

EVALUATION DE STRATÉGIES POUR LA GESTION DU RISQUE SISMIQUE DU BÂTIMENT

THÈSE N° 3074 (2004)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Laboratoire de construction en béton

SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Vincent PELLISSIER

ingénieur civil diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Grimisuat (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. M. Badoux, Prof. F.-L. Perret, directeurs de thèse
Prof. E. Brühwiler, rapporteur
Dr O. Lateltin, rapporteur
Dr P. Mouroux, rapporteur

Lausanne, EPFL
2004

A Laetitia,

Elisa,

Marc et

Emma

PRÉFACE

Dans l'arc alpin, l'urbanisation et l'activité économique sont concentrées dans les territoires les moins pentus à savoir les dépôts alluvionnaires des fonds de vallée. Jusqu'à récemment, les autorités pensaient que dans ces plaines, seul l'abord des fleuves était exposé aux dangers naturels, en l'occurrence celui d'inondation. Malheureusement, les travaux de ces dix dernières années en matière de sismicité tendent à démontrer que deux situations, l'une géotechnique et l'autre morphologique peuvent aggraver l'effet destructeur d'un séisme pour des ouvrages construits sur des terrains meubles. Cette aggravation est appelée « effet de site ». Elle est due dans la première des situations à la présence de sédiments fins et d'eau souterraine au droit des ouvrages. La seconde est liée directement à la forme des vallées alpines et au rapport « largeur-profondeur » de celles-ci en dessous du niveau de la plaine.

Ces considérations, liées au fait que toute prévision en matière de déclenchement de séisme est impossible, ont obligé le canton du Valais – qui est exposé à un séisme majeur de magnitude 6.5-7 sur l'échelle de Richter avec une période de retour de 475 ans – à modifier sa législation en matière de construction et rénovation du bâti de façon à prendre en compte dès 2004 ces effets potentiellement destructeurs pour tout immeuble de trois étages et plus. En sachant pertinemment qu'il est illusoire financièrement de se lancer dans un programme à court terme de rénovation parasismique du patrimoine existant, le canton le plus exposé de Suisse aux tremblements de terre a préféré s'appuyer sur des mesures préventives qui devraient lui permettre d'obtenir un parc immobilier parasismique à 75% d'ici un siècle en comptant uniquement sur son renouvellement naturel.

La recherche effectuée dans le cadre de la présente thèse de doctorat aborde de manière originale cet aspect en soupesant deux principes parfois contradictoires, celui de précaution et celui de proportionnalité. Des priorités peuvent dès lors être déterminées. Cette démarche digne d'intérêt propose également de fixer le niveau de protection cible pour les bâtiments existants. Des indications utiles sont fournies aux différents acteurs et le rôle de chacun est mis en lumière; celui des autorités naturellement, mais également celui des partenaires au processus de gestion que sont les propriétaires ou encore les assureurs.

La recherche dans le domaine de la sismicité doit faire encore beaucoup de progrès pour mieux appréhender la complexité de la fréquence et de l'intensité de l'aléa sismique dans nos régions. Cependant, c'est en adaptant de manière pragmatique la prévention au fur et à mesure des connaissances scientifiques les plus récentes que nous affronterons dans les meilleures conditions le séisme majeur que nous prédit l'analyse des événements passés.

Dr Jean-Daniel Rouiller

Géologue Cantonal du Valais, septembre 2004

REMERCIEMENTS

Une thèse de doctorat bénéficie du concours de nombreuses personnes. Je tiens ici à les remercier. Parmi ces personnes, je pense tout d'abord au Professeur Dr Marc Badoux et au Professeur Dr Francis-Luc Perret qui m'ont accordé leur confiance et ont dirigé cette thèse en suscitant des pistes de recherche tout en lui donnant la rigueur nécessaire. Je pense aussi au Dr Pierre-André Jaccard et au Dr Pierrino Lestuzzi qui, lors de nos nombreux échanges, ont su répondre à mes multiples interrogations.

