bâtiments. Nous n'avons pas évalué les dommages sur le centre ancien, car le type de structure qu'on y rencontre habituellement, en maçonnerie non renforcée, est complètement différent de classes considérées.

Comme la moyenne générale sur nos six classes de bâti est quasiment la même que celle réalisée avec les classes A2, A3, B2 et B3, nous allons considérer la moyenne générale comme représentative pour les deux types de bâti que nous avons distingués : le bâti collectif et le bâti mixte.

Avec les suppositions précédentes, nous avons réalisé une distribution spatiale simplifiée de dommages estimés (c. f. fig. 3.21).

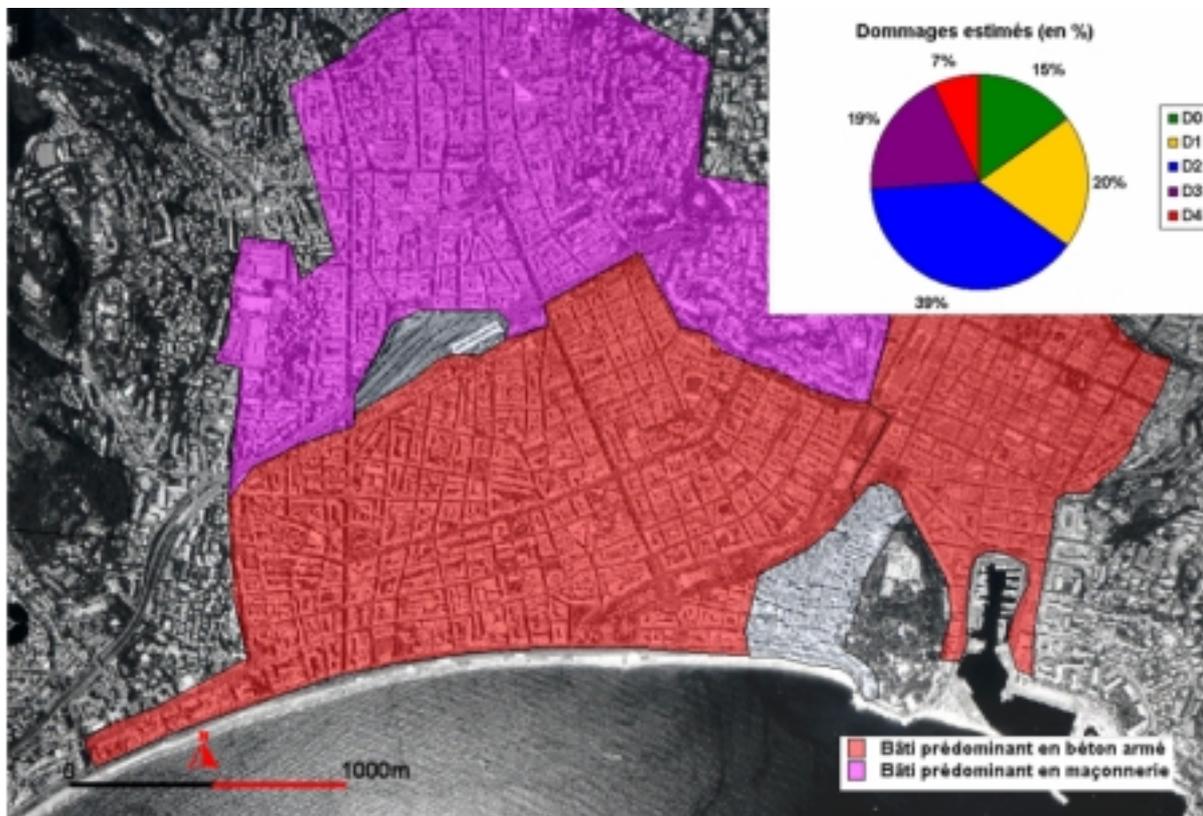


Figure 3.21 Estimation de dommages sur le bâti non pavillonnaire

Nous pouvons ainsi observer une moyenne de 7 % de bâtiments totalement ruinés sur la zone de constructions relativement récentes, de la partie nord de la zone urbaine niçoise. Dans le centre historique de la ville, les dégâts seraient encore plus forts, en raison de la vulnérabilité plus élevée des constructions anciennes.

Ces résultats représentent uniquement des indications relatives aux éventuels dégâts. En raison des nombreuses incertitudes, telles que celles relatives aux courbes d'endommagement ou bien à la définition de la sollicitation sismique, ces estimations doivent être retenues avec réserve.

3.4.3 Analyse comparative des résultats

3.4.3.1 Estimation des dommages par l'utilisation des courbes de capacité issues de HAZUSTM

Une première analyse comparative des résultats est réalisée par rapport à une estimation de dommages basée sur le même type d'approche que précédemment, mais en utilisant les courbes de capacité issues de HAZUSTM. Nous avons réalisé les mêmes étapes de l'analyse, en considérant la même sollicitation sismique, en passant par les mêmes étapes : la définition des courbes de capacité, la définition du scénario sismique, le calcul du point de demande pour chaque type de construction et le croisement avec les courbes d'endommagement.

Les courbes de capacité telles que nous les avons définies dans le chapitre 2, ont été croisées avec la même sollicitation sismique (c. f. fig. 3.16) ; les coordonnées des points de demande ainsi obtenus nous ont permis ensuite l'application des courbes de fragilité définies auparavant plus haut dans le texte.

L'estimation de dommages obtenue est présentée ci-dessous, par niveau de dommages et type de bâti (c. f. tableau 3.8) :

Type de structure	D0	D1	D2	D3	D4
A1	33%	23%	30%	11%	3%
A2	26%	25%	31%	14%	4%
A3	19%	23%	37%	16%	5%
B1	27%	17%	38%	14%	4%
B2	26%	25%	35%	11%	3%
B3	16%	23%	45%	11%	5%
Moyenne	25%	23%	36%	12%	4%

Tableau 3.8 Estimation de dommages structurels en utilisant les courbes de capacité de HAZUSTM

Une comparaison générale avec les résultats basés sur les courbes de capacité que nous avons développées montre que notre méthode estime des dommages plus importants, notamment pour les structures en béton armé (c. f. fig. 3.22).

Les différences entre les résultats provenant des deux méthodes sont peu importantes en revanche pour les bâtiments en acier (c. f. fig. 3.23), malgré les écarts constatés entre les deux types de courbes de capacité (c. f. § 2). Nous pouvons remarquer ainsi que des différences notables entre des courbes de capacité induisent des écarts moindres concernant leur application à l'estimation de dommages.

Globalement, la moyenne de bâtiments complètement détruits (4%) est inférieure à celle issue des nouvelles courbes (7%), en raison notamment des estimations relatives aux constructions en béton armé.

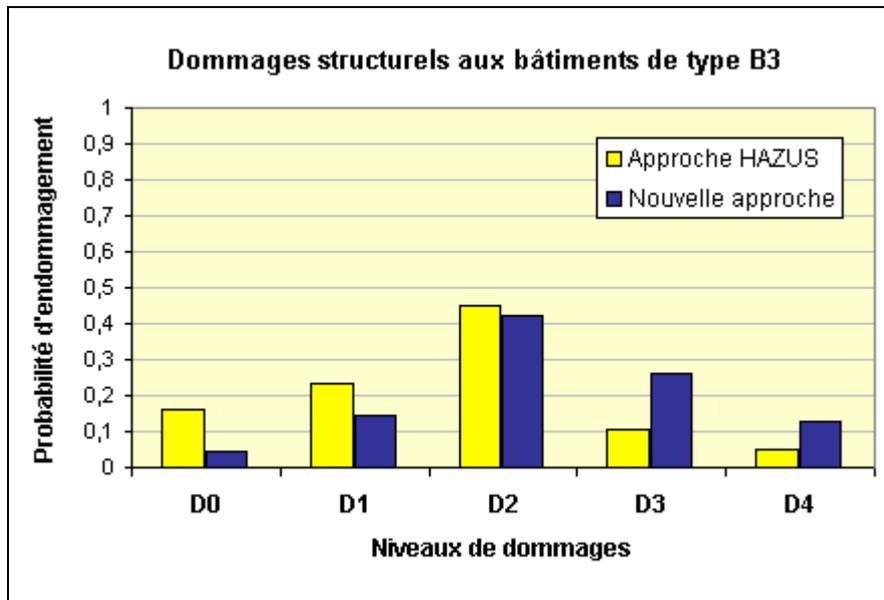


Figure 3.22 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS et celle basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type B3

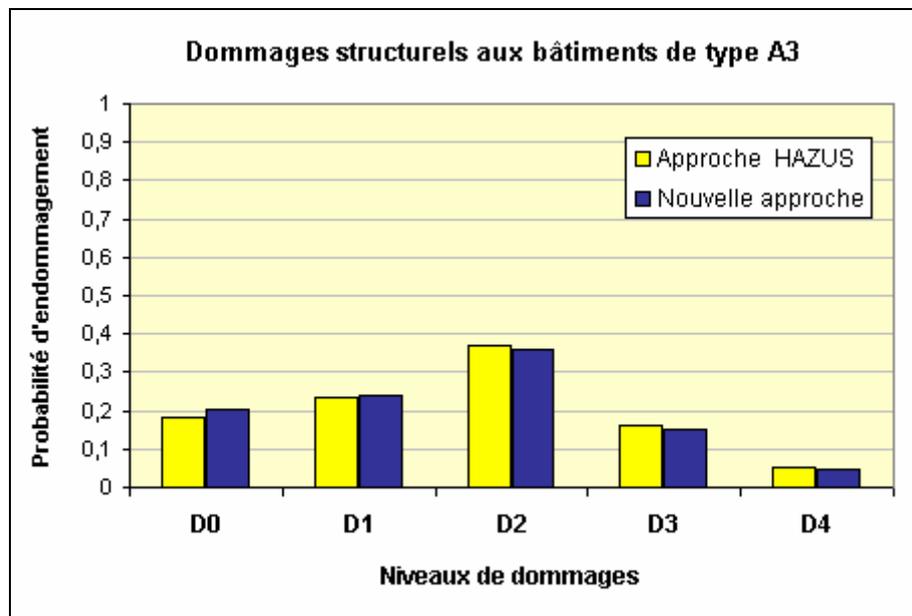


Figure 3.23 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS et celle basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type A3

3.4.3.2 Estimation de dommages issue de l'approche GEMITIS

L'approche GEMITIS (c. f. § 1) fait partie d'un programme de recherche engagé par le comité français de la Décennie Internationale pour la Prévention des catastrophes naturelles (DIPCN).

La méthode utilisée a un caractère qualitatif. Les courbes d'endommagement, issues de l'EMS 98, ont été appliquées à neuf types différents de bâti. Malheureusement, ces typologies sont incompatibles avec nos classes de constructions standard définies auparavant. La seule catégorie qui semble compatible avec celles de notre étude est la catégorie « T4 », qui se définit comme « bâtiments collectifs réalisés depuis 1969 ». Une autre difficulté est engendrée par l'absence de résultats sous forme de pourcentage d'endommagement, seule une cartographie des dégâts étant disponible (c. f. fig. 3.24).

La demande sismique considérée est basée sur une action sismique équivalente à celle utilisée dans notre estimation, à savoir un PGA de 0,16g. Une intensité macrosismique est dérivée ensuite à partir de cette valeur.

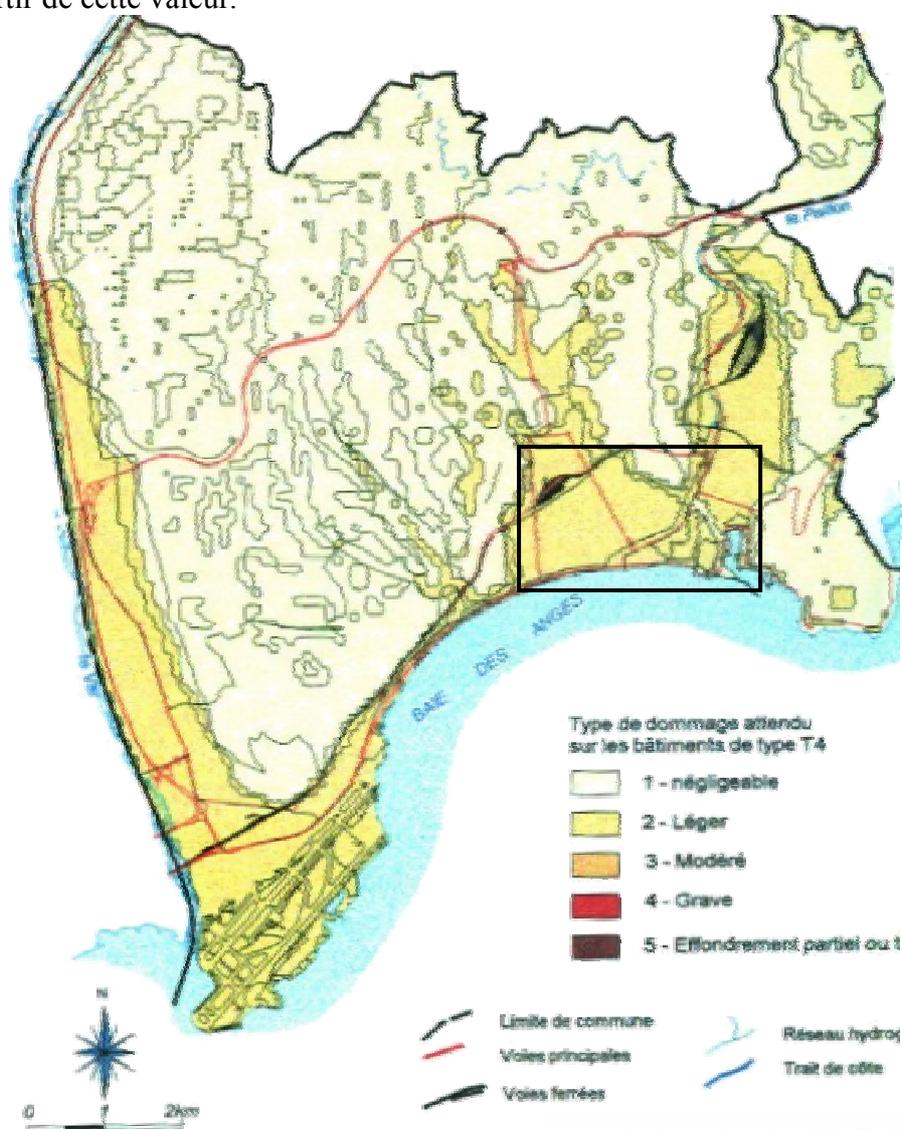


Figure 3.28 Estimation de dommages sur la ville de Nice concernant les bâtiments de type T4 du projet GEMITIS (source : Arnal et Martin, 1999). Le rectangle noir correspond à la zone cartographiée dans notre approche.

De même que pour notre étude, cinq niveaux de dégâts ont été considéré: dommages négligeables, dommages légers, dommages modérés, dommages graves et effondrements partiels ou totaux.

Suivant la cartographie de dommages des bâtiments de type T4 (c. f. fig. 3.24), nous observons sur la plupart de la ville de Nice des dommages négligeables et, dans une moindre proportion, des dommages légers. D’après ce modèle, un séisme semblable à celui supposé dans notre étude ne provoquera pas, pour les bâtiments collectifs réalisés après 1969 (en acier comme en béton armé), de dommages plus importants que des dommages légers.

En comparant les estimations résultant de GEMITIS avec nos propres estimations (c. f. fig. 3.21), on peut remarquer des différences sensibles, car nos résultats montrent une moyenne de dégâts très importants dans une proportion de 7%, des dégâts importants sur 19% des constructions et plus d’un tiers des constructions comme présentant des dommages modérés dans la zone d’étude.

3.5 Synthèse des résultats obtenus

Nous avons regroupé ci-dessous l’ensemble des résultats afin de disposer d’une vision synthétique de ce chapitre (c. f. tableau 3.9)

		Barcelone					Nice				
Risque sismique		Risque sismique modéré. Le dernier séisme important a eu lieu en 1448. Enjeux importants					Risque sismique modéré. Le dernier séisme important a eu lieu en 1883. Enjeux importants.				
Scénario sismique	PGA	0,11g					0,16g				
	Amplification	3					2,25				
	Observation	Le spectre élastique a été réduit afin de prendre en compte l’amortissement effectif.					Le spectre élastique a été réduit afin de prendre en compte l’amortissement effectif.				
Types de constructions considérées		Constructions de type « poutres – poteaux », en acier et béton armé					Constructions de type poutres – poteaux, en acier et béton armé				
Courbes d’endommagement		Les courbes d’endommagement sont issues de HAZUS TM					Les courbes d’endommagement sont issues de HAZUS TM				
Estimation de dommages		D0	D1	D2	D3	D4	D0	D1	D2	D3	D4
Endommagement moyen pour l’ensemble de constructions considérées		63,5%	18,5%	15,7%	2%	0,3%	15%	20%	39%	19%	7%
Comparaison	HAZUS	79,3%	11,7%	9,2%	0,8%	0%	25%	23%	36%	12%	4%

avec des estimations antérieures		Méthode des matrices d'endommagement.	GEMITIS
	Autres	Dommages légèrement moins importants estimés par notre approche.	Incompatibilité du type de bâti. Dommages globalement plus importants estimés par notre approche
Commentaires		<ul style="list-style-type: none"> - Dommages estimés relativement très importants pour Nice - Dommages plus importants estimés par notre approche par rapport à HAZUS - Manque d'analyse spatiale de dommages - Nécessité d'estimation pour l'ensemble du bâti - Nécessité de prise en compte de plusieurs scénarios sismiques - Nécessité de validation des courbes d'endommagement utilisées actuellement 	

Tableau 3.9 Comparaison des résultats obtenus

3.6 Conclusions

Les courbes de capacité développées dans le chapitre 2 ont été utilisées ici pour l'estimation de dommages à l'aide de la méthode du spectre de capacité. Nous avons réalisé deux applications, sur Barcelone et sur Nice, villes à sismicité modérée et donc non négligeable, d'autant plus qu'elles présentent une forte concentration d'enjeux. Les résultats ont été comparés dans un premier temps avec ceux fournis par une application directe des CC issues du modèle HAZUSTM ; dans un deuxième temps, avec les résultats fournis par d'autres types d'approches.

Les estimations que nous avons obtenues présentent un caractère qualitatif, étant exprimées en pourcentages d'endommagement susceptible de se produire par type de bâti et par niveau de dommage. Des analyses quantitatives n'ont pas pu être réalisées en raison de l'absence d'inventaire précis du type du bâti.

Dans le cas de l'application sur Nice, les dommages provoqués par un séisme semblable à celui de 1883 (avec une probabilité de retour d'environ 10% sur 50 ans) seraient assez forts, avec environ 10% du total des constructions en acier et béton armé présentant de dommages importants, et 3,3% des constructions complètement détruites. La comparaison avec des études antérieures s'est révélée difficile, en raison de l'incompatibilité des classes de bâti considérées.

Dans le cas de l'application sur Barcelone, les dommages consécutifs à une sollicitation sismique associée à une période de retour de 500 ans seraient, en termes statistiques, moins forts que sur Nice, avec un 2% du total des constructions considérées présentant des dommages importants, et seulement 0,3% complètement détruites. Une analyse comparative par rapport à une étude antérieure basée sur des matrices de vulnérabilité nous montre, sur un plan général, des estimations légèrement supérieures issues de cette dernière approche. Cette

différence peut s'expliquer toutefois par la non considération dans notre étude de tous les types standard de bâtiments, tel que les constructions en maçonnerie non renforcée.

Ces applications ne représentent que des exemples d'utilisation de CC pour l'évaluation *ex ante* des dommages. Pour un modèle complet et plus précis d'estimation de dommages sismiques au niveau d'une agglomération urbaine, des données complémentaires sont requises. Ainsi, l'existence d'inventaires cartographiques des types standard de bâti est un élément fondamental pour une analyse spatiale de dégâts. La mise au point des CC spécifiques à d'autres types de constructions serait également nécessaire, ainsi que spécifiques à d'autres enjeux tels que réseaux routiers, centrales électriques ou thermiques. On note le récent développement dans cette direction apporté par la réalisation d'un outil d'analyse de la vulnérabilité des ponts (Davi et Schmitt, 2003). Des missions en retour d'expérience peuvent apporter un complément important d'information, notamment pour ce qui est de la calibration des courbes d'endommagement existantes, et donc d'une manière implicite pour la validation des modèles. Un essai de validation est réalisé par la suite (c. f. § 4), où une estimation *ex-ante* de dommages suite au séisme du 26 janvier 2001 de Bhuj, en Inde, réalisée d'une manière analytique, est comparée avec une évaluation *ex-post* de dégâts réels effectuée à l'aide de l'imagerie satellitaire à très haute résolution.

CHAPITRE 4. UTILISATION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE DANS LA GESTION DU RISQUE SISMIQUE. APPLICATION A L'ESTIMATION DE DOMMAGES

La première partie de ce chapitre a pour objet de présenter l'un état de l'art concernant l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans l'analyse du risque sismique, notamment pour l'estimation de dommages et l'évaluation de la vulnérabilité.

Dans une deuxième partie, nous avons utilisé l'imagerie optique à très haute résolution pour la détection, la cartographie et l'estimation de dommages. Deux cas ont été analysés: le séisme de Bhuj, en Inde, survenu en janvier 2001 et celui de Boumerdes, en Algérie, survenu en mai 2003. De plus, une simulation de dommages *ex-ante* a été réalisée pour le cas de Bhuj ; les résultats ont ensuite été comparés avec l'estimation *ex-post* par photo - interprétation.

Enfin, dans une troisième partie, nous présentons les perspectives de l'application de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique.

4.1 Introduction

L'imagerie satellitaire est utilisée depuis longtemps dans le domaine de l'étude des risques naturels, principalement pour l'analyse des dégâts postérieurs à une catastrophe. En effet, diverses études ont été menées pour estimer les dommages consécutifs aux catastrophes naturelles, notamment les inondations, les cyclones ou encore les mouvements de terrain (GSC, 2000 ; Van des Sande, 2001 ; Marinelli et al, 1997 ; Stow et Wright, 1997 ; Wood, 2002). Les résolutions spatiales ne permettaient pas avant l'année 99 une estimation fiable des dégâts en raison de la taille trop importante du pixel par rapport aux éléments endommagés par un séisme (tels que bâtiments ou autres structures). En effet, la plus haute résolution disponible jusqu'à la fin des années 90 était de 5 mètres, en mode panchromatique (noir & blanc), du satellite indien IRS, suivie par celle de 10 mètres des satellites français SPOT 1 – 4 (c. f. annexe 4.1). Ainsi, seules les zones complètement détruites ont pu être détectées et cartographiées par télédétection, notamment suite au séisme de Kocaeli, en Turquie, survenu en août 1999. Avec l'arrivée d'une nouvelle génération de satellites tels que IKONOS (1999), EROS A1 (2000) ou Quickbird (2001) dont les images ont des résolutions spatiales allant de 1,8m à 0,60m (c. f. annexe 4.1), l'imagerie a commencé à être utilisée comme un outil performant dans le domaine du génie parasismique. Outre l'imagerie optique, l'imagerie radar est également utilisée pour des objectifs similaires, notamment pour palier la présence des nébulosités atmosphériques, qui limitent les potentialités d'utilisation de l'imagerie optique.

La détection et la cartographie rapide de dommages à partir de l'analyse des images satellitaires effectuée immédiatement après la catastrophe, peut apporter une aide importante aux opérations de gestion de crise. Ainsi, une transmission des informations relatives aux zones les plus endommagées permettrait une meilleure organisation dans le déploiement des forces de secours. Pour l'instant, ce type d'application reste toutefois limité, notamment en raison des délais d'acquisition des images qui sont encore trop importants, ce qui restreint le caractère opérationnel d'une détection rapide de dommages.

En dehors de l'aspect concernant la quantification rapide de dégâts, la très haute résolution peut être appliquée également à l'évaluation de la vulnérabilité urbaine. Les différents types

de constructions, tels que les maisons individuelles, les habitats collectifs ou les bâtiments à fonction industrielle peuvent être mises en évidence à travers les images satellitaires, ce qui constitue une information de première importance pour la réalisation des inventaires de bâti. L'intégration de ce type d'informations dans des bases de données SIG permet de plus l'analyse spatiale et le croisement cartographique avec les autres informations spatiales relatives au risque sismique, tel que le zonage sismique. Cet aspect semble offrir de nouvelles perspectives pour les modèles d'estimation de dommages *a priori*, notamment pour ce qui est du recensement et de l'organisation des données. A l'utilisation de l'imagerie satellite dans ce domaine s'ajoutent les récents développements en géomatique : la réalisation des MNE³⁷ urbains apporte en effet une dimension complémentaire et de nombreuses perspectives pour l'inventaire et la cartographie des enjeux.

Dans le cadre d'un modèle d'estimation de dommages, l'apport de l'imagerie satellitaire se situe au niveau de l'estimation de dommages directs et indirectes **après** un événement, ainsi qu'au niveau de la définition des enjeux (c. f. fig. 4.1).

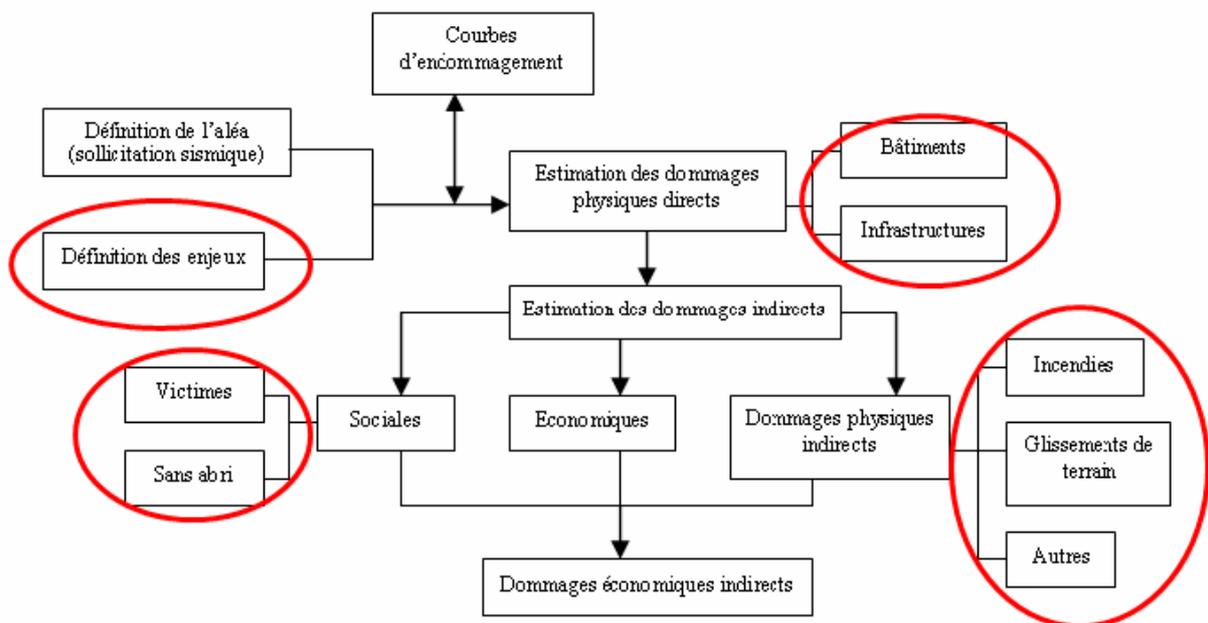


Figure 4.1 Domaine d'application de l'imagerie satellitaire dans le cadre d'un MEDS

4.2 Détection et cartographie rapide de dommages. Etat de l'art

Plusieurs types de capteurs, à différentes résolutions spatiales et spectrales, ont été utilisés pour la détection de dommages. La résolution spatiale des images varie ainsi entre plus de 2km et 1m, les interprétations étant réalisées à travers des méthodes spécifiques à chaque échelle de travail. Nous allons distinguer dans ce travail *la basse résolution*, pour des résolutions supérieures à 100m, *la moyenne résolution*, pour des résolutions comprises entre 20 et 100m, *la haute résolution*, pour des résolutions comprises entre 5 et 20 m et *la très haute résolution*, pour celles inférieures à 5m. Nous allons présenter ici une synthèse des

³⁷ Modèle Numérique d'Élévation

principales recherches réalisées avec l'imagerie optique, en fonction de classes citées ci-dessus, ainsi qu'avec l'imagerie radar.

4.2.1 Utilisation des images satellitaires à basse, moyenne et haute résolution

Les approches de détection de dommages à travers l'utilisation des images à basse résolution sont basées sur l'imagerie de nuit en provenance du satellite météorologique américain DMSP. La méthode, développée par des chercheurs japonais (Hayashi et al, 1998 ; Hashitera et al, 1999) repose sur le principe de la détection des zones où la consommation d'électricité est réduite considérablement par rapport au jour précédent le séisme. La reconnaissance est donc basée sur une analyse multi – temporelle des images nocturnes, sur lesquelles on observe les changements de rayonnement lumineux (c. f. annexe 4.2).

L'utilisation des images satellitaire de moyenne résolution à la détection de dommage consécutifs à un séisme, commencée notamment après le tremblement de terre de Kobe, au Japon, en 1995, a connu un essor important suite à la secousse catastrophique de Kocaeli, en Turquie, en août 1999 (Matsuoka et Yamazaki, 1998 ; Hashitera et al, 1998 ; Yusuf et al, 2002).

L'étude menée par Huyck et al (2002) essaye ainsi de mettre en évidence les zones affectées par le séisme de Kocaeli à travers des méthodes automatique de détection de changement appliquées à un couple d'images SPOT 4 encadrant l'événement (c. f. annexe 4.2). Plusieurs niveaux d'endommagement ont été distingués, et les résultats ont été ensuite comparés avec les dégâts réels constatés sur le terrain. La taille relativement importante du pixel (10 m) par rapport au bâti restreint toutefois l'analyse à la reconnaissance uniquement des vastes zones complètement détruites.

Estrada et al (2001) utilisent l'imagerie multi – temporelle Landsat pour la détection des zones endommagées suite au même séisme de Turquie de 1999, sur la base des comparaisons des valeurs radiométriques ainsi que d'une analyse en composantes principales (c. f. annexe 4.2). L'étude met également en évidence la subsidence d'une zone côtière et l'incendie de la raffinerie de Tüpras.

Eguchi et al (2000) analysent l'apport de l'imagerie satellitaire dans le génie parasismique à travers une mission en retour d'expérience réalisée après la secousse de Kocaeli. Les dommages constatés sur le terrain ont été positionnés sur des images en provenance du satellite Landsat 5.

Diverses recherches ont été réalisées ensuite pour la mise en évidence des dégâts suite au séisme d'El Salvador, au Salvador, et de Bhuj, en Inde, survenus tous deux en janvier 2001 (Estrada et Kohiyama, 2001 ; Yusuf et al, 2002). Dans le cas de Salvador, seuls des glissements importants de terrains ont pu être reconnus ; en ce qui concerne le cas de Bhuj, une méthode basée sur une comparaison des valeurs radiométriques a permis la reconnaissance de zones fortement endommagées (c. f. annexe 4.2).

Nous pouvons mentionner également la mise en place de la Charte Internationale « Espace et catastrophes majeures ». Cet organisme est un partenariat établi entre plusieurs fournisseurs d'imagerie satellitaire dans le but de fournir des données gratuites, immédiatement après une catastrophe naturelle, sous la demande de la protection civile, à toute organisation capable de réaliser une détection rapide de dégâts. Des images multi – temporelles SPOT 1 ont été utilisées pour la détection des zones endommagées suite au séisme de Salvador de janvier 2001. Mais la présence des nuages semble avoir conduit à une interprétation erronée des images satellitaires (c. f. annexe 4.3).

Les images satellitaires à basse, moyenne et haute résolution ont donc permis à travers différentes méthodes et approches la détection et la cartographie de larges zones urbaines fortement touchées, mises en évidence notamment à l'aide d'analyses multi – temporelles. Mais lorsque les dégâts ne couvrent pas de vastes surface ou sont dispersés, leur reconnaissance devient très difficile, même s'ils sont très importants, tel que dans le cas de Salvador. L'imagerie à très haute résolution semble toutefois pouvoir apporter des nouvelles perspectives et solutions pour une meilleur gestion du risque sismique.

4.2.2 Utilisation des images satellitaires de très haute résolution

Les images de très haute résolution, apparues à la fin des années 90, ont permis le passage de l'analyse au niveau d'une zone à l'analyse au niveau d'un élément seul, tel qu'un bâtiment. Des éléments encore plus petits, tels que des voitures, peuvent également être aujourd'hui distingués. Cette possibilité de reconnaissance du détail du bâti offre ainsi la possibilité d'une cartographie rapide des dommages post-catastrophe, avec un niveau plus élevé de précision et fiabilité.

L'imagerie à très haute résolution a été utilisée notamment pour l'étude du séisme de Bhuj (Inde) en 2001. Une exploitation des images en provenance du satellite IKONOS appliquées à la cartographie et à l'estimation de dommages sera par ailleurs présentée plus loin dans ce chapitre (c. f. § 4.3).

Dans un premier temps, nous présentons une étude réalisée à l'aide d'une simulation multitemporelle SPOT 5, c'est à dire des images SPOT avec une résolution réduite à 2,5m (André et al, 2001 ; André, 2002 ; GSC, 2001). La méthode utilisée est basée sur l'exploitation d'une image antérieure au séisme fournie par KVR 2000 et d'une image IKONOS postérieure, toutes les deux ayant subi une dégradation de leur résolution spatiale initiale pour simuler la résolution de SPOT 5. Plusieurs méthodes classiques de détection multitemporelle des changements ont été essayées, telle que la comparaison automatique des réflectances, les différences radiométriques ou encore l'analyse des contours.

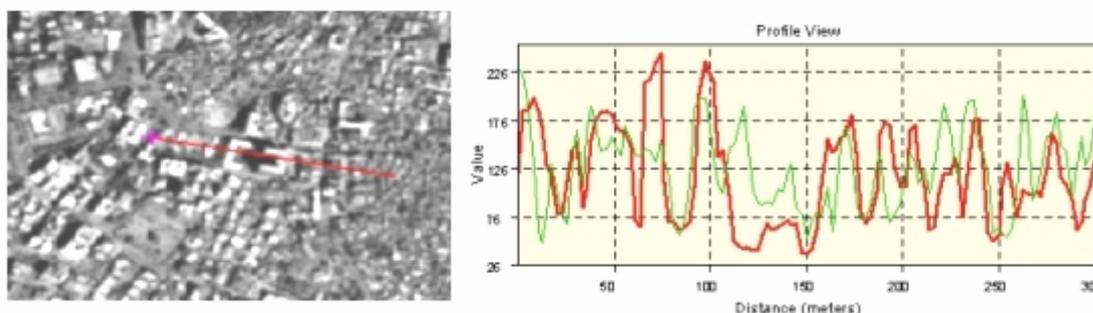


Figure 4.2 Comparaison des profils radiométriques avant (en vert) et après (en rouge) sur une zone supposées sans dégâts. On observe toutefois des écarts importants entre les deux profils (source : GSC 2001).

Ces méthodes, utilisées auparavant sur les images à moyenne et haute résolution (c. f. § 4.2.1 annexe 4.2), n'ont pas fourni ici de résultats probants (c. f. fig. 4.2). Des techniques de photo-interprétation ont été également utilisées, basées sur une détection multi - temporelle de changements. Des critères morphologiques tels que les différences entre la forme et le contour d'un bâtiment ou bien d'une zone homogène de bâti ont permis la réalisation d'une cartographie des zones endommagées (c. f. fig. 4.3). Mais, suite à une validation ultérieure à l'aide d'images IKONOS en pleine résolution ainsi que des photographies de terrain, il s'est avéré que des zones interprétées comme affectées étaient en réalité des « bidonvilles ». La

taille réduite des bâtiments typiques de cette zone est sans doute l'une des sources de cette confusion.



Figure 4.3 Cartographies de dommages sur la ville de Bhuj à l'aide des simulations multi - temporelles SPOT 5 (source : André et al, 2001).

La recherche, réalisée dans le cadre d'une étude d'analyse des potentialités du satellite SPOT5 à l'estimation rapide de dommages³⁸, a mis en évidence les perspectives de ce capteur ainsi que ses limites. Dans un contexte de gestion de crise, la résolution de 2,5m n'apporte pas une fiabilité suffisamment élevée, l'efficacité de son utilisation étant sans doute limitée à la détection des grandes zones urbaines totalement détruites.



Figure 4.4 Cartographie des zones affectées suite au séisme de Bhuj, à l'aide d'une image IKONOS (source : Charte Internationale, 2002).

³⁸ étude réalisée pour le CNES

Une deuxième étude devant conduire à la cartographie de dommages suite au séisme de Bhuj a été réalisée avec des images IKONOS dans le cadre la Charte Internationale « Espace et catastrophes majeures » (c. f. annexe 4.4). L'analyse, basée uniquement sur la photo-interprétation, a permis la détection de quelques bâtiments supposés endommagés, avec deux niveaux de dommages : les constructions totalement ruinées et partiellement ruinées (c. f. fig. 4.3). Malheureusement, les auteurs ne présentent pas les critères qui ont permis la détection des dommages. Nous ne disposons pas non plus d'une carte de dommages sur l'ensemble de l'agglomération urbaine, afin de pouvoir comparer les résultats avec notre propre estimation de dommages (c. f. § 4.5). Toutefois, la ville ayant été fortement touchée, comme nous avons pu le constater suite aux rapports des missions en retour d'expérience et d'après les photographies prises sur le terrain au lendemain du séisme, cette détection de dommages nous semble fiable même si elle reste incomplète.

Récemment, de nouvelles perspectives d'une reconnaissance automatique de dommages ont été proposées par André (2002). Ainsi, une méthode basée sur la détection des anomalies morphologiques des bâtiments semble pouvoir extraire les constructions endommagées, avec un niveau élevé de fiabilité. L'imagerie post – événement fournie par IKONOS est appliquée dans cette étude. Tout d'abord, le bruit est éliminé à l'aide d'un filtre centre connexe (Mering et Parrot, 1994). Ensuite, les bâtiments sont extraits un par un dans un format « vecteur », tâche simplifiée par l'application d'une technique spécifique, appelée *dilatation géodésique* (Serra, 1982), qui facilite la séparation des bâtiments des autres éléments tels que les espaces non construits et les voies de communication. Une enveloppe convexe des bâtiments extraits est ensuite produite (c. f. fig. 4.5) par fermeture morphologique (Serra, 1982).

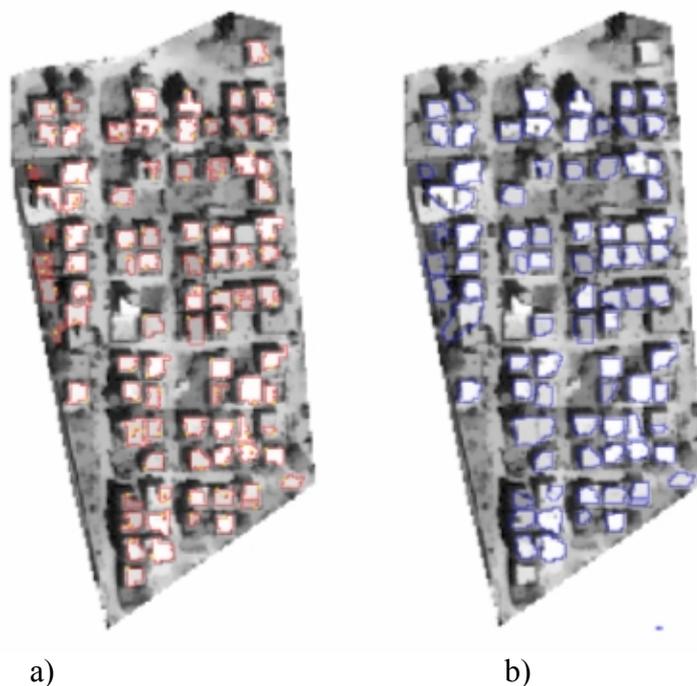


Figure 4. 5 a) Extraction des contours des bâtiments ; b) le calcul de l'enveloppe convexe de chaque objet (source : André, 2002).

On se propose ici de détecter les anomalies morphologiques que l'on considère comme des indicateurs pertinents de l'endommagement d'un bâtiment par un séisme. Quatre indices relatifs aux formes et contours des objets sont calculés pour la mise en évidence de dommages, car on considère ici que ceux-ci sont caractérisés notamment par des déformations

des contours et des formes des bâtiments. Les quatre indices utilisés sont appelés ainsi «l'indice de rugosité», «l'indice de compacité», «l'indice de surface» et «l'indice de périmètre» (André et al, 2003). Sur la base du traitement de zones test, où les bâtiments réellement détruits ont été détectés à l'aide de la photo-interprétation et validés par des rapports de terrain, des seuils qui séparent les objets endommagés de ceux non endommagés ont été fixés sur les valeurs de ces quatre indices. La séparation n'étant pas toujours très nette, un principe de travail a été adopté dans l'étude, afin d'obtenir une haute fiabilité des résultats : au moins 95% des éléments considérés comme endommagés sont réellement endommagés. Ainsi, même si d'autres éléments non détectés peuvent être en réalité détruits, il reste une probabilité minimale (inférieure à 5%) qu'il subsiste des éléments non endommagés parmi les éléments détectés. (c. f. fig. 4.6).

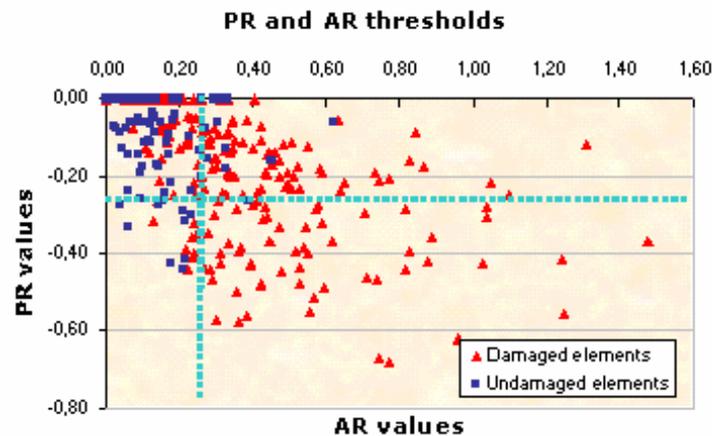


Figure 4.6 Séparation des éléments endommagés à l'aide du seuillage des valeurs des indices de surface et de périmètre. Figurent en rouge les éléments sûrement endommagés. On observe ainsi qu'en bas et à droite par rapport aux lignes vertes se trouvent exclusivement des éléments endommagés (source : André et al, 2003).

Grâce à cette méthode semi-automatique on a pu mettre en évidence les constructions endommagées suite au séisme de Bhuj, sur plusieurs zones-test (c. f. fig. 4.7).



Figure 4.7 Bâtiments endommagés (en rouge) détectés par les seuils réalisés sur les indices de contours et forme (source : André et al, 2003).

La même approche a été appliquée sur une zone non affectée afin de tester la validité de la méthode, en utilisant les mêmes seuils. Ainsi, des zones-test sur San Diego (Etats – Unis) et sur Athènes (Grèce) ont été analysées, et les seuils appliqués n'ont pu distinguer aucun éléments présentant des anomalies morphologiques, ce qui indique une certaine robustesse de la méthode.

4.2.3 Utilisation de l'imagerie radar

L'imagerie radar a commencé à être utilisée notamment dans les années 90 pour la détection des mouvements du sol consécutifs aux secousses sismiques ainsi qu'aux glissements de terrains (Massonet et al, 1993 ; 1994 ; Murakami et al, 1994 ; Achache et al, 1995 ; Fruneau et Achache, 1996). Concernant la détection des dégâts, c'est après les séismes de Kobe, en 1995, que la communauté scientifique s'est penchée sur l'apport des images radar à la reconnaissance des zones endommagées.

Aoki et al (1998) analysent ainsi le potentiel de l'imagerie multi – temporelle fournie par le satellite ERS à la détection de dommages suite au séisme de Kobe, en Japon, du 1995 (c. f. annexe 4.4). Les résultats sont comparés avec la réalité de terrain afin de valider la méthodologie utilisée.

Matsuoka et Yamazaki (2002) utilisent le même type d'images radar en provenance du ERS pour la reconnaissance des dégâts suite au séisme de Kocaeli. Des larges zones urbaines ont pu être détectées et cartographiées (c. f. annexe 4.4).

Les diverses études réalisées à l'aide des images radar ont mis en valeur des approches très intéressantes et innovantes liées à la détection de dommage. Si la précision de l'analyse n'est pas très élevée, ce type d'approche présente en revanche l'avantage important donné par l'élimination d'un inconvénient majeur des images optiques, qui est la présence de nuages.

4.3 Application de l'imagerie satellitaire à l'analyse de la vulnérabilité sismique urbaine

La télédétection, utilisée depuis longtemps pour l'analyse du milieu urbain, a commencé depuis peu à être appliquée dans la gestion du risque sismique, suite notamment au développement des modélisations de dommages (Johnson, 2001). Généralement, l'analyse de la vulnérabilité sismique est réalisée de manière individuelle, pour des constructions précises, dans le but de déterminer la nécessité d'une réhabilitation. Pour cette raison, l'analyse au niveau d'un quartier d'un secteur urbain est assez difficile, car elle nécessiterait une inspection de toutes les constructions, une par une. L'essor des modèles d'estimation de dommages consécutifs aux séismes dans les dernières années a poussé la communauté scientifique à développer des nouveaux outils d'évaluation de la vulnérabilité à grande échelle, sur l'ensemble d'une agglomération urbaine. On s'est penché alors vers les possibilités apportées par l'imagerie satellitaire optique ou radar, les images à très haute résolution disponibles depuis peu permettant d'ouvrir des perspectives prometteuses pour la réalisation de tels objectifs.

L'une des premières études concernant l'application de l'imagerie satellite à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti au risque sismique a été réalisée par Aoki et al (1999). L'étude analyse les caractéristiques de la retrodiffusion d'une zone urbaine à l'aide d'un capteur laser aéroporté à haute résolution. Les auteurs ont essayé de déterminer les signatures spectrales spécifiques à différents types de structures, à travers des ratios de polarisation. Les zones -test

considérées ont montrées uniquement que la polarisation prédominante varie considérablement avec la hauteur, la forme et l'alignement des bâtiments.

Une étude importante concernant l'analyse de la vulnérabilité urbaine a été réalisée par Eguchi et al (2000) ; elle utilise l'imagerie à la construction des inventaires de bâti. Les auteurs réalisent tout d'abord une analyse rapide d'une image radar d'intensité, à haute résolution, et d'un inventaire urbain sous la forme d'une couche SIG, qui permet d'observer les mêmes caractéristiques de la ville (c. f. fig. 4.8). L'analyse de l'image radar (fig. 4.8a), réalisée en quelques heures à l'aide de méthodes automatiques, peut ainsi apporter la même quantité d'informations que l'inventaire urbain (fig. 4.8b), réalisé en plusieurs mois.

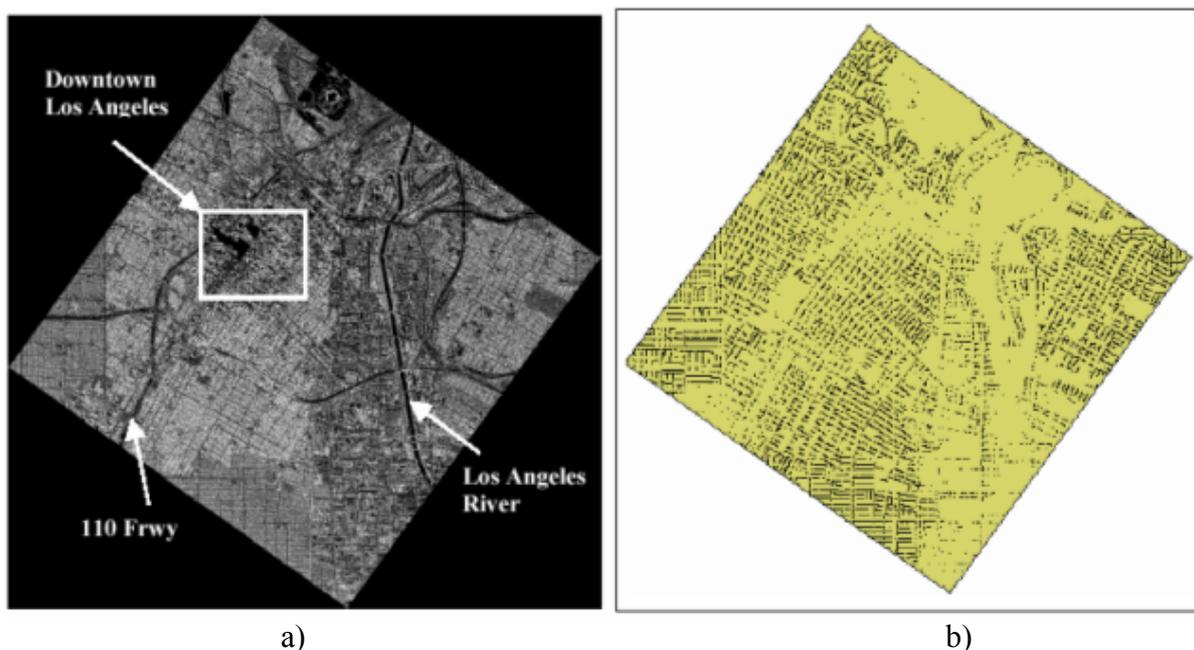


Figure 4.8 a) Image radar comparée avec b) un inventaire urbain (source : Eguchi et al, 2000).

Eguchi et al (2000) ont également étudié les possibilités d'extraction des contours des constructions à partir de l'imagerie optique ainsi que leurs hauteurs, à l'aide de l'imagerie radar. Dans l'exemple cité ci-dessous, la hauteur du bâtiment a pu être calculée à partir d'une image fournie par un capteur radar aéroporté. La comparaison avec une image aérienne permet de constater une relative fiabilité de l'estimation de la hauteur (c. f. fig. 4.9).

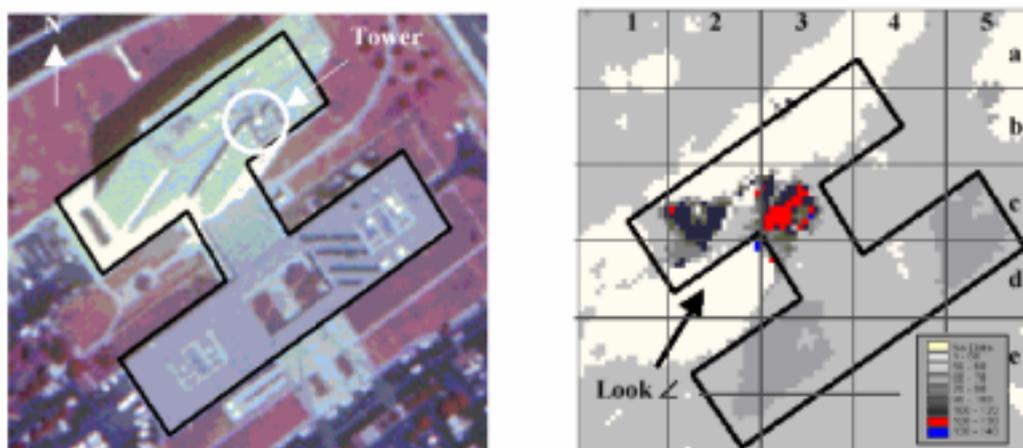


Figure 4.9 Calcul de la hauteur d'un bâtiment à l'aide de l'imagerie radar et comparaison avec une photo aérienne (source : Eguchi et al, 2000).

Malgré le caractère restreint de cette application, qui se réduit à quelques exemples ponctuels, elle permet d'entrevoir les possibilités de l'imagerie satellite pour effectuer des inventaires urbains qui donneraient accès à une estimation précise de la vulnérabilité sismique.

Nous pouvons noter également une récente initiative française (Wyniecky et al, 2003). Dans cette recherche, la vulnérabilité urbaine est analysée à l'aide d'un Modèle Numérique de Surface (MNS). Des capteurs optiques aéroportés à très haute résolution sont utilisés ainsi pour l'extraction des bâtiments et pour le calcul de leurs hauteurs. Les contours des constructions sont extraits ici manuellement, un par un, par digitalisation de l'information visible sur l'image. Ensuite, des hauteurs sont associées à chaque objet, suite à la réalisation d'un MNS sur la zone - test (c. f. fig. 4.10).

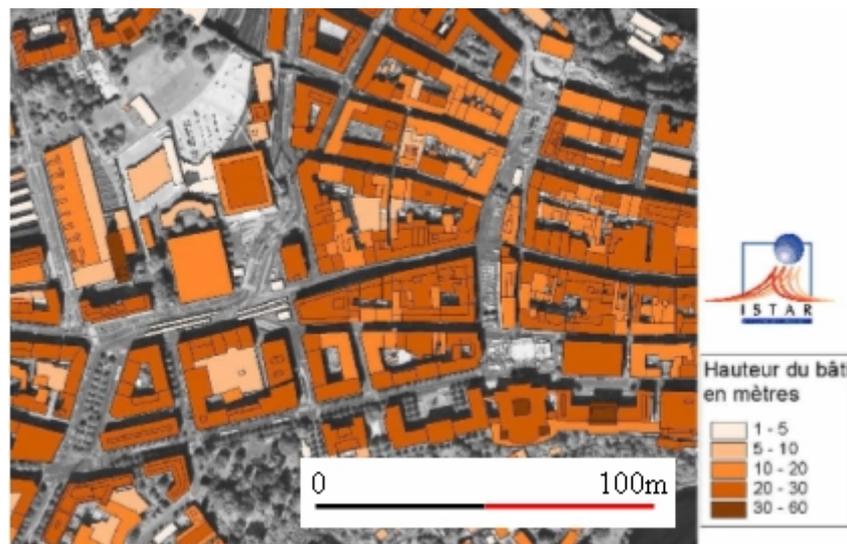


Figure 4.10 Détermination des hauteurs des constructions à partir des images aériennes à très haute résolution (source : Wyniecky et al, 2003).

Les auteurs présentent ensuite un système d'évaluation de la vulnérabilité du bâti, à travers l'analyse d'une vidéo corrélée à un GPS. Ainsi, l'inspection visuelle d'un bâtiment dont le GPS indique la position exacte permet l'évaluation de sa vulnérabilité. L'information est ensuite cartographiée et associée à chaque bâtiment extrait antérieurement.

Diverses autres études analysent également la vulnérabilité face au risque sismique à travers l'imagerie satellitaire, mais restent aujourd'hui à un niveau expérimental (Tarek et Weeks, 2003 ; Nefesliogu et al, 2003 ; Dalaibaatar et al, 2001).

Malgré l'existence des travaux utilisant l'imagerie radar comme optique, des méthodes précises d'analyse de la vulnérabilité n'ont pas encore vu le jour. Mais l'imagerie actuellement disponible offrent toutefois des perspectives très intéressantes. Ainsi, de nombreuses villes sont aujourd'hui dotés des Modèles Numérique d'Élévation ou de Surface, qui apportent des informations incontournables pour l'analyse de la vulnérabilité sismique, ne serait-ce que la hauteur des constructions. Ces données, utilisées principalement par les acteurs de la télécommunication, restent encore économiquement très chères et par conséquent très peu accessibles au monde scientifique. Avec la multiplication des capteurs aériens ou satellite à très haute résolution on peut envisager une réalisation plus facile et à grande échelle de ce type de données, qui permettront à l'avenir une meilleure prévention et protection contre le risque sismique.

4.4 Utilisation de l'imagerie satellite à très haute résolution à l'estimation de dommages consécutifs au séisme de Bhuj, Inde (2001). Comparaison avec une simulation *ex-ante*.

Nous allons utiliser ici l'imagerie satellitaire en provenance des satellites IKONOS et KVR1000 à la reconnaissance des zones affectées sur la ville de Bhuj, en Inde, suite au séisme du 26 janvier 2001. Les dommages détectés principalement sur la base d'une photo interprétation sont cartographiés à l'aide d'un SIG. Nous avons effectué également une estimation rapide des victimes, élément qui peut apporter des informations très importantes à l'organisation des équipes de secours dans un contexte de gestion de crise. Une comparaison des résultats avec une modélisation *ex-ante* de dommages, réalisée sur la base des courbes de capacité développées dans ce travail (c. f. § 2), est effectué en dernier lieu.

4.4.1 Contexte de l'étude

Le 26 janvier 2001, vers 9 heures du matin, un séisme très important a frappé l'ouest de l'Inde, dans une région de plus de 20 millions d'habitants (c. f. fig. 4.11). La secousse, ressentie jusqu'au Pakistan et au Népal, a produit des dégâts importants dans l'état du Gujarat, où plus de 20000 personnes ont trouvé la mort et environ 167000 ont été blessées. L'épicentre s'est situé à 23.36°N et 70.34°E, à une distance d'environ 225 km d'Ahmedabad, et environ 300 km d'Hyderabad, au Pakistan. La ville de Bhuj, située à 20 kilomètres de l'épicentre, a souffert des pertes très importantes, de même que les villes de Bachau et Anjar. Une intensité maximale de X (sur l'échelle MSK) a été assignée par les autorités locales à une zone circonscrite à ces trois villes.



Figure 4.11 Localisation de l'épicentre du séisme de Bhuj, Inde, 2001 (source image : www.eqecat.com)

La secousse, d'une magnitude évaluée à 7,7 par l'USGS a engendré une rupture de faille d'environ 40 km (EERI, 2001), sur une direction est – ouest, avec un mécanisme en faille inverse. La profondeur de l'hypocentre a été estimé entre 18 km (selon l'Université de Tokyo) et 22 km (selon l'USGS). Peu de stations d'enregistrement des signaux sismiques étaient installées dans la région de l'épicentre. Un des rares enregistrements disponibles se trouve à Ahmedabad, où le pic de l'accélération a été mesuré à environ 0,11g (c. f. fig. 4.12). Cette valeur, anormalement élevée, semble être due aux éventuels effets de site (AFPS 2001). La loi d'atténuation de Fukushima et Tanaka (1990, 1992) peut renseigner sur la valeur maximale de l'accélération en zone épiscopentrale, estimée à une moyenne de 0,25g (AFPS 2001).

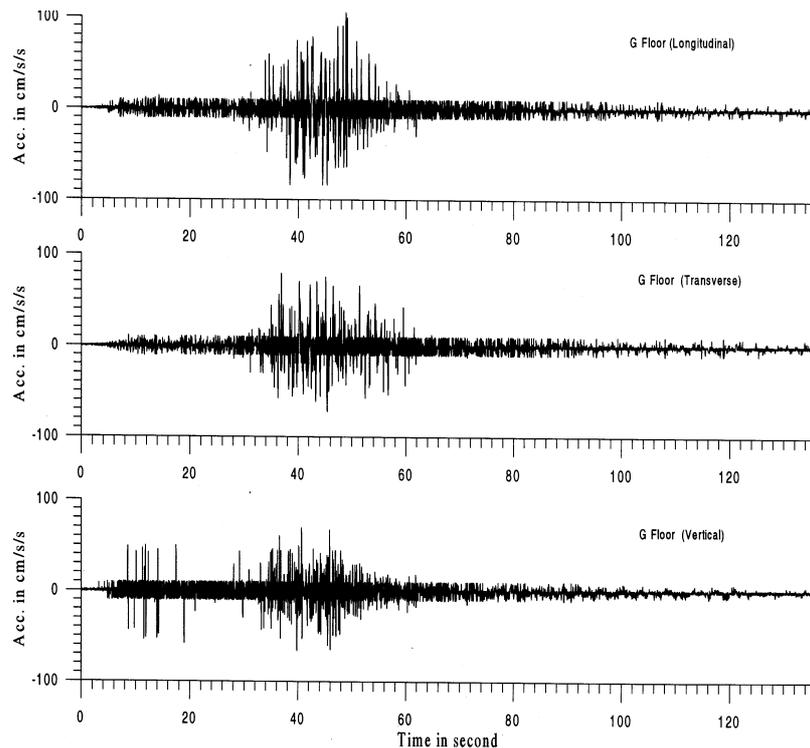


Figure 4.12 Accélération sismique enregistrée à Ahmedabad, au rez-de-chaussée d'un immeuble (source : Université de Roorkee, Inde)

Le nord de l'Inde constitue une région à sismicité historique, due à la collision de la plaque indienne et la plaque Eurasie, à raison d'environ 20 mm/an (Bilham et al, 2001). Cette zone a connu ainsi de nombreux séismes historiques, tels que celui de Koyna (1967), Latur (1993) ou encore le tremblement destructeur du 16 juin 1819, survenu dans la partie ouest de Gujarat, à Allah Bund, d'une magnitude de 7,8 (c. f. fig. 4.13).

Quelques répliques, le 8 février d'une magnitude de 5,3 et le 19 février, d'une même magnitude (AFPS 2001) ont accompagné le mouvement principal, sans engendrer toutefois de dommages. La secousse principale a provoqué une liquéfaction de grande ampleur, dans toute la partie nord du district de Kachchh, sur une surface de plusieurs dizaines de milliers de km² (EERI, 2001).

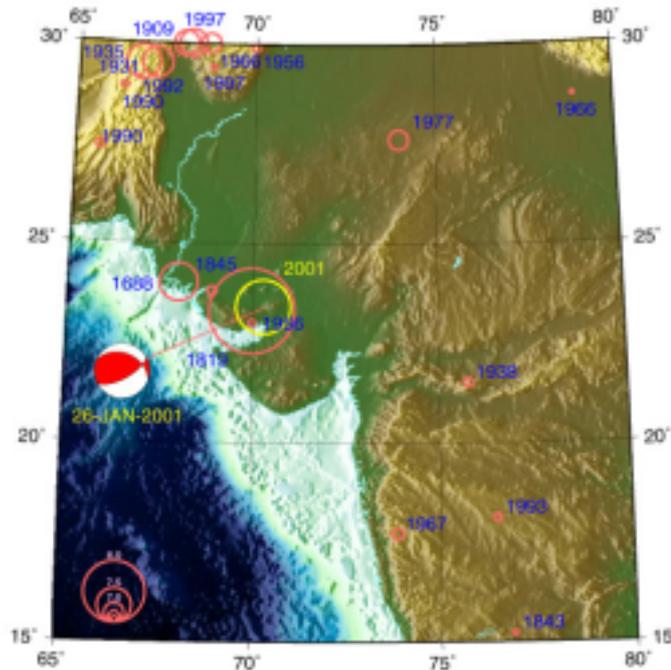


Figure 4.13 Carte des épacentres historiques dans la région de Gujarat (source : Université de Tokyo ; Japon).

4.4.2 Présentation de l'architecture indienne

L'architecture indienne est caractérisée par la prépondérance de divers types de constructions en maçonnerie ou en pierres, réalisées selon des traditions centenaires. Récemment, on constate l'apparition de plus en plus des bâtiments en béton armé de plusieurs étages, qui depuis environ 25 ans sont devenus majoritaires dans les zones urbaines³⁹. Parmi les constructions en maçonnerie, on peut citer les constructions réalisées entièrement en pierres, celles avec une ossature en bois ou encore celle avec un toit en poutrelles en bois (c. f. annexe 4.5). Le comportement de ces types de bâti face à un tremblement de terre est assez déficitaire, les nombreux séismes survenus en Inde témoignant des dommages importants produits à ces constructions (c. f. fig. 4.14). Les bâtiments récents en béton sont également assez vulnérables au risque sismique, en raison notamment du non respect des normes parasismiques, qui existent pourtant officiellement en Inde depuis 1962 (Indian Standard, 1962) et qui font suite à une série de travaux réalisés bien avant la deuxième guerre mondiale (Kumar, 1933 ; ICJ, 1934 ; West, 1937). De nombreux bâtiments de ce type ont été fortement endommagés suite au séisme de Bhuj, dont environ 75 à Ahmedabad, à plus de 200 km de l'épicentre (c. f. fig. 4.15).

³⁹ Une description plus détaillée de principaux types de constructions se retrouve en annexe 4.5



Figure 4.14 Maisons en maçonnerie, très vulnérables face aux séismes (source : Université de Roorkee, Inde)



a)



b)

Figure 4.15 Bâtiment en cadres en béton armé, situé à Bhuj, endommagé suite au séisme de 2001 par la ruine classique d'un étage intermédiaire (a) et du rez-de-chaussée (b) (source : EERI, 2001).

Une caractéristique des bâtiments en béton armé à plusieurs niveaux est la présence des réservoirs d'eau au niveau du toit. Les citernes d'eau ont été un facteur majeur d'endommagement d'un grand nombre de constructions (c. f. fig. 4.16). Leur effondrement brutal est survenu en raison d'un simple manque de résistance ainsi que du mouvement dynamique induit par l'oscillation de l'eau sous la sollicitation sismique.



Figure 4.16 Effondrement du réservoir d'eau, situé au dernier étage, phénomène constaté sur une large échelle suite au séisme de Bhuj (source : EERI, 2001).

Un de types traditionnels d'architecture, présent notamment dans l'état de Gujarat, est le bâti appelé « bhonga » (c. f. fig. 4.17). De forme ronde, en terre, et avec un toit léger, ces constructions ont prouvé un comportement relativement satisfaisant face aux séismes, en raison notamment de leur forme et de leur structure légère. Par ailleurs, ce type de construction réduit la probabilité de blessure en cas d'effondrement.



Figure 4.17 Construction traditionnelle de type « bhonga », spécifique à la région de Gujarat (source : www.world-housing.net)

Par ailleurs, il convient d'examiner également le cas de la présence des monuments historiques, dont de nombreux font partie du patrimoine architectural mondial de l' UNESCO. Le séisme du janvier 2001 a produit des dommages très importants à ces monuments, dont notamment la destruction totale du temple Rao Lakhaji Chhatri, à Bhuj, construit en 1761, ou encore la destruction partielle du palais de Darbargarh (c. f. fig. 4.18).



Figure 4.18 Destruction totale du temple Rao Lakhaji Chhatri (a) et partielle du palais Darbargarh (b), suite au séisme de Bhuj (source : UNESCO, 2001).

4.4.3 Cartographie et estimation de dommages

4.4.3.1 Analyse préalable de la vulnérabilité urbaine

Nous avons utilisé l'imagerie optique à très haute résolution afin de détecter et de cartographier les zones endommagées sur la zone urbaine de Bhuj. Les données que nous avons exploitées sont deux images encadrant l'événement. La première, prise comme référence, provient du satellite russe KVR-1000, à 2m de résolution, acquise en 1998 (c. f. annexe 4.6). La seconde est une image IKONOS, prise deux jours après le séisme, avec une résolution de 1 mètre en mode multispectral (c. f. annexe 4.7).

Tout d'abord, une analyse de l'ensemble de l'image IKONOS nous a permis d'estimer la vulnérabilité globale de la ville. Nous avons pu mettre ainsi en évidence (c. f. fig. 4.19), à l'aide d'un filtre rehaussant les contours, deux zones de bâti dense spécifique de l'architecture traditionnelle (c. f. annexe 4.5). L'analyse visuelle de l'image nous a permis ensuite de confirmer cette hypothèse. La zone A (le cercle rouge, en haut sur l'image 4.19) correspond vraisemblablement au centre ancien, en raison de son caractère centrique par rapport à la ville (c. f. fig. 4.20). La zone B (le cercle rouge, à droite sur l'image 4.19) correspond à un quartier pauvre, avec des constructions de type « bhonga » (c. f. fig. 4.21). Ces deux zones à bâti traditionnel se caractérisent par une taille très réduite des bâtiments, proche voire inférieure au pixel (qui est de 1m sur l'image IKONOS utilisée). Pour cette raison, la détection mono-temporelle des dommages a été quasi impossible dans ces deux parties de la ville.

La différence entre ce type de structure urbaine et les zones de construction récente est significative (c. f. fig. 4.22). On remarque que les images 4.20, 4.21 et 4.22 sont à la même échelle, d'environ 1/3000. Les destructions présentes dans cette partie moderne de la ville deviennent ainsi détectables, la taille des bâtiments permettant une reconnaissance des dégâts.



Figure 4.19 Détection des deux zones à bâti dense, traditionnel, de la ville de Bhuj



Figure 4.20 Structure urbaine de la vieille ville de Bhuj

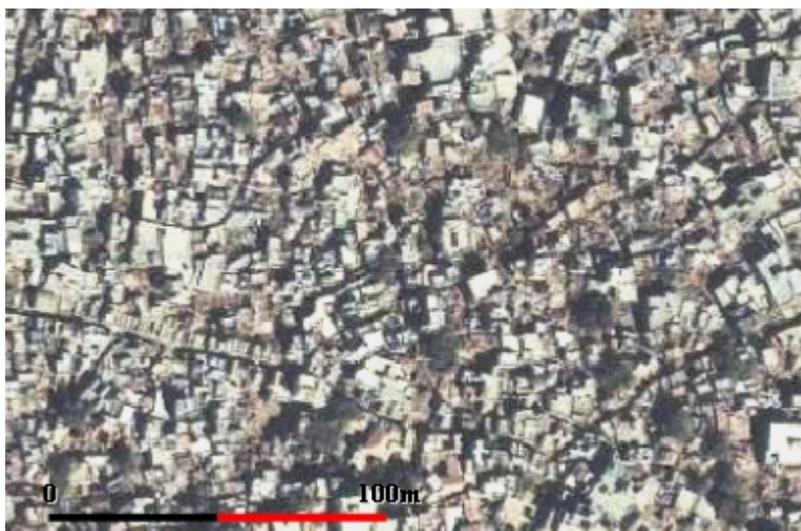


Figure 4.21 Structure urbaine d'un quartier pauvre, avec des maisons traditionnelles, de type « bhonga », spécifique à la région de Gujarat



Figure 4.22 Structure urbaine des parties modernes de la ville de Bhuj

4.4.3.2 Détection et cartographie de dommages

En photo - interprétation il existe deux techniques de base pour la détection de changement : l'analyse mono - temporelle, réalisée uniquement sur une image postérieure, et une analyse multi - temporelle, lorsque l'on dispose d'un couple d'images encadrant l'événement. Dans le premier cas, l'analyse basée sur la détection visuelle des dommages est fortement dépendante de la résolution spatiale. Dans le deuxième cas, la détection des changements entre les images avant et après permet l'identification d'éventuels dégâts. Ceux-ci sont associés à des changements de structure, de forme ou de contour (Chiroiu et al, 2003a).

Nous avons appliqué dans cette étude une analyse mono - temporelle, vérifiée ensuite par une détection de changement multi - temporelle, notamment pour les zones à bâti dense. La reconnaissance des dommages a été facilitée dans la partie sud de la ville par le caractère régulier des bâtiments, à l'opposé de la « vieille ville », où la taille des constructions

traditionnelles indiennes a rendu l'interprétation plus difficile. Des nombreux bâtiments complètement en ruine ont pu être détectés et cartographiés, les endommagements étant facilement reconnaissables (c. f. fig. 4.23 et 4.24).



Figure 4.23 Ensemble des bâtiments complètement détruits sur la ville de Bhuj, suite au séisme du janvier 2001



Figure 4.24 Constructions en ruine, dont les débris couvrent la route, suite au séisme de Bhuj du janvier 2001

Les différenciations des niveaux d'endommagement ne sont généralement pas détectable par l'imagerie spatiale, qui permet uniquement de reconnaître les immeubles complètement détruits. En effet, des niveaux de dommages structurels légers, modérés ou même importants restent invisibles depuis l'espace, car dans ce cas la construction garde la même forme et le même contour. L'effondrement d'un étage faible, généralement le rez-de-chaussée, n'est qu'un exemple des dommages importants non détectables à l'aide de l'imagerie satellite. Ce type d'endommagement, qui s'est produit à grande échelle suite au séisme du 1999 de Kocaeli, en Turquie, correspond à un mode classique de ruine des bâtiments (c. f. annexe 4.8). Nous avons pu toutefois réaliser une distinction entre deux niveaux de dégâts : les dommages forts et les dommages très forts (c. f. fig. 4.25 a, b et c). On considère qu'il y a dommage importants lorsqu'un bâtiment (ou une zone) est endommagé, mais il (elle) n'est pas complètement effondré (en jaune) ; le dommage très important correspond à la ruine totale de

la structure (en rouge). Cette classification permet par la suite de réaliser une estimation rapide de victimes, sur la base de la détection de ces deux niveaux de dégâts.



Figure 4.25 Exemple de dommage très important (a); exemple de dommage important (en jaune) et très important (en rouge) (b); exemple d'une zone interprétée comme ayant des dommages importants (c).

En ce qui concerne l'analyse du centre ancien, c'est uniquement l'interprétation multi-temporelle qui nous a permis la reconnaissance des zones affectées. Le critère sur lequel nous sommes basé a été notamment la disparition des alignements des rues (c. f. fig. 4.26).

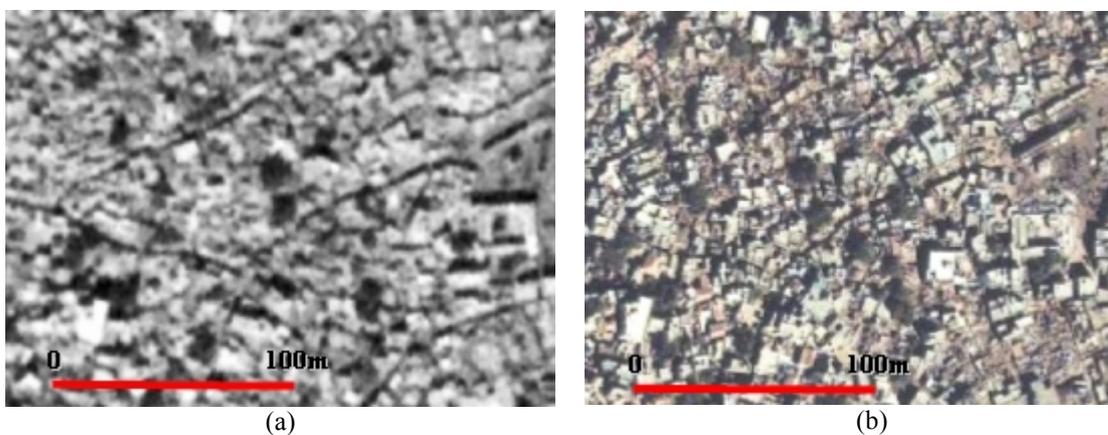


Figure 4.26 Disparition des alignements de rues, critère utilisé pour la détection de dommages dans la vieille ville. L'image pré - séisme (a) et l'image post - séisme (b).

Un SIG a été utilisé pour la représentation ainsi que l'analyse spatiale des zones des dommages (c. f. fig. 4.27). Une importante concentration de destructions peut s'observer dans la partie nord de la ville (le centre ancien) où la vulnérabilité élevée des constructions ou bien des éventuels effets de site ont contribué à l'amplification de dégâts. Les méthodes d'analyse spatiale du SIG nous ont permis de calculer la surface des zones endommagées. Nous avons pu ainsi estimer sur l'ensemble de la zone urbaine couverte par l'image environ 0,43 km² considérés comme présentant de dégâts, avec 0,25 km² de dommages importants (DI) et 0,18 km² de dommages très importants (DTI).