Cette recherche a été rendue possible grâce au soutien financier et technique de l'Etablissement Cantonal d'Assurance du Canton de Vaud (ECA). Je remercie donc vivement son directeur Monsieur Jean-Robert Guignard pour son appui efficace et visionnaire. J'ai aussi pu profiter grandement des contributions apportées par Messieurs Marc-Olivier Burdet et Jean-Marc Lance tout au long de ce travail.

Piloté par le Laboratoire de Construction en Béton (IS-BETON) et la Chaire de Logistique, Economie et Management (LEM) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), ce travail a bénéficié de la collaboration efficace de la Centrale pour la Mitigation des Séismes du Service Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), en particulier de Messieurs Blaise Duvernay et Florian Widmer ainsi que son directeur, le Dr Olivier Lateltin. Leur aide et leurs encouragements constants ont été une grande source de motivation. Je remercie également le Professeur Dr Dan Abrams de m'avoir accueilli quelques temps au sein de son équipe du Mid-America Earthquake Center à l'Université d'Illinois.

De plus, j'aimerais associer toutes les personnes sollicitées pour l'obtention des différentes informations utilisées pour la rédaction de ce document. S'ajoute donc à ces remerciements l'administration communale d'Aigle, le Corps suisse d'aide humanitaire, la société suisse des ingénieurs et architectes (SIA) et plus précisément Maître Walter Maffioletti, l'Etat du Valais, par l'implication du géologue cantonal, le Dr Jean-Daniel Rouiller et du Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) par le Dr Pascal Tissières.

Les membres du jury, chacun sollicités dans leur domaine de compétence propre, ont effectué un travail essentiel. Leur lecture critique et leurs remarques ont contribué de manière décisive à la rédaction de cette thèse.

Plusieurs collaborateurs de l'Ecole polytechnique ont été mis à contribution à diverses (et nombreuses) occasions. Je tiens ici à remercier chaleureusement mes collègues, particulièrement Messieurs Michel Thomann, Christian Greifenhagen et Aymeric Sevestre, pour toute l'aide apportée. Un dernier remerciement s'adresse encore à toutes les autres personnes qui m'ont supporté et qu'il serait trop long d'énumérer ici.

Une pensée reconnaissante va enfin à ma famille et à mon entourage, qui ont su me soutenir et m'encourager durant cette période ainsi qu'à ma femme Laetitia, qui a su brillamment mener le bateau familial avec trois petits moussaillons à son bord.

Vincent Pellissier

RÉSUMÉ – SUMMARY

1. RÉSUMÉ

Ce document présente les résultats d'un travail de recherche portant sur la gestion du risque sismique. Cette recherche s'inscrit dans le contexte d'une prise de conscience croissante au niveau mondial de l'importance de ce risque et représente une contribution à l'effort de recherche.

Afin de pouvoir gérer le risque d'une manière rationnelle, il faut pouvoir le quantifier. Le projet consiste dans un premier temps à évaluer le risque sismique d'un portefeuille de bâtiments. Le portefeuille choisi est la ville d'Aigle située au cœur des Alpes helvétiques. L'évaluation a été menée sur la base d'un inventaire sismique de la ville qui a permis au travers d'une approche globale de considérer le comportement des bâtiments. Les pertes humaines, immobilières et mobilières ont ensuite pu être déterminées pour plusieurs scénarii d'aléa sismique d'intensités différentes. Dès lors, connaissant les probabilités de survenance de ces intensités ainsi que les incertitudes sur les paramètres, il a été possible de quantifier le risque affectant le portefeuille de bâtiments étudié. Le sinistre maximum potentiel pour la région a également été déterminé. Le modèle d'estimation du risque a donc été fixé ainsi que ses paramètres constitutifs. Il est dès lors reproductible. Les résultats obtenus renseignent sur les pertes potentielles, sur le niveau de prime d'assurance et sur les éléments de réassurance.

La gestion du risque sismique, de par sa complexité et par l'ampleur des conséquences consécutives à un événement majeur, nécessite une appréhension différente des autres risques naturels. Dans un deuxième temps, des outils de gestion sont donc fournis aux décideurs pour faire face à ces particularités. Un cadre de gestion est ici formalisé. Il permet d'affronter la complexité liée aux spécificités du risque sismique mais également liée à la multiplicité des critères de décision ainsi que des acteurs du système étudié.

La fixation des objectifs de protection a fait l'objet d'un développement particulier. Les normes de construction fixent cet objectif lors de la réalisation de nouveaux ouvrages. Par contre, cela fait défaut pour les bâtiments existants. Cette recherche propose une méthode qui permet de fixer ce niveau de protection et de combler cette lacune. Cette méthode soupèse également les principes souvent contradictoires de précaution et de proportionnalité.

Les différentes mesures de gestion ont ensuite été cataloguées de manière originale en fonction de leur influence sur les éléments constitutifs du risque. Ces mesures sont dites de prévention, de protection ou d'intervention. Elles agissent sur l'aléa, la vulnérabilité ou encore sur la valeur exposée au risque considéré. Enfin, des stratégies ont été élaborées pour être par la suite évaluées et comparées. Une stratégie est un ensemble de mesures ayant un impact sur les différents éléments du risque.

Le processus décisionnel est inspecté selon une approche systémique considérant la multiplicité des critères de décision et des acteurs à l'aide d'une méthode d'analyse multicritère par surclassement. Des critères sont proposés pour des bâtiments individuels ainsi

que pour un portefeuille de bâtiments. La mise en œuvre du processus décisionnel à des projets-pilotes permet d'illustrer la démarche et, dès à présent, de fournir des recommandations.

Le projet-pilote de la ville d'Aigle a constitué le fil conducteur de la recherche présentée dans ce document et qui tente d'aborder dans sa complétude le domaine large de la gestion du risque sismique.

2. SUMMARY

This document presents the results of a research on seismic risk management. It echoes the worldwide trend of increasing awareness of the importance of this risk and represents a contribution to the effort of research.

In order to manage risk in a rational way, it is necessary to quantify it. The first part of this research consists in evaluating the seismic risk of a portfolio of buildings. The selected portfolio is the city of Aigle located in the center of the Swiss Alps. The evaluation was based on a seismic inventory of the city, enabling, through a global approach, to consider the behavior of the buildings. Different losses (life, building, furniture) could be estimated for several scenarios of seismic hazards intensities. Knowing the probability of occurrence of these intensities, as well as the uncertainties of the constitutive parameters, it was then possible to quantify the risk affecting the selected portfolio of buildings. The maximum potential loss for the studied area was also estimated. As a result, a reproducible risk estimation model was developed with its constitutive parameters. The obtained results provide information on potential losses, on the level of insurance premium as well as on elements of reinsurance.

Seismic risk management, because of its complexity and the extent of the consequences ensuing from major events, requires a different approach from other natural risks. In the second part of this research, management tools are therefore developed in order for decision makers to face these particularities. A comprehensive management framework is elaborated. This framework makes it possible to deal with the complexity of seismic risk, which not only stems from its inherent specificities but also from the multiplicity of decision criteria as well as the variety of actors within the system.

The definition of protection objectives receives special attention in this research. Construction codes usually fix safety levels for new constructions. For existing buildings on the other hand, there are no such provisions. The present research proposes a method for fixing this protection level. This method also considers the often contradictory principles of precaution and proportionality.

An innovative catalogue of mitigation measures are then proposed, classified according to their influence on the components of risk. These measures can be focused on prevention, protection or intervention. They have an impact on the hazard, the vulnerability or on the exposed value at the considered risk. Consequently, different strategies are built to be later evaluated and compared. For this work, a strategy is considered to be a panel of measures that have an impact on the constitutive elements of risk.

The decision-making process is regarded as a systemic approach considering the multiplicity of decision criteria and actors. A multicriteria analysis method based on an outranking philosophy is adopted for the comparison. Criteria are proposed for individual buildings as well for a portfolio of buildings. Applications of the decision-making process on pilot projects illustrate the methodology and provide practical recommendations.

The pilot project of the city of Aigle was the guideline for the presented research, which aimed to deal with the complexity of seismic risk management in the most comprehensive way possible.