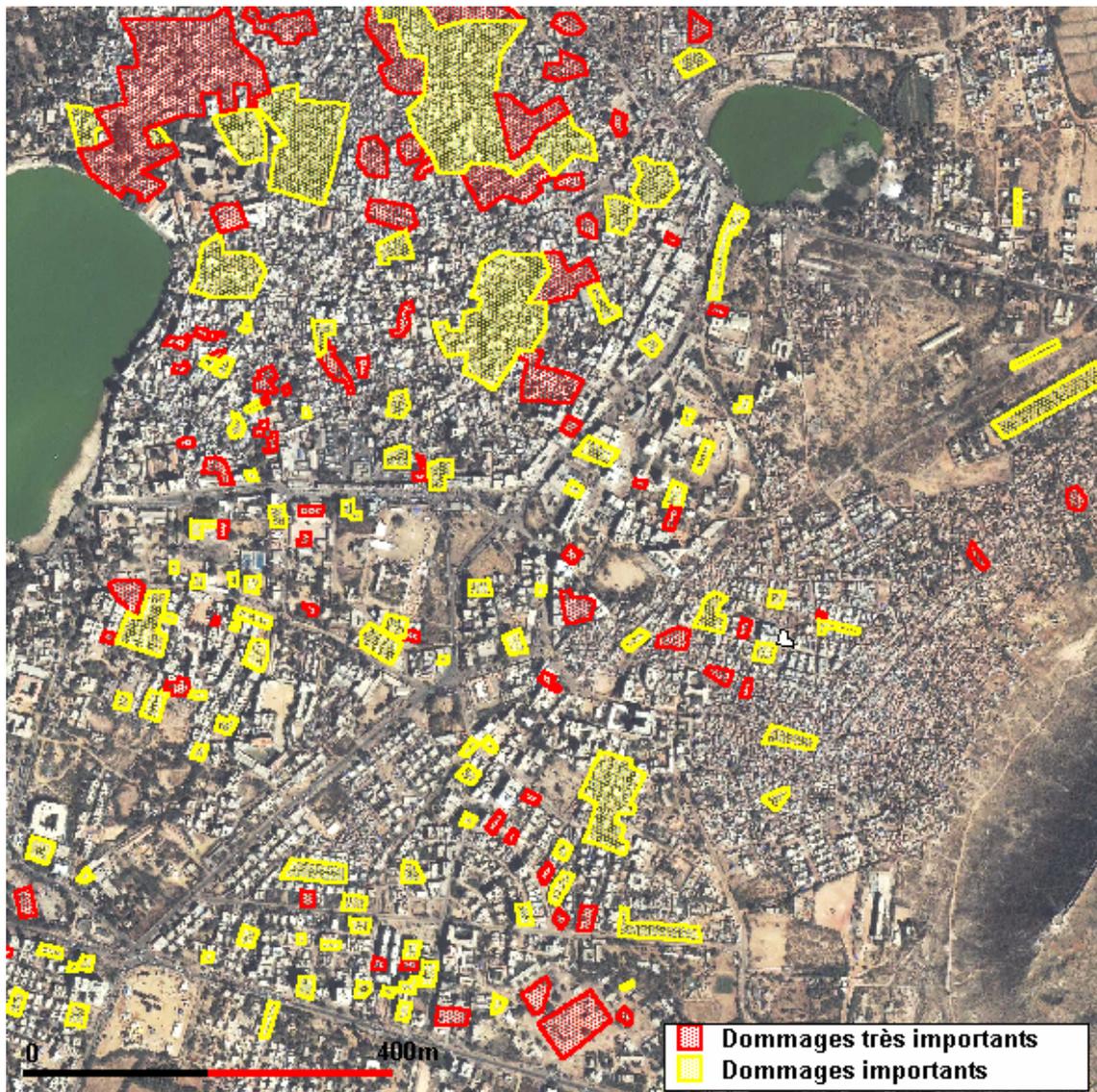


Figure 4.27 Distribution spatiale de zones endommagées sur l'agglomération urbaine de Bhuj, suite au séisme du janvier 2001.

4.4.3.3 Estimation de dommages

Deux méthodes statistiques ont été appliquées dans le but d'obtenir une estimation rapide du nombre de victimes : une approche basée sur HAZUS (NIBS 1997) ainsi qu'une nouvelle approche expérimentale.

La population de la ville, estimée à environ 120000 personnes (WorldBank, 2001) est divisée par la surface de la zone urbaine (4,3 km²), afin d'obtenir une densité relative de population, qui est de 28140 habitants par km². Cette densité est mise en correspondance par la suite avec la surface endommagée, pour estimer le nombre de personnes affectées par chaque niveau de dégâts (c. f. tableau 4.1). Nous trouvons de cette manière 7035 habitants affectés par le DI et 5065 affectés par le DTI.

Niveau de dommages	Densité (habitants/km ²)	Surface (km ²)	Nombre de personnes affectées
DI	28140	0.25	7 035
DTI	28140	0.18	5 065

Tableau 4.2 Nombre de personnes affectées par chaque niveau de dommages

Nous avons appliqué dans un premier temps une approche basée sur HAZUS (NIBS 1997) pour estimer le nombre total de victimes. Une échelle de dommages corporels en 4 niveaux est définie dans cette méthode (c. f. annexe 1.10):

- sévérité 1 : blessures légères ne nécessitant pas l'intervention médicale
- sévérité 2 : blessures nécessitant une intervention médicale mais sans danger de mort
- sévérité 3 : blessures qui peuvent être mortelles s'il n'y a pas d'intervention médicale rapide
- sévérité 4 : blessures mortelles.

Nous avons simplifié ici cette échelle en 2 niveaux : les blessés légers (niveau équivalent à la somme de trois premiers niveaux de sévérité de HAZUS), et les blessés mortels (équivalent au niveau de sévérité 4 de HAZUS).

En fonction du niveau de dommage physique au bâti, des ratios de victimisation sont fournis par type de construction. Nous avons pris pour notre application les ratios correspondants au bâti en maçonnerie non renforcée (c. f. annexe 1.2), en raison de deux éléments : la similitude avec le type de construction traditionnel indien et la distribution la plus défavorable de ces ratios par rapport aux autres types de bâti. Les pourcentages de dommages corporels pour cette catégorie de bâtiments sont présentés ci-dessous (c. f. tableau 4.2):

Niveau d'endommagement physique du bâti	Niveaux de dommage corporel			
	Sévérité 1	Sévérité 2	Sévérité 3	Sévérité 4
Domage structurel léger	0.05	0.005	0	0
Domage structurel modéré	0.4	0.04	0	0
Domage structurel important	2	0.2	0.002	0.002
Domage très important sans effondrement	10	2	0.02	0.02
Domage très important avec effondrement	50	10	2	2

Tableau 4.2 Ratios de victimisation issus de HAZUS, pour le bâti de type maçonnerie non renforcée

De la même façon que pour les dommages corporels, les cinq niveaux de dégâts structurels des bâtiments ont été simplifiés en deux classes, afin de pouvoir corréliser les deux niveaux de dommages importants (DI) et dommages très importants (DTI). Ainsi, ce dernier correspond au niveau « dommage très important avec effondrement », et le premier à la somme des autres quatre niveaux. Les ratios de victimisation deviennent alors (c. f. tableau 4.3):

		Blessés légers (BL)			Blessés mortels (BM)
Ratios de victimisation (%)		Sévérité 1	Sévérité 2	Sévérité 3	Sévérité 4
DI	Dommage structurel léger	0.05	0.005	0	0
	Dommage structurel modéré	0.4	0.04	0	0
	Dommage structurel important	2	0.2	0.002	0.002
	Dommage structurel très important sans effondrement	10	2	0.02	0.02
	TOTAL	14.717			0.022
DTI	Dommage structurel très important avec effondrement	50	10	2	2
	TOTAL	62			2

Tableau 4.3 Ratios de victimisation issues de HAZUS regroupées dans notre étude

Les ratios de victimisation présentés ci-dessus sont ensuite appliqués au nombre total d'habitants affectés. A titre d'exemple, concernant les DI, le pourcentage de blessés légers est de 14,717% sur 7035 personnes affectées par ce niveau de dommage. L'estimation complète du nombre de victimes est présentée dans le tableau 4.4

Niveau de dommage au bâti	Pers. affectées	Ratio de BL	Ratio de BM	BL	BM
DI	7035	0.14717	0.00022	1035	2
DTI	5065	0.62	0.02	3140	101
Total:				4175	103

Tableau 4.4 Estimation du nombre de victimes réalisée sur la base de la méthode HAZUS

Nous avons obtenu, par conséquent, une estimation de 4175 blessés légers et 103 blessés mortels en utilisant une approche basée sur la méthode HAZUS,

Nous avons appliqué ensuite une deuxième approche, basée sur deux hypothèses simplificatrices. Cette approche est encore expérimentale, et fait l'objet de recherches en cours (Chiroiu et al, 2002a ; 2002, b ; 2002, c). Nous avons fait les suppositions suivantes :

a) concernant les DTI, compte tenu du fait que la structure est complètement détruite, nous considérons que 80% des habitants ont souffert de blessures mortelles, et 20% de blessures légères.

b) pour ce qui est des DI, nous considérons que 5% des habitants sont blessés mortellement, et 60% sont blessés légèrement.

En appliquant ces ratios au nombre des personnes affectées par chaque niveau de dommages physique au bâti, nous avons utilisé ainsi la même démarche que dans le cadre de la première approche (c. f. tableau 4.5).

Niveau de dommage au bâti	Pers. affectées	Ratio de BL.	Ratio de BM	BL	BM
DI	7035	60%	5%	4221	352
DTI	5065	20%	80%	1013	4052
			Total:	5234	4404

Tableau 4.3 Estimation du nombre des victimes réalisée sur la base des hypothèses simplificatrices

Nous obtenons de cette manière une estimation de 5234 blessés légers et 4404 blessés mortels.

Nous pouvons remarquer des différences importantes entre les résultats fournis par ces deux approches. L'estimation de victimes basée sur HAZUS est considérablement inférieure à celle de la deuxième approche, notamment pour ce qui est de l'évaluation du nombre de blessés mortels, où l'on observe un écart d'un facteur d'environ 40.

4.4.3.4 Validation de la détection et de l'estimation de dommages

La principale contrainte de l'imagerie satellite est l'impossibilité de détecter l'endommagement modéré ou léger du bâti. De plus, le mode de ruine connu sous le nom «d'étage faible», produit sur une large échelle notamment suite au séisme de Kocaeli (1999), est difficilement reconnaissable. Par conséquent, les résultats que nous avons obtenus, en termes de cartographie de zones endommagées et d'estimation du nombre des victimes, ne correspondent qu'aux dégâts structurels très importants, où le bâtiment a perdu toute capacité de résistance. Les autres limites sont engendrées par l'homogénéité des images et la qualité des données, qui influent sur l'interprétation. L'analyse multi - temporelle est conditionnée notamment par des résolutions identiques du couple d'images traitées. Parmi d'autres facteurs contraignants, on peut citer également l'angle d'incidence des capteurs, qui détermine la fiabilité de l'interprétation. Un angle d'incidence trop élevé engendre des ombres importantes, qui peuvent cacher des bâtiments.

En ce qui concerne notre estimation du nombre des victimes, des limitations sont dues à une évaluation peu précise de la densité de population.

Du point de vue de la cartographie de dégâts, la plupart des rapports de reconnaissance après le séisme présente la ville de Bhuj comme fortement touchée, avec le centre ancien « complètement détruit » (AFPS 2001) ou avec « plus de 70% d'effondrement total » (EDM, 2001). Des photos de terrain témoignent de l'ampleur des destructions dans cette zone (c. f. fig. 4.28).



Figure 4. 28 Le centre historique de la ville de Bhuj après le séisme du janvier 2001 (source : UNESCO, 2001).

Notre cartographie a identifié le centre ancien comme présentant une importante concentration de dommages (la partie nord sur l'image 4.26).

Une des dernières statistiques officielles de dommages sur la ville de Bhuj est donnée par le rapport fourni le 29 Janvier 2001 par l'équipe de gestion de crise des Nations Unies UNDMT⁴⁰. Celui –ci mentionne un nombre de 5065 morts et 10925 blessés (UNDMT 2001). Après cette date, les pertes ont été quantifiées pour l'ensemble de l'état de Gujarat, sans aucun détail concernant Bhuj. Un rapport final en provenance de la Banque Mondiale (World Bank, 2001) présente une statistique globale d'environ 20000 morts et 167000 blessés pour l'ensemble de cette région, où les villes de Anjar et de Bachau (les deux villes ayant une population d'environ 50000 personnes) ont souffert des pertes très importantes, avec des effondrement sur des vastes surfaces.

Comparant ces chiffres avec nos résultats, on peut remarquer que nous avons sous-estimé nombre des victimes (c. f. tableau 4.6). Concernant le nombre des personnes décédés, notre deuxième approche expérimentale fournit une évaluation relativement proche de la réalité. L'approche basée sur HAZUS montre une estimation bien inférieure à la réalité. Pour ce qui est du nombre des personnes blessées, on remarque des sous évaluations à peu près équivalentes issues des deux approches.

Source	Statistique du nombre des victimes	
	Nombre de personnes blessées	Nombre de personnes décédées
UNDMT	10925	5065
Approche basée sur HAZUS	4175	103
Nouvelle approche expérimentale	5234	4404

Tableau 4.6 Comparaison de l'estimation du nombre de victimes avec les statistiques officielles

Les raisons de cette sous appréciation générale sont multiples. Elles sont liés notamment à l'impossibilité de détection de dommages modérés ou légers, tel que nous l'avons exposé auparavant, ou encore à la qualité médiocre de l'estimation de la densité de population. A ces

⁴⁰ United Nations Disaster Management Team

éléments s'ajoutent au biais les ratios de victimisation, qui peuvent être évidemment mal calibrés.

4.4.4 Simulation *ex-ante* de dommages. Comparaison des résultats.

Nous avons réalisé une estimation de dommages *ex-ante*, en utilisant les courbes de capacité développées auparavant, suivant la méthode que nous avons employée pour les deux scénarii de séismes sur les villes de Nice et Barcelone (c. f. § 3).

Tout d'abord, nous avons calculé le spectre de réponse correspondant au séisme réel. En raison du manque d'enregistrements de signaux réels, nous avons pris un PGA de 0,25g comme sollicitation de référence, selon l'estimation réalisée par la mission AFPS (2001). A partir de cette valeur nominale, nous avons construit ensuite un spectre de réponse selon les valeurs caractéristiques données par les normes françaises AFPS (1992). Ceci ne représente toutefois qu'une approximation du mouvement réel du sol, réalisée comme une alternative à l'absence de données précises. Nous avons pris, de la même manière que pour l'application sur Nice, un sol de type S1 (c. f. annexe 3.1), qui définit les caractéristiques du spectre de réponse (c. f. fig. 4.29).

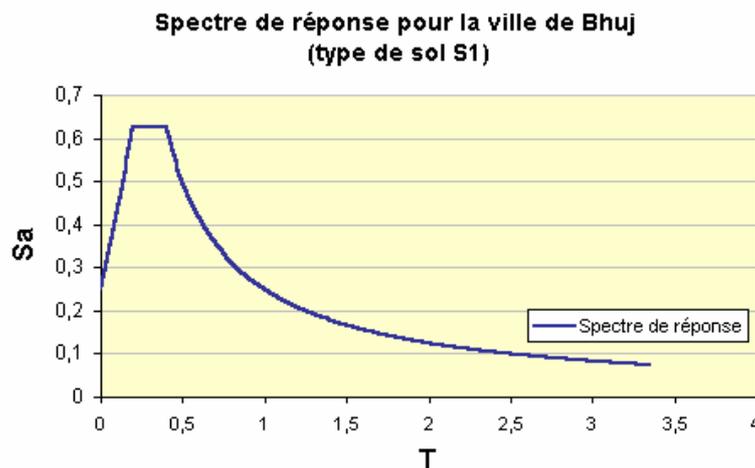


Figure 4.29 Spectre de réponse considérée pour le séisme de Bhuj, suivant la norme PS 92 (1992), avec un PGA de 0,25g.

Pour modéliser les dommages physiques au bâti, nous avons appliqué ensuite les courbes de capacité développées dans notre recherche. Nous avons considéré uniquement le type de bâti, B1, correspondant aux constructions en cadres en béton armé de moins de 4 étages. En dehors de la maçonnerie non renforcée, qui représente le bâti prédominant, ce type de construction (c. f. annexe 4.3) est couramment utilisé, notamment dans la partie moderne de la ville.

Nous avons donc superposé la courbe de capacité B1 au spectre de réponse, réduit selon les paramètres correspondant (c. f. annexe 3.2) pour tenir compte de l'amortissement supplémentaire de ce type de structure (c. f. fig. 4.30). Nous obtenons ainsi le point de demande (c. f. § 3).

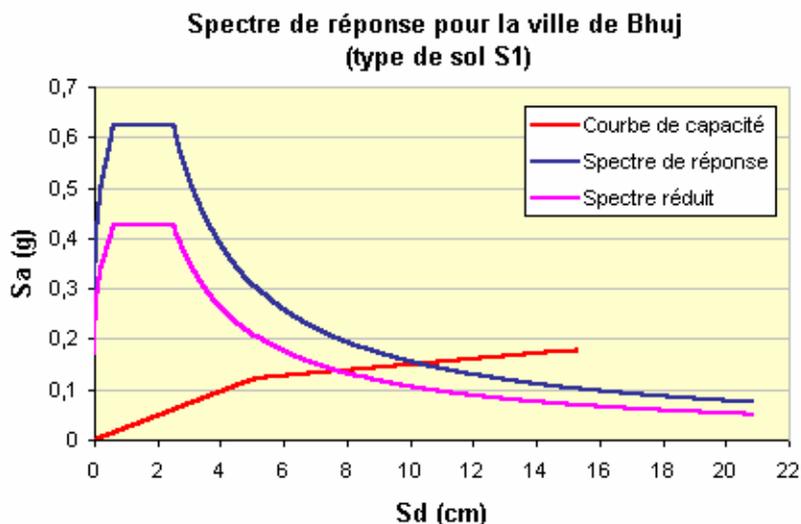


Figure 4.30 Superposition de la courbe de capacité caractéristique au bâti de type B1 au spectre de réponse du séisme de Bhuj. Obtention du point de demande.

En appliquant les courbes d'endommagement issues de HAZUS (c. f. § 1.2.1, 3.3.3 et c. f. annexe 3.3), nous avons obtenu d'une manière analytique une estimation de dommages potentiels consécutifs au séisme de Bhuj du janvier 2001. Les résultats sont présentés ci-dessous (c. f. tableau 4.7). Nous rappelons que le niveau D0 représente l'absence de dommages, et que le niveau D4 correspond à des dommages très forts (c. f. § 3.3.3).

Niveaux de dommages	D0	D1	D2	D3	D4
Pourcentage de bâti endommagé	7,5 %	8,6 %	34,6 %	32,5 %	16,8%

Tableau 4.74 Résultats de la simulation *ex-ante* de dégâts.

Nous avons trouvé donc une estimation de 16,8% de bâtiments de type B1 comme présentent des dommages très forts.

Nous avons essayé ensuite de comparer les résultats de cette simulation *ex-ante* de dommages avec notre estimation *ex-post* réalisée à l'aide de l'imagerie satellite. Plusieurs inconvénients apparaissent concernant la possibilité de cette comparaison, notamment sur la distribution du type de bâti supposé équivalent à celui de la classe B1 présent dans les zones endommagées. Nous avons toutefois tenté, à travers une approche statistique, d'obtenir des résultats comparables.

Tel que nous avons pu le montrer auparavant, à l'aide de l'imagerie satellite on peut distinguer uniquement les dommages très importants. Les bâtiments endommagés par la ruine d'un seul étage (qui engendre l'effondrement du bâtiment) font exception, car malgré leur endommagement total ils sont très difficiles à être reconnus par télédétection. En raison de cet aspect nous allons comparer uniquement les résultats obtenus concernant le niveau D4 de dommages supposés, correspondant à la ruine probable des bâtiments.

Nous avons seulement considéré ici les zones endommagées de la partie moderne de la ville, supposée présenter majoritairement des constructions similaires au type B1, pris dans la

simulation *ex-ante* de dégâts. De cette manière on exclut notamment les constructions traditionnelles en maçonnerie, présentes en grande partie dans la vieille ville. Nous avons partagé ensuite la partie moderne de Bhuj en plusieurs zones, en fonction de la densité des bâtiments (c. f. fig. 4.31). Cette distinction nous permet d'associer à l'estimation un facteur qui prend en compte la répartition de la surface totale bâtie sur l'ensemble de la zone.

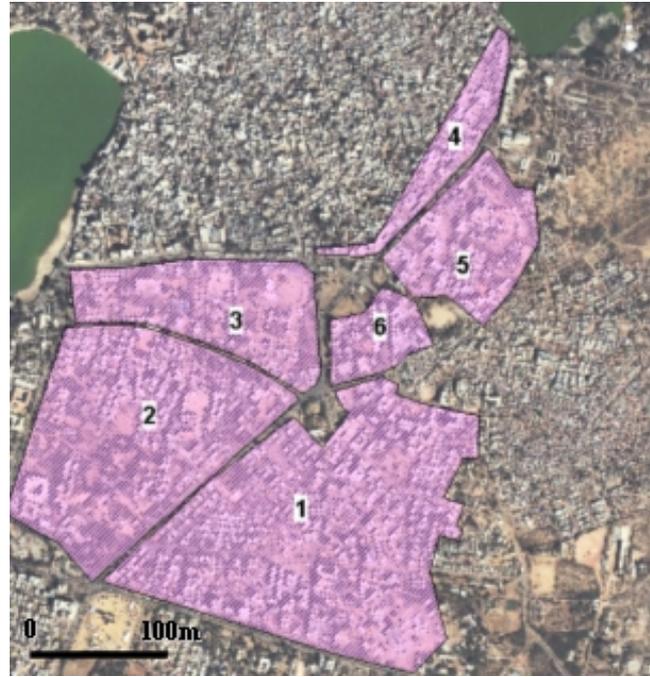


Figure 4.31 Répartition de la partie moderne de Bhuj en plusieurs zones, en fonction de la densité du bâti.

Le calcul que nous avons réalisé pour estimer le pourcentage du bâti endommagé est basé sur la formule suivante :

$$P = \frac{S(\text{end})_i}{S(\text{tot})_i \times c_i} \quad 4.1$$

- P représente le pourcentage de bâti endommagé sur la zone étudiée
- S (end)_i représente la surface endommagée sur la zone étudiée
- S(tot)_i représente la surface totale de la zone étudiée
- c_i représente le pourcentage de surface bâtie sur la zone étudiée.

Le calcul des surfaces S(end)_i et S(tot)_i, ainsi que le coefficient de densité de la surface bâtie réalisé l'aide du SIG, est détaillé dans le tableau ci-dessous (c. f. tableau 4.8). Ce dernier a été évalué sur la base d'une photo-interprétation. Le coefficient de densité de la surface bâtie (c_i) est considérée comme la zone où des dommages ont été détectés lors de l'analyse des images satellitaires, indépendamment du niveau de dégâts, qu'ils soient importants ou très importants. Les deux niveaux de dégâts correspondent au niveau D4 de dommages issu de HAZUS, car la structure, même si elle n'est pas encore complètement en débris, n'assure plus aucune capacité de résistance, ce qui équivaut au niveau maximum de dommage.

Zone	Surface endommagée (m ²)	Surface totale (m ²)	Pourcentage de surface bâtie	Pourcentage de bâti endommagé
1	48000	410000	0,7	16,7%
2	20000	280000	0,4	17,8%
3	11250	133000	0,4	21,1%
4	4500	38000	0,7	16,9%
5	7000	103000	0,5	13,6%
6	5300	41000	0,7	18,5%
Moyenne générale				17,4%

Tableau 4.8 Calcul du pourcentage de bâti endommagé

Nous pouvons observer une moyenne de 17,4% de bâti fortement endommagé. Comparant avec les résultats obtenus suite à la simulation *ex-ante*, on remarque une relative similitude entre les deux résultats (17,4% obtenus à travers l'imagerie contre 16,8% obtenus d'une manière analytique).

Ces résultats incorporent néanmoins plusieurs incertitudes et approximations, comme nous l'avons montré auparavant. On peut citer notamment l'incertitude liée à l'action sismique, considérée ici comme caractérisée par un PGA moyen de 0,25g. Mais des effets probables de site ou topographique, ou tout simplement les écarts possibles de la loi de corrélation utilisée auraient donné un PGA supérieur à cette valeur, ce qui engendrerait des dommages plus forts en termes quantitatifs issus de la simulation analytique.

Nous sommes toutefois satisfaits de la cohérence des résultats des deux approches, qui indiquent une relative validité des coefficients ainsi que des méthodes utilisées. Ces constatations semblent indiquer que les modèles d'estimation de dommages *ex-ante* offrent des résultats proches de la réalité, même si leur précision demande certainement à être améliorée.

4.5 Application de l'imagerie satellite à très haute résolution à l'estimation de dommages suite au séisme de Boumerdes, Algérie (2003).

Nous présentons ici une étude visant à la détection et à la cartographie de dommages suite au séisme de Boumerdes, en Algérie, survenu le 21 mai 2003, à l'aide de l'imagerie satellitaire à très haute résolution fournie par IKONOS et QUICKBIRD. Notre étude sera focalisée sur les agglomérations urbaines de Boumerdes et de Zemmouri, situées à proximité de l'épicentre.

4.5.1 Contexte de l'étude

Le 21 mai 2003, à 19h44 heure locale, un très fort séisme de magnitude 6,8 a frappé le nord de l'Algérie, produisant des dommages très importants dans la plupart des zones urbaines de la côte méditerranéenne. Le séisme, dont l'épicentre a été localisé par USGS à environ 60 km à l'est-nord-est de la capitale Alger (c. f. fig. 4.32), s'est produit dans une zone de

chevauchement entre la plaque Eurasienne et la plaque Africaine, par un mécanisme de faille inverse. Un tsunami de 2m a été généré dans la Méditerranée, produisant des dégâts jusqu'aux Baléares, où de nombreux bateaux stationnés dans le port ont souffert d'endommagements considérables. La région la plus affectée a été la province de Boumerdes, située à l'est d'Alger, où les villes de Zemmouri, Thenia et Boumerdes ont connu des destructions massives.



Figure 4.32 Localisation de l'épicentre du séisme d'Algérie du 21 mai 2003, et son mécanisme au foyer.

La partie Est de la capitale a été également touchée, et de nombreux bâtiments en béton armé ont été complètement détruits. Les statistiques officielles de victimes présentent globalement plus de 2200 morts et 10200 blessés.

L'Algérie se trouve dans une zone à sismicité élevée, qui a connu un grand nombre de secousses à travers l'histoire. Ainsi, en 1716, un séisme très important avait détruit la plupart de la ville, causant la mort de plus de 20000 personnes ; en 1316 une secousse similaire a été notée. Plus récemment, le séisme d'Orléansville en 1954 d'une magnitude de 6,7 a provoqué la mort d'environ 1200 personnes et la destructions de plus de 20000 bâtiments ; en 1980, le tremblement de terre de El Asnam a causé la mort d'environ 2600 personnes.

4.5.2 Analyse des dommages sur la ville de Zemmouri

4.5.2.1 Détection et cartographie de dommages sur Zemmouri

Nous avons réalisé dans un premier temps une analyse des dommages sur la ville de Zemmouri, située à une dizaine de kilomètres de l'épicentre, à l'aide de l'imagerie post-événement fournie par IKONOS et acquise 7 jours après le séisme (c. f. fig. 4.33). La reconnaissance de dégâts est basée uniquement sur des interprétations visuelles. Les nuages présents dans la partie sud de l'image n'ont pas permis l'analyse de la ville de Thenia, qui a souffert également de pertes très importantes, ainsi que d'une partie de la ville de Zemmouri.

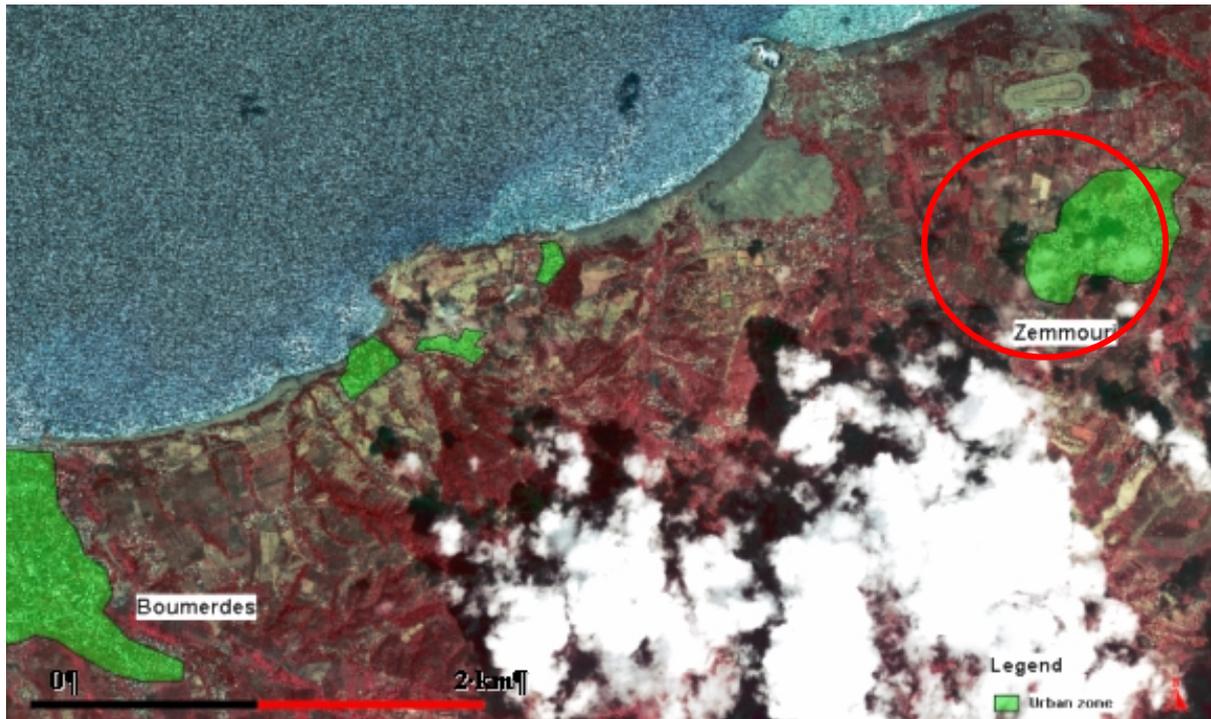


Figure 4.33 Image IKONOS acquise après le séisme de Boumerdes, le 21 mai 2003. Sont cartographiées en vert les principales agglomérations urbaines (source image : European Space Imaging).

Sur une image RGB, réalisée afin de mieux séparer le bâti et les ombres de la végétation, nous avons utilisé les techniques classiques de la photo – interprétation mono-temporelle pour la détection et la cartographie de dommages. De la même façon que pour l'étude des conséquences du séisme de Bhuj, nous avons appliqué des critères basés sur les anomalies morphologiques et radiométriques des bâtiments. comme endommagés



Figure 4.34 Reconnaissance des dommages suite au séisme de Boumerdes, de mai 2003, à l'aide d'une image IKONOS post – événement. On remarque l'absence de l'ombre du bâtiment situé dans le cercle rouge (source image : European Space Imaging).



(a)



(b)

Figure 4.35 Reconnaissance des dommages suite au séisme de Boumerdes, de mai 2003, à l'aide d'une image IKONOS post – événement. Distinction entre dommages très importants (a) et importants (b) (source image : European Space Imaging).

Ainsi, nous avons pu observer des changements importants dans la continuité des toits ou dans la forme des constructions, ou encore l'absence de l'ombre (c. f. fig. 4.34) que nous avons interprétés comme une conséquence de l'endommagement du bâti (c. f. fig. 4.35).

Les critères de reconnaissance de dommages mentionnés ci-dessus nous ont permis la détection et la cartographie de zones affectées sur l'ensemble de la ville de Zemmouri. La présence de quelques petits nuages dans la partie sud de la ville a limité toutefois cette interprétation (c. f. fig. 4.36).

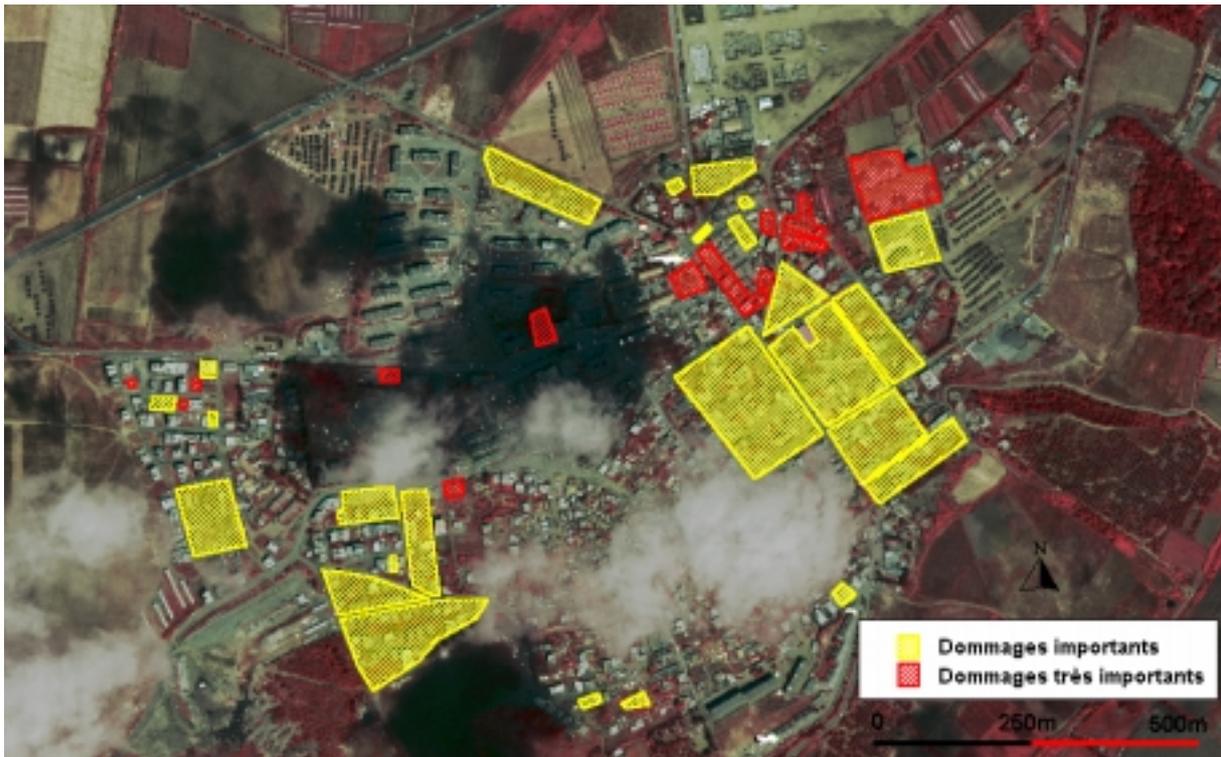


Figure 4.36 Cartographie de dommages sur Zemmouri. (source image: European Space Imaging).

4.5.2.2 Estimation de pertes à Zemmouri

Nous avons essayé ensuite de quantifier le nombre de victimes, à partir de la reconnaissance de dommages. Nous avons appliqué les deux approches statistiques décrites précédemment : une première basée sur les ratios de victimisation issues de HAZUS et une deuxième basée sur nos hypothèses.

Nous avons estimé tout d'abord la densité approximative de la population, à travers la quantification de taille de la zone urbaine. Nous obtenons ainsi (c. f. tableau 4.9) une densité de 0,027 personnes par m².

Population totale	21,000 ⁴¹
Surface (m ²)	760,000
Densité (personnes/m²)	0,027

Tableau 4.9 Estimation de la densité de population de Zemmouri

A partir de cette estimation, nous avons calculé le nombre d'habitants affectés par type de dommages : le dommage important (DI) et le dommage très important (DTI). Nous avons obtenu ainsi un nombre de 3571 personnes affectées par DI et 440 affectées par DTI (c. f. tableau 4.10).

⁴¹ source : La Croix Rouge (www.croix-rouge.fr)

	Densité (personnes / m ²)	Surface (m ²)	Nombre de personnes affectées
Dommege important (DI)	0,027	132270	3571
Dommege très important (DTI)	0,027	16270	440

Tableau 4.10 Calcul du nombre des personnes affectées par le séisme de Boumerdes, sur la ville de Zemmouri

Pour l'approche issue de HAZUS, nous avons appliqué les mêmes équivalences (entre les niveaux de dommages au bâti et les niveaux de sévérité de blessures) que celles présentées plus haut dans le texte (c. f. § 4.4) afin d'obtenir des ratios de victimisation pour les deux niveaux de dommages au bâti, DI et DTI, et pour les deux niveaux de dommages corporels, qui sont les blessés légers (BL) et les blessés mortels (BM). Nous avons gardé ainsi les ratios de HAZUS correspondant au bâti en maçonnerie non renforcée, car, même si ce type de construction n'est pas majoritaire, ces ratios sont les plus défavorables par rapport aux autres classes prédéfinies de bâti. Nous obtenons une estimation de 799 personnes blessées légèrement et 10 personnes blessées mortellement (c. f. tableau 4.11).

Niveau de dommage au bâti	Pers. affectées	Ratio de BL.	Ratio de BM	BL	BM
DI	3571	0.14717	0.00022	526	1
DTI	440	0.62	0.02	273	9
Total:				799	10

Tableau 4.11 Estimation de pertes humaines à Zemmouri, suite au séisme du 21 mai 2003. Evaluation réalisée sur la base de HAZUS.

Nous avons appliqué ensuite une deuxième approche, à travers des ratios de victimisation basés sur nos deux hypothèses simplificatrices, que nous rappelons ci-dessous :

a) concernant les DTI, compte tenu du fait que la structure est complètement détruite, nous considérons que 80% des habitants ont souffert de blessures mortelles, et 20% de blessures légères.

b) pour ce qui est des DI, nous considérons que 5% des habitants sont blessés mortellement, et 60% sont blessés légèrement.

Utilisant ces hypothèses, à travers la même typologie appliquée pour la première approche nous obtenons (c. f. tableau 4.12) une évaluation de 2231 blessées et 531 morts.