TABLE DES MATIÈRES

Préface	i
Remerciements	ii
Résumé – Abstract	iii
1. Positionnement de la problématique	1
1.1. Introduction	1
1.1.1. La société face au risque sismique	
1.1.2. Comment aborder ce risque ?	
1.1.3. Un besoin de quantification	
1.1.4. Quelle stratégie de gestion ?	
1.1.5. Comparaison	
1.2. Champs de l'étude	2
1.3. Besoins et attentes	3
1.3.1. Diagnostic et lacunes	
1.3.2. Des mesures insuffisantes	
1.3.3. Formalisation du processus décisionnel	
1.4. Particularités de la démarche	5
1.4.1. Un projet transdisciplinaire	
1.4.2. Notion de risque	
1.4.3. Les projets-pilotes	
1.5. Organisation du document	6
1.6. Principaux résultats	8
1.6.1. Apports scientifiques	
1.6.2. Originalité	
1.6.3. Contributions pratiques	
2. Etat des connaissances des éléments de génie parasismique	11
2.1. Le risque sismique	11
2.1.1. Les événements historiques en Suisse	
2.1.2. Tendance	
2.2. L'aléa sismique	13
2.2.1. L'aléa régional	
2.2.2. Courbes d'atténuation	
2.2.3. L'aléa local	
2.3. La vulnérabilité	17
2.3.1. Nouvelles constructions	
2.3.2. Bâti existant	
2.4. Outils et méthodes de calcul	18
2.5. Synthèse	20
3. Modèle d'estimation du risque sismique	21
3.1. Bases du modèle	21
3.1.1. De la dimension individuelle à la dimension plurielle	
3.1.2. Les modèles existants	
3.1.3. Méthodologie utilisée	

3.2. Eléments physiques du modèle	24
3.2.1. Aléa sismique	
<i>Aléa régional</i>	
<i>Aléa local</i>	
3.2.2. Inventaire sismique	
<i>Considérations</i>	
<i>Courbes de vulnérabilité</i>	
<i>Courbes de vulnérabilité de l'ensemble du bâti</i>	
3.3. Pertes considérées	29
3.3.1. Pertes directes	
<i>Pertes humaines</i>	
<i>Pertes immobilières et mobilières</i>	
<i>Les autres pertes directes</i>	
3.3.2. Pertes indirectes	
3.4. Quantification du risque	33
3.4.1. Principe de détermination	
3.4.2. Risque humain	
3.4.3. Risque immobilier et mobilier	
3.4.5. Sinistre maximum potentiel	
3.5. Synthèse	35
4. Objectifs de protection	37
4.1. Particularités	37
4.1.1. Les états limites	
4.1.2. Des ressources limitées	
4.2. Objectifs cibles de protection	39
4.2.1. Nouvelles constructions	
4.2.2. Constructions existantes	
<i>Le principe de proportionnalité</i>	
<i>Le principe de précaution</i>	
4.2.3. Eléments considérés pour l'adaptation des actions sismiques	
<i>La durée de vie restante de l'ouvrage</i>	
<i>Le nombre de vies humaines menacées</i>	
<i>Indice de valeur humaine de l'ouvrage</i>	
<i>La valeur économique de l'ouvrage</i>	
<i>L'utilisation de l'ouvrage</i>	
<i>Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage</i>	
<i>Plan indiciel de valeurs</i>	
4.2.4. La zone d'aléa sismique	
4.2.5. Fixation par objectifs	
<i>Normalisation</i>	
4.2.6. Droites d'isovaleur du facteur de correction p	
4.2.7. Variabilité des paramètres	
4.3. Synthèse	49
5. Mesures et stratégies de gestion	51
5.1. Classification des mesures de gestion du risque sismique	51
5.2. Les mesures de prévention	52
5.2.1. Définition	
5.2.1. Mesures de gestion territoriale	
<i>Mise à disposition de cartes de microzonage des classes de sols de fondation pour le dimensionnement</i>	
5.2.3. Mesures orientées valeurs	
5.2.4. Mesures constructives	
<i>Transfert de l'évolution de l'état des connaissances</i>	
<i>Actions découlant des bases légales</i>	
5.2.5. Mesures incitatives	

5.3. Les mesures de protection	54
5.3.1. Définition	
5.3.2. Mesures techniques de mitigation de la vulnérabilité	
<i>Axes fondamentaux des mesures</i>	
<i>Importance de l'effet de site pour le choix de la mesure</i>	
<i>Quels critères pratiques d'évaluation faut-il considérer ?</i>	
5.3.3. Mesures d'adéquation	
5.4. Les mesures d'intervention	58
5.4.1. Définition	
5.4.2. Positionnement temporel	
5.4.3. Mesures de préparation et d'atténuation	
5.4.4. Mesures de réparation	
<i>Situation actuelle en Suisse</i>	
<i>L'assurance, la co-assurance et la réassurance</i>	
<i>La titrisation du risque</i>	
<i>Vers un modèle mixte: Privé - Public</i>	
5.5. Les stratégies	62
5.5.1. Elaboration de stratégies	
5.5.2. Stratégie actuelle	
5.5.3. Stratégie orientée vie	
5.5.4. Stratégie orientée valeur	
5.6. Synthèse	65
6. Cadre de gestion	67
6.1. Théorie de la décision face au risque sismique	67
6.1.1. Formalisation du processus de gestion	
1. <i>Définition du problème</i>	
2. <i>Détermination des objectifs</i>	
3. <i>Elaboration des mesures de gestion</i>	
4. <i>Evaluation prospective</i>	
5. <i>Choix</i>	
6. <i>Mise en oeuvre</i>	
7. <i>Evaluation rétrospective</i>	
6.1.2. Evolution de l'attitude face au risque	
<i>La prévoyance</i>	
<i>La prévention</i>	
<i>La précaution</i>	
6.1.3. Eléments de la décision	
6.2. Les étapes menant au choix	72
6.2.1. 1ère étape: Identification des phénomènes dangereux (Que peut-il se produire et où ?)	
6.2.2. 2ème étape: Evaluation du risque (Avec quelle fréquence et quelles conséquences cela peut-il se produire ?)	
6.2.3. 3ème étape: Détermination des mesures (Comment peut-on se protéger et quels moyens va-t-on mettre en oeuvre ?)	
6.3. Analyse systémique	76
6.3.1. Les acteurs du processus décisionnel	
<i>Identification des acteurs</i>	
<i>Intérêts et motivations</i>	
<i>Conditions initiales</i>	
6.3.2. Méthodes de comparaison	
<i>Analyse coût-bénéfice et coût-efficacité</i>	
<i>Analyse multicritère par surclassement</i>	
6.3.3. Critères de comparaison	
<i>Espace de décision</i>	
<i>Dimension économique</i>	
<i>Dimension sécuritaire ou humaine</i>	

6.4. Comparaison	82
6.4.1. Comparaison pour des bâtiments individuels	
<i>Situation initiale</i>	
<i>Analyse comparative des mesures et enseignements généraux</i>	
6.4.2. Comparaison des stratégies génériques	
<i>Critères retenus</i>	
<i>Analyse comparative des stratégies</i>	
<i>Enseignements généraux</i>	
<i>Frontières d'application du modèle</i>	
6.5. Distinction	88
6.6. Synthèse	89
7. Conclusions	91
7.1. Enseignements	91
7.1.1. Les attentes	
7.1.2. Enseignements généraux	
7.1.3. Enseignements particuliers	
7.2. Thèse proposée	93
7.3. Conclusion	94
Notations	xi
Glossaire	xiii
Bibliographie	xv
Annexes	
A. Bâtiments individuels	A01-A22
B. Population de bâtiments – Ville d'Aigle	A23-A36
C. Méthodes d'analyse multicritère	A37-A44
D. Recommandation SGEb (éd. 2003)	A45-A48
E. Contexte réglementaire	A49-A62
Curriculum vitae	