Niveau de dommage au bâti	Pers. affectées	Ratio de BL.	Ratio de BM	BL	BM
DI	3571	60%	5%	2143	179
DTI	440	20%	80%	88	352
Total :				2231	531

Tableau 4.125 Estimation de pertes humaines sur Zemmouri, suite au séisme du 21 mai 2003. Evaluation réalisée sur la base des hypothèses simplificatrices

4.5.2.3 Validation de la cartographie et de l'estimation de dommages sur Zemmouri

Sans revenir sur les contraintes liées à la reconnaissance des dommages en ville, on peut noter toutefois la présence des nuages sur la partie Sud de Zemmouri, ce qui a empêché l'analyse d'une zone relativement restreinte.

Les dépêches des agences de presse ainsi que quelques rapports de missions en retour d'expérience mentionnent des destructions massives (AFPS 2003 ; EERI 2003). Ainsi, on a apprécié « 80% de la ville complètement détruite »⁴².

D'un point de vue cartographique, nous disposons d'une carte des dommages réalisée par le Gouvernement Nord- Américain au lendemain de la catastrophe, pour les Nations Unies (c. f. fig. 4.37). On observe la représentation de quatre niveaux d'endommagement, entre ceux catastrophiques, en rouge, et ceux légers, en jaune. Dans la partie centre - ouest de la ville, on peut constater une cartographie relativement équivalente des zones affectées. En revanche, des différences apparaissent dans la partie nord, où la grande zone visible en bleu n'a pas été détectée comme endommagée à travers notre analyse ; dans la partie sud, nous avons identifié une zone importante de dommages modérés, non cartographiée dans la figure ci-dessous.

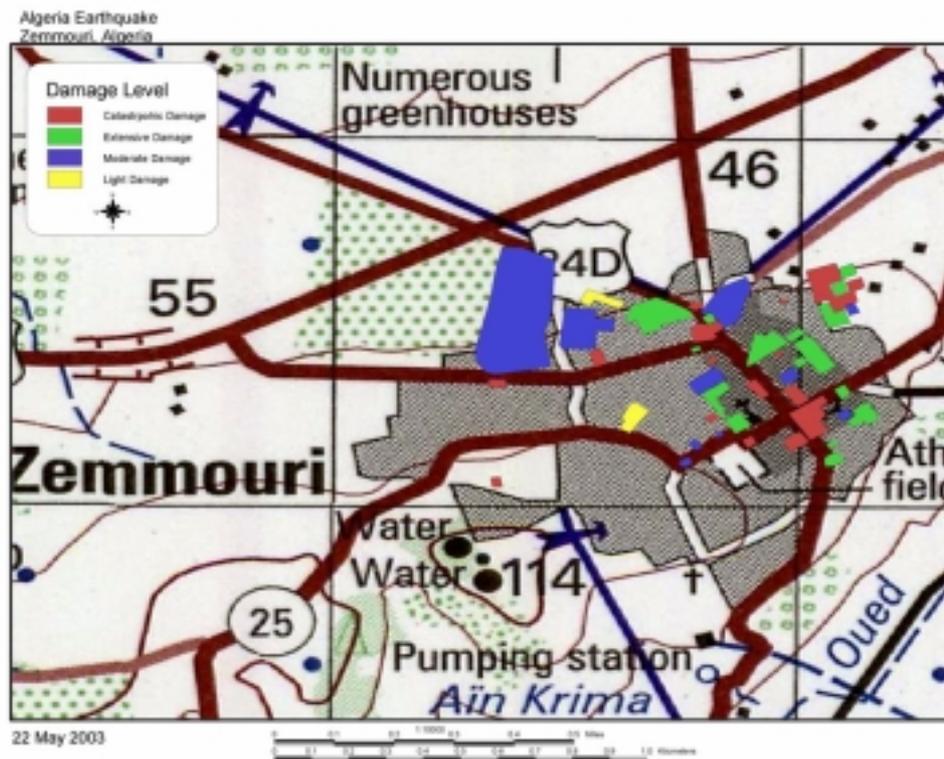


Figure 4.37 Cartographie des dommages sur Zemmouri réalisée par le Gouvernement Américain pour les Nations Unies, le lendemain du séisme du 21 mai 2003 (source: www.reliefweb.org)

En ce qui concerne la validation de notre quantification du nombre des victimes, des sources présentent plus de 300 morts⁴³ sur Zemmouri, ou encore 3442 blessés et 1382 morts sur l'ensemble de la province de Boumerdes⁴⁴. On constate donc une légère surévaluation des

⁴² AP, le 25 Mai 2003; Le Monde, 27 Mai 2003

⁴³ source : Le Monde du 27 mai

⁴⁴ source : Centre National Algérien de Gestion de Crise

victimes issue de notre approche, ainsi qu'une importante sous-évaluation issue de HAZUS, mais la comparaison est difficile à réaliser en absence des statistiques officielles exactes.

4.5.3 Analyse des dommages sur la ville de Boumerdes

Nous avons réalisé dans un deuxième temps une analyse de dommages sur la ville de Boumerdes, à l'aide des images multi-temporelles encadrant le séisme du 21 mai 2003, fournies par le satellite Quickbird. Nous avons pu comparer ainsi pour la première fois des images à très haute résolution (60 cm) acquises par le même capteur présentant l'état des lieux avant et après le séisme (c. f. annexe 4.9). La ville de Boumerdes, capitale de la province qui porte son nom, se situe à environ 12 km à l'ouest de Zemmouri et environ 60 km à l'est d'Alger. Fortement touchée par le séisme, la ville a été déclarée zone sinistrée, de même qu'environ 20 autres agglomérations urbaines la province de Boumerdes.

Nous avons pu analyser l'imagerie acquise un an avant le séisme et deux jours après l'événement. Le niveau du détail des images ainsi que la typologie des constructions, majoritairement modernes, nous ont permis une reconnaissance des dommages à l'échelle du bâti. L'analyse multi-temporelle confère une très haute fiabilité à la détection de dommages, en diminuant considérablement les éventuelles confusions d'une interprétation mono-temporelle, comme nous le montrons à travers les exemples suivants (c. f. 4.38 et 4.39).



(a)

(b)

Figure 4.38 Destruction complète de plusieurs immeubles à Boumerdes suite au séisme du 21 mai, reconnaissable clairement à l'aide de l'imagerie multi-temporelle. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).

On observe sur l'image 4.39b, post-événement, l'effondrement total des plusieurs immeubles, ainsi que l'endommagement de plusieurs bâtiments. Le même type

d'effondrement peut être constaté sur l'image post événement de la figure 4.39, où la partie gauche des trois immeubles s'est effondré en mille-feuilles.

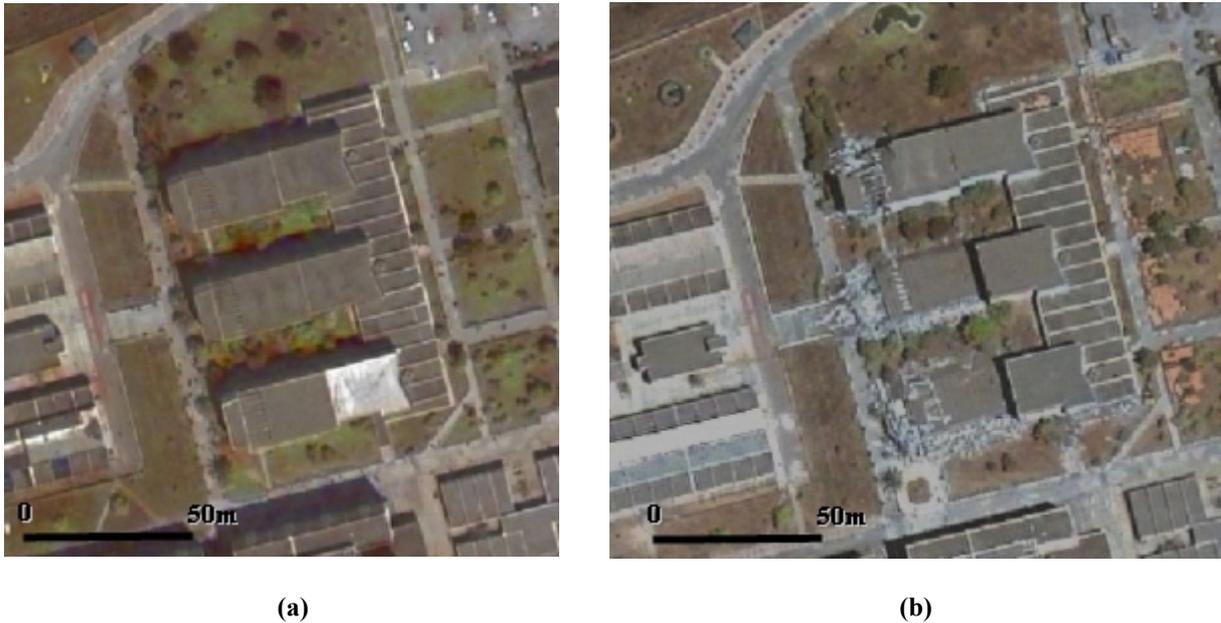


Figure 4.39 Effondrement de trois immeubles modernes de Boumerdes. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).

Nous avons pu extraire également d'autres exemples de comparaison « avant – après » qui ne laissent aucun doute sur l'interprétation des zones endommagées (c. f. annexe 4.10). De plus, la résolution de 60cm et l'angle d'incidence utilisé nous ont permis la détection de l'effondrement du rez-de-chaussée, un mode typique d'endommagement généralement non détectable, car l'immeuble reste debout, même complètement ruiné (c. f. fig. 4.40).



Figure 4.40 Effondrement d'un rez-de-chaussée à Boumerdes, détectable à l'aide de l'imagerie multi-temporelle. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).

La distinction entre les dommages forts et très forts a été réalisée selon le principe présenté dans le § 4.4. Les dommages importants ont été considérés lorsque l'immeuble est endommagé mais pas effondré (c. f. fig. 4.41), et les très importants quand il est complètement détruit, rasé (c. f. fig. 4.42).



Figure 4.41 Exemple de dommage important à Boumerdes. On distingue les bâtiments à l'intérieur des cercles jaunes comme endommagés mais pas complètement effondrés. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b) (source image : DigitalGlobe).

On peut observer que les deux bâtiments qui se trouvent dans les cercles jaunes (c. f. fig. 4.41) ont souffert des endommagements importants, celui de gauche semblant être tordu, et celui de droite étant probablement effondré sur son rez-de-chaussée. La structure des deux immeubles est restée pourtant debout, malgré la ruine des édifices. C'est en raison de aspect que nous les avons considérés comme dommages importants. D'autres destructions d'immeubles, qui ont été complètement rasés (c. f. fig. 4.42), ont été classés en dommages très importants.



Figure 4.42 Endommagement très important à Boumerdes. L'immeuble à l'intérieur du cercle rouge a été complètement rasé. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b) (source image : DigitalGlobe).

Nous avons ainsi analysé les dommages sur l'ensemble de la zone urbaine, à travers une comparaison multi – temporelle de chaque bâtiment. La cartographie résultante, facilitée par la présence majoritaire de constructions modernes à plusieurs niveaux, probablement en béton armé, a été réalisée au niveau de l'immeuble. En raison de la grande extension spatiale de la ville, nous présentons la cartographie de dommage uniquement sur une partie de la ville (c. f. fig. 4.43).



Figure 4.43 Cartographie de dommages sur une partie de ville de Boumerdes, suite au séisme du 21 mai 2003 (source de l'image de fond : DigitalGlobe).

Au niveau de l'ensemble de la ville, nous avons représenté (c. f. fig. 4.44) les zones ayant une concentration importante de bâtiments détruits. Nous avons distingué, en fonction de la densité des destructions, les zones à destructions importantes et les zones à destructions modérées. Les zones à destructions importantes ont ainsi une concentration plus élevée d'immeubles endommagés (à dommages forts ou très forts) que les zones à destructions modérées.



Figure 4.44 Cartographie de zones affectées sur l'ensemble de la ville de Boumerdes, suite au séisme du 21 mai 2003 (source de l' image de fond : DigitalGlobe).

Cette cartographie d'ensemble permet d'avoir une vue générale des zones affectées. Il existe également d'autres immeubles endommagés, en dehors de ces zones, mais les destructions restent isolées par rapport au voisinage, n'étant pas concentré sur une partie distincte de la ville. La cartographie détaillée présentée ci-dessus permet d'avoir une analyse plus fine de la situation.

Nous n'avons pas pu réaliser d'évaluation du nombre des victimes, car nous n'avons pas disposé d'informations sur le nombre d'habitants de la ville de Boumerdes.

La validation n'a pas été non plus réalisée, en raison de l'absence de toute carte officielle de dommages, ainsi que du manque d'une validation terrain. Mais le niveau de résolution des images utilisées, la possibilité d'une analyse multi – temporelle ainsi que la clarté des exemples de dommages nous font penser à une haute fiabilité des résultats obtenus.

D'une perspective de gestion de crise, un couple d'image à résolution sous – métrique encadrant l'événement peut apporter certainement des informations très utiles et précises concernant la localisation de dommages. La seule contrainte est liée dans ce cas au délai d'acquisition d'images, qui se révèle trop important jusqu'ici pour assurer un caractère opérationnel d'une telle analyse pour une intervention rapide de l'aide humanitaire.

4.6 Synthèse de l'application de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique

Nous avons synthétisé dans les tableaux 4.13 les principales caractéristiques concernant l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique, notamment pour la détection de dommages et pour la définition des enjeux.

	Très haute résolution	Haute résolution	Moyenne résolution	Basse résolution	Radar
Détection de dommages					
<i>Analyse automatique</i>	Pas de méthodes fiables (travaux de recherche en cours)	Pas de méthodes fiables (travaux de recherche en cours)	Uniquement détection des grandes surfaces complètement détruites	Uniquement détection des grandes surfaces complètement détruites	- Uniquement détection des grandes surfaces complètement détruites - Fiabilité assez limitée
Temps de traitement	-	-	< 24 h	< 24h	< 24h
Limitations ou contraintes principales	- Impossibilité de séparation automatique du bâti du reste des objets - Nébulosité	- Impossibilité de séparation automatique du bâti du reste des objets - Nébulosité	- Nécessité d'images d'avant le séisme avec les mêmes caractéristiques - Nébulosité	- Nécessité d'images d'avant le séisme avec les mêmes caractéristiques - Nébulosité	- Nécessité d'images d'avant le séisme avec les mêmes caractéristiques

Remarques	- Sous certaines conditions, l'analyse peut être faite uniquement sur une seule image post-événement		- Impossibilité de détection des dommages au niveau du bâti - Impossibilité de détection de dommages de type « étage faible »	- Impossibilité de détection des dommages au niveau du bâti - Impossibilité de détection de dommages de type « étage faible »	- Impossibilité de détection des dommages au niveau du bâti - Impossibilité de détection de dommages de type « étage faible » - Perturbation du signal radar en milieu urbain par d'autres facteurs que les dégâts
<i>Analyse visuelle</i>	- Haute fiabilité en milieu urbain moderne - Fiabilité moyenne en milieu rural ou urbain ancien (dense)	- Fiabilité moyenne en milieu urbain moderne - Faible fiabilité en milieu rural ou urbain ancien (dense)	Analyse très difficile voire impossible	Analyse impossible	Analyse impossible
Temps de traitement	< 24 h	< 24h	-	-	-
Limitations ou contraintes principales	- Taille réduite des constructions anciennes - Nébulosité	- Taille réduite des constructions anciennes - Nébulosité	-	-	-
Remarques	- Possibilité de détection de dommages de type « étage faible » - Analyse fiable avec une seule image post-séisme	- Analyse possible avec une seule image post-événement	-	-	-
Utilisation en situation de crise après un séisme					
<i>Produits</i>	- Possibilité d'une cartographie de dommages, au niveau du bâtiment, d'un secteur urbain ou d'une zone en 72h - Cartographie précises des caractéristiques urbaines (routes, ponts, type de bâti) - Cartographie des éléments utiles pour la gestion de la post-crise (accessibilité, éventuelles zones de dépôts de gravats)	- Possibilité d'une cartographie de dommages, au niveau d'un secteur urbain ou d'une zone en 72h - Cartographie des principales caractéristiques urbaines (routes, ponts, type de bâti) - Cartographie éventuelle des éléments utiles pour la gestion de la post-crise (accessibilité, éventuelles zones de dépôts de gravats)	- Eventuelle cartographie (fiabilité limitée) de dommages au niveau d'une zone en 72h - Eventuelle cartographie (fiabilité limitée) des principales caractéristiques urbaines et des éléments utiles pour la post-crise	- Eventuelle cartographie (fiabilité très limitée) de dommages au niveau d'une zone en 72h	- Eventuelle cartographie (fiabilité limitée) de dommages au niveau d'une zone en 72h - Eventuelle cartographie (fiabilité limitée) des principales caractéristiques urbaines et des éléments utiles pour la post-crise

<i>Utilisations possibles</i>	- Equipes de secours, pour la détection des habitations isolées endommagées - Reconstruction - Missions en retour d'expérience	- Reconstruction - Missions en retour d'expérience	- Reconstruction - Missions en retour d'expérience	- Reconstruction - Missions en retour d'expérience	- Reconstruction - Missions en retour d'expérience
Définition des enjeux – analyse de vulnérabilité					
Caractéristiques	- Analyse visuelle - Distinction du type de bâti (résidentiel, habitat collectif, etc...) au niveau de chaque construction - Distinction des enjeux spéciaux (ponts, centrales, etc...)	- Assez difficile par analyse visuelle - Distinction des secteurs à bâti dense et des secteurs à bâti moderne	Distinction possible du bâti résidentiel ou dense au niveau d'une zone	Impossibilité	Pas de méthode fiable (développements en cours)
Limitations ou contraintes principales	-	Taille réduite de certains bâtiments par rapport à la taille du pixel	Confusions entre le bâti et d'autres objets	-	Taille réduite des bâtiments par rapport à la taille du pixel
Remarques	- Impossibilité de détection du type de structure du bâti (maçonnerie, etc) - Possibilité de détection de l'hauteurs des bâtiments (réalisation des MNE)	-	-	-	Possibilité de détection de l'hauteur des bâtiments (réalisation des MNE)

Tableau 4.13 Principales caractéristiques concernant l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique

Les trois études de cas réalisées ont été également synthétisées (c. f. tableau 4.14) afin de disposer d'une comparaison générale de leurs principales caractéristiques.

Etude de cas	Bhuj	Zemmouri	Boumerdes
Capteur et résolution	Ikonos, 1m en mode multispectrale et KVR, 2m en mode panchromatique	Ikonos, 1m en mode multispectrale	Quickbird, 60cm en mode multispectrale
Images	1 image après le séisme (Ikonos) et 1 image avant le séisme (KVR)	1 image après le séisme	2 images après le séisme et 1 image avant le séisme
Caractéristiques du séisme	26 janvier 2001, Inde Mw = 7,7	21 mai 2003, Algérie Mw = 6,8	21 mai 2003, Algérie Mw = 6,8

Position du site par rapport à l'épicentre	~ 10 km	~ 12 km	~ 18 km
Analyse des images	Analyse visuelle multi-temporelle	Analyse visuelle mono-temporelle	Analyse visuelle multi-temporelle
Détection de dommages	Détection de dommages au niveau d'un bâtiment ou d'une zone	Détection de dommages au niveau d'un bâtiment ou d'une zone	- Détection de dommages au niveau d'un bâtiment ou d'une zone - Détection des endommagement de type « étage faible »
Evaluation du nombre de victimes	- Evaluation relativement cohérente concernant le nombre de morts - Sous-évaluation importante du nombre de blessés	- Evaluation relativement cohérente concernant le nombre de morts et de blessés	Pas d'évaluation en raison de l'absence d'information relatives à la densité de population
Limitations ou contraintes principales	- Taille réduite des constructions traditionnelles - Constructions très denses - Incertitudes liées à la densité de population	- Nébulosité sur une partie de la ville - Pas de comparaison avec une image de référence avant le séisme	-
Remarques	Détection difficile de dommages aux constructions traditionnelles	Détection difficile dans le milieu urbain dense, sans référence avant le séisme	- Détection des immeubles effondrés sur le RdC - Très haute fiabilité des résultats

Tableau 4.6 Principales caractéristiques des études de cas réalisées

4.7 Conclusions et perspectives de l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la gestion du risque sismique

Nous avons pu analyser dans ce chapitre l'apport de l'imagerie satellitaire à très haute résolution à l'analyse des dégâts consécutifs aux séismes. Deux études de cas ont relevé ses avantages ainsi que ses inconvénients, notamment dans une perspective de gestion de crise. La détection de dommages a été dans les deux cas fortement dépendante du type de constructions. Les immeubles modernes à plusieurs étages sont bien détectables, avec des contours et des caractéristiques morphologiques précises, qui facilitent la reconnaissance des endommagements. En revanche, le bâti traditionnel, en terre ou adobe, ou encore les anciens centres urbains, qui présentent généralement une densité de constructions beaucoup plus importante, rend l'analyse difficile et incertaine.

A l'aide de l'imagerie mono – temporelle, nous avons ainsi pu constater que les dommages sont facilement reconnaissables dans le cas de l'effondrement complet d'un immeuble non mitoyen, transformé en débris, tel qu'on a vu sur Bhuj, Zemmouri ou encore Boumerdes. D'autres critères basés principalement sur la reconnaissance des anomalies concernant le contour, la forme ou la radiométrie des bâtiments nous ont conduit à la détection des zones

affectées. A ces critères d'endommagement on peut ajouter l'absence des ombres ainsi que l'apparition d'une discontinuité des routes. Dans les zones urbaines à bâti dense, la reconnaissance est plus difficile, et donc la fiabilité des résultats est moindre.

L'imagerie multi – temporelle nous a montré que les endommagements consécutifs au séisme sont reconnaissables avec une fiabilité assez élevée, notamment lorsqu'on dispose des images provenant du même capteur, comme dans le cas de l'étude sur Boumerdes. Nous avons pu ainsi détecter les zones affectées à l'intérieur même des centres urbains, grâce à la mise en évidence des changements « avant – après ». Les possibilités apportées par ce type d'analyse sont prometteuses, car la cartographie des zones affectées est très précise et peut être réalisée au niveau du bâtiment. En absence d'autres informations, les cartes des dommages réalisés de cette manière peuvent être très utiles pour la gestion de crise, notamment pour le déploiement des forces de secours.

Cependant, l'une des limites de l'imagerie satellitaire réside encore dans l'impossibilité de détection des dommages modérés. De plus, à de rares exceptions, même la reconnaissance d'un type d'endommagement fort, qui est l'effondrement du rez-de-chaussée, reste indétectable, car en visée nadirale la structure du bâti semble intacte. Dans le cas de Boumerdes, nous avons pu détecter un seul cas de ce genre suite à une comparaison avant – après réalisée par rapport à un bâtiment mitoyen. La reconnaissance a été possible également grâce à la très haute résolution des images, qui a permis la détection de détails très fins.

La détection de dommages par photo-interprétation mono ou multi – temporelle se réalise assez rapidement. A titre d'exemple, la cartographie sur Zemmouri a été réalisée par une personne en moins de 3 heures, pour une surface d'environ 1,5 km², et sur Boumerdes en environ 4 heures, pour une surface d'environ 5 km² (analyse plus courte car multi – temporelle). Ceci représente un aspects très important pour ce qui est de la faisabilité d'une localisation rapide des zones affectées dans un but d'aide aux interventions humanitaires. Mais cette caractéristique à une moindre importance par rapport aux contraintes qui peuvent apparaître dans un tel contexte.

Ainsi, la contrainte principale est donnée par le temps d'acquisition des images, qui est pour l'instant de l'ordre de quelques jours, et donc largement supérieur aux délais requis habituellement par les forces de secours, présentes sur le terrain dans les 24h qui suivent la catastrophe. Une importante étude de faisabilité de ce type d'application a été réalisée par André (2002), qui quantifie les besoins des utilisateurs potentiels des cartographies rapides de dommages. Une deuxième contrainte est donnée par la couverture nuageuse, qui est aléatoire et qui empêche le traitement des images. Enfin, une troisième contrainte est donnée par le transfert de l'information, sous forme d'une carte des zones affectées, aux équipes de secours déjà présentes sur le terrain.

Le passage à la très haute résolution nous offre aujourd'hui la possibilité d'une cartographie très précise du bâti des zones endommagées, allant jusqu'au niveau d'un immeuble. Les images IKONOS, en 1999, et puis Quickbird, en 2001, ont ainsi ouvert des nouvelles perspectives dans l'utilisation des images satellitaires pour la gestion du risque sismique. Le lancement de plusieurs capteurs à très haute résolution dans le futur proche^{45,46} apportera des

⁴⁵ Le satellite Orbview-3 a été lancé avec succès le 26 juin 2003. Il dispose d'une résolution spatiale de 1m en mode panchromatique et 4m en multi – spectral.

⁴⁶ Le satellite EROS B, dont le lancement est prévu pour la fin de l'année 2003, proposera une résolution spatiale de 0,87 cm en mode panchromatique.

possibilités supplémentaires à l'imagerie disponible aujourd'hui, ce qui laisse envisager un accès plus facile à ce type de données ainsi que leur utilisation à une échelle plus large. En dehors de l'aspect de soutien à la gestion de crise, l'imagerie satellitaire à très haute résolution peut apporter également des informations importantes pour les modèles d'estimation de dommages. Elle apporte ainsi des nouvelles perspectives concernant notamment le développement des inventaires urbains, car les différents typologies standard des constructions deviennent reconnaissables à travers une photo – interprétation (c. f. fig. 4.45).



Figure 4.45 Exemple des différents types de bâti, reconnaissables à l'aide de l'imagerie satellitaire. Centre urbain moderne, formé par des bâtiments hauts, de plus de 10 niveaux (a) ; bâtiments à habitats collectifs, d'environ 5 étages (b) ; exemple des secteurs pavillonnaires (c) et (d). (source images : Space Imaging et DigitalGlobe).

Des nouvelles perspectives peuvent être apportées également par l'utilisation des capteurs radar aéroportés⁴⁷, pour la détection rapide de dommages ainsi que pour la réalisation d'inventaires urbains. La comparaison des MNE, réalisés avant et après un séisme, peut mettre en évidence d'une manière automatique les éventuels dégâts, au niveau du bâtiment près. La reconnaissance des niveaux d'endommagement modéré devient ainsi possible, grâce aux légers écarts en hauteur ou en horizontale détectables à travers ce type d'analyse. A titre d'exemple, nous présentons ci-dessous (c. f. fig. 4.46) une simulation des deux MNE réalisées avant et après un séisme, où les bâtiments endommagés peuvent être reconnus et extrait d'une manière automatique.

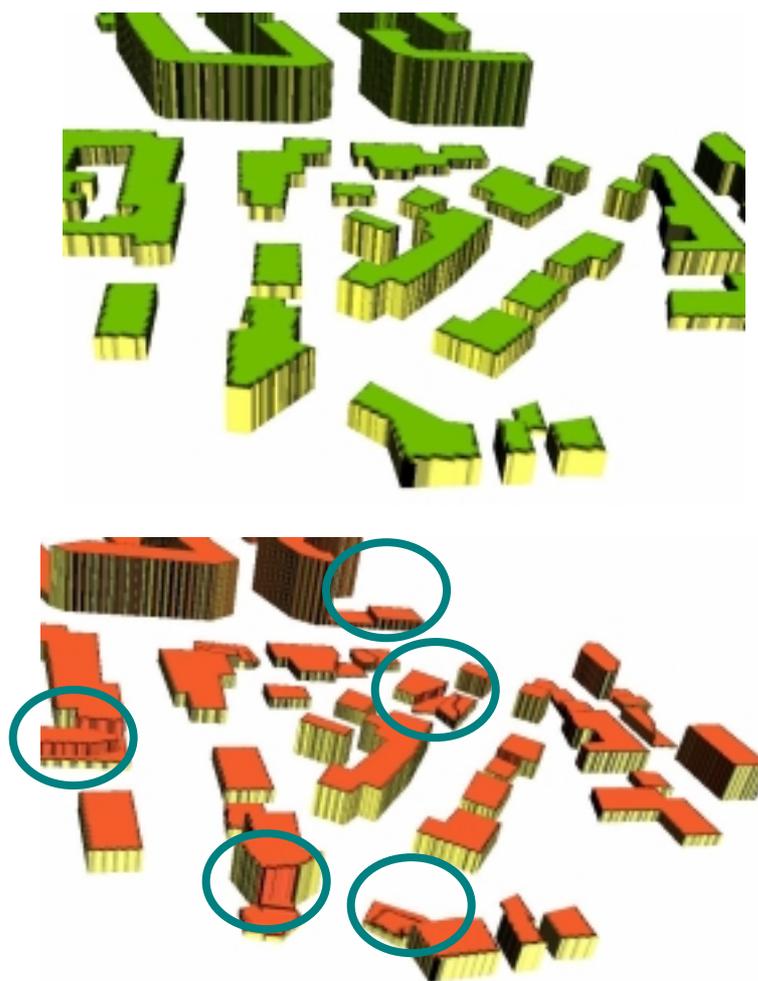


Figure 4.46 Exemple d'un couple des MNE encadrant un séisme, mettant en évidence les dommages simulés, représentés par les cercles bleus.

La reconnaissance des types de constructions à l'aide de l'imagerie satellitaire ainsi que la réalisation (ou l'accès à) des MNE sur les principales agglomérations urbaines permettront une quantification plus fine de la vulnérabilité, et apportera par conséquent une aide non négligeable à la gestion du risque sismique. Les différents modèles d'estimation de dommages vont bénéficier ainsi des données d'entrée plus fines, qui engendreront à leur tour une meilleure protection et prévention face aux séismes.

⁴⁷ Tel que LIDAR (acronyme de « Light Detection and Ranging »; plus d'informations sur www.nasa.gov).

CHAPITRE 5. ESSAI DE MISE AU POINT D'UNE ECHELLE D'INTENSITE MULTI - ALEA

Dans ce chapitre nous allons essayer de marquer un premier pas vers une extension des modélisations de dommages consécutifs aux séismes aux autres risques naturels. Nous allons présenter ainsi la mise au point d'une échelle unifiée d'intensité d'endommagement, en cinq niveaux, pour l'ensemble des aléas naturels, que nous avons réalisée dans le cadre d'un projet du Ministère de L'Ecologie et du Développement Durable (MEDD).

Dans une première partie nous allons décrire le contexte et les principaux objectifs de cette étude. Ensuite, nous allons exposer la méthodologie générale utilisée et les principales étapes de travail.

Dans une deuxième partie nous allons nous concentrer sur le développement de l'échelle d'intensité sismique en cinq niveaux. Nous présentons ainsi la démarche suivie, les spécificités et contraintes apparues et enfin le résultat final de cette échelle.

Dans un troisième partie, nous allons présenter quelques exemples d'applications de ces échelles, notamment pour le cas des séismes, des inondations et des feux de forêts.

Nous allons finir ce chapitre par une analyse des résultats obtenus, concernant le risque sismique ainsi que l'ensemble des aléas naturels. Les perspectives d'extension du modèle sismique aux autres aléas naturels sont analysées dans la dernière partie.

5.1 Introduction

Exceptés les séismes et quelques phénomènes atmosphériques, les autres risques naturels ne présentent pas d'échelle (du moins d'usage courant) qui puisse quantifier leur impact, en fonction de leur intensité ou des dommages engendrés. Si, après la manifestation d'un tremblement de terre, on peut dire que « la secousse a eu une magnitude de 7,2 sur l'échelle de Richter », ou encore que « l'intensité épiscopale a été de 8 », dans le cas des inondations ou des mouvements de terrain nous ne pouvons pas associer une valeur caractérisant leur impact. Cet aspect représente pourtant un élément fondamental des modélisations du risque, en termes de dommages. Le développement d'une échelle d'intensité standard, adaptée à l'ensemble des aléas, apporte ainsi une nouvelle dimension pour la gestion du risque naturel.

D'un autre côté, la communauté scientifique internationale se penche de plus en plus vers des approches multi-risques, où le modèle sismique servirait de référence⁴⁸. Les récentes catastrophes dues aux inondations importantes, telles que les inondations du Gard, en septembre 2002, ou encore les inondations de l'Europe Centrale, en juillet 2002, témoignent de la nécessité d'une meilleure gestion de ce risque, ce qui devrait être facilité par le développement des modèles d'estimation de dommages. Les impacts engendrés par tous les aléas pourraient ainsi être quantifiés à travers une échelle d'intensité unifiée. Une conséquence directe de la modélisation de dommages multirisques serait une définition plus précise des zones exposées, ce qui permettrait l'amélioration de la gestion du risque.

⁴⁸ Diverses tables rondes ont été organisées sur ce sujet, lors de conférences nationales et internationales, telle que les Journées Nationales pour la Prévention du Risque Naturels (SIRNAT – JPRN), du janvier 2003 ou encore la 7^{ème} Conférence Nationale des Etats – Unis de Génie Parasismique, du juillet 2002.

En ce qui nous concerne, nous avons participé au développement d'un système d'échelles d'intensité à l'ensemble des aléas naturels, qui a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par le MEDD⁴⁹. La recherche s'est étalée sur une période de plus de 2 ans, menée par différents experts spécialisés dans tous les aléas traités. Les échelles ont été développées sous la direction du bureau d'étude Géosciences Consultants, en collaboration avec les chercheurs de Météo-France pour les aléas liés à l'atmosphère, et ceux du Cemagref pour les inondations, les coulées de boues, les feux de forêts et les avalanches. L'ensemble des phénomènes ayant fait l'objet de la mise au point de ce système sont repris dans le tableau 5.1.

Aléa	Phénomène concerné	Organisme chargé de l'étude
Phénomènes liés à l'atmosphère	Cyclones	Météo-France
	Tempête	
	Tornade	
	Foudre	
	Grêle	
	Neige	
Avalanches	Avalanches	Cemagref
Inondations	Crues de plaine	Cemagref
	Remontée de nappe	GSC
	Submersion marine	GSC
Feux-de-forêts	Feux-de-forêts	Cemagref
Eruptions volcaniques	Eruptions volcaniques	GSC
Mouvements de terrains	Effondrements de cavités naturelles ou artificielles (fontis ou généralisés)	GSC
	Affaissements de cavités naturelles ou artificielles (fontis ou généralisés – subsidence – tassements)	GSC
	Eboulements, écroulements, chutes blocs incluant falaises rocheuses littorales et non littorales	GSC
	Glissements de versants et phénomènes associés (hormis fluages et coulées de boues)	GSC
Crues torrentielles	Laves torrentielles, ruissellement et coulées de boue	Cemagref
Séismes	Séismes	GSC
Tsunamis	Tsunamis	GSC

Tableau 5.7 Recueil des aléas naturels considérés dans le système d'échelles d'intensité

Notre contribution personnelle se limite au développement de l'échelle d'intensité sismique ainsi que d'intensité des tsunamis. Pour tout élément concernant les autres phénomènes

⁴⁹ Le titre exact de l'étude est « Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par types des phénomènes naturel ».

naturels, nous présentons uniquement les résultats obtenus par les autres chercheurs associés au projet.

Le projet vise à permettre la caractérisation de l'intensité physique et du potentiel d'endommagement, provoqué par des événements naturels survenus sur le territoire français métropolitain et d'outre-mer. Cette caractérisation a pour vocation de documenter tous les événements naturels dommageables dans un contexte de retour d'expérience. Ce système d'échelles devrait permettre de mieux apprécier l'impact des aléas, de comparer l'évolution de la vulnérabilité de différents territoires et de contribuer à une planification améliorée des actions publiques de prévention des risques naturels.

Des échelles d'intensité, standardisées à l'ensemble des phénomènes naturels, ont été développées dans ce but. Il s'agissait de pouvoir disposer d'un critère simple permettant de classer les phénomènes naturels dommageables survenant sur le territoire métropolitain français et les DOM-TOM. Les échelles développées sont basées sur la mesure de l'intensité physique des phénomènes et/ou sur l'observation des effets destructeurs sur différents types d'enjeux. Elles n'ont, dans le cadre de ce projet, qu'un but de constat a posteriori, c'est à dire après la manifestation de l'événement.

Les échelles vont présenter à la fois des paramètres physiques et des descriptions de niveaux d'endommagement sur des types d'enjeux standard. Il n'y a pas de relation bi-univoque entre les critères physiques et d'endommagement sur les enjeux. A une classe d'intensité décrite par un paramètre physique donné ne correspond pas systématiquement une classe d'endommagement maximal supposé possible, sous l'effet des sollicitations physiques. Bien évidemment, des niveaux moindres peuvent être observés selon l'éloignement, la position de l'enjeu relativement au phénomène source et à son maximum d'intensité qui peut être très localisé, étendu, ou se déplacer. On a choisi dans cette étude de ne considérer que les localisations des enjeux les plus défavorables par rapport à la sollicitation physique.

La diversité des modes d'actions des aléas sur l'environnement et les enjeux a mené à introduction d'une même trame d'échelle mais plusieurs possibilités d'utilisation. La qualification de l'événement s'effectue ainsi soit par une valeur unique pour les événements localisés et circonscrits, soit par des valeurs locales (rapportées à l'ensemble des communes affectées) pour les événements de grande extension géographique (cyclones, inondations, séismes).

L'analyse approfondie des modes d'endommagement excluait de pouvoir caractériser tous les aléas par un seul et même cadre d'échelle. Cette trame est exploitée de manière variée selon les échelles. Ainsi, on trouve :

- a) des aléas peu étendus, bien délimités dans l'espace et simples à décrire, pouvant être qualifiés avec l'échelle dans sa forme unique. C'est le cas des avalanches, des feux de forêts, des mouvements de terrain, des coulées de boues et laves torrentielles ;
- b) des aléas étendus avec une échelle servant à la fois à qualifier un événement dans sa totalité mais aussi les intensités atteintes localement par commune. C'est le cas notamment pour les échelles des aléas atmosphériques tels que les cyclones. C'est aussi le cas pour les séismes et les éruptions volcaniques.
- c) le cas des inondations, pour lesquelles deux échelles sont développées, l'une qualifiant la rareté et l'intensité globale du phénomène, l'autre les effets de la submersion locale et l'endommagement pour chaque commune. Le traitement des tempêtes est également singulier, en raison d'une caractérisation locale à travers les dégâts sur des enjeux type et d'une caractérisation de l'événement via les mesures de force du vent.