1 POSITIONNEMENT DE LA PROBLÉMATIQUE

1.1. INTRODUCTION

1.1.1. La société face au risque sismique

L'attitude de la société face aux *dangers naturels* [Glossaire] a évolué au cours du temps du fatalisme vers une volonté de plus en plus marquée de protection. La tendance moderne est d'aborder la problématique des dangers naturels de manière préventive en développant des méthodes de gestion spécifiques. Les mécanismes techniques, économiques et politiques engagés doivent permettre de gérer au mieux les *effets* [Glossaire] néfastes des phénomènes catastrophiques dans le temps, l'espace et selon des ressources naturellement limitées à disposition. Cette évolution est particulièrement claire dans le domaine sismique. Un grand effort international est en cours pour améliorer les connaissances de l'aléa et de la vulnérabilité des systèmes affectés par les séismes. La recherche présentée dans ce document s'inscrit dans la prise de conscience récente du risque sismique encouru par la société.

1.1.2. Comment aborder ce risque ?

La gestion du risque sismique, dans un environnement complexe, doit être envisagée avec méthode. Dans cette optique, l'interaction entre les disciplines de l'ingénierie des structures, de la modélisation du risque et de l'économie ouvrent des perspectives, exploitées dans cette étude. Un *cadre décisionnel* [Glossaire] permettant d'évaluer des stratégies de gestion du risque sismique, illustré par des projets pilotes, a pu être esquissé. Cette recherche montre comment peut se développer une base rationnelle de comparaison de différentes mesures et stratégies de gestion. Il s'agit notamment d'étudier l'opportunité d'investir dans des mesures de réduction du risque sismique, sachant que ces investissements sont restés jusqu'ici bien en dessous de ceux consentis pour la gestion d'autres dangers naturels, tels que les inondations ou les avalanches, comme l'illustre la figure 1.3 [Bachmann 2002].

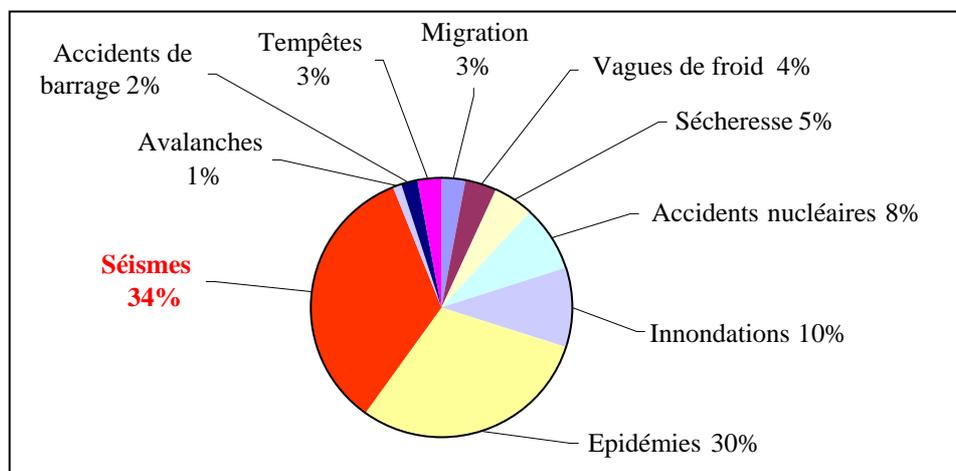


Figure 1.1 – Répartition des risques potentiels en Suisse selon [Katarisk 2003]

De nombreuses études attestent que le risque sismique représente une part importante des risques affectant nos sociétés. Il appartient en effet aux risques prépondérants d'origine humaine ou naturelle [Katanos 1995] [Katarisk 2003], comme le montre la figure 1.1. Les études précitées prennent en compte différents facteurs sociologiques, comme par exemple l'aversion des gens face à des *événements* [Glossaire] de grande ampleur.

1.1.3. Un besoin de quantification

Pour pouvoir appréhender le risque, il faut pouvoir le quantifier avec suffisamment de précision. C'est pourquoi une partie importante de cette recherche fixe les composantes d'un modèle d'*estimation* [Glossaire] du risque tout d'abord pour des bâtiments individuels puis aborde par la suite une population de bâtiments.