5.2 Etapes de travail et méthodologie utilisée

5.2.1 Recensement des échelles existantes

Le développement des échelles est passé, dans une première phase, par la réalisation d'un état de l'existant en matière d'échelles d'intensité, tant en France qu'à l'étranger. Il a été convenu que les échelles existantes seraient adaptées aux objectifs du projet lorsque cela était possible. L'inventaire exhaustif réalisé a permis l'identification de quatre types d'échelles : les échelles d'intensité physique des phénomènes, les échelles de dommages, les échelle d'intensité physique et de dommages fusionnés ou parallèles et les échelles de gravité, de coûts de dommages, de reconstruction ou de prévention.

Les échelles d'intensité physique du phénomène ont un usage généralement scientifique de description d'un ou plusieurs paramètres physiques décrivant l'intensité des phénomènes. La magnitude pour les séismes en est l'exemple le plus évident. Elles peuvent être basées sur des mesures instrumentales ou non. L'échelle VEI pour le volcanisme bien que semi-quantitative est également une échelle d'intensité (explosivité) de ce type. Ce type d'échelle décrit en général l'ensemble du phénomène sous un aspect macroscopique et permet d'attribuer une valeur d'intensité ou de magnitude à un événement considéré dans son ensemble.

Les échelles de dommages s'affranchissent des paramètres physiques de la source, en décrivant les dégâts provoqués par les aléas localement. L'échelle d'intensité macrosismique EMS 98 est un exemple typique de ce qui est visé ici par la notion d'échelle. La qualification d'un degré passe en général par la description de niveaux de dommages plus ou moins faciles à observer sur des enjeux types comme le bâti, différencié en catégories plus ou moins complexes selon les échelles, les réseaux et infrastructures, l'environnement ou des effets secondaires. Les descriptions s'appliquent localement et sont généralement dépendantes du site, même si elles obéissent en général à des lois de décroissance en fonction de la distance à la source du phénomène.

La qualification des degrés atteints est faite par l'observation de dommages sur des enjeux communs. Ces enjeux sont généralement classés en catégories (êtres vivants, bâtiments et constructions, infrastructures et réseaux, milieux naturels et environnement). Les dommages aux enjeux sont en général des effets facilement reconnaissables y compris par des non-techniciens. La difficulté de mise en œuvre repose plus sur le fait que le degré de dommages atteint ne peut pas reposer que sur une seule observation mais sur une multiplication d'observations et par une affectation finale et globale pour un site ou un événement qui repose sur l'appréciation des experts.

Un troisième type d'échelle est représenté par les échelles d'intensité physique et de dommages fusionnés ou parallèles, telle que Saffir - Simpson qui décrit les cyclones en Atlantique. Les niveaux d'intensité définis combinent des valeurs physiques observées ou mesurées localement et des descriptions d'effets ou de modes d'endommagement sur des enjeux. Ces enjeux peuvent varier d'un degré à l'autre et n'être mentionnés qu'à partir du moment où ils subissent un dommage pour une intensité donnée. Ces échelles vont permettre de décrire un phénomène dans sa totalité par le niveau maximal atteint, en cours ou prévisible, dans le cas des cyclones.

Enfin, on a pu recenser l'existence d'un quatrième type d'échelle, servant à quantifier le coût des impacts des catastrophes naturelles ou des mesures de réduction du risque. Ce type d'échelles a une vocation socio-économique d'aide à la décision à travers la quantification de coût, en terme de dommages corporels (nombre de victimes, blessés et morts), de coût de mise en protection, de réduction de la vulnérabilité de coût de réparation ou remise en état après un événement dommageable.

Nous allons présenter par la suite une synthèse des échelles existantes inventoriées, par type d'aléa.

Pour l'aléa « inondations », des échelles en fonction de la fréquence des crues ont été répertoriées, mais aucune échelle d'intensité n'a été identifiée.

Pour l'aléa « mouvements de terrains », ont été recensées les échelles d'intensité physiques de l'UNESCO (1983) ainsi que de dommages visibles sur le bâti d'Arnon (1975), d'Alexander (1988) et de Léone (1996).

Pour l'aléa « crues torrentielles », phénomène qui relève à la fois de l'inondation et du mouvement de masse selon sa concentration en transport solide, les recherches n'ont pas permis d'identification claire d'une échelle spécifique, quelques éléments se retrouvant toutefois dans l'échelle de Léone (1996).

Pour les éruptions volcaniques, deux échelles exploitables ont été recensées dans la phase d'inventaire: l'échelle de l'indice d'explosivité VEI (Newhall et Self, 1982) ainsi que l'échelle d'intensité des phénomènes volcaniques du BRGM (Stieltjes et Mirgon, 1998).

Pour l'aléa « avalanche », on a pu inventorier une l'échelle européenne de risque météorologique d'avalanche (Pahaut, 1993), une échelle canadienne (Clung et Schaerer, 1993) ainsi qu'une échelle française en cours de développement, réalisée par le CEMAGREF en collaboration avec MeteoFrance.

Pour l'aléa « feux de forêts », il a été recensé notamment une échelle de puissance de feux (Alexandrian, 1997), ainsi que d'autres études concernant mesures des paramètres caractérisant les incendies, tels que l'énergie dégagée ou la surface parcourue.

Concernant les phénomènes météorologiques, les aléas traités ont été les tempêtes, les tornades, les ouragans et les cyclones, la grêle, la neige, les pluies verglaçantes et la foudre. Pour les tempêtes, on recense notamment l'échelle de Beaufort (Davies, 1992 ; Petterssen, 1969), universellement utilisée ; pour les tornades, les échelles de Fujita (Fujita, 1973 ; 1981) et Torro⁵⁰ présentent une bonne disposition à être adaptées ; en ce qui concerne les ouragans et les cyclones, l'échelle de Saffir-Simpson (NOAA, 1999) d'usage international, représente, entre autres échelles, un appui très intéressant pour notre étude ; pour ce qui est de la grêle, on note encore une fois l'échelle de Torro ; pour les pluies verglaçantes, la neige et la foudre, les recherches n'ont pu trouver aucune échelle en usage.

Pour ce qui est de l'aléa tsunami, trois échelles ont pu être inventoriées : celle de Iida, de Soloviev et de Murty (Iida, 1963 ; Murty, 1977 ; Soloviev, 1978).

Enfin, les échelles concernant le risque sismique seront présentées en détail lors du paragraphe 5.3, qui est dédié à la mise au point d'une nouvelle échelle spécifique.

5.2.2 Elaboration méthodologique des échelles

Après le recensement des échelles existantes, l'étude est passée à une deuxième phase, d'élaboration méthodologique des futures échelles en cinq niveaux.

⁵⁰ Tornado and Storm Research Organisation ; www.torro.org.uk.

L'état de l'art a permis l'identification des critères requis qui répondaient aux objectifs du projet, facilement accessibles et mesurables a posteriori. L'une des principales difficultés a été d'identifier des "enjeux standards", fréquemment observables, et présentant des niveaux d'endommagement visibles et variables en fonction de l'intensité physique de l'aléa source, indépendamment du lieu. Il nous a fallu revenir à la vulnérabilité intrinsèque des enjeux, non dépendante du contexte d'exposition à l'aléa, que l'on peut qualifier de vulnérabilité contextuelle.

Une méthodologie commune a été mise en place afin d'homogénéiser au mieux les échelles. Ainsi, quatre types d'enjeux standard ont été définis: les personnes, les bâtiments, les infrastructures et les ouvrages ainsi que les espaces naturels et agricoles. Une analyse du type d'endommagement pour ces différents enjeux, en fonction des aléas, a été effectuée en fonction des données disponibles (bases de données publiques, coupures de presse, etc...). Le schéma décrivant la méthodologie d'attribution d'une classe d'intensité est présenté sur la figure ci-dessous (c. f. fig. 5.1) :

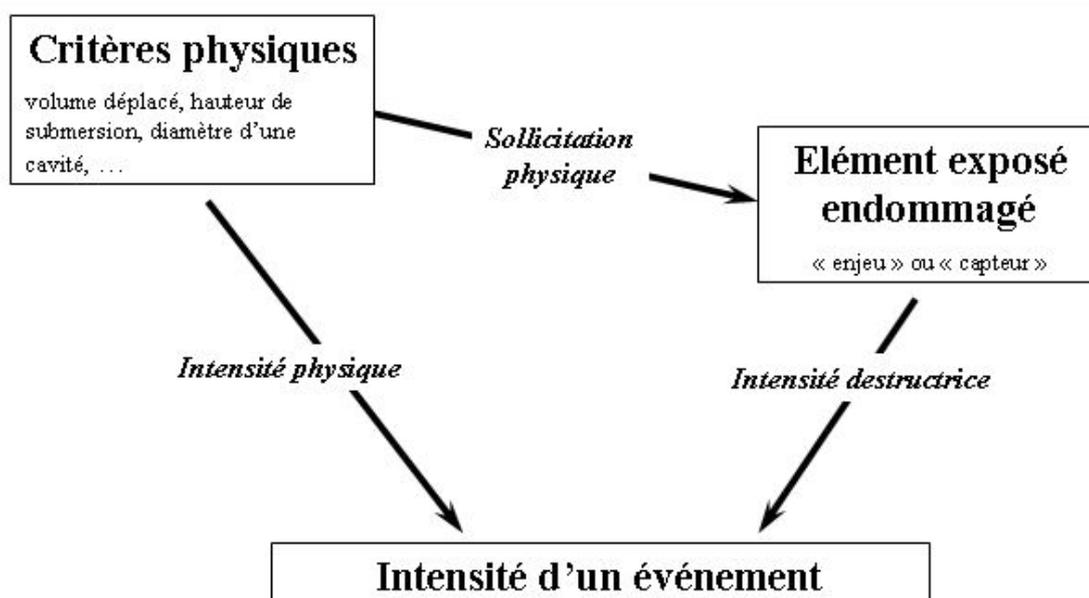


Figure 5.1 Méthodologie d'attribution d'une intensité pour un événement donné (source : GSC, 2003).

Ce schéma, développé initialement pour les mouvements de terrain, a été adapté en fonction des autres phénomènes naturels, selon le type de leur manifestation, et la nature de l'endommagement causé à différents enjeux.

Pour la définition des critères physiques sont exclus les paramètres non mesurables in situ, c'est-à-dire les critères basés sur la fréquence (à l'exception des inondations de plaine), sur la cinématique, sur la gravité économique ou monétaire ou encore sur la dangerosité humaine.

Des recommandations spécifiques par phénomènes ont été introduites ensuite, du fait de leur trop grande hétérogénéité. Il s'est avéré, à l'issue de cette phase, qu'il était généralement préférable de mettre en place des correspondances -entre les niveaux d'endommagement aux enjeux et les niveaux d'intensité physique par phénomène- qui seraient décrites par des gammes de valeurs (intervalles, ordres de grandeurs) et non par des valeurs de classes fixes (qui sont apparues trop rigides).

Il a été défini ensuite une forme générale standard des échelles, basée sur un modèle issu de la grille HAZUS concernant les niveaux d'endommagement du bâti (c. f. tableau 5.2).

Echelle existante	Classe	Paramètres physiques	Echelle teintes graphiques	Effets prévisibles sur les enjeux				Autres critères
				Personnes	Bâtiments	Infrastructures et ouvrages	Espaces naturels et agricoles	
	<i>1- Très faible</i>		20 %					
	<i>2- Faible</i>		40%					
	<i>3- Moyen</i>		60%					
	<i>4- Elevé</i>		80%					
	<i>5- Très élevé</i>		100%					

Tableau 5.8 Grille d'échelle standard

La première colonne permet de se raccorder à une éventuelle échelle existante en usage telle que l'EMS98 pour les séismes ou l'échelle Fujita pour les tornades.

La colonne « Autres critères » permet de prendre en compte les éléments spécifiques aux aléas mais non généralisables ou ne répondant pas totalement aux objectifs du projet. Y sont notamment mentionnées des ordres de grandeur des vitesses de déplacement des masses, non mesurables a posteriori, pour l'échelle des glissements de versants.

En fin de cette phase de travail, un avant projet d'échelle pour chaque aléa a été réalisé. Ces échelles préliminaires ont été soumises à une consultation par des experts, extérieurs à l'équipe du projet, qui ont fait parvenir ultérieurement leurs remarques, commentaires et suggestions d'amélioration.

5.2.3 Prise en compte de l'extension spatiale des échelles

La troisième phase de l'étude a eu pour objet la prise en compte de la composante spatiale des événements, avec la définition d'un référentiel unitaire, la commune. En effet, les aléas peuvent affecter des surfaces allant de l'ordre du mètre carré de surface (fontis, marnières) jusqu'à des centaines de milliers de kilomètres carrés pour les tempêtes majeures ou encore les cyclones.

Lorsque le phénomène affecte plus d'une commune, ou concerne tout ou partie de plusieurs communes, chacune d'elles se verra affectée d'une intensité qui lui est propre, mais il s'agira d'un événement unique.

Un indice global d'impact adimensionnel a été ainsi introduit, pour les phénomènes d'extension supra - communale que sont les séismes, les cyclones, les tempêtes et les inondations. Celui-ci, basé sur une formule de calcul simple, basée sur des intensités locales (par phénomène ou par commune), permet d'évaluer l'impact global de l'événement lorsque le territoire affecté concerne plus d'une commune. Cet élément permet une comparaison d'événements selon leurs ampleurs réelles, en terme d'impact.

$$I = \frac{\sum (\text{niveau } X * \text{nombre des communes présentant le niveau } X)}{\text{Nombre de classe de l'échelle de l'aléa}} \quad (5.1)$$

où le « niveau x » représente le niveau d'intensité associé à l'événement analysé sur une commune.

Nous allons présenter plus loin dans le texte quelques exemples d'application de cet indice, après la présentation des nouvelles échelles d'intensité.

5.2.4 Elaboration des nouvelles échelles d'intensité

Suite à la définition des avant-projets d'échelles ainsi que de leur utilisation, à travers la prise en compte de la dimension spatiale des événements, l'étape suivante de travail a été donc la définition des échelles d'intensité, pour chaque aléa. Celles-ci sont présentées en intégralité dans l'annexe 5.1.

Les développements des échelles n'ont pas été faits de façon parfaitement synchronisée, dans la mesure où certaines dérivait étroitement d'échelles existantes tandis que d'autres échelles de risques ou de vulnérabilité pour certains aléas devaient être profondément modifiées. Pour certains aléas, il a fallu créer des échelles entièrement nouvelles.

5.2.4.1 Méthodologie commune à l'ensemble des échelles d'intensité

Pour faciliter et homogénéiser l'usage des échelles, il a été choisi de retenir la valeur maximale d'intensité fournie par les différentes observations quel que soit l'aléa, le site et l'extension spatiale, que l'impact soit localisé ou très étendu. Ce choix a été préféré à celui de la valeur d'intensité la plus représentée statistiquement, dans la mesure où la classification résultante doit être indépendante de la distribution spatiale des enjeux. La qualification de classe d'intensité doit rester également indépendante du nombre d'enjeux présents et endommagés (ce qui relève de la gravité) et donc de la vulnérabilité du site.

Un guide général d'utilisation ainsi que des guides spécifiques à chaque aléa ont été ainsi préparés, afin de mieux expliquer les objectifs, les contraintes et le mode d'emploi de chaque échelle. Nous allons présenter ici les principaux conseils d'utilisation.

L'intensité d'un événement sera déterminée soit à partir des paramètres physiques intrinsèques au phénomène, soit à partir des endommagements observés sur des enjeux standards définis, que sont les différents types de bâti, d'infrastructures, de réseaux, le milieu naturel. En l'absence d'enjeu, elles doivent permettre de qualifier une intensité et les dommages théoriques correspondants s'il n'y a pas eu d'endommagement (absence d'enjeu sur le site). Toutefois, ces échelles seront prioritairement utilisées pour caractériser des phénomènes dommageables.

Les échelles devront être indépendantes du site et de sa vulnérabilité, ce qui impose d'avoir une palette variée de critères de description afin d'être sûr de pouvoir en disposer d'au moins un permettant de caractériser l'événement. Cela signifie aussi qu'en présence d'enjeux sur la zone impactée, la classe d'intensité n'est pas décrite en fonction du nombre d'enjeux présent (ce qui reviendrait à qualifier un niveau de vulnérabilité) mais selon la classe d'endommagement observé sur ces enjeux. En effet, les échelles n'ont pas pour objet de mesurer la gravité de l'événement.

Il sera rejeté notamment une qualification basée sur les endommagements portant sur des types d'enjeux non - standards ou à vulnérabilité visiblement très forte a priori (par exemple, pour l'enjeu bâtiment: un cabanon en bois affecté par le vent ne relève pas d'un enjeu standard alors qu'une maison en fait partie).

Sur un site ou sur une même commune, si la classe d'intensité peut être à la fois choisie par les endommagements et les intensités physiques et en cas de disparité entre les classes indiquées par les endommagements et les paramètres physiques, c'est le plus fort de tous qui est retenu comme valeur caractéristique.

Dans le cas d'aléas étendus spatialement, chaque commune concernée devra faire l'objet d'une caractérisation de classe d'intensité atteinte. Il sera entre autres important de ne pas négliger les communes où l'intensité atteinte a été faible.

En l'absence de toute information de terrain fiable permettant d'affecter une classe d'intensité sur une commune, il va devoir trancher entre absence d'impact de l'événement (impact nul donc hors échelle) ou impact non qualifiable. Il sera alors toléré que soit affectée une classe d'intensité par analogie avec les communes voisines, si l'existence de dommages est cependant avérée.

5.2.4.2 Méthodologie spécifique par aléa

Des ajustements de la méthodologie globale ont été effectués, en fonction des aléas. Ainsi, le nombre de classes a parfois été augmenté ou diminué, les enjeux-types présents peuvent varier d'un phénomène à un autre. Les inondations de plaine par exemple comportent trois classes et certains phénomènes de mouvements de terrain en comptent six.

Certains aléas sont susceptibles de concerner deux échelles ou de changer d'échelle au cours de leur manifestation. C'est le cas de certains mouvements de versants qui, dans leur phase finale de déplacement, peuvent en effet voir leur vitesse augmenter et migrer ainsi de l'échelle des glissements à celle des écroulements, la première n'intégrant pas de telles vitesses de déplacement.

De la même façon, les inondations font figure de cas particulier. Les crues de plaine sont caractérisées par trois échelles qui sont : une échelle de fréquence de crue (de rareté), une échelle de crues rapides et une échelle de crues lentes. Comme dans les cas des mouvements de terrain susceptibles de changer d'échelle, en fonction de l'intensité (volumes, vitesses de déplacements) des événements, les événements liés aux inondations peuvent relever soit de phénomènes de remontées de nappe, soit de crues de plaine. Ces événements peuvent par ailleurs survenir indépendamment l'un de l'autre, ou simultanément, sur des durées différentes.

La question du passage d'un phénomène à l'autre peut se poser lorsque les deux phénomènes sont plus ou moins simultanés. Généralement, la remontée de nappe va précéder les débordements qui sont en grande partie la conséquence de l'incapacité des sols à absorber l'excès de ruissellement. Cette concomitance de phénomènes justifie de renseigner deux événements sur deux échelles. Dans le cas où la remontée de nappe précéderait les débordements, les deux phénomènes peuvent être considérés et donc être qualifiés en fonction du niveau d'intensité maximum atteint, généralement avec un léger décalage dans le temps. Les échelles développées pour chacun des aléas ont été soumises à un groupe d'experts, chargés de les recadrer et de les valider. Les différentes remarques et commentaires des experts sollicités ont ensuite été intégrées aux échelles.

5.3 Développement de l'échelle d'intensité sismique en 5 niveaux

5.3.1 Recensement et analyse des échelles existantes

Pour le développement de l'échelle sismique en cinq niveaux nous avons suivi la méthodologie générale présentée plus haut dans le texte. Nous avons commencé dans une première étape par l'inventaire des principales échelles existantes.

Une première catégorie d'échelles sont ainsi celles liées à l'intensité physique des tremblements de terre, exprimées généralement par la magnitude ou encore par le PGA.

La magnitude des séismes, mesure utilisée couramment pour la description d'un événement sismique, n'est pas une échelle en degré mais une fonction continue, qui peut être négative ou positive et en principe n'a pas de limites. En réalité, sa valeur minimale est liée à la sensibilité du sismographe. Un sismographe très sensible peut enregistrer une magnitude de l'ordre de -2, équivalente à l'énergie dégagée par la chute d'une brique sur le sol d'une hauteur de 1 mètre. Sa valeur maximale est liée à la résistance de la lithosphère aux forces tectoniques et à la longueur maximum de la faille susceptible de se fracturer d'un seul coup. Le séisme de plus grande magnitude connue au cours de ce siècle est celui du Chili en 1960, de magnitude 9.5; la zone de rupture de la faille a atteint plus de 1000 km de long. C'est à cause de cette limite qu'on entend parfois parler des 9 degrés de l'échelle de Richter. Les séismes de magnitude supérieure à 9 sont très rares et la magnitude 10 semble être la limite supérieure acceptable.

L'accélération du sol est un paramètre direct du séisme, obtenu à partir des accélérographes enregistrés en différentes stations. Elle peut être influencée par les conditions locales du sol, étant souvent amplifiée par les sols mous, sableux et limoneux. Comme l'accélération du sol est la cause principale des dégâts aux bâtiments, elle a été mise en relation directe avec la magnitude du séisme (c. f. tableau 5.3).

PGA (g)	Magnitude	Niveau d'intensité
0.025g	< 5	Mineur
0.05 – 0.1g	5 – 5.9	Léger
0.1 – 0.25g	6 – 6.9	Important
0.25 – 0.75g	7 – 7.9	Fort
> 0.75g	> 8	Majeur (très fort)

Tableau 5.9 Relation entre magnitude et PGA (source : www.unc.edu/~neic)

L'inconvénient principal de l'utilisation du PGA comme paramètre de base pour une échelle est qu'il ne dépend pas totalement du séisme, étant lié à des conditions locales du sol. Nous ne pouvons pas définir le phénomène exclusivement à partir du PGA, même si ce paramètre est la cause fondamentale des dégâts pour toutes sortes de constructions. Le PGA définit donc une intensité locale.

Une deuxième catégorie d'échelles sont celles liées à la mesure des dommages provoqués par les séismes, les échelles d'intensité sismique. Elles consistent dans une série de descriptions de l'effet de la secousse sismique sur un certain nombre d'objets se trouvant dans le milieu quotidien. Ces objets peuvent être considérés comme capteurs, du moment que leur réponse aux tremblements de terre est utilisée pour mesurer le niveau de la secousse. La caractéristique de ces "capteurs" est qu'il n'y a pas besoin d'appareils de mesure pour estimer l'impact du séisme, et cela représente un avantage énorme d'une échelle d'intensité.

Le fonctionnement de toutes les échelles d'intensités est, principalement, basé sur des observations postérieures au séisme, faites en utilisant un formulaire d'enquête sismique spécifique à chaque pays. Les informations recueillies de cette manière sont comparées, site par site, avec l'échelle d'intensité utilisée, afin d'établir une carte macrosismique.

L'intensité est directement liée à un site. Il est incorrect de dire que " l'intensité d'un séisme a été de 8 ". Par ailleurs, elle ne peut pas être affectée à une seule entité comme un bâtiment ou une rue. Comme minimum, elle peut être assignée à une commune.

A la fin du 19^{ème} siècle, Rossi, un italien, et Forel, un suisse, ont créé la première échelle de dommages dus à un tremblement de terre. L'échelle, comportant dix niveaux de dommages, est basée exclusivement sur des observations (c. f. annexe 5.2).

Leur échelle a été utilisée durant quelques décennies, jusqu'au début des années 1930, quand l'échelle de Mercalli, à douze niveaux, est reprise dans le monde entier. Ainsi, en 1931, l'échelle de Mercalli Modifié (MMI), reprend et modifie légèrement l'échelle connue sous le nom de Mercalli Cancani Sieberg, ou l'échelle MCS (Richter, 1958). La nouvelle échelle MMI, basée uniquement sur des observations postérieures au séisme, comporte 12 niveaux bien déterminés et détaillés (c. f. annexe 5.3). La classification est réalisée au moyen d'une inspection visuelle et l'encadrement dans un certain niveau d'intensité est facile, n'imposant pas du personnel qualifié.

Plus tard, en 1964, Medvedev, Sponheuer et Karnik publient l'échelle MSK., d'après les initiales de leur nom, échelle basée notamment sur la MMI ainsi que sur divers travaux antérieurs publiés par Medvedev en Russie (Sponheuer et Karnik, 1964). L'aspect quantitatif est amélioré, elle présentant de même que la MMI douze niveaux d'intensité (c. f. annexe 5.4). La description des dommages correspondant à chaque niveau d'intensité est bien différenciée par type d'enjeu. L'échelle est actuellement employée au niveau international, et a été utilisée par le BCSF⁵¹ jusqu'au 31 décembre 1999, quand elle a été remplacée par l'EMS 98.

En 1988, La Commission Sismologique Européenne a décidé une révision radicale de l'échelle MSK. Un groupe de travail " Echelles macrosismique " a été établi sous la direction de G. Grunthal. Après deux réunions, à Zurich, en 1990 et à Munich, en 1991, les résultats ont été présentés en 1992, à Potsdam, sous forme d'un guide d'utilisation de la nouvelle échelle, des annexes explicatives et des illustrations des cas (c. f. annexe 5.5). En même temps, il a été décidé un changement de nom: la nouvelle MSK devient ainsi la EMS, la "European Macroseismic Scale". La nouvelle échelle a été publiée en 1993 par la Commission Européenne, et approuvée par la Commission Sismologique en 1996. La version finale a été publiée en 1998, avec de légères modifications et des confirmations des parties expérimentales (Grunthal, 1998 ; Grunthal et Levret, 2001). Depuis, l'échelle a été largement adoptée en Europe. En France, le BCSF l'a adoptée comme échelle officielle d'intensité depuis janvier 2000.

⁵¹ Bureau Central Sismologique Français

Nous avons également pris en compte l'échelle d'endommagement proposée dans l'approche HAZUS (c. f. chapitre 1), où une échelle en cinq niveaux est définie concernant les effets sur tout type d'enjeux, bâtiment, infrastructure d'énergie ou de transport. Ci-dessous nous avons résumé cette échelle (c. f. tableau 5.4). On retrouve dans cette approche une description détaillée de chaque niveau d'endommagement, avec des caractéristiques adaptées à chaque type d'enjeux (c. f. chapitre 1.2).

Niveau de dommages	Personnes	Bâtiments	Structures vitales	Infrastructures de transport	Infrastructure d'énergie
Aucun	Pas de blessés	Pas de dommages	Pas de dommages	Pas de dommages	Pas de dommages
Léger	Blessés légers nécessitant des soins médicaux de base sans hospitalisation	Léger endommagement structurel	Léger endommagement structurel	Léger endommagement	Léger endommagement
Modéré	Les blessures requièrent des soins poussés voire une hospitalisation	Endommagement structurel modéré	Endommagement structurel modéré	Endommagement modéré	Endommagement modéré
Importants	Blessures sévères pouvant entraîner la mort si elles ne sont pas soignées de manière adéquate rapidement	Endommagement structurel important	Endommagement structurel important	Endommagement important	Endommagement important
Complet	Mort instantanée ou blessure fatale	Endommagement structurel total, ruine	Endommagement structurel total	Destruction totale	Destruction totale

Tableau 5.10 Présentation simplifiée de l'échelle d'endommagement issue de HAZUS (source : HAZUS™)

Nous citons également l'échelle d'intensité sismique japonaise JMA, présentant 7 niveaux principaux (c. f. annexe 5.6).

Suite à l'analyse de l'ensemble des échelles existantes, nous avons choisi la trame issue de l'échelle d'endommagement de HAZUS comme la base de la nouvelle échelle simplifiée en cinq niveaux, comme par ailleurs pour l'ensemble des aléas étudiés. Nous avons essayé par conséquent de regrouper les barreaux des échelles telles que MSK ou EMS98 de manière à pouvoir disposer uniquement des cinq niveaux.

Nous avons défini ainsi les deux limites, inférieure et supérieure, qui marquent le moment à partir duquel on peut considérer l'occurrence d'un phénomène et respectivement le niveau physique maximum de celui-ci.

Le seuil « plancher » représente pour les séismes, l'enregistrement physique du signal. Toutefois, nous pouvons considérer un niveau minimum au-dessous duquel les événements seront classés « niveau 0 » indépendamment de leurs enregistrements sismiques. En termes d'intensité physique, nous avons pris cette limite comme correspondant à une magnitude de 5. Un seuil supérieur « plafond » a été défini afin de limiter le nombre des barreaux de la future échelle. Pour les séismes, à partir d'un certain niveau d'intensité, la plupart des enjeux standard seront complètement détruits, et donc le nombre des marqueurs potentiels est

considérablement réduit. Ainsi, à partir d'une intensité supérieure à X (sur MMI, MSK ou EMS), la majorité des structures seront totalement endommagées, l'assignation de l'intensité de XI ou XII étant faite uniquement par rapport aux endommagements de l'environnement. Tenant compte de cela, une intensité maximale équivalente au niveau XI de l'EMS a été fixée comme seuil supérieur.

5.3.2 L'échelle d'intensité simplifiée en 5 niveaux

L'échelle d'intensité des séismes s'appliquera à tout phénomène sismique naturel entraînant des dégâts ; elle mesure le potentiel dommageable des séismes, au contraire de la magnitude sismique, qui est une mesure physique de l'énergie dégagée par la secousse.

Les répliques d'un séisme, bien qu'elles fassent partie du même événement sismique, sont associées à une intensité d'endommagement distincte de celle de la secousse principale, dans la mesure où elles engendrent des dégâts.

Une corrélation a été établie avec l'échelle EMS afin de pouvoir associer une classe d'endommagement aux valeurs d'intensité fournies par le BCSF suite aux enquêtes post sismiques, appelées enquêtes macrosismiques. La même correspondance pourra être faite par rapport aux échelles MSK et MMI, sur la base de leur similitude concernant le nombre de classes d'intensité (de même que l'EMS, elles comportent 12 niveaux).

L'élaboration de la nouvelle échelle repose essentiellement sur l'ajustement en cinq classes des échelles existantes, notamment de l'EMS 98. Celles-ci nous ont permis de disposer d'une gamme très variée de paramètres supposés a priori fournir des informations pertinentes afin d'établir un niveau d'intensité. Sur la base des indicateurs utilisés par les échelles existantes, nous avons extrait ceux qui correspondent le mieux aux contraintes du projet : l'accessibilité, la facilité de quantification et de renseignement.

La magnitude du séisme, représentant la puissance intrinsèque du phénomène, a été retenue comme paramètre à titre indicatif de classification de l'événement, étant accessible rapidement après le séisme et diffusée publiquement par plusieurs organismes.

En ce qui concerne les paramètres d'endommagement, les indicateurs choisis sont relativement classiques et se retrouvent dans la plupart des échelles inventoriées. L'état d'endommagement structurel et non structurel du bâti, avec ses repères caractéristiques, représente un paramètre de base pour l'évaluation de l'intensité destructrice d'un événement. De même que le bâti, l'état des ouvrages d'infrastructure (ponts, voies routières et ferroviaires) ainsi que le bon fonctionnement des réseaux font partie des paramètres pouvant décrire un certain niveau d'intensité.

L'effet sur les personnes a été retenu également comme un indicateur relativement fiable, celui-ci se retrouvant sur toutes les échelles d'intensité sismique. L'effet sur le milieu naturel représente une importante source complémentaire d'informations sur le niveau d'intensité du phénomène, étant particulièrement utile pour les séismes forts.

L'échelle d'intensité sismique contient 3 types distincts d'informations à renseigner :

a) Un paramètre physique du phénomène, en l'occurrence la magnitude du séisme. Ce paramètre est relativement accessible : en effet plusieurs institutions disposent de réseaux d'enregistrements et communiquent généralement, dans un bref délai, la magnitude du

séisme. Lorsque plusieurs magnitudes différentes sont communiquées par diverses institutions, il est conseillé de retenir une valeur moyenne.

b) Un paramètre d'intensité macrosismique attribué selon les échelles existantes, en l'occurrence l'intensité EMS 98 ou MSK. L'intensité macrosismique des séismes survenus en France métropolitaine est déterminée par le BCSF suite au traitement des informations recueillies grâce au formulaire d'enquête macrosismique. Les valeurs d'intensité sont ultérieurement mises en ligne sur la base de données SisFrance⁵². Les données ont un caractère exhaustif : une intensité est associée à chaque commune des départements touchés ; de plus, le séisme est corrélé à une valeur d'intensité globale, correspondant à l'intensité épiscopale. Les valeurs à retenir pour la classification de l'événement seront celles du BCSF car plus rapidement accessibles que la mise à jour de la base de données SisFrance.

Pour les séismes survenus outre-mer, l'information devient difficilement accessible. Les missions de retour d'expérience de l'Association Française de Génie Parasismiques (AFPS) pourraient toutefois assigner une valeur d'intensité globale à l'événement. A l'échelle communale, les informations ne sont pas disponibles pour le moment. A terme, les futurs centres de données sismologiques de Guadeloupe et de Martinique seront censés réaliser les enquêtes macrosismiques.

c) Diverses informations liées aux endommagements des différents enjeux. Ces informations doivent être recueillies sur le terrain dans le cadre de missions post sismiques et renseignées directement dans l'échelle. Le positionnement dans une des classes de l'échelle sera fait essentiellement sur la base des observations visuelles. Il sera retenu le niveau maximum d'endommagement constaté par les indicateurs donnés dans l'échelle.

Des images illustrant les cinq classes d'endommagement sur différents enjeux appuieront les repères écrits. Elles aideront ainsi à la caractérisation de l'événement dans la classe la plus adéquate.

Une fois que différents champs de l'échelle ont été renseignés, l'opérateur devra assigner une valeur d'intensité d'endommagement sur la fiche correspondante. Il est conseillé de renseigner un maximum de colonnes, sur la base des informations disponibles, afin d'obtenir une fiabilité de classification plus importante.

Les différents repères et critères de l'échelle n'indiqueront pas toujours la même intensité. L'attribution du degré d'intensité sera faite sur la base du niveau correspondant au maximum observé et renseigné.

Lorsque la collecte de données sera terminée, nous disposerons de plusieurs formulaires pour la même commune, sur le principe d'une fiche par observateur. Ainsi, dans une première phase et pour la même commune, plusieurs intensités pourront être attribuées. L'attribution d'une valeur unique d'intensité sera faite en retenant la valeur moyenne des niveaux relevés sur chaque fiche. Plus le nombre de fiches renseignées est important, plus la fiabilité de l'observation sera élevée.

Nous présentons l'échelle simplifiée en cinq niveaux sur le tableau 5.5. Une colonne associant des nuances de gris à chaque niveau de l'échelle a été introduite suite à une décision du groupe de travail du projet, car il a été considéré que cela permettrait une cartographie ultérieure plus facile des intensités, dans une perspective d'utilisation opérationnelle des échelles.

⁵² www.sisfrance.net

Chapitre 5. Essai de mise au point d'une échelle d'intensité multi-aléa

Echelle existante (EMS)	Classe	Paramètres physiques	Teinte graphique	Dommages potentiels sur les enjeux				Autres critères
				Personnes	Bâtiments	Infrastructures et ouvrages	Milieux naturels et agricoles	
V	1-Très faible	4 à 4,5	10%	Le séisme est ressenti par beaucoup de personnes. Certaines personnes qui dorment se réveillent, quelques personnes sont effrayées.	Sans endommagement structurel. Endommagement non structurel léger : quelques fissures dans les éléments non porteurs.	Sans dégât	Changements mineurs de niveau de l'eau dans les puits	Balancement des objets suspendus, résonnement des verres, ouverture des portes et des fenêtres.
VI	2-Faible	4,5 à 5,5	25%	Le séisme est ressenti par la plupart des personnes aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. Beaucoup de personnes sont effrayées et se précipitent vers l'extérieur. Quelques personnes perdent l'équilibre. Blessés probables, par chutes d'objets à l'intérieur ou à l'extérieur (cheminées, tuiles ou briques).	Légers dégâts structurels : fissures minces dans les éléments porteurs. Endommagement non structurel modéré : détails architecturaux peuvent être détruits ; chute de cheminées, toits endommagés, retombée des morceaux de maçonnerie. La capacité portante des bâtiments n'est pas affectée.	Sans dégât structurels. Tassements très légers et/ou fissures mineures dans les voies routières. Endommagements non structurels légers dans les ponts ou tunnels : quelques fissures minces dans les recouvrements.	Vagues légères sur l'eau stagnante, dues à la secousse locale. Possibles retombées mineures de pierres ou petits glissements de terrains.	Des objets ordinaires peuvent tomber. Des meubles peuvent être déplacés. Certains verres peuvent se casser.
VII	3-Moyenne	5,5 à 6,5	50%	La plupart des gens sont effrayés et essayent de sortir en plein air. Certains perdent leur équilibre, surtout dans les étages supérieurs. Blessés possibles. Pertes de vies peu probables.	Endommagement structurel modéré : fissures importantes dans les poteaux et les poutres, murs porteurs fissurés, armatures endommagées. Endommagement non structurel important : cloisons complètement fissurées ou détruites. La capacité portante des bâtiments parasismiques n'est pas affectée ; capacité portante des bâtiments de type non parasismique affectée ; possibles effondrements partiels de maisons rurales.	Tassement et/ou fissures de voies routières ; difficultés de circulation par endroits. Fissures dans les piles des ponts, légers mouvements des têtes de piles. Fissures dans le linéaire du tunnel, quelques retombées de pierres. Possibles interruptions ponctuelles des réseaux électriques ou téléphoniques.	Vagues sur l'eau stagnante. Glissement de terrains ou retombées de pierres probables. Fissures mineures dans le sol. Possibilité de liquéfaction. Changements dans le débit des sources et le niveau des puits.	Meubles sont dérangés et certains peuvent être renversés. Retombées d'un grand nombre d'objets.
VIII	4-Elevée	6,5 à 7,5	75%	Frayeur et panique. Beaucoup de personnes perdent leur équilibre. Nombreux blessés. Pertes de vies probables.	Endommagement structurel important : endommagement du béton ainsi que des armatures, effondrement partiel de certains murs, des planchers ou de certains poteaux ; les constructions non parasismiques souffrent de destructions importantes ; nombreuses maisons rurales détruites. Endommagement non structurel très important. Beaucoup de murs non structurels effondrés. Endommagement des monuments et statues. La capacité portante des constructions de type parasismique est mise en danger.	Tassements et fissures importantes, menant à des interruptions ponctuelles de la circulation des voies routières. Les piles de ponts perdent leur capacité de résistance. Légères torsions de la base des poteaux. Déformations rémanentes des têtes de piles (déplacements ou flexions). Armature endommagée, larges fissures. La capacité portante des ponts est mise en danger. Tassement du portail d'entrée des tunnels, fissures larges le long du linéaire. Des rails de trains peuvent être endommagés. Interruptions de courte durée des réseaux électriques ou téléphoniques	Changements importants dans le débit des sources et le niveau des eaux. L'eau devient turbide. Glissements de terrains importants. Liquéfaction et larges fissures dans le sol. Glissement de talus sur les chaussées	Meuble sont renversés. Objets comme TV, ordinateurs, etc tombent. Fenêtres cassées.
≥ IX	5-Exceptionnelle	> 7.5	100%	Panique générale. Nombreux blessés. Pertes de vies humaines nombreuses à catastrophiques.	Effondrement partiel ou total de beaucoup de bâtiments. Dégâts structurels importants. Nombreuses maisons rurales complètement détruites. La capacité portante des bâtiments de type parasismique est affectée, certains sont détruits.	Crevasse importantes possibles sur des routes, certaines pouvant être coupées. Endommagement important de poteaux, menant à l'effondrement total des certains ponts. Des tunnels peuvent s'effondrer. Endommagements de rails de trains. Interruptions importantes des réseaux électriques ou téléphoniques	Possibles changements de relief. Déviation des cours d'eau, apparition des cascades ou des nouvelles sources. Glissements de terrains massifs. Sol fortement fissuré ou ouvert.	La plupart des objets sont renversés.