1.1.4. Quelle stratégie de gestion ?

Les mesures à disposition des décideurs pour gérer le risque sismique sont passées en revue et classifiées. Une « stratégie de gestion du risque sismique » est définie comme un ensemble de mesures cohérentes et complémentaires ayant un *impact* [Glossaire] sur le profil de risque du système étudié. Les décideurs disposent d'un éventail d'actions, appelées ici des mesures, qu'ils peuvent mettre en œuvre. Elles vont du statu quo jusqu'à des mesures appliquées à l'ensemble du parc immobilier. Différentes mesures techniques, comme le renforcement ciblé de certaines constructions, par exemple les hôpitaux, sont également abordées. Un autre type d'approche envisagé fait appel à un transfert du risque économique au moyen d'assurances.

1.1.5. Comparaison

Pour pouvoir mettre en place une mesure ou une stratégie, le processus décisionnel impliquant les principaux acteurs est inspecté. Ces acteurs représentent souvent des intérêts contradictoires. Un concept de management orienté objectifs [Pellissier 2003b], permettant de prendre en considération la multiplicité des acteurs et des points de vue est ici développé et appliqué.

1.2. CHAMPS DE L'ÉTUDE

C'est avec une vision globale que la problématique est abordée. Cette vision permet de soulever de nombreuses interrogations qui méritent des recherches plus approfondies. On pense ici par exemple aux incertitudes liées au comportement sismique des bâtiments en maçonnerie traditionnelle ou en béton faiblement armé ou encore à l'importance de l'effet de site. L'évolution historique des actions sismiques à appliquer lors d'un dimensionnement a vu une forte augmentation au cours du temps, du fait de l'amélioration des connaissances à son sujet. La figure 1.2, inspirée de [Bachmann 2004], illustre la tendance de l'évolution historique des actions sismiques de dimensionnement dans les normes. Les recherches en cours dans ce domaine vont certainement encore modifier dans le futur cette tendance.

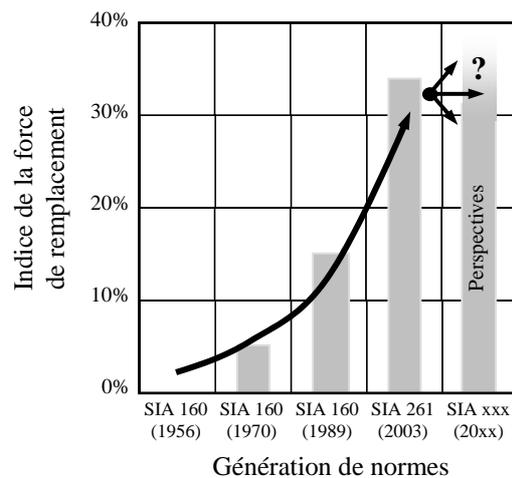


Figure 1.2 – Tendances et perspectives de l'évolution historique des actions sismiques dans les normes suisses, pour un bâtiment de classe d'ouvrage CO II, dimensionné conventionnellement [Bachmann 2004]

La recherche présentée dans ce document se concentre par ailleurs uniquement sur les bâtiments. Ce choix a été conduit par le fait que les immeubles représentent une grande partie des pertes consécutives à un tremblement de terre. Il est cependant important de ne pas occulter le rôle important que peuvent jouer, par exemple, les infrastructures de transport ou d'alimentation en eaux ou en électricité pouvant être affectées par un séisme. Ces aspects ne sont pas abordés dans ce travail, mais une démarche similaire peut être envisagée et le cadre formalisé reste valable. La recherche ici présentée a été conduite pour la problématique helvétique avec ses spécificités propres. Evidemment, elle peut être envisagée pour d'autres contextes de façon similaire.

1.3. BESOINS ET ATTENTES

1.3.1. Diagnostic et lacunes

Ce qui distingue le tremblement de terre des dangers naturels dits classiques, tels que les inondations ou les avalanches, est lié aussi bien aux spécificités propres à l'aléa sismique lui-même, énoncées ci-après, qu'au contexte réglementaire. Ce second aspect fait l'objet du traitement particulier en annexe E [Contexte réglementaire].