Tableau 5.11 La nouvelle échelle d'intensité sismique en cinq niveaux

* paramètre à titre indicatif

Nous présentons ensuite, dans le cadre de cette échelle, quelques exemples d'illustrations des cinq niveaux d'intensité, issues notamment de l'échelle EMS 98. Ces images serviront à guider l'observateur dans la classification de l'événement dans l'une des cinq classes d'endommagement suivant les effets sur différents enjeux, et représentent un appui aux critères détaillés dans l'échelle. Un exemple pour chaque niveau d'intensité se trouve ci-dessous (c. f. tableau 5.6) :

Niveau d'intensité	Illustration
Niveau 1	 <p data-bbox="746 1061 1294 1093">Dégâts non structurels légers aux toits du bâtiment</p> <p data-bbox="828 1108 1209 1140">Source : EMS 98 (Grunthal, 1998)</p>
Niveau 2	 <p data-bbox="828 1765 1209 1796">Fissures dans les éléments porteurs</p> <p data-bbox="828 1812 1209 1843">Source : EMS 98 (Grunthal, 1998)</p>

<p>Niveau 3</p>	 <p>Fissures importantes dans les poteaux. Endommagement structurel important Source: Earthquake Engineering Research Center, Université de Berkeley, Etats –Unis</p>
<p>Niveau 4</p>	 <p>Fissures importantes dans les routes ; circulation interrompue Source: Earthquake Engineering Research Center, Université de Berkeley, Etats –Unis</p>
<p>Niveau 5</p>	 <p>Modifications importantes du paysage. Source: Earthquake Engineering Research Center, Université de Berkeley, Etats –Unis</p>

Tableau 5.12 Exemple d'illustration de dommages pour chaque niveau d'intensité

5.4 Application des échelles

Nous avons réalisé ensuite quelques exemples d'application du nouveau système d'échelles d'intensité, pour qualifier un événement à un niveau local, sur une commune, ainsi qu'au niveau global, sur l'ensemble des communes affectées. Nous allons prendre le cas des séismes, des inondations ainsi que des feux de forêts, aléas pour lesquels nous allons appliquer les échelles d'intensité correspondantes sur la base des informations disponibles à travers notamment l'internet⁵³.

5.4.1 Application de l'échelle d'intensité sismique

Nous avons pris deux séismes comme exemples pour tester la nouvelle échelle d'intensité : le séisme de Saint Paul de Fenouillet, survenu en février 1996, et le séisme de Hennebont, du septembre 2002.

Le séisme est un aléa étendu dans l'espace. On caractérise donc l'événement localement par des intensités communales, d'une part, et globalement d'autre part, à travers le maximum des intensités enregistrées d'une manière similaire à ce qui est pratiqué avec les échelles internationales MSK ou EMS98. Nous avons réalisé également une caractérisation de l'événement par son indice d'impact synthétique global selon la formule déjà présentée (c. f. formule 5.1).

Le premier événement présenté ici est donc le séisme de Saint-Paul-de-Fenouillet, et nous allons qualifier l'intensité sur la commune avec le même nom.

Dans la nuit du dimanche 18 février 1996, à 2h 46, les Pyrénées Orientales ont connu le plus important séisme depuis celui d'Arudy de 1980 (c. f. fig. 5.2). La magnitude de la secousse, fournie le jour même par différentes institutions, varie entre 4.8 (USGS) et 5.6 (ReNaSS⁵⁴).

Sur la commune de Saint-Paul-de-Fenouillet, ce séisme n'a occasionné que des dégâts mineurs, présents notamment sur les constructions anciennes en maçonnerie. Ceux-ci se traduisent notamment par l'apparition de quelques nouvelles fissures ou l'élargissement de celles existantes, comme par exemple sur l'église communale.

D'après l'effet de ce séisme sur les bâtiments ainsi que sur les personnes, l'intensité caractéristique du séisme sur la commune de Saint Paul de Fenouillet serait de 1, soit une intensité très faible. Mais une intensité de VI sur l'échelle MSK a été assignée par le BCSF pour cette commune, ce qui indique le niveau 2 d'intensité, soit une intensité faible (c. f. tableau 5.7).

⁵³ Des applications pour les autres types d'aléas ont été réalisées dans le cadre du projet « Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par types des phénomènes naturel », disponibles dans le rapport final de l'étude.

⁵⁴ Réseau National Sismologique

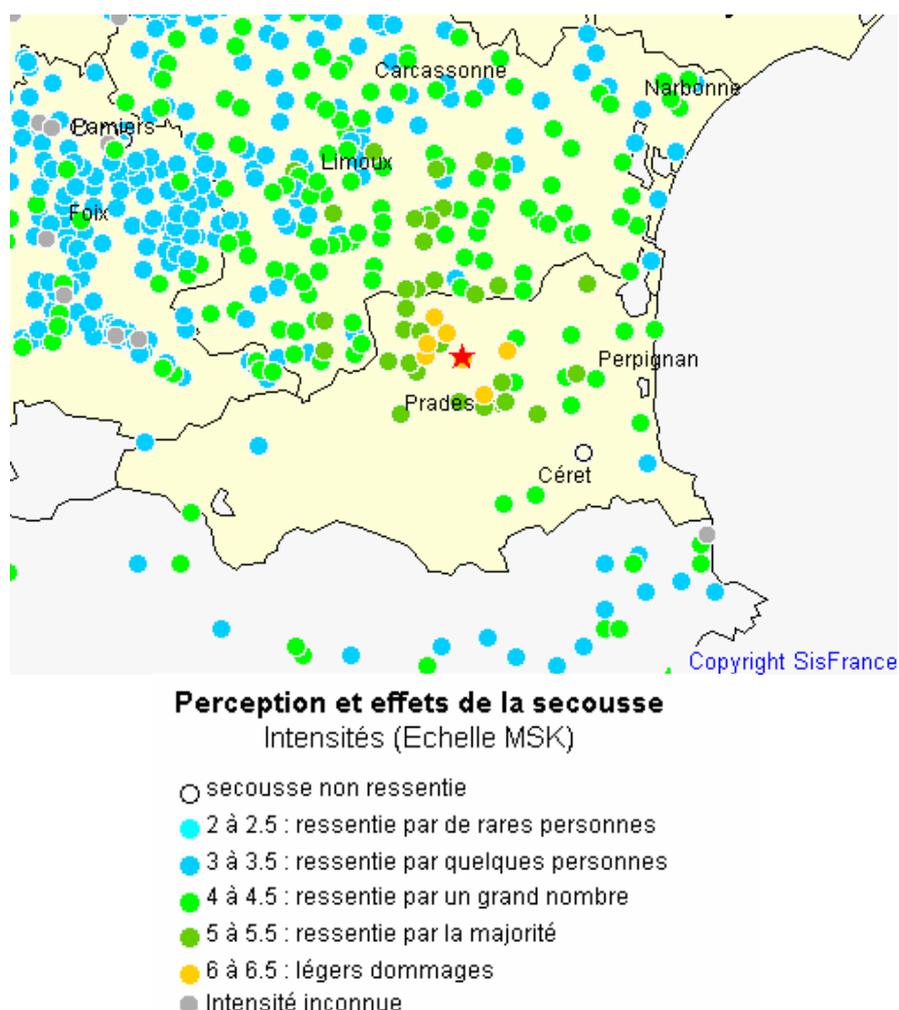


Figure 5.2 Localisation de l'épicentre du séisme du 18 février 1996 (source : www.sisfrance.net)

Echelles existantes	Niveau	Paramètres physiques	Echelle teintes graphiques	Effets prévisibles sur les enjeux				Autres critères
		Magnitude*		Personnes	Bâtiments	Infrastructures et ouvrages	Milieus naturels	
	1 Très faible		10%	XXXXX	XXXXX			
XXXXX	2 Faible	XXXXX	25%					
	3 Moyen		50%					
	4 Elevé		75%					
	5 Exceptionnel		100%					

Tableau 5.13 Qualification en intensité du séisme de Saint Paul de Fenouillet, du février 1996, sur la commune avec le même nom.

Les séismes affectant en général des surfaces assez étendues, la caractérisation par l'indice global d'impact a tout lieu d'être réalisée si l'on veut comparer l'impact de différents séismes. Rappelons que la simple qualification par la magnitude ou l'intensité macro-sismique ne fournit pas d'informations sur l'étendue géographique des surfaces affectées par les intensités décroissantes selon la distance à l'épicentre.

Sur la base des intensités EMS 98 calculées par le BCSF, 60 communes ont une intensité 1 et 14, une intensité 2. La valeur synthétique d'intensité globale a été établie donc à (c. f. éq. 5.1):

$$I = (1 \times 60 + 2 \times 14) / 5 = 17,6$$

Un deuxième exemple que nous avons pris est le séisme de Hennebont, dans le Morbihan, survenu le 30 septembre 2002 (c. f. fig. 5.3). La magnitude calculée par la RénaSS est de 5,4.



Figure 5.3 Localisation du séisme d'Hennebont du 30/09/2002. (Source : BCSF)

Pour la qualification de l'événement nous avons utilisé les informations concernant l'intensité macrosismique EMS 98 communiquées par BCSF, en l'absence de descriptions des conséquences directes de la secousse.

Ainsi, nous avons pu établir directement une corrélation avec notre échelle sur l'ensemble des communes affectées (c. f. tableau 5.8).

Commune	Intensité EMS	Nouvelle échelle d'intensité
Hennebont	6	2
Kervignac	5/6	2
Inzinzac - Lochrist	5/6	2
Branderion	5	1
Inguiniel	4/5	1
Lanvaudan	4/5	1
Plouay	4/5	1
Quinstinic	4/5	1
Languidic	4/5	1
Baud	4/5	1
Camors	4/5	1
Plumelin	4	-
Pluvigner	4/5	1
Brech	4	-
Locoal - Mendon	4/5	1
Auray	4	-
Ploemel	4	-
Carnac	4	-
Plouharnel	4	-
Belz	4	-
Merlevenez	4/5	1
Sainte Helene	4	-
Plouhinec	4	-
Merlevenez	4/5	1
Riantec	4/5	1
Lanester	4/5	1
Lorient	4	-
Ploemeur	4	-
Larmor - Plage	4	-
Caudan	4/5	1
Queven	4/5	1
Gestel	4/5	1
Pont - Scorff	4/5	1
Quimperle	4	-
Arzano	4	-

Tableau 5.14 Qualification en intensité du séisme d'Hennebont d'octobre 2002 pour chaque commune affectée, sur la base de la valeur de l'intensité EMS 98.

Sur la base de ces intensités locales, attribuées aux communes concernées, nous avons calculé par la suite l'indice d'impact, afin de quantifier le poids global de l'événement.

Ainsi, le calcul de l'impact (c. f. éq. 5.1) fourni un indice de :

$$I = (3 \times 2 + 18 \times 1) / 5 = 4,8$$

Nous pouvons constater, en comparant les indices d'impact calculés ci-dessus, un effet plus important du séisme de Saint Paul de Fenouillet (avec un indice de 17,6) par rapport à celui de Hennebont (avec un indice de 4,8). En réalité, le séisme de Saint Paul de Fenouillet a eu un impact important sur la société ainsi que sur la communauté scientifique, faisant l'objet des missions en retour d'expérience organisées par des associations professionnelles françaises

ainsi qu'étrangères⁵⁵. A l'opposé, la secousse de Hennebont a eu un impact assez limité, faisant l'objet uniquement des mesures du BCSF.

Ceci nous permet de valider l'information apportée par l'indice d'impact proposé pour l'ensemble d'aléa. Nous allons comparer plus loin ces deux événements sismiques avec une inondation lente, une inondation rapide par ruissellement urbain et un incendie de forêts.

5.4.2 Application de l'échelle d'intensité d'inondations - crues lentes

L'exemple que nous avons pris illustre une caractérisation d'une inondation due à une crue lente survenue en novembre 2000 dans le Calvados, sur la rivière Touques. Le secteur étudié se situe entre les communes de Pont-l'évêque et de Deauville.

Seul un tronçon de la rivière est documenté ainsi que deux de ses affluents. Nous avons caractérisé ainsi l'impact de la crue sur 19 communes, sur la base des documents et rapports fournis par les différents services de DDE⁵⁶ locales, la DIREN⁵⁷ Basse-Normandie, ainsi que des archives photographiques, des extraits de cartes et relevés provenant de campagnes aériennes et hélicoptérées durant l'événement, des élus et des riverains.

L'intensité de l'inondation a été quantifiée d'une manière globale, selon l'échelle de rareté de la crue (c. f. annexe 5.1) ainsi que selon l'indice d'impact global, et d'une manière locale, à travers l'échelle de submersion. Sur chaque commune affectée, c'est l'intensité maximale observée qui a été retenue.

Dans une première étape nous avons réalisé une qualification selon la fréquence de crue (c. f. annexe 5.1), sur la base notamment des hydrogrammes obtenus durant la période d'inondation. Les débits mesurés ont permis la qualification de l'intensité de la rivière Touques sur l'ensemble de son bassin versant. La comparaison avec le débit décennal indique donc le niveau 2 d'intensité, soit une intensité moyenne.

Cette qualification nous semble cependant sans intérêt, car elle ne quantifie en aucune manière les endommagements survenus suite à l'inondation. Nous allons réaliser une discussion sur cet aspect à la fin du chapitre, en analysant l'ensemble des échelles.

Dans une deuxième étape, nous avons essayé de qualifier l'inondation suivant l'échelle de submersion. Cette échelle s'applique donc au niveau local, à chaque commune. Nous allons prendre l'exemple de la commune de Pont l'Evêque, où la côte de submersion la plus élevée a été d'environ 1,5 m, ce qui indique une intensité moyenne (c. f. tableau 5.9).

Echelle existante	Niveau	Paramètres physiques (ordre de grandeur)	Echelle teintes graphiques	Effets prévisibles sur les enjeux				Autres critères
				Personnes	Bâtiments	Infrastructures et ouvrages	Espaces naturels et agricoles	
	1 <i>Faible</i>		10%	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	
	2 <i>Moyen</i>	XXXXXX	50%					
	3 <i>Fort à Exceptionne</i>		100%					

Tableau 5.15 Qualification en intensité selon l'échelle de crue lente sur la commune de Pont l'Evêque suite à l'inondation de la Touques du novembre 2000.

⁵⁵ Des missions en retour d'expérience ont été organisées par l'AFPS ainsi que par l'Institut Cartographique de Catalogne, en Espagne.

⁵⁶ Direction Départementale de l'Équipement

⁵⁷ Direction Régionale de l'Environnement

Les effets constatés sur les autres catégories d'enjeux indiquent pourtant une intensité faible. En raison de notre règle qui nous demande l'affectation du niveau maximum, on établit par conséquent le niveau 2 d'intensité, soit une intensité moyenne.

Le même type d'observations nous a conduits à l'affectation d'une intensité caractéristique sur l'ensemble des communes se situant sur le bassin versant de la Touques (c. f. fig. 5.4)

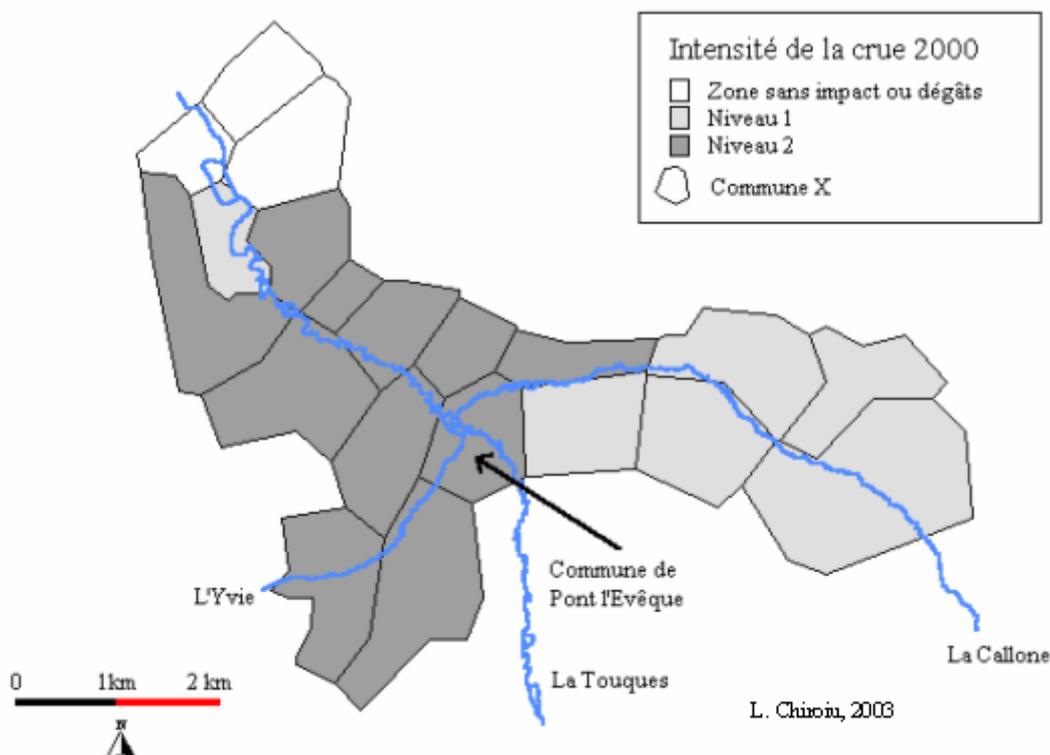


Figure 5.4 Qualification en intensité de crue lente de chaque commune se situant sur le bassin versant de la Touques pour l'inondation du novembre 2000 (source de données : GSC).

Les communes sans impact ou sans dommages sont hors échelle et ne sont pas prises en compte. Dix communes ont été classées avec une intensité de 2 et six autres avec une intensité de 1. La valeur d'impact global calculée (c. f. éq. 5.1) est donc de :

$$I = (6*1 + 10*2)/3 = 8,67$$

5.4.3 Application de l'échelle d'intensité d'inondations - crues rapides et ruissellement

Nous avons également pris comme exemple d'application de l'échelle d'inondation due aux crues rapides et ruissellement urbain, un événement survenu sur le secteur de Touques – Deauville – Trouville, dans le Calvados, suite à un orage de forte intensité survenu le 1 juin 2003. Un important ruissellement pluvial accompagné de coulées de boues, une remontée des eaux par les canalisations et l'ennoiment de nombreuses caves ont été les conséquences de cet orage, l'état de « catastrophe naturelle » étant par ailleurs déclaré sur ces trois communes. Sur la base des dommages constatés suite à une mission en retour d'expérience, nous avons pu affecter un niveau d'intensité pour chaque commune. Ainsi, les murs effondrés (c. f. fig. 5.5) et les voitures emportées, l'érosion des berges et l'endommagement des voiries nous ont

conduit à l'affectation du niveau 2 d'intensité sur les communes de Touques et Trouville (c. f. tableau 5.10). L'inondations des caves à Deauville caractérise le niveau 1 d'intensité.



Figure 5.5 Destructions des murs sur la commune de Touques lors de l'inondation du juin 2003. (photo : F. Bahoken)

Classe	Critères d'intensité				Teinte	Effets prévisibles sur les enjeux					Critères spécifiques	
	Inondation		Déversement	Coulée de boue		(facteurs aggravants : forte extension spatiale ; effet de surprise : crue la nuit, absence d'alerte)					Ruissellement urbain	Coulées de boue
Intensité	Gradient G de montée des eaux	Hauteur H Vitesse V submersion	Profondeur P (m) moyenne d'une brèche	Longueur L (km/commune) de cours d'eau affecté		Personnes	Bâtiments	Infrastructures	Espaces naturels et agricoles	Rivières et ouvrages fluviaux	Tous enjeux	
1								XXXX				
2							XXXX			XXXX	XXXX	XXXX
3												

Tableau 5.16 Qualification en intensité de crue rapide sur les communes de Touques et Trouville suite à l'inondation de juin 2003.

Nous avons calculé ensuite l'indice global d'impact caractérisant cet événement de crue rapide et ruissellement urbain (c. f. éq. 5.1):

$$I = (2*2 + 1*1)/3 = 1,67$$

5.4.4 Application de l'échelle d'intensité des feux de forêts

Nous avons pris comme un dernier exemple d'application des échelles d'intensité au cas des feux de forêt. Nous avons considéré ainsi l'analyse de l'incendie survenu en juillet 2003 dans le massif de Maures, dans le Var. Les flammes, qui ont couvert une surface de plus de 12000 hectares (c. f. fig. 5.6), ont calciné une dizaine des maisons, une trentaine de voitures ainsi que plusieurs campings.



Figure 5.6 Images acquise par le satellite SPOT 5 le 20 juillet 2003. On distingue en vert foncé la surface incendiée, et en rouge la végétation non brûlée (source : SpotImage).

Sur la base notamment de la surface parcourue, de son ampleur ainsi que des endommagements provoqués, nous avons qualifié l'incendie dans le niveau 6 d'intensité, en retenant la valeur maximale indiquée par ces critères (c. f. tableau 5.11).

Classe	Paramètres physiques (ordre de grandeur)	Echelle teintes graphiques	Dommages potentiels sur les enjeux				
			Surface parcourue par le feu	Espaces naturels et agricoles	Personnes	Bâtiments	Infrastructures et ouvrages
Très faible 1		10 %					
Faible 2		20%					
Moyenne (3)		40%					
Elevée (4)		60 %					
Très élevée (5)	XXXXX	80%		XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
Exceptionnelle (6)		100%	XXXXX				

Tableau 5.17 Qualification en intensité de l'incendie survenu en juillet 2003 dans le massif des Maures, dans le Var.

L'incendie s'est propagé sur le territoire de six communes : Fréjus, Roquebrune sur Argens, Muy, Vidauban, Plan de la Tour et Sainte Maxime. Pour obtenir un indice global d'impact, nous avons qualifié cet événement en niveau 5 d'intensité sur chaque commune, sur la base des dégâts produits sur les enjeux standard. Ainsi, nous obtenons (c. f. éq. 5.1) un indice global de:

$$I = (6*5)/6 = 5$$

5.4.5 Analyse des résultats de l'application des échelles d'intensité

Les échelles que nous avons utilisées ont permis la qualification de phénomènes naturels distincts sur des échelles relativement équivalentes, ce qui montre l'intérêt du nouveau système d'échelles d'intensité. Ces qualifications ont été réalisées sur la base notamment des informations élémentaires, accessibles au public et ne nécessitant pas des connaissances scientifiques relatives à chaque aléa. Cet aspect est très important, car il permet la «vulgarisation» de ces échelles et par conséquent leur large diffusion.

Les études de cas considérées permettent également une analyse de la pertinence de l'indice global d'impact. Élément spécifique du système d'échelles d'intensité proposé, il a été introduit notamment pour la prise en compte de la dimension spatiale des événements naturels produisant des dégâts.

Nous avons réalisé dans un premier temps un tableau comparant les indices obtenus pour les aléas analysés plus haut dans le texte (c. f. tableau 5.12).

Aléas	Date d'occurrence	Localisation	Indice
Séisme	18/02/1996	Saint Paul de Fenouillet (Pyrénées Orientales)	17,6
Séisme	30/09/2002	Hennebont (Morbihan)	4,8
Inondation – crue lente	11/2001	Bassin de la Touques (Calvados)	8,67
Inondation – crue rapide	04/06/2003	Touques, Trouville, Deauville (Calvados)	1,67
Feux de forêts	18/07/2003	Var	5

Tableau 5.18 Comparaison des indices d'impact entre différents événements pour séismes, inondations et feux de forêts.

Nous pouvons observer ainsi que l'indice d'impact différencie effectivement les événements en fonction de leur extension spatiale. Ainsi, l'inondation par ruissellement survenue en juin 2003 sur Touques, Trouville et Deauville présente un coefficient de 1,67, ce qui est évidemment inférieur à celui associé à l'incendie de Var de juillet 2003, affectant 6 communes, ou encore à celui associé aux inondations de la Touques de novembre 2001, qui ont touché 16 communes.

Toutefois, du point de vue de l'impact en termes de dommages, cet indice ne reflète pas totalement l'ampleur des conséquences réelles. L'incendie du Var, par exemple, a provoqué des dégâts plus importants (en termes de victimes ou des destructions aux enjeux) que les inondations de la Touques de novembre 2001 ou même que le séisme de Saint Paul de Fenouillet. Selon son indice, cet incendie peut être comparé au séisme de Hennebont, mais ce dernier a été un événement presque non ressenti, alors que le feu de forêts avait requis la présence de plus de 1700 pompiers. Les indices correspondants à ces événements, dans leur

forme actuelle, ne quantifient pas (ou peu) par conséquent l'intensité globale d'endommagement d'un événement; en revanche, ils mesurent l'extension spatiale, permettant uniquement la comparaison des territoires affectées en termes de surface.

5.5 L'apport des nouvelles échelles d'intensité.

Le nouveau système d'échelles offre la possibilité de quantifier les effets de différents événements selon les mêmes bases, ce qui n'était pas envisageable dans le passé. L'idée qui a conduit cette étude est innovante, et les applications possibles seraient nombreuses (telles que la gestion de territoire, l'élaboration des PPR spécifiques, la déclaration de l'état de « catastrophe naturelle », ou encore les assurances). Mais les résultats obtenus peuvent être considérablement améliorés afin d'uniformiser l'ensemble de ces échelles. Initialement prévues en cinq niveaux, les échelles actuelles varient en réalité entre trois et six niveaux. Un autre inconvénient majeur de ce système est l'existence de plusieurs échelles pour le même phénomène (comme le cas des inondations, où l'on dispose d'une échelle en fréquence et d'une autre en intensité d'endommagement), ou la délimitation incertaine entre l'utilisation des deux échelles (comme pour le cas de l'échelle « crue rapide par ruissellement urbain et coulée de boue » et l'échelle « coulées de boue »).

Nous allons analyser par la suite chaque échelle d'intensité, aléa par aléa.

L'échelle d'intensité sismique ne représente en effet qu'une contraction de l'échelle actuelle EMS98 (ou encore MMI ou MSK) en 5 niveaux, sans apporter d'autres éléments complémentaires. Le BCSF réalise actuellement après chaque séisme une enquête macrosismique en attribuant une intensité⁵⁸ à chaque commune touchée, à travers une méthodologie développée dans le cadre de l'EMS 98. D'un point de vue pratique, la nouvelle échelle est basée donc uniquement sur la translation entre les douze niveaux de l'EMS et les cinq niveaux actuels. L'avantage apporté réside dans la possibilité de comparaison sur la même base des effets d'un séisme avec les effets d'un événement tel qu'une avalanche ou une tempête.

L'échelle d'intensité d'éruptions volcaniques représente par ailleurs une nouveauté, les conséquences potentielles de ce type de phénomène étant quantifiées pour la première fois sur une échelle d'endommagement. Comme pour le cas des séismes ainsi que pour le reste des aléas, elle permet une comparaison avec l'impact d'autres risques naturels selon la même base.

En ce qui concerne les quatre échelles de mouvement de terrains, différenciées selon le type de phénomène, elles représentent également une approche innovante, qui permet la séparation en plusieurs niveaux d'endommagement des conséquences complexes de ce type d'aléa. Pour la première fois nous pouvons comparer, en termes de dommages, un glissement de terrain avec un affaissement de carrière ou encore avec un éboulement. Ces échelles arrivent à combler un manque important de repère ainsi que de définition d'un critère de quantification de l'impact de cet aléa, très répandue en France, au contraire des autres aléas plus rares (tels que les éruptions volcaniques, les tornades ou les tsunamis). Nous regrettons toutefois l'hétérogénéité du nombre des niveaux entre les différentes échelles, qui varient entre quatre (pour l'échelle « effondrement de cavités naturelles »), cinq (pour l'échelle « affaissements,

⁵⁸ il s'agit d'une intensité EMS 98

tassements et subsidences ») et six (pour l'échelle « éboulement, écroulement et chutes de blocs » et pour l'échelle « glissements de versants »).

Pour l'aléa « inondations » ont été distingués trois types principaux de phénomènes : les inondations par débordement, les inondations par remontée de nappes et enfin les inondations par submersion marine.

Pour ce qui est des inondations par débordement, nous pouvons remarquer l'introduction de la notion de fréquence pour la caractérisation d'un événement, malgré l'objectif de quantification de l'impact d'une crue à travers les endommagements produits. Cet aspect a été volontairement non traité pour les autres aléas, afin de ne pas juger un phénomène sur une base probabiliste et de mettre en évidence son potentiel destructeur. L'élaboration de l'échelle en fréquence nous paraît donc contradictoire avec le principe du projet. Dans une autre perspective, cette échelle peut être utilisée uniquement par de spécialiste, familiers avec le terrain d'étude et en possession de données hydrologiques précises sur le bassin versant analysé. De plus, le développement des échelles d'intensité de submersion pour le même type d'événement demande donc une double qualification en intensité selon deux échelles différentes, qui n'ont pas le même nombre de niveaux.

Les deux échelles d'intensité de submersion, pour les crues lentes et celles rapides, présentent l'inconvénient majeur d'avoir seulement trois niveaux d'intensité. Ceci implique donc une réduction importante de possibilité de comparaison sur les même bases des effets des inondations avec les effets des autres risques naturels, et représente en effet un écart important par rapport aux cinq niveaux prévus initialement. De l'autre côté, les trois niveaux représente une qualification simpliste et intuitive, équivalente aux trois degrés de comparaison utilisés d'une manière universelle (« peu », « moyen » et « beaucoup »). L'introduction du moins d'un niveau supplémentaire (sur la base par exemple de la hauteur de submersion) rendrait cette échelle plus professionnelle et plus adéquate aux objectifs du nouveau système d'échelles d'intensité.

Les échelles de remontée de nappes et de submersion marine, les deux étant en cinq niveaux, ont le mérite de distinguer pour la première fois plusieurs classes d'intensité de leurs effets. Leur utilisation restera probablement limitée, en raison notamment d'une relative rareté de manifestation de ces événements.

Les échelles développées pour les phénomènes météorologiques sont très intéressantes, du moins pour les aléas les plus endommageants tels que tempêtes, grêles ou cyclones. Le regroupement en cinq niveaux de différentes échelles existantes et utilisées couramment répond parfaitement aux objectifs souhaités. Les notions simples et pratiques utilisées par ces échelles laissent envisager des perspectives intéressantes pour une généralisation de l'application de ces échelles.

Les échelles de feux de forêts, d'avalanches, de laves torrentielles et de tsunami réalisent également pour la première fois une classification de l'impact de ces aléas à travers cinq niveau d'intensité, contribuant ainsi à l'homogénéité du nouveau système d'échelles.

Sur l'ensemble des aléas, nous pouvons remarquer qu'à l'exception des inondations, il existe une certaine cohérence des échelles, en termes de niveaux d'intensité comme en termes d'effet sur des enjeux standard. Elles permettront donc notamment la comparaison des conséquences des divers aléas naturels à travers les mêmes références, et indirectement l'évaluation de la vulnérabilité des différents territoires. L'indice d'impact global permet de plus la prise en compte de l'extension spatiale d'un événement, même si cela n'apporte pas, pour l'instant, d'informations sur l'importance globale de dommages provoqués par l'événement considéré.

5.6 Perspectives d'extension du modèle sismique aux autres risques naturels

La gestion du risque sismique a enregistré un progrès important dans les dernières années en raison notamment d'une meilleure compréhension du mécanisme du phénomène d'un côté et du comportement des différents enjeux potentiels face à cet aléa de l'autre côté. Les connaissances acquises dans ces deux directions ont ensuite permis le développement de nouveaux outils et techniques de réduction de la vulnérabilité touchant tous les aspects de la société. Une conséquence directe a été l'amélioration au début des années 90 des normes parasismiques d'un grand nombre de pays, tels que la France ou les Etats-Unis. La population est devenue de plus en plus sensible à cette problématique, intérêt appuyé également par l'occurrence de quelques catastrophes très meurtrières, tels que le séisme de Kobe, en 1995 ou encore de Kocaeli, en 1999. Des efforts importants ont été déployés pour mettre en place des stratégies de réduction du risque sismique au niveau international, à travers entre autres la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles. Mais les autres risques naturels n'ont pas connu le même essor du point de vue de leur gestion, notamment les inondations ou les tempêtes, qui ont provoqué dernièrement des dégâts très importants.

Prenons le cas du risque d'inondation importante en région parisienne. Tout d'abord, l'aléa est analysé d'une manière exclusivement déterministe, pratique de moins en moins utilisée pour le risque sismique, car la nécessité de protection est analysée en fonction de plusieurs scénarii d'événements. A titre d'exemple, le zonage sismique probabiliste de la France, fini depuis peu, est envisagé remplacer prochainement le zonage actuel, réalisé d'une manière déterministe. Ensuite, le scénario généralement unique pris en compte en région parisienne par les principaux acteurs de la gestion des risques naturels est la crue de 1910, dite « centennale », soit un événement qui a une probabilité de retour de 10% sur 10 ans. Cette estimation ne prend pas du tout en compte l'écoulement des années, et donc l'augmentation de la probabilité d'occurrence de l'événement (l'équivalent des modèles probabilistes « à mémoire » utilisés dans le risque sismique). Nous pouvons remarquer toutefois que cette probabilité d'occurrence de 10% sur 10 ans est cinq fois plus élevée qu'un des scénarii considéré habituellement dans le risque sismique, qui est de 10% sur 50 ans. Les conséquences potentielles d'une éventuelle catastrophe sont pourtant évaluées à plus de 10 milliards d'euros. Malgré ceci, les acteurs concernés par la gestion des risques naturels ont commencé depuis très peu de temps à s'intéresser à cet aspect. Ainsi, le Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) sur Paris a été mis en enquête publique au mois de février 2003, et le Plan Spécialisé de Secours contre les Inondation (PSSI) en région parisienne est toujours en phase d'étude.

Contrairement au risque sismique, il n'existe aucun guide méthodologique proposant des solutions techniques et conseils de protection contre les inondations, à destination des particuliers ou des spécialistes (architectes ou ingénieurs), malgré l'existence de ce type de documents à l'étranger (FEMA, 1999).

Quant à la gestion financière de ce risque, rien n'a été fait pour l'anticipation éventuelle d'un événement de cette ampleur. Il est probable que l'actuel système français d'assurance contre les catastrophes naturelles soit largement dépassé par l'ampleur d'une telle catastrophe ; mais pour l'instant il n'y a aucune incitation à la recherche des solutions alternatives, telle que

l'adaptation des outils déjà existants au niveau international (Godard et al, 2002). A titre indicatif, on cite le marché financier d'échange de polices d'assurances dédiés exclusivement au risque naturel, le CATEX⁵⁹.

L'estimation de dommages apparaît donc comme un outil inévitable pour une meilleure gestion du risque d'inondation. Mais le développement de ce type d'approche a pris du retard par rapport au risque sismique, en raison notamment des spécificités techniques liées à la modélisation de cet aléa. Au début des années 90, des travaux de recherches ont permis la réalisation de modèles de submersion, basés notamment sur une approche hydraulique. La rivière est ainsi discrétisée à l'aide des éléments finis en « casier », chaque carré étant caractérisé par des propriétés telles que la vitesse du courant ou la hauteur de submersion (c. f. annexe 5.7). Mais ces modèles sont assez lourdes, en développement comme en manipulation, et présentent une précision assez faible, car la taille des éléments est souvent proche du kilomètre. Développée la fin de années 90, une nouvelle approche basés sur une analyse hydro-géomorphologique semble être mieux adaptée pour l'analyse du risque inondation (IIBRBS et al, 1994). Basée sur la superposition d'une lame d'eau à un modèle numérique de terrain, la méthode permet ainsi l'obtention de la hauteur de submersion avec une précision élevée, dépendant en grand partie de la précision du MNT. Plus facile à réaliser, elle présente toutefois des inconvénients liés à la non prise en compte des paramètres dynamiques de l'eau, notamment la vitesse du courant. Malgré cet aspect, cette méthode commence à être de plus en plus utilisée pour la modélisation des inondations (SwissRe, 2003).

Nous allons mentionner également le développement récent (en 2002) par la FEMA d'un modèle HAZUSTM adapté au risque inondation, réalisée avec une interface SIG et permettant de même que HAZUSTM séismes l'analyse de différents scénarii ainsi que l'utilisation de données spécifiques apportées par l'utilisateur (c. f. annexe 5.7).

Les aspects mentionnés plus haut dans le texte pourraient être sensiblement améliorés avec le développement des modèles d'estimation de dommages spécifiques aux inondations, et le risque sismique, malgré ces limitations, peut jouer aujourd'hui un rôle d'exemple. L'adaptation des éléments méthodologique liés à l'analyse probabiliste d'aléa, aux courbes d'endommagement ou encore aux solutions de protection peut constituer un point de départ pour l'amélioration globale de la gestion du risque d'inondation.

En ce qui concerne les aléas météorologiques, des modèles d'estimations de dommages dus aux événements tels que tempêtes ou tornades existent (à l'international) notamment dans le domaine privé, développés par les sociétés de modélisation du risque et utilisés par les sociétés d'assurances⁶⁰. Nous allons mentionner également le développement à la fin des années 90 d'un outil très intéressant et novateur de gestion financière des risques dues aux températures inhabituelles, hautes ou basses, basé sur *les dérivés climatiques* (Augros et Queruel, 2001 ; Campbel et Diebold, 2002 ; Cao et Wei, 2000 ; Geman, 1998). Les spécialistes ont réalisé que de nombreux secteurs sont affectés directement ou indirectement par les aléas climatiques (c. f. tableau 5.13). Ils ont développer ainsi les dérivés climatiques, qui sont des instruments financiers basés sur des analyses techniques du risque climatique. Ils permettent la couverture contre un type donnée d'exposition (par exemple contre une température au-dessous de 20 degrés en été pour les fournisseurs de glace, ou contre le gel et la neige en hiver pour les entreprises de BTP), en échange d'une police standard d'assurance. En fonction des statistiques ainsi que des analyses spécifiques à chaque type de risque, on peut calculer la probabilité de retour de l'événement choisi ; sur la base des pertes potentielles estimées, le spécialiste peut fixer ainsi une prime d'assurance correspondante.

⁵⁹ plus d'informations sont disponibles sur www.catex.com

⁶⁰ tel que, à titre d'exemple, le modèle EUROWIND, développé et disponible auprès de société EQECAT

Secteur d'activité	Risque
Agriculture	Soleil, pluie, gel
Assurances	Soleil, température
Agroalimentaire, commerce de détail	Sécheresse, pluie
Bâtiments et travaux publics	Gel, pluie
Energie	Température
Textiles, habillement	Température
Tourisme, loisir	Ensoleillement, pluie, neige
Transport	Neige, gel, pluie

Tableau 5.19 Types de risques météorologiques affectant divers secteur d'activité (source : Augros et Querel, 2001).

En France, une collaboration entre la bourse Euronext et MeteoFrance⁶¹ permet depuis janvier 2002 l'utilisation de ce type d'outil comme une mesure de protection contre quatre types de risque climatiques : les températures, la pluie, la neige et la grêle.

Ces développements, très utiles notamment pour la gestion financière du risque mais également d'une manière indirecte pour la protection et la prévention, nous paraissent une perspective très intéressante de recherche pour l'application à d'autres aléas naturels tels que les séismes ou les inondations. Le nouveau système d'échelles d'intensité proposé ici peut représenter dans ce contexte une base de travail intéressante.

Pour conclure, le risque sismique nous paraît aujourd'hui un exemple à suivre pour la gestion des autres risques naturels et notamment pour le risque d'inondation, pour lequel des importants efforts devraient être réalisés afin de disposer de véritables mesures de protection de la société, à tous les niveaux. Par ailleurs, la transposition des outils existants pour d'autres aléas tels que les dérivés climatiques apporterait une aide importante à la gestion du risque sismique.

⁶¹ Plus d'informations disponibles sur <http://nextweather.euronext.com>

CONCLUSION

Par ce travail nous avons essayé de contribuer au développement des outils permettant l'amélioration de la gestion du risque sismique.

Nous avons présenté dans une première partie les objectifs, le fonctionnement, les paramètres et les limites d'applications des modélisations de dommages consécutifs aux séismes. Notre analyse a porté sur les principaux modèles tels que HAZUSTM, GEMITIS, RADIUS ou encore RISK-UE. La plupart des approches proposent des estimations basées sur l'utilisation de l'intensité macrosismique pour la quantification de l'endommagement. HAZUSTM se distingue par sa démarche claire qui permet une évaluation de dommages directement à partir du mouvement du sol, à travers des relations reliant le déplacement ou l'accélération du sol à différents niveaux d'endommagement structurel. Nous avons pu constater également la simplicité des modèles tels RADIUS, qui rend son application accessible à des non spécialistes, aspect très utile en vue de leur utilisation par des collectivités ou décideurs locaux. Dans le contexte français, nous avons analysé le modèle GEMITIS, appliqué sur la ville de Nice.

Malgré les points faibles qui demeurent inhérentes pour le moment, variant d'un modèle à l'autre, une évaluation de dommages sismiques offre l'information de ce qui se passerait en cas d'un séisme, ce qui est indispensable pour une meilleure prévention et protection face au risque sismique.

Les perspectives d'améliorations des modélisations de dommages sont basées principalement sur l'amélioration des fonctions d'endommagement, sur la définition de typologies standard de constructions au niveau international, sur la réalisation des inventaires précis des enjeux et sur la définition des microzonages sismiques spécifiques aux grandes agglomérations urbaines.

Dans une deuxième partie, nous avons développées des courbes de capacité par type standard de bâti, élément central d'une modélisation directe de dommages, à partir du mouvement du sol. Nous avons ainsi analysé plus de deux cents types de constructions, en variant notamment les dimensions et la géométrie des structures. Le calcul a été effectué suivant la méthode « pushover », réalisé à l'aide d'un logiciel spécialisé. Les résultats obtenus permettent une correspondance directe entre la sollicitation sismique et l'endommagement. Ces courbes, que nous avons développées pour six classes standard de bâti, décrivent en effet le comportement général du type de construction considéré face à une sollicitation sismique. A travers ces relations, nous proposons une alternative aux principales courbes existantes de ce type, issues du modèle HAZUSTM. En effectuant une analyse comparative de nos résultats par rapport à celles-ci, nous avons pu noter certaines différences au niveau des valeurs des points caractéristiques, même si généralement nos courbes présentent le même aspect que celles de HAZUSTM. Ces différences peuvent être dues aux paramètres considérés lors de la modélisation des structures, car le type d'architecture considéré dans notre recherche est spécifique au contexte urbain européen. De légères variations dans ces paramètres entraînent des différences importantes dans les valeurs caractéristiques des courbes de capacité.

Des recherches considérant un nombre plus important de structures devraient permettre une amélioration de la finesse de ce type de courbes. Une autre perspective serait l'extension de l'approche à d'autres typologies traditionnelles de constructions, telle que les maisons en bois, en maçonnerie ou en adobe.

Dans une troisième partie, nous avons utilisé ensuite les courbes de capacité pour le calcul des pertes potentielles suite à des scénarii probabilistes de séismes, à travers les courbes d'endommagement proposées par le modèle HAZUSTM. Les courbes d'endommagement relient le déplacement du bâtiment engendré par la simulation de l'action sismique à cinq niveaux de dommages structures. Ainsi, pour un déplacement souffert par le type de bâti A de X cm, nous obtenons une probabilité d'avoir P₁ % d'endommagement de niveau 1, P₂% d'endommagement du niveau 2, P₃% d'endommagement du niveau 3, P₄% d'endommagement du niveau 4 et enfin P₅% d'endommagement du niveau 5.

Nous avons considéré l'étude des cas des villes de Barcelone et Nice, situées dans une zone à sismicité modérée mais présentant une forte concentration d'enjeux socio-économiques. Les résultats obtenus ont un caractère semi-qualitatif, en raison de l'absence des données précises concernant un inventaire de types de bâti. Les résultats sont ainsi exprimés en pourcentage d'endommagement susceptibles de se produire pour un type de bâti et un niveau de dommages.

Dans le cas de l'occurrence d'un séisme de même type que celui de 1883 de Ligurie, Nice souffrirait des dommages très importants, estimés à un minimum de 3% de l'ensemble des constructions complètement détruites et environ 10% comme présentant des endommagements très sérieux. La probabilité de retour d'un tel événement n'est pourtant pas exceptionnelle, avec 10% de chances de se produire en 50 ans. Malgré une comparaison difficile avec le modèle GEMITIS, en raison de l'incompatibilité des classes de bâti considérées, on a pu noter toutefois que l'évaluation de dommages issue de ce dernier est inférieure à celle de notre approche.

Dans le cas de l'application sur Barcelone, les dommages consécutifs à une sollicitation sismique associée à une période de retour de 500 ans seraient, en termes statistiques, moins forts que sur Nice, avec 2% du total des constructions considérées présentant des dommages importants, et seulement 0,3% complètement détruites. Une analyse comparative par rapport à une étude antérieure basée sur des matrices de vulnérabilité nous montre, sur un plan général, des estimations légèrement supérieures issues de cette dernière approche.

Le développement des courbes de capacité pour un nombre plus important des typologies standard de constructions ainsi que l'amélioration de celles proposées ici permettra sans doute l'obtention d'estimations de dommages plus précises. La réalisation des inventaires du type de bâti représente un autre élément important contribuant à l'amélioration de la fiabilité des résultats.

Ces résultats offrent uniquement un aperçu des conséquences directes potentielles consécutives à un séisme. A l'heure actuelle, il est très difficile de prévoir tous les impacts indirects, notamment d'ordre social et financier ; à titre d'exemple, la faillite éventuelle des sociétés dont les bâtiments sont en ruine peut engendrer entre autres l'augmentation généralisée du chômage dans la région. Mais les effets indirects ne seront certainement pas limités à la région d'impact du séisme, tel que cela a été le cas pour le séisme de Kobe, au Japon, en 1995.

Si les évaluations des conséquences potentielles issues des modèles d'estimation de dommages consécutifs au séisme présentent toujours un certain degré d'incertitude, calculable malgré tout (Grossi, 2000), il est évident qu'il vaut mieux avoir une idée de ce qu'il pourrait se passer que de ne pas être informé. Ceci représente un élément très important pour la préparation et la prévention du risque, et les décideurs devraient se pencher plus vers de telles estimations afin de mettre en place des politiques réelles de mitigation. L'aménagement du territoire et notamment les normes parasismiques et le contrôle du bâti devraient permettre

une meilleure protection face au risque sismique, mais l'incitation à leur application reste pour le moment assez réduite. Ainsi, le système français d'assurance, outil qui peut jouer un rôle très important dans la gestion du risque, ne constitue pas aujourd'hui un élément catalysant la préparation face aux catastrophes naturelles (Godard et al, 2002). De futures améliorations devraient être envisageables, des solutions pouvant être apportées par les modèles d'assurances étrangers, présents en Allemagne, Angleterre, Suisse ou encore aux Etats-Unis.

Dans une quatrième partie nous avons analysé l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans le domaine du génie parasismique. L'utilisation des images à très haute résolution, fournie depuis la fin des années 90 par des satellites commerciaux, ouvrent de nouvelles perspectives dans le risque sismique, notamment pour la gestion des catastrophes et pour le développement des inventaires urbains de bâti.

La détection rapide de dommages représente une application principale de l'imagerie satellitaire, qui a émergé depuis notamment le séisme de Kocaeli, de 1999. Différentes approches de mise au point des méthodes automatiques de reconnaissance de dégâts ont été développées depuis, tel que nous l'avons présenté au début de cette partie. Mais nous avons noté que les techniques traditionnelles d'analyse de changements n'offrent pas, pour l'instant, des résultats fiables dans le cas de l'imagerie à très haute résolution.

A travers l'étude du cas de séisme de Bhuj, en Inde, et de Boumerdes, en Algérie, nous avons réalisé une analyse en photo - interprétation du potentiel de l'imagerie à très haute résolution, qui a permis la cartographie des zones endommagées. Nous avons utilisé des images multi-temporelles encadrant les deux événements. Sur la base des critères de forme, de structure et de texture, nous avons pu distinguer deux niveaux de dommages au bâti : la ruine totale et partielle des structures. Dans le cas du séisme d'Algérie, nous avons également détecté des effondrements typiques des bâtiments collectifs sur un ou plusieurs étages⁶². Nous avons pu noter que la fiabilité de la mise en évidence des dégâts varie fortement avec le type de bâti analysé. Ainsi, dans les environnements urbains modernes, à bâtiments de plusieurs niveaux, les effondrements totaux ou partiels sont détectables avec une haute fiabilité de l'interprétation. Au contraire, dans les milieux denses, à constructions traditionnelles, qui sont généralement de petite taille, la reconnaissance de dommage reste difficile malgré la très haute résolution.

La très haute résolution offre la possibilité d'une cartographie de dégâts au niveau du bâtiment près. Mais, dans un contexte, de gestion de crise, la cartographie des zones affectées au niveau d'une ville ou même d'une région peut représenter une aide importante pour le déroulement optimal des opérations de secours. Nous avons présenté ici un exemple de cartes pour chacun de ces trois niveaux d'analyse.

Nous avons également réalisé une estimation préliminaire du nombre de victimes provoquées par les deux séismes étudiés, sur les villes de Bhuj, en Inde et Zemmouri, en Algérie. Sur la base des hypothèses qui définissent des ratios de victimisation pour deux niveaux d'endommagement, nous avons obtenu des évaluations rapides du nombre de blessés légers et mortels, qui offrent un aperçu de l'ampleur de la catastrophe. En effectuant une comparaison avec les statistiques officielles, nous avons pu constater que nos estimations sont relativement proches de la réalité, notamment pour le cas de l'Algérie.

Dans un contexte de gestion de crise, la détection, la cartographie et l'estimation de dégâts peut représenter un appui très important pour les opérations de secours, des informations

⁶² Dommage de type « soft story ».

rapides concernant les zones affectées n'étant pas toujours disponibles. A titre d'exemple, pour le séisme de Boumerdes, des agglomérations rurales ayant subi des dommages importants ont été identifiées trois jours après la secousse principale (AFPS 2003). Les images à très haute résolution analysés ici ont été acquises 2 jours après le séisme, et donc considérant une analyse des images en quelques heures, ces informations auraient pu être communiquées plus rapidement au centre de gestion de crise. L'analyse des images, même en photo-interprétation, se réalise relativement vite par des spécialistes. Nous avons donné ici à titre d'information un délai de 4 heures pour l'analyse multi-temporelle de 5 km² par une seule personne, ce qui correspond à l'étude de la ville de Boumerdes, en Algérie. Pour l'instant, la contrainte technique principale concernant une telle application reste le délai d'acquisition des images, qui demeure trop important pour une intervention rapide de l'aide humanitaire.

Une analyse précise des dégâts à moyen terme peut constituer toutefois un outil intéressant pour les opérations de reconstructions après la catastrophe. Les missions en retour d'expérience peuvent s'appuyer également sur l'imagerie satellitaire à très haute résolution, qui permet la reconnaissance des zones affectées et offre en même temps un aperçu de la structure urbaine. Par ailleurs, l'équipe française de l'AFPS envoyée pour une étude en retour d'expérience en Algérie témoigne de la contribution qui aurait pu apporter la cartographie précise de dommages réalisée dans notre recherche⁶³.

Outre la détection et la cartographie de dommages, l'application des images à très haute résolution semble pouvoir offrir de nouvelles perspectives dans le domaine du génie parasismique. Le développement des inventaires urbains de bâti peut ainsi être largement facilité par l'imagerie, qui apporte une précision de plus en plus demandée pour la réalisation de modèles fins d'estimation de dommages. Grâce à ces possibilités, l'imagerie satellitaire devient un thème de recherche considéré avec un grand intérêt par les spécialistes du génie parasismique, et diverses manifestations scientifiques commencent depuis peu à se pencher vers son apport à la gestion du risque sismique⁶⁴. Mais en raison notamment du caractère pluri – disciplinaire, les recherches demeurent aujourd'hui peu nombreuses dans ce domaine.

Enfin, nous avons présenté dans une dernière partie le développement d'un nouveau système d'échelles d'intensité pour les aléas naturels. Nous avons proposé, pour divers types de phénomènes, une échelle ayant la même grille, qui comporte cinq niveaux d'intensité. Le développement a été réalisée notamment sur la base d'une compilation exhaustive des échelles d'intensité existantes, telles que l'EMS 98 pour les séismes ou Fujita pour les tornades. Mais pour d'autres aléas, tel que « les inondations » ou « les mouvements de terrain », de nouvelles échelles ont été créés. Ce système permet une quantification des effets de différents événements suivant les mêmes critères, offrant ainsi la possibilité de comparaison des conséquences consécutives à divers phénomènes naturels.

Nous avons réalisé également quelques exemple d'application des ces échelles à des événements récents, pour le cas des séismes, des inondations et des feux de forêts. A travers ces exemples, on a pu noter l'existence de quelques inconvénients, liés notamment à l'hétérogénéité du nombre de niveaux d'intensité, qui varient ainsi de trois à six, ou encore à la présence de plusieurs échelles pour le même aléa, dans le cas des inondations. Toutefois,

⁶³ Etienne Bertrand et Ludvina Colbeau-Justin, membres de la mission AFPS en retour d'expérience en Algérie, questionnés sur ce sujet, ont exprimé le besoin et l'intérêt d'une telle cartographie pour les prochaines reconnaissances post – sismiques.

⁶⁴ Une table ronde a eu lieu en septembre 2003 au sein de l'EERI dédiée uniquement à l'analyse du potentiel de la télédétection dans le génie parasismique. Un groupe de travail international sur ce thème a été constitué.

nous avons pu constater une cohérence globale de l'ensemble des échelles, malgré les spécificités de chaque phénomène naturel considéré.

Ce système peut représenter une base de travail pour une extension du modèle de gestion du risque sismique à d'autres risques naturels, notamment pour les cas des inondations et des aléas météorologiques. Il constitue, de plus, un outil devant permettre une meilleure compréhension des phénomènes naturels, étape incontournable dans l'élaboration des moyens fiables de protection et prévention.

De nombreux programmes de recherches dans le risque naturel et notamment sismique se sont réalisés dans les dernières années en France, financés par l'état ou par la Commission Européenne. Ils ont apporté ainsi une quantité importante d'information, concernant essentiellement le développement de nouvelles solutions techniques pour la construction et la protection de différents enjeux d'une part, et l'estimation des conséquences potentielles suite à la manifestation des différents scénarii de catastrophes naturelles d'autre part. Les décideurs disposent par conséquent aujourd'hui d'une large gamme d'outils, dont certains présentés dans ce travail, qui doivent servir comme un appui important pour la mise en place d'une meilleure politique de mitigation.

BIBLIOGRAPHIE

- AFPS (1999a). *Le séisme de Chi-Chi, Taiwan. Rapport de mission*. Paris, France. 87 pages
- AFPS (1999b). *Le séisme de Kocaeli, Turquie. Rapport de mission*. Paris, France. 112 pages
- AFPS (2001). *Le séisme de Bhuj, Gujarat, Inde. Rapport de mission*. Paris, France. 82 pages
- AFPS 2003. *Le séisme du 21 Mai, en Algérie. Rapport préliminaire de mission*. Paris, France. 92 pages
- AFPS. (2002). *Guide AFPS « Conception parasismique des bâtiments »*. Paris, France. 138 pages.
- AIR (Applied Insurance Research). (1999). *The Izmit Earthquake – Findings of the AIR post-disaster field investigation team*. AIR Special Report, Boston, Etats-Unis. 22 pages
- Alexandre, D. (1986) *Landslides damages to buildings*. Environment Geology and Water Science, Vol. 3 n° 8, pages 452-462
- Alexandrian D., 1997 Etat des méthodes de caractérisation des incendies dans “Convention INRA-DERF 61.21.14/97”, pp. 19-29.
- Amakuni, K., Mochizuki, T., Enomoto, T. (1995). *Study on Yokohama City’s hazard mapping using GIS*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., Bommer, J. J. (1996). *Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol° 25, N° 4. pages 371 – 400.
- Ambraseys, N., Smit, P., Berardi, R., Rinaldis, R., Cotton, F., Berge – Thierry, F. (2000). *Dissemination of European Strong-Motion Data*. CD-ROM collection. European Council, Environment and Climate Research Program.
- Ambraseys, N. (1985). *Intensity – attenuation and magnitude –intensity relationships for northwest european earthquakes*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 13, pages 733 – 779.
- Ambraseys, N., Bommer, J. J. (1991). *The attenuation of ground acceleration in Europe*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 20, pages 1179 – 1202.
- André, G. (2002). *Détection et la cartographie des dommages et des marqueurs de catastrophes naturelles par imagerie spatiale optique et radar*. Thèse de Doctorat. Université Paris VII, Paris, France. 430 pages.
- André G., Chiroiu L., Guillande R., Galaup M. (2002). *Evaluation et cartographie de dommages par imagerie satellite Spot 5 : simulation sur la ville de Bhuj, séisme de Gujarat, Inde (26 janvier 2001)*. Bulletin de la SFPT. 164/165. pp 174-183.
- André, G., Chiroiu, L., Mering, C., Guillande, R. (2003). *Building destruction and damage assessment after earthquake using high resolution optical sensors. The case of the Gujarat earthquake of January 26, 2001*. International Geosciences and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003. Toulouse, France.
- Aoki, H., Matsuoka, M., Yamazaki, F., Uratsuka, S., Kobayashi, T., Satake, M. (1999). *Backscattering Characteristics of Airborne SAR Images for Seismic Vulnerability Assessment in Urban Areas*. 20th Asian Conference on Remote Sensing.
- Aoki, H., Matsuoka, M., Yamazaki, F. (1998). *Characteristics of satellite SAR images in the damaged areas due to the Hyogoken-Nanbu earthquake*. 19th Asian Conference on Remote Sensing.
- AON (2003). *Natural Catastrophe Modeling Glossary Terms*. AON Corporation, www.aon.com

Applied Technology Council (1996). ATC 40. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Redwood City, California, Etats-Unis.

Arnal, C., Martin, R. (1999). *Projet GEMITIS Nice – Evaluation des dommages directs d'un séisme sur la ville de Nice, scénarios de risque. Extension des résultats au département des Alpes Maritimes*. Rap. BRGM R40612, 173 pages.

Arnon, C. (1975) *Subsidence engineer's handbook*. National Coal Board, Londres, Angleterre

Atkinson, G., Sonley, E. (2000). *Empirical Relationships Between Modified Mercalli Intensity and Response Spectra*. Bulletin of Seismological Society of America, N° 90, Vol. 2, pages 537 – 544. Etats-Unis.

Augros, J. C., Queruel, M. (2001). *Les dérivés climatiques et naturels : de nouvelles opportunités pour les investisseurs*. www.cdcixis-cm.com

Bahoken, F., Chiroiu, L., Guillaude, R (2003). *Développement d'une échelle d'intensité en 5 niveaux pour l'ensemble des aléas naturels*. Colloques SIRNAT – Les journées pour la prévention des risques naturels. Orléans.

Balassanian, S., Manukian, A. (1995). *Seismic risk assessment for the territory of Armenia*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France

Bendimerad, F. (2002). *A Global Action Plan to Reduce Risk to Megacities in Developing Countries*. Second Annual IIASA-DPRI Meeting "Integrated Disaster Risk Management: Megacity Vulnerability and Resilience". Laxenburg, Autriche

Bertogg, M., Hitz, L., E., Kriesch, S. (2002). *Vulnerability Functions Derived from Loss Data for Insurance Risk Modelling: Findings from Recent Earthquakes*. 12 th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 281. Londres, Angleterre. 9 pages

Bertogg, M., Schmid, E., Kriesch, S. (2000). *Earthquake Modelling as a Risk Management Tool for Accumulation Control in the Insurance Industry*. EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe". Laxenburg, Autriche

Betbeder – Matibet, J., Bour, M. (2002). *Lois d'atténuation pour les valeurs de pic du mouvement (accélération, vitesse, déplacement) et d'ordonnées spectrales*. Cahier Technique AFPS, N° 23 , pages 23 – 56.

Bilham, R., Gaur, V. K., Molnar, P. (2001). *Himalayan Seismic Hazard*. Science, N°. 293.

Bisch, P. & Coin, A. (2002). The "CAMUS 2000 " research. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Londres, Angleterre.

Brazee, R. J. (1972). *Attenuation of modified Mercalli intensities with distance for the United States , east of 106° W*. Earthquakes Notes Vol. 43, N°1, pages 41 – 52.

Brun, S. E., Etkin, D., Law, D. G., Wallace, L., White, R. (1997). *Coping with Natural Hazard in Canada : Scientific, Government and Insurance Industry Perspectives*. Environmental Adaptation Research Group and Institute for Environmental Studies, University of Toronto. Canada

Bruneau, M., Uang, C. M., Whittaker, A. (1997). *Ductile Design of Steel Structures*. McGraw-Hill, New-York, Etats-Unis.

Building Seismic Safety Council (1992). *NEHRP Handbook for the Evaluation of the Existing Buildings. FEMA 178*. Washington, Etats – Unis.

Building Seismic Safety Council (1997 a). *NEHRP Recommended Provisions for the Seismic Regulations for New Buildings. FEMA 222A*. Washington, Etats – Unis

- Building Seismic Safety Council (1997 b). *NEHRP Recommended Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 273*. Washington, Etats – Unis
- Building Seismic Safety Council. (1997, b). *NEHRP Recommended Guidelines for the Seismic Rehabilitations of Buildings (FEMA 273)*. Washington, Etats Unis. 435 pages.
- Burkhart, G. R., Bergen, Z., Carande, R., Hensley, S., Bickel, D., Fellerhoff, J. R. (1996). *Elevation Correction and Building Extraction from Interferometric SAR Imagery*. International Congress of Remote Sensing Symposium (IGARSS), Lincoln, Etats – Unis.
- Bustamante, G., Chatelain, J.L., Fernandez, J., Yepes, H., Tucker, B., Villacis, C., Yamada, T., Kanefo, F. (1995). *An example in Quito (Ecuador) of the use of seismic microzoning for risk reduction in Developing Countries*. Actes de la V^{ème} conférence internationale de zonage sismique, Nice. Ouest Editions, Presses Académiques.
- Campbell, S. D., Diebold, F. X. (2002). *Weather Forecasting for Weather Derivative*. The Wharton Financial Institutions Center. <http://fic.wharton.upenn.edu> Wharton, Etats – Unis.
- Cao, M. Wei, J. (2000), *Pricing the weather*. Risk. Vol. 13, N° 5, pages 67 – 70. Etats – Unis.
- Castillo, A., López-Almansa, F., Pujades i Beneit, L. (2001). *Peligrosidad sísmica local para la ciudad de Mérida, Venezuela. Implementación en SIG (Sistemas de información geográfica)*. Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica ; Madrid 2001.
- Chandler, A. M., Lam, N. T. K., Wilson, J. L., Hutchinson, G. L. (2001). *Response spectrum modelling for regions lacking earthquake records*. Electronic Journal of Structural Engineering. Vol 1, N° 1.
- Charte Internationale « Espace et Catastrophes Naturelles » (2002). *Atelier européen d'auto -formation*. Commission Européenne, DG ENV, Unité de Protection civile. Paris, France.
- Chatelain, J.-L., Yepes, H., Guillier, B., Fernandez, J., Valverde, J., Souris, M., Tucker, B., Hoefler, G., Kaneko, F., Yamada, T., Bustamante, G., Villacis, C. (1996). *Le Scénario Sismique de Quito: Methodologie et Resultats*. Bulletin de l'Institut d'Etudes Andines, N° 25 (3), pages 553-588.
- Chatelain, J.-L., Yepes, H., Guillier, B., Fernandez, J., Valverde, Kaneko, F., Souris, M., Dupierier, E., Hoefler, G., Yamada, T., Bustamante, G., Tucker, B., Villacis, C. (1994). *Les Scénarios Sismiques comme Outils d'Aide la Decision pour la Reduction des Risques: Projet Pilote Quito, Equateur*. Rev. Geogr Alp., Tome LXXXII, n4, pages 131 – 150
- Chávez Morillo, J. (1998). *Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Catalunya*. Thèse de Doctorat, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Espagne.
- Chavez, J., Goula, X., Roca, A. (1998). *Preliminary seismic risk assessment for Catalonia (Spain)*. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris.
- Cheng, F., Thiel, K. H. (1995). *Delimitating the Building Heights in a City From the Shadows in a Panchromatic Spot-Image Test of 42 Buildings*. International Journal of Remote Sensing. Vol°16, N°3, pages 409 – 415.
- Chiroiu, L., Michel – Kerjan, E. (2003). *Gestion du risque de tremblements de terre en France : pertinence des modèles d'estimation des dommages sismiques*. 6ème Colloque Nationale de l'AFPS. Palaiseau, France
- Chiroiu, L. (2003). *Développement des courbes de capacité pour une typologie standardisée des structures. Application à l'estimation de dommages*. 6ème Colloque Nationale de l'AFPS. Palaiseau, France
- Chiroiu, L., Andre, G., Guillaude, R., Bahoken, F. (2003, a). *Estimation de dommages sismiques post catastrophe à l'aide de l'imagerie satellite. Application au séisme de Gujarat, Inde, 2001*. 6ème Colloque Nationale de l'AFPS. Palaiseau, France

- Bahoken, F., Chiroiu, L., Guillaude, R. (2003). *Développement d'échelles d'intensité par type de phénomènes naturels*. Colloque SIRNAT - Les Journées pour la Prévention du Risque Naturel, Orléans
- Chiroiu, L., Guillaude, R., Andre, G., Bahoken, F. (2003, b). *Crués de la Seine. Analyse spatio-temporelle et estimation rapide de dommages économiques au bâti. Application sur Vitry sur Seine* Colloque SIRNAT - Les Journées pour la Prévention du Risque Naturel, Orléans
- Chiroiu, L., Andre, G., Guillaude, R., Bahoken, F. (2002, a). *Earthquake Damage Assessment Using High Resolution Satellite Imagery*. 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, USA
- Chiroiu, L., Andre, G., Guillaude, R., Bahoken, F. (2002, b). *Earthquake Damage Assessment Using High Resolution Satellite Imagery*. NH3-03 Risk assessment and mapping : applications of GIS to earthquake vulnerability, risk and disaster management EGS XXVII General Assembly. Nice, France
- Chiroiu, L., Andre, G., Bahoken F. (2002, c). *Earthquake Imagery Sheds Light on Damage*. Imaging Notes Magazine, Vol. 17, N° 3.
- Chiroiu, L., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., Barbat, A., Pujades, L. (2001). *El método del espectro de capacidad aplicado a la evaluación de daños sísmicos*. 2° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. Madrid, Espagne
- Chiroiu, L. (2000). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica a partir de espectros de demanda y de capacidad. Aplicación a Barcelona*. Rapport de l'Institut Cartografic de Catalunya (ICC) n°: GS – 139/00. Barcelona, Espagne
- Chopra, A. K., Goel, R.K. (1999). *Capacity Demand Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum*. Earthquake Spectra, N° 15, pages 637 – 656
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Ed. Prentice – Hall, New Jersey, Etats – Unis.
- Chopra, A., Goel, R. (2001). *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation*. PEER Report 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley ; Etats – Unis. 97 pages
- Clark, K. M. (2002). *The Use of Computer Modeling in Estimating and Managing Future Catastrophe Losses*. The Geneva Papers on Risk and Insurance, Vol. 27, No. 2 15 pages.
- Coburn, A., Spence, R. (2002). *Earthquake Protection*. J. Wiley & Sons. Anglettere. 420 pages.
- Comartin, C., Niewiarowski, R., Freeman, S. A., Turner, F. (2000). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: A practical Overview of the ATC 40 Document*;. Earthquake Spectra, N° 16, pages 241 – 261
- Combescuré D., Queval, J.C., Chaudat, T., Sollogoub, P. (2003). *Seismic behaviour of a non-symmetric R/C bearing walls specimen with torsion. Experimental behaviour and non-linear modelling*. 6ème Colloque National de l'AFPS. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France
- Dalaibaatar, E., Hofstee, P., Van Genderen, J. L. (2001). *Assessing Seismic Risk of Ulaan Baator by Aerospace Methods*. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapour, Indonésie.
- Davi, D., Schmitt, P. (2003). *SISMOA : une méthode d'estimation rapide de la vulnérabilité des ponts aux séismes*. 6ème Colloque National de l'AFPS. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
- Davidovici, V. (1985). *Génie Parasismique*. Presse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Davies, Kay. (1992). *The Super Science Book of Weather*. Wayland Publishers Ltd

- Deichmann, N., Fah, D. (2002). *Le prochain tremblement de terre ne doit pas nous surprendre*. Service Sismologique Suisse. <http://seismo.eth.ch>
- Dominique, P., Andre, E. (1999). *Evaluation probabiliste de l'aléa sismique en France*. Actes du Cinquième Colloque National de l'AFPS – Génie Parasismique et Réponse Dynamique des Ouvrages. Cachan.
- Dominique, P., Andre, E. (1999). *Evaluation probabiliste de l'aléa sismique sur le territoire national français*. 5ème Colloque National AFPS, Cachan, France. 10 pages
- Douglas, J. (2001). *A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)*. ESEE Report No. 01-1, Imperial College of Science, Technology and Medicine ; Civil Engineering Department ; Londre, Angleterre.
- EDM (2001). *The Bhuj Earthquake of January 26, 2001. Consequences and Futures Challenges*. Earthquake Disaster Mitigation Center; Miki, Japon; www.edm.bosai.go.jp
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI). (2000). *Financial Management of Earthquake Risk*. EERI Endowment Fund White Paper, Oakland, Etats-Unis. 88 pages
- EERI 2001. *Bhuj earthquake reconnaissance report*. Oakland, Etats – Unis. 398 pages
- Eguchi, R. T., Huyck, C. K., Houshmand, B., Tralli, D. M. , Shinozuka, M. (2000). *A New Application for Remotely Sensed Data: Construction of Building Inventories using Synthetic Aperture Radar Technology*. 2nd Multi-Lateral Workshop on Development of Earthquake and Tsunami Disasters Mitigation Technologies and Their Integration for the Asia-Pacific Region. Kobe, Japon.
- Enomoto, T., Seo, K., Yoshii, H. (1995). *Survey on loss estimation and scenario for predicted magnitude 7.0 earthquake in Western Part of Kanagawa Prefecture*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Enomoto, T., Navarro, M., Schmitz, M., Rocabado, V., Kantak, P., Matsuda, I., Abeki, N., Masaki, K., Delgado, J., Sánchez, J. F. (2001). *Evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de Caracas (Venezuela) a partir de las características dinámicas del suelo y de los edificios, usando medidas de ruido ambiental*. Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sismica ; Madrid 2001.
- Erdik, M., Avci, J., Durukal, E. (1995). *Developing an earthquake damage scenario for Istanbul*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Escuela Politecnica Nacional, Geohazards International, Ilustre Municipio de Quito, ORSTOM Quito, OYO Corporation (1994). *The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project*. Geohazards International, Etats – Unis.
- Fah, D. (2000). *Earthquake Scenarios. From Earthquake Hazard to Loss Estimation*. Service Sismologique Suisse. <http://seismo.eth.ch>
- Fajfar, P. (2000). *A Non Linear Analysis Methods for Performance – Based Seismic Design*. Earthquake Spectra, N° 16, pages 573 – 591
- Fajfar, P., (1999). *Capacity Spectrum Methods Based on Inelastic Demand Spectra*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 28, pages 979 – 993
- FEMA (1997). *FEMA 273. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitations of Buildings*. Washington, Etats – Unis
- FEMA (1999). *FEMA 348. Protecting Building Utilities From Flood Damage. Principles and practices for the design and construction of flood resistant building utility systems*. Washington, Etats – Unis.
- Freeman, S. A. (1978). *Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion*. Publication SP 55, American Concrete Institute, pages 585 – 605

- Freeman, S. A., Nicoletti, J. P., Tyrell, J. V. (1975). *Evaluation of Existing Buildings for Seismic Risk – A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington*. Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Etats-Unis.
- Fujita, T. (1981). *Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales*. Journal of Atmospheric Science, N° 38, pages 1511-1534
- Fujita (1973). *Tornadoes around the world*. Weatherwise N° 26, pages 56-62.
- Fukushima, Y., Tanaka, T. (1990). *A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan*. Bulletin of Seismological Society of America, pages 757 – 783.
- Fukushima, Y., Tanaka, T. (1992). *Revised attenuation relation for peak horizontal acceleration by using a new data base*. Bulletin of the Seismological Society of Japan,
- Geman, H.. (1998), *Insurance and Weather Derivatives: From Exotic Options to Exotic Underlyings*. London: Risk Publications. Angleterre.
- Giardini, D. (1999). *The Global Seismic Hazard Assessment Program*. Annali di Geofisica,
- Giardini, D., Mayer-Rosa, D., McCue, K., McGuire, R., Shedlock K., Zhang, P. (1999). *The compilation of the GSHAP map of global seismic hazard*. Annali di Geofisica,
- Godard, O., Henry, C., Lagadec, P., Michel-Kerjan, E. (2002). *Traité des nouveaux risques*. Editions Gallimards. 620 pages.
- Goel, R. K., Chopra, A. K. (1991). *Inelastic Seismic Response of One-Storey, Assymetric Plan Systems: Effects on System Parameters and Yielding*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, N°. 3.
- Gonzalez, M., Chavez, J., Susagna, T., Goula, X., Roca, A. (2001). *Simulation des effets sismiques : application au séismes du 1428 dans les Pyrénées Orientales*. Archéosismicité et sismicité historique. Contribution à la connaissance et à la définition du risque. Perpignan. Pages 119 – 124
- Goula, X (2001). *Gestió del risc sísmic a Catalunya*. les Jornades del CRECIT: La Gestió dels Riscos Naturals. Andorra. Pages 32 – 60.
- Goula, X. (2000). *Peligrosidad sísmica*. Notes de cours, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne.
- Grossi, P. (2000). *Earthquake Damage Assessment: From Expert Opinion to Fragility Curves*. Actes de la “8 th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability”.
- Grossi, P. (2000). *Quantifying the uncertainty in seismic risk and loss estimation*. Actes de la “EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe”. Laxenburg, Autriche “. Laxenburg, Autriche. 13 pages
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, 99 pages.
- Grünthal, G., Levret, A. (2001). *L'Echelle Macrosismique Européenne*. 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, 103pp., Luxembourg.
- GSC (2000). *Fast Damage Assessment after Major Disaster by Multitemporal Radar and Optical Analysis*. Projet ESA/ESTEC, Paris, France.
- GSC (2003). *Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par types des phénomènes naturel*. Rapport d'étude. Paris.

- Hadfield, P. (1991). *Tokyo séisme. 60 secondes qui vont changer le monde*. Editions Autremont, Paris. 149 pages.
- Hamada, M. (1975). *Architectural Fire Resistant Themes*. Kenchikugaku Taikai, Shokokusha, Tokyo.
- Hashitera, S, Maki, N., Hayashi, H. (1999). *The Potential of Using Satellite Images to Determine an Index of Recovery from Natural Disaster: A Case Study of the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster*. 6th Japan/United States Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction.
- Hayashi, H., Takashima, M. (1998). *Fundamental research about method for real-time observation of recovery process using historical data of electric power consumption as an index of the recovery*. Papers of Annual Conference of the Institute of Social Safety Science No.8 pages 348-357
- Hayes, M.H., *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*, John Wiley and Sons, 1996
- Hinzen, K. G., Schütte, S. (2002). *Evidence for a Medieval-Earthquake with Damaging Effects on Buildings from Late Antiquity in Cologne, Germany*. Environmental Catastrophes and Recoveries in the Holocene; Brunel University, Londres.
- Hitz, L., Kriesch, S., Schmid, E. (2000). *Random Occurrence or Predictable Disaster? New models in earthquake probability assessment*. SwissRe publishing, Zurich, Suisse. 8 pages
- Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E., Nalbant S. S., Meyer, B., Armijo, R., Tapponnier, P., King, G. C. P. (2000). *Seismic hazard in the Marmara sea region following 17 August 1999 Izmit earthquake*. Nature, N° 404, pages 269 – 272.
- Huyck, C. K., Mansouri, B., Eguchi, R. T., Houshmand, B., Castner, L. L., Shinozuka, M. (2002). *Earthquake Damage Detection Algorithms Using Optical and Ers-Sar Satellite Data – Application to the August 17, 1999 Marmara, Turkey Earthquake*. 7th National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Etats – Unis.
- IIBRBS, Agence de l'eau Seine – Normandie, MATE, Région Ile de France. (1994). *Analyse empirique des désordres et des dommages résultants des différentes crues de la Seine et de la Marne dans l'agglomération continue d'Ile de France. Note de synthèse*. Paris, France. 62 pages
- Iida, K. (1963). Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of earthquake associated with tsunamis. International Union of Geodesy and Geophysics Monographs, Vol. 24, pages 7 – 17.
- Indian Concrete Journal (ICJ). (1934). *Special Issue on The Great Indian Earthquake*. Indian Concrete Journal, Vol. 8, N°. 10. Inde.
- Indian Standard (1962). *Indian Standard Recommendations for Earthquake Resistant Design of Structures*. Bureau of Indian Standards, New Delhi, Inde.
- Instituto Cartográfico de Catalunya, Universitat Politècnica de Catalunya (1998). *Eurosismod. Final Analysis of Soil Effects in the City of Barcelona*. Rapport Interne ICC, Barcelona, Espagne.
- Johnson, L. (2000). *Earthquake Loss Modeling Applications for Disaster Management: Lessons from the 1999 Turkey, Greece, and Taiwan Earthquakes*. Actes de la “EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe”. Laxenburg, Autriche. 11 pages
- Johnson, L. A. (2000). *Earthquake Loss Modeling Applications for Disaster Management: Lessons from the 1999 Turkey, Greece, and Taiwan Earthquakes*. EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA); Laxenburg, Austria
- Joyner, W. B., Boore, D. M. (1981). *Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, N° 6, pages 2011–2038.

Kameda, H., Morikawa, H. (1992). *An interpolating stochastic process for simulation of conditional random fields*. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 7, N° 4, pages 243 - 254.

Kishi, G. N., Yakut, A., Byeon, J. S. (2001). *Advanced Component Method (ACM TM) - An Objective Methodology for the Assessment of Building Vulnerability*. Proceedings of Kobayashie, K., Yokomatsu M. (2000). *Economic Valuation of Catastrophe Risks: Beyond Expected Losses Paradigms. Global change and catastrophe risk management*. Earthquake Risks in Europe. IIASA, Laxenburg, Austria

Kumar, S. L. (1933). *Theory of Earthquake Resisting Design with a Note on Earthquake Resisting Construction in Baluchistan*. Paper N° 165, Punjab Engineering Congress, Inde.

Lang, K. (2002). *Seismic vulnerability of existing buildings*. Thèse de Doctorat, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology ; Suisse. 198 pages.

Lee, W., Kanamori, H., Jennings, C., Kisslinger, C. (2002). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part A*. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior.

Leone, F. (1996) *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. Ed. BRGM, Collection Eau Aménagement Environnement . Document du BRGM n° 250.

Liechti, D., Ruettenner, E., Eugster, S., Streit, R. (2000). *The impact of a and b value uncertainty on loss estimation in the reinsurance industry*. Annali di Geofisica, Vol. 43, N° 1, pages 23 – 30.

Lopez Casado, C., Molina Palacios, S., Delgado, J, Pelaez, J. A. (2000). *Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 90, N° 1, pages 34-47

Lutikov, A., Ragozin, A., Frolova, N. (1995). *Seismic hazard assessment for some cities of Dagestan*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France

Mahaney, J. A., Paret, T. F., Kehoe, B. E., Freeman, S. A. (1993). *The Capacity Spectrum Method*.

Marinelli L., Michel R., Beaudoin A. (1997). *Flood mapping using ERS tandem coherence image : a case study in southern France*. In : 3rd ERS Symposium on Space at the service of our environment , Florence, ITALIE. 17-21 march 1997, p. 531-536.

Martin, C., Mompelat, J.M., Chauvel, F. (1999). *Méthodologie d'évaluation du risque sismique applicable au bâti individuel des Antilles Françaises*. Actes du Cinquième Colloque National de l'AFPS. Cachan.

Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Adragna, F. (1994). *Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake*. Nature, Vol. 369, pages 227-230

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. Rabaute, T. (1993). *The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry*, Nature, 364, pp 138-142.

Matsuoka, M., Yamazaki, F. (1998). *Identification of damaged areas due to the 1995 Hyogoken – Nanbu Earthquake Using Satellite Optical Images*. 19th Asian Conference of Remote Sensing.

Matsuoka, M., Yamazaki, F. (2000). *Remote Sensing Technologies for Earthquake Damage Detection: Examples for Kobe, Japan and Luzon, The Philippines*. 21th Asian Conference of Remote Sensing.

Matsuoka, M., Yamazaki, F. (2000). *Use of interferometric satellite SAR for earthquake damage detection*. 6th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, Etats- Unis.

Mc Clung D., Schaerer P., (1993). *The avalanche Handbook*. The Mountaineers, ISBN 0-89886-364-3, 272 pages.

MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research). (2000). *The Marmara, Turkey Earthquake of August 17, 1999: Reconnaissance Report*. University of Buffalo, New York, Etats-Unis.

McGuire, R. (1995). *Scenario earthquakes for loss studies based on risk analysis*. Actes de la Vème conférence internationale de zonage sismique, Nice. Ouest Editions, Presses Académiques.

McGuire, R. K. (1978). *Seismic ground motion parameter relations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, n° 104, pages 481–490.

Meaden, G. T. (1976) *Tornadoes in Britain; their intensities and distribution in space and time*. Journal of Meteorology ; N°1, pages 242-251.

Mering C., Parrot J.F. (1994). *Radar image analysis using morphological filters*. Mathematical Morphology and its Applications to Signal Processing. Editions Serra and Soille, pp 353-360.

Method for Evaluating Structural Response During the Loma Prieta Earthquake. Proceedings of 1993 National Earthquake Conference on Earthquake Hazard Reduction in the Central and Eastern United States: A Time for Examination and Action. Memphis, Tennessee, Etats – Unis. pages 501-510.

Michel-Kerjan, E. (2001). *Insurance against natural disasters: do the French have the answer? Strengths and limitations*. Actes de la conférence “Integrated Disaster Risk Management: Reducing Socio – Economic Vulnerability”. Laxenburg, Autriche. 29 pages

Mistri, R., Dong, W., Shah, H. (2001). *Interdisciplinary observations on January 2001 Bhuj, Gujarat Earthquake*. World Seismic Safety Initiative, International Association of Earthquake Engineering, Etats – Unis.

Mohammadioun, B., Pecker, A (1993). *Prévision du mouvement sismique au rocher à partir de mouvements forts actuellement disponibles*. Actes du 3^{ème} Colloque National AFPS ; Saint –Rémy-les-Chevreuses, France. Pages 23 – 31.

Monge, O., Bour, M., Lebrun, B., Sedan, O., Mirgon, C., Leroi, E., Mompelat, J.M., Martin, C., Chauvel, F. (1999). *Evaluation et réduction du risque sismique à l'échelle régionale en Martinique et Guadeloupe*. Actes du Cinquième Colloque National de l'AFPS. Cachan.

Monge, O., Lebrun, B., Sedan, O., Mirgon, C., Leroi, E., Mompelat, J.M., Martin, C., Souloumiac, R., Chauvel, F. (1999). *Evaluation et réduction du risque sismique à Pointe-à-Pitre et Fort de France*. Actes du Cinquième Colloque National de l'AFPS. Cachan.

Mouroux, P., Bour, M., Bertrand, E., Le Brun, B., Martin, C., Monge, O. (2002). *De la géologie au risque sismique. Le projet européen RISK-UE*. Géologues. N° 135, pages 156 – 161. Paris.

Mouroux, P., Bour, M., Bertrand, E., Le Brun, B., Masure, Ph., Martin, C., Monge, O., l'équipe RISK-UE (2003). *Le projet RISK-UE*. 6ème Colloque Nationale de l'AFPS. Palaiseau, France

MunichRe (2002). *Topics. Annual Review : Natural Catastrophes 2001* . GeoRisks Research Department, Munich Re Group, Allemagne. 48 pages

Murty, T. S. (1977). *Seismic sea waves, tsunamis*. Canadian Department of the Environment, Bulletin N°198, 337 pages.

Nations Unies – Département des Affaires Humanitaires (NU-DAH). (1992). *Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes*. ONU – IDNDR, Genève, Suisse.

National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA. *Saffir-Simpson Hurricane Scale*.. www.publicaffairs.noaa.gov/saffir.html.

- Natural Disaster Coalition (NDC). (1995). *Catastrophe Risk : A National Analysis of Earthquake , Fire Following Earthquake, and Hurricane Losses to the Insurance Industry*. Rapport NDC, Washington, Etats-Unis.
- Nefeslioglu, H. A., Tun, M., Ayday, C., Goktan, R. M. (2003). *Change Detection of Structures in the Earthquake Hazard Zoning Map of Eskisehir City, Turkey, by Using Satellite Images*. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Berlin, Allemagne.
- Newhall C.G., Self S (1982) *The Volcanic explosivity Index (V.E.I) : an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. Journal of. Geophysic. Research. Vol. 87, N°2, pages 1231-1238.
- Newmark, N., Hall, W. J., (1982). *Earthquake Spectra and Design*. Editions EERI, Berkeley, Etats-Unis.
- Normes Françaises DTU Règles PS 92. (1995). *Règles PS applicables aux bâtiments, dites Règles PS 92*. AFNOR, Paris.
- Odeh, D., Zadeh, M. (1997). *Use and Mis-use of Catastrophe Risk Analysis Software*. First Forensic Engineering Congress, Minneapolis, Etats-Unis.
- Oppenheim, A.V., and R.W. Schafer (1989). *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, New-York.
- Organisation des Nations Unies – Stratégie Internationale pour la Prévention des Catastrophes (ONU-SIPC). (2000). *Les retombées socio – économiques du séisme d’Izmit en Turquie (17 août 1999)*. ONU – SIPC, Genève, Suisse.
- Pahaut E. (1993). *Echelle européenne, guide d’utilisation*. Neige et avalanches, Vol 63, pages 2-8
- Pais, I., Sousa Oliveira, C., Tevez Costa, P., Cabral, J. (1995). *Seismic risk and emergency planning. Application to the city of Lisbon*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Paret, T. F., Sasaki, K. K., Eilbeck, D. H, Freeman, S. A. (1996). *Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanism from Higher Mode Effects*. Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering; Mexico
- Paret, T. F., Freeman, S., Dameron, A. (2002). *Rethinking The Earthquake Engineering Paradigm: From Response Reduction To Response Suppression*. 7th US National Conference on Earthquake Engineering. Boston, Etats-Unis.
- Parson, T., Toda, S., Stein, R., Barka, A., Dietrich, J. H. (2000). *Influence of the 17 August 1999 Izmit Earthquake on Seismic Hazards in Istanbul*. Science, N° 288. pages 661 – 665.
- Paulay, T., Priestley, N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Willey & Sons, New-York, Etats-Unis.
- Pavlov, O., Koff, G., Frolova, N. (1995). *Seismic hazard ans seismic tisk mapping for Irkutsk city*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Petterssen, S. (1969). *Introduction to Meteorology*. McGraw-Hill Book Company. New York, Etats-Unis.
- Porter, B., Ming Lee, S. (2002). *The Role of Catastrophe Modelling in Alternative Risk Transfer*. Journal of Reinsurance, Vol. 9, N° 3. 12 pages.
- Priestley, N. (2000). *Performance Based Seismic Design*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Papier N°. 2831, Auckland, Nouvelle Zélande.
- Ragueneau, F., Casaux, G., Mazars, J. (2003). *CAMUS 2000 benchmark analyses through multifiber beam formulation coupled to continuum damage mechanics*. 6ème Colloque National de l’AFPS. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.

- Rashed, T., Weeks, J. (2003). *Exploring the Spatial Association between Measures from Satellite Imagery and the Changing Patterns of Urban Vulnerability to Earthquake Hazards*. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Berlin, Allemagne.
- Richter, C. F. (1958). *Elementary Seismology*. Editions W. H. Freeman and Company, San Francisco. Etats – Unis.
- RMS (Risk Management Solutions). (1999). *Event Report, Kocaeli, Turkey Earthquake*. Editions RMS, San Francisco, Etats-Unis.
- Rovelli, A., Molin, D., Malagnini, L., Caserta, A. (1995). *Variability of damage patterns in Rome : Combination of source and local effects*. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Sabetta, F., Pugliese, A. (1987). *Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77, N° 5, pages 1491–1513.
- Saita, J., Matsuoka, M., Yamazaki, F., Shabestari, T. K. (2001). *Site response characteristics of seismic stations in Japan based on microtremor observations and strong motion records*. The Eight East Asia – Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Singapore
- Sanford, A. R. (1998). *An Empirical Relation Between Magnitude and Maximum Intensity for New Mexico Earthquakes*. Geophysics Open-File Report 86; Earth and Environmental Science and Geophysical Research Center, New Mexico, Etats –Unis.
- Sato, T., Imabayashi, H. (1999). *Real Time Conditional Simulation of Earthquake Ground Motion*. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol. 1, N° 1, pages 27 - 38.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T, Fleta, J., Roca, A (1998). *Analysis of seismic hazard in Catalonia (Spain) through different probabilistic approaches*. Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris.
- Serra, J. (1982). *Image Analysis and Mathematical Morphology* (Vol. I). Academic Press, Angleterre
- Soloviev, V (1978). *Tsunamis*. The assessment and mitigation of earthquake risk. UNESCO, Paris.
- Sponheuer, W et Karnik, V. (1964). *Neue seismische skala*. 7th Symposium of the European Seismological Center, Jena, Allemagne.
- Stewart, I. (2003). “A rift at the heart of Europe: Reassessing large earthquake potential in NW Europe”. Benfield Grieg Hazard Research Center, University College London, Angleterre.
- Stieltjes L., Mirgon C. (1998). *Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques.test d'application sur les réseaux de la Martinique*. Rapport de synthèse. Rapport BRGM. R 40098, 218 p.
- Stow, R. J., Wright, P. (1997). *Mining subsidence land survey by SAR interferometry*. ERS Symposium on Space at the service of our environment , Florence, Italie.
- Structural Engineers Association of Southern California. (SEASC). *Probable Maximum Loss, A Rational Approach*. SEASC Convention, Indian Wells, Etats-Unis.
- Stubbs, N. (1999). *A Methodology to Compute Probable Maximum Losses for Public Facilities, Infrastructure and Buildings in Severe Winds*. The Uncertainty of Damageability Meeting, Risk Prediction Initiative. Bermudes.
- Susagna, T., Goula, X. (1999). *Atlas Sismic de Catalunya. Vol. 1*. Institut Cartografic de Catalunya, Barcelone, Espagne.
- SwissRe (2002). *Catastrophes naturelles et techniques en 2002*. Sigma N° 1/2002. Zurich, Suisse.

- SwissRe (2003). *Catastrophes naturelles et techniques en 2002*. Sigma N° 2/2003. Zurich, Suisse.
- Thierry P., Zacek, M., Vercellino, G., Martin, R., Bard, P. Y., Mouroux, P., Tartar, C. (1998). *Projet GEMITIS Nice. Analyse de vulnérabilité (bâti courant et bâtiments stratégiques communaux). Mise en place des éléments pour les scénarios de risque*. Rapport BRGM R40229.
- Trifunac, M. D. , Brady, A. G. (1976). *Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N°4-5, pages 455–471.
- UNESCO (2001). *Unesco Mission To Gujarat, India - For The Conservation Of Earthquake-Damaged Cultural Properties*. Unesco, Paris.
- UNESCO WP/WLI (1983) *Multilingual Landslide Glossary*. Bitech, Richmond, Etats-Unis.
- United Nations Disaster Management Team (2001). *India Earthquake Reports N° 1 - 21*. www.undmt.org
- Van des Sande, C. (2001). *River flood damage assessment using IKONOS imagery*. EC, JRS, SAI, Ispra, Italie. 77 pages.
- Vanmarcke, E, Fenton, G. (1991). *Conditioned Dimulation of Local Fields of Earthquake Ground Motion*. Structural Safety, N° 10, pages 247 – 264.
- Vanmarcke, E. (1983). *Random Fields : Analysis and Synthesis*. MIT Press, Cambridge, Etats-Unis.
- Villacís, C., Tucker, B., Yepes, H., Kaneko, F., Chatelain, J.-L. (1997). *Use of Seismic Microzoning for Risk Management in Quito, Ecuador*. Earthquake Engineering N°46, pages 63-70.
- West, W. D. (1937). *Earthquakes in India*. 24th Indian Science Congress. Hyderabad, Inde.
- Whitman, R.V., Tarek, S.A., Wong, E. (1977). *Preliminary Correlation Between Earthquake Damage and Strong Ground Motion*. Structures Publication NO. 564, MIT, Boston, Etats-Unis.
- Wong, F. S., Dong, W. (1995). *Estimation of business interruption loss using microzonation techniques*. Actes de la V^{ème} conférence internationale de zonage sismique, Nice. Ouest Editions, Presses Académiques.
- Wood, H. (2002) *Operational Use of Earth Observing Satellites for Hazard Applications*. 29th International Symposium on Remote Sensing of the Environment.
- World Bank (2001). *Gujarat Earthquake Assessment Report*. www.worldbank.org
- Wyniecky, P., Guegen, F., Bard, P. Y., Le Fur, H. (2003). *Outils d'identification de la typologie du bâti urbain : apports du couplage entre cartographie numérique et imagerie aérienne et vidéo*. 6ème Colloque National de l'AFPS. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
- Yépez Moya, F. (1996). *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación*. Thèse Doctorale, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Espagne.
- Zacek, M. 1996. (1996). *Construire Parasismique*. Editions Parenthèses, Marseille, 340 pages.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Type d'information fourni par les MEDS.....	6
Tableau 2.1 Types de bâtiments utilisés pour le développement des courbes de capacité	48
Tableau 2.2 Nombre de bâtiments testés par type de constructions	49
Tableau 2.3 Liste des configurations analysées pour les constructions de type A1 et B1	50
Tableau 2.4 Valeurs moyennes et écart types des points définissant les courbes de capacité des bâtiments en acier.....	56
Tableau 2.5 Valeurs moyennes et écart types des points définissant les courbes de capacité des bâtiments en béton.	56
Tableau 2.6 Synthèse des principaux résultats obtenus	64
Tableau 3.1. Rappel des types standard de bâti utilisés pour l'estimation de dommages.....	72
Tableau 3.2 Coordonnées des points de demande pour chaque type de structure	73
Tableau 3.3 Niveaux d'endommagement structurel	74
Tableau 3.4 Estimation de dommages structurels, par type de construction	76
Tableau 3.5 Estimation de dommages structurels en utilisant les courbes de capacité de HAZUS™ sur la ville de Barcelone	78
Tableau 3.6 Coordonnées des points de demande pour chaque type de structure	84
Tableau 3.7 Pourcentage d'endommagement structurel, par type de construction.....	85
Tableau 3.8 Estimation de dommages structurels en utilisant les courbes de capacité de HAZUS™	88
Tableau 3.9 Comparaison des résultats obtenus	92
Tableau 4.1. Nombre de personnes affectées par chaque niveau de dommages.....	111
Tableau 4.2 Ratios de victimisation issus de HAZUS, pour le bâti de type maçonnerie non renforcée.....	111
Tableau 4.3 Ratios de victimisation issues de HAZUS regroupées dans notre étude.....	112
Tableau 4.4 Estimation du nombre de victimes réalisée sur la base de la méthode HAZUS	112
Tableau 4.5 Estimation du nombre des victimes réalisée sur la base des hypothèses simplificatrices.....	113
Tableau 4.6 Comparaison de l'estimation du nombre de victimes avec les statistiques officielles.....	114
Tableau 4.7 Résultats de la simulation <i>ex-ante</i> de dégâts.....	116
Tableau 4.8 Calcul du pourcentage de bâti endommagé	118
Tableau 4.9. Estimation de la densité de population de Zemmouri	122
Tableau 4.10 Calcul du nombre des personnes affectées par le séisme de Boumerdes.....	123
Tableau 4.11 Estimation de pertes humaines à Zemmouri, suite au séisme du 21 mai 2003. Evaluation réalisée sur la base de HAZUS.....	123
Tableau 4.12 Estimation de pertes humaines sur Zemmouri, suite au séisme du 21 mai 2003. Evaluation réalisée sur la base des hypothèses simplificatrices	123
Tableau 4.13 Principales caractéristiques concernant l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la gestion du risque sismique	131
Tableau 4.14 Principales caractéristiques des études de cas réalisées.....	132
Tableau 5.1 Recueil des aléas naturels considérés dans le système d'échelles d'intensité.....	137
Tableau 5.2 Grille d'échelle standard.....	142
Tableau 5.3 Relation entre magnitude et PGA (source : www.neic.usgs.gov).....	145
Tableau 5.4 Présentation simplifiée de l'échelle d'endommagement issue de HAZUS (source : HAZUS™).....	147
Tableau 5.5 La nouvelle échelle d'intensité sismique en cinq niveaux	150
Tableau 5.6 Exemple d'illustration de dommages pour chaque niveau d'intensité.....	152
Tableau 5.7 Qualification en intensité du séisme de Saint Paul de Fenouillet, du février 1996, sur la commune avec le même nom.	154
Tableau 5.8 Qualification en intensité du séisme d'Hennebont d'octobre 2002	156
Tableau 5.9 Qualification en intensité selon l'échelle de crue lente sur la commune de Pont l'Evêque.	157
Tableau 5.10 Qualification en intensité de crue rapide sur les communes de Touques et Trouville.	159
Tableau 5.11 Qualification en intensité de l'incendie survenu en juillet 2003 dans le massif des Maures.	160
Tableau 5.12 Comparaison des indices d'impact entre différents événements pour séismes, inondations et feux de forêts.....	161
Tableau 5.13 Types de risques météorologiques affectant divers secteur d'activité (source : Augros et Querel, 2001).....	166

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages sismiques (source : Chiroiu et Michel – Kerjan, 2003).....	6
Figure 1.2 Exemple d'une courbe de probabilité de dépassement d'un niveau de pertes.....	8
Figure 1.3 Exemple de courbe standard d'endommagement associant le déplacement du sol à une probabilité d'endommagement, par niveau de dommage.....	10
Figure 1.4 Courbe de fragilité issues de l'EMS 98 (Source : Grunthal et al, 1998).....	11
Figure 1.5 Répartition géographique de bâtiments de type S3 dans l'état de Santa Barbara aux Etats-Unis	15
Figure 1.6 Choix du type d'analyse de l'aléa	16
Figure 1.7 Choix d'un événement déterministe aléatoire	16
Figure 1.8 La représentation physique des courbes de capacité	18
Figure 1.9 Exemple de courbe de capacité utilisée dans HAZUS™	18
Figure 1.10 Exemple de sollicitation sismique.....	19
Figure 1.11 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel.....	20
Figure 1.12 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel.....	21
Figure 1.13 Courbes de fragilité typiques.....	22
Figure 1.14. Organigramme du projet GEMITIS Nice (source : Arnal et Martin, 1999).....	25
Figure 1.15 Méthodologie d'estimation de dommages directs (source : Arnal et Martin, 1999).....	26
Figure 1.16 Détermination de la sollicitation sismique de référence.....	27
Figure 1.17 Types de bâtiments utilisés pour l'estimation de dommages, associés avec la courbe de fragilité correspondante (source : Arnal et Martin, 1999).....	28
Figure 1.18 Secteurs homogènes de bâti sur ville de Nice (source : Arnal et Martin, 1999).....	29
Figure 1.19 Exemple de cartographie de dommages sur la ville de Nice, pour les bâtiments de type PN (source : Arnal et Martin, 1999).....	30
Figure 1.20 Estimation du nombre de victime provoquées par un séisme survenu de jour (source : Arnal et Martin, 1999).....	31
Figure 1.21 Estimation des dommages financiers directs sur le département des Alpes Maritimes (source : Arnal et Martin, 1999).....	31
Figure 1.22 Cartographie des zones susceptibles de liquéfaction, représentées en mauve (source : RADIUS).....	33
Figure 1.23 Schéma conceptuel du modèle RADIUS (source : RADIUS, 2002).....	34
Figure 1.24 Définition du scénario de séisme	35
Figure 1.25 Intensité (sur l'échelle MSK) de la secousse sismique sur la ville de Quito, supposée à se produire à 25 km au nord de la ville, avec une magnitude de 6.3 (source : EPN et al, 1994).....	38
Figure 1.26 La distribution statistique des dommages au bâti attendus suite au scénario du séisme local (source : EPN et al, 1994).....	39
Figure 3.1 Position du module relatif à l'évaluation de dommages directs dans le cadre d'un MEDS	66
Figure 3.2 Schéma conceptuel d'estimation de dommages utilisant la méthode du spectre de capacité.....	68
Figure 3.3 Signification physique de la courbe de capacité (l'état d'endommagement du bâtiment)	69
Figure 3.4 Aspect général des courbes d'endommagement.....	69
Figure 3.5 Cartographie des principaux épicentres historiques en Catalogne (source : Susagna et Goula, 1999)	70
Figure 3.6 Spectre de réponse caractéristique pour Barcelone, réduit pour un amortissement effectif de 16%, correspondant aux structures de type A1.	71
Figure 3.7 Obtention du point de demande pour les constructions de type A1 pour le cas de Barcelone	73
Figure 3.8 Courbes d'endommagement structurel pour les structures de type A1 pour le cas de Barcelone	75
Figure 3.9 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en acier pour la ville de Barcelone	76
Figure 3.10 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en béton pour la ville de Barcelone	77
Figure 3.11 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS™ et celles basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type A1 pour la ville de Barcelone	78
Figure 3.12 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS™ et celles basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type B2 pour la ville de Barcelone.	79
Figure 3.13 Estimation de dommages sur la ville de Barcelone suite à un événement d'intensité sismique VI et VII.....	80
Figure 3.14 Zonage sismique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (source : www.prim.net)	81
Figure 3.15 L'Ecole maternelle communale du quartier Saint-Etienne à Nice, lors du séisme de 1883.....	82

Figure 3.16 Spectre de réponse pour la ville de Nice (en bleu), réduit par l'indice d'amortissement (en magenta), correspondant à un amortissement effectif de 16%.....	83
Figure 3.17 Obtention du point de demande pour le type de bâti A1 pour la ville de Nice.....	84
Figure 3.18 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en acier, pour la ville de Nice.....	85
Figure 3.19 Distribution de dommages structurels pour les bâtiments en béton armé, pour la ville de Nice.....	86
Figure 3.20 Cartographie des différents types de bâti sur une partie de la ville de Nice.....	86
Figure 3.21 Estimation de dommages sur le bâti non pavillonnaire.....	87
Figure 3.22 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS et celle basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type B3.....	89
Figure 3.23 Comparaison de dommages entre l'approche basée sur les courbes de capacité issues de HAZUS et celle basée sur les nouvelles courbes. Application aux bâtiments de type A3.....	89
Figure 3.24 Estimation de dommages sur la ville de Nice concernant les bâtiments de type T4 du projet GEMITIS (source : Arnal et Martin, 1999). Le rectangle noir correspond à la zone cartographiée dans notre approche.....	90
Figure 4.1 Domaine d'application de l'imagerie satellitaire dans le cadre d'un MEDS.....	91
Figure 4.2 Comparaison des profils radiométriques avant (en vert) et après (en rouge) sur une zone supposées sans dégâts. On observe toutefois des écarts importants entre les deux profils (source : GSC 2001).....	93
Figure 4.3 Cartographies de dommages sur la ville de Bhuj à l'aide des simulations multi - temporelles SPOT 5 (source : André et al, 2001).....	94
Figure 4.4 Cartographie des zones affectées suite au séisme de Bhuj, à l'aide d'une image IKONOS (source : Charte Internationale, 2002).	94
Figure 4. 5 a) Extraction des contours des bâtiments ; b) le calcul de l'enveloppe convexe de chaque objet (source : André, 2002).	95
Figure 4.6 Séparation des éléments endommagés à l'aide du seuillage des valeurs des indices de surface et de périmètre. Figurent en rouge les éléments sûrement endommagés. On observe ainsi qu'en bas et à droite par rapport aux lignes vertes se trouvent exclusivement des éléments endommagés (source : André et al, 2003).	96
Figure 4.7 Bâtiments endommagés (en rouge) détectés par les seuils réalisés sur les indices de contours et forme (source : André et al, 2003).....	96
Figure 4.8 a) Image radar comparée avec b) un inventaire urbain (source : Eguchi et al, 2000).	98
Figure 4.9 Calcul de la hauteur d'un bâtiment à l'aide de l'imagerie radar et comparaison avec une photo aérienne (source : Eguchi et al, 2000).	98
Figure 4.10 Détermination des hauteurs des constructions à partir des images aériennes à très haute résolution (source : Wyniecky et al, 2003).	99
Figure 4.11 Localisation de l'épicentre du séisme de Bhuj, Inde, 2001 (source image : www.eqecat.com).....	100
Figure 4.12 Accélération sismique enregistrée à Ahmedabad, au rez-de-chaussée d'un immeuble (source : Université de Roorkee, Inde)	101
Figure 4.13 Carte des épicentres historiques dans la région de Gujarat (source : Université de Tokyo ; Japon). 102	
Figure 4.14 Maisons en maçonnerie, très vulnérables face aux séismes (source : Université de Roorkee, Inde)	103
Figure 4.15 Bâtiment en cadres en béton armé, situé à Bhuj, endommagé suite au séisme de 2001 par la ruine classique d'un étage intermédiaire (a) et du rez-de-chaussée (b) (source : EERI, 2001).	103
Figure 4.16 Effondrement du réservoir d'eau, situé au dernier étage, phénomène constaté sur une large échelle suite au séisme de Bhuj (source : EERI, 2001).	104
Figure 4.17 Construction traditionnelle de type « bhonga », spécifique à la région de Gujarat.....	104
Figure 4.18 Destruction totale du temple Rao Lakhaji Chhatri (a) et partielle du palais Darbargarh (b), suite au séisme de Bhuj (source : UNESCO, 2001).	105
Figure 4.19 Détection des deux zones à bâti dense, traditionnel, de la ville de Bhuj.....	106
Figure 4.20 Structure urbaine de la vieille ville de Bhuj.....	106
Figure 4.21 Structure urbaine d'un quartier pauvre, avec des maisons traditionnelles, de type « bhonga », spécifique à la région de Gujarat.....	107
Figure 4.22 Structure urbaine des parties modernes de la ville de Bhuj.....	107
Figure 4.23 Ensemble des bâtiments complètement détruits sur la ville de Bhuj, suite au séisme du janvier 2001	108
Figure 4.24 Constructions en ruine, dont les débris couvrent la route, suite au séisme de Bhuj du janvier 2001 108	
Figure 4.25 Exemple de dommage très important (a); exemple de dommage important (en jaune) et très important (en rouge) (b); exemple d'une zone interprétée comme ayant des dommages importants (c)..	109
Figure 4.26 Disparition des alignements de rues, critère utilisé pour la détection de dommages dans la vieille ville. L'image pré - séisme (a) et l'image post - séisme (b).	109

Figure 4.27 Distribution spatiale de zones endommagées sur l'agglomération urbaine de Bhuj, suite au séisme du janvier 2001.	110
Figure 4. 28 Le centre historique de la ville de Bhuj après le séisme du janvier 2001 (source : UNESCO, 2001).	114
Figure 4.29 Spectre de réponse considérée pour le séisme de Bhuj, suivant la norme PS 92 (1992), avec un PGA de 0,25g.....	115
Figure 4.30 Superposition de la courbe de capacité caractéristique au bâti de type B1 au spectre de réponse du séisme de Bhuj. Obtention du point de demande.	116
Figure 4.31 Répartition de la partie moderne de Bhuj en plusieurs zones, en fonction de la densité du bâti.	117
Figure 4.32 Localisation de l'épicentre du séisme d'Algérie du 21 mai 2003, et son mécanisme au foyer.	119
Figure 4.33 Image IKONOS acquise après le séisme de Boumerdes, le 21 mai 2003. Sont cartographiées en vert les principales agglomérations urbaines (source image : European Space Imaging).	120
Figure 4.34 Reconnaissance des dommages suite au séisme de Boumerdes, de mai 2003, à l'aide d'une image IKONOS post – événement. On remarque l'absence de l'ombre du bâtiment situé dans le cercle rouge (source image : European Space Imaging).....	120
Figure 4.35 Reconnaissance des dommages suite au séisme de Boumerdes, de mai 2003, à l'aide d'une image IKONOS post – événement. Distinction entre dommages très importants (a) et importants (b) (source image : European Space Imaging).	121
Figure 4.36 Cartographie de dommages sur Zemmouri. (source image: European Space Imaging).....	122
Figure 4.37 Cartographie des dommages sur Zemmouri réalisée par le Gouvernement Américain pour les Nations Unies, le lendemain du séisme du 21 mai 2003 (source: www.reliefweb.org).....	124
Figure 4.38 Destruction complète de plusieurs immeubles à Boumerdes suite au séisme du 21 mai, reconnaissable clairement à l'aide de l'imagerie multi – temporelle. L' image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).	125
Figure 4.39 Effondrement de trois immeubles modernes de Boumerdes. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).	126
Figure 4.40 Effondrement d'un rez-de-chaussée à Boumerdes, détectable à l'aide de l'imagerie multi – temporelle. L'image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b). (source image : DigitalGlobe).	126
Figure 4.41 Exemple de dommage important à Boumerdes. On distingue les bâtiments à l'intérieur des cercles jaunes comme endommagés mais pas complètement effondrés. L' image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b) (source image : DigitalGlobe).	127
Figure 4.42 Endommagement très important à Boumerdes. L'immeuble à l'intérieur du cercle rouge a été complètement rasé. L' image prise avant le séisme (a), et celle acquise deux jours après (b) (source image : DigitalGlobe).	127
Figure 4.43 Cartographie de dommages sur une partie de ville de Boumerdes, suite au séisme du 21 mai 2003 (source de l'image de fond : DigitalGlobe).....	128
Figure 4.44 Cartographie de zones affectées sur l'ensemble de la ville de Boumerdes, suite au séisme du 21 mai 2003 (source de l' image de fond : DigitalGlobe).....	128
Figure 4.45 Exemple des différents types de bâti, reconnaissables à l'aide de l'imagerie satellitaire. Centre urbain moderne, formé par des bâtiments hauts, de plus de 10 niveaux (a) ; bâtiments à habitats collectifs, d'environ 5 étages (b) ; exemple des secteurs pavillonnaires (c) et (d). (source images : Space Imaging et DigitalGlobe).	134
Figure 4.46 Exemple d'un couple des MNE encadrant un séisme, mettant en évidence les dommages simulés, représentés par les cercles bleus.....	135
Figure 5.1 Méthodologie d'attribution d'une intensité pour un événement donné (source : GSC, 2003).	141
Figure 5.2 Localisation de l'épicentre du séisme du 18 février 1996 (source : www.sisfrance.net)	154
Figure 5.3 Localisation du séisme d'Hennebont du 30/09/2002. (Source : BCSF).....	155
Figure 5.4 Qualification en intensité de crue lente de chaque commune se situant sur le bassin versant de la Touques pour l'inondation du novembre 2000 (source de données : GSC).....	158
Figure 5.5 Destructions des murs sur la commune de Touques lors de l'inondation du juin 2003. (photo : F. Bahoken).....	159
Figure 5.6 Images acquise par le satellite SPOT 5 le 20 juillet 2003. On distingue en vert foncé la surface incendiée, et en rouge la végétation non brûlée (source : SpotImage).	160