- La perception du risque sismique est faussée du fait de la rareté du phénomène. La survenance dépassant la mémoire collective conduit à une sous-évaluation du risque dans sa perception [Schneider 1994]. Ce biais de perception trouve son origine dans deux comportements distincts [Kunreuther 1978].
 1. Le premier est la sous-évaluation quasi systématique du risque encouru par les gens. Qui plus est, lorsque le risque sismique peut être estimé, il est souvent très faible, ce qui incite à ne pas les considérer ex ante. Un travail de sensibilisation du public et des décideurs est donc impératif pour la prise en considération de ce risque à son niveau réel.

2. Le second comportement est une tendance naturelle à privilégier des dépenses pour ce qui est certain plutôt que pour ce qui se relève de la potentialité [Godard 2002].
- L'*ampleur* [Glossaire] des dégâts potentiels est telle qu'elle dépasserait la capacité de résilience d'une quelconque institution publique ou privée. L'obligation d'une approche multilatérale et collaborative s'impose donc pour ce danger, contrairement aux dangers classiques qui peuvent être appréhendés de manière unilatérale, par exemple par un organisme de régulation. De plus, on atteint les limites de l'assurabilité à l'aide des outils classiques de l'assurance pour les cas de risques à faible probabilité d'occurrence, mais aux conséquences catastrophiques (*Low Probability-High Consequences: LP-HC events* dans la littérature anglophone). Cette facette sera approfondie au chapitre 5, qui détaille les possibilités de transfert du risque économique.
 - Le fait que les actions soient uniquement envisageables sur l'*atténuation* [Glossaire] des conséquences et non sur le phénomène pose un problème d'utilisation des outils de gestion classiques développés pour les autres dangers naturels. En effet, les dangers naturels classiques affectent la couche géologique superficielle, c'est-à-dire les premiers mètres, inférieurs pour les glissements de terrain ou supérieurs pour les avalanches ou les crues. Il est dès lors possible d'agir directement sur la cause du risque. Les tremblements de terre sont quant à eux plus profonds. Il est par conséquent plus difficile d'influencer leur intensité ou leur occurrence.

1.3.2. Des mesures insuffisantes

Malgré l'importance relative du risque sismique mise en lumière à la figure 1.1, les pouvoirs publics n'y consacrent qu'une faible proportion des fonds alloués aux mesures de protection contre les dangers naturels. Cet état de fait est illustré à la figure 1.3. En Suisse, ces fonds s'élèvent actuellement à environ 600 millions de francs par année. Cette disproportion découle principalement du fait de la perception erronée que l'on a du phénomène [Bachmann 2002].

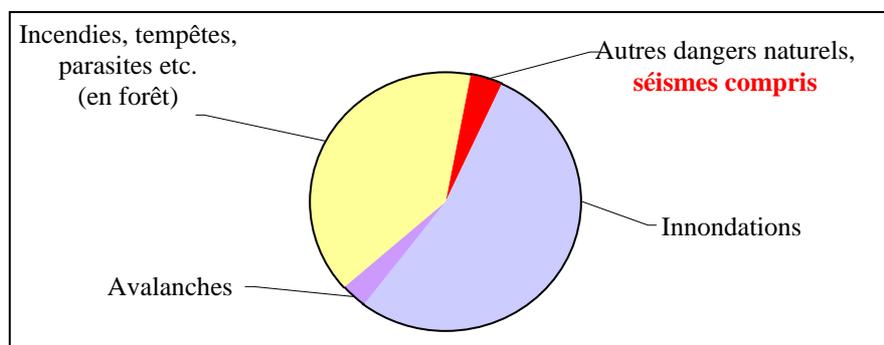


Figure 1.3 – Affectation des dépenses publiques pour les mesures de protection contre les risques naturels en Suisse (environ 600 millions de francs par année) [Bachmann 2002]

1.3.3. Formalisation du processus décisionnel

Pour les raisons explicitées plus en avant, la gestion du risque sismique doit être envisagée avec méthode. Une démarche impliquant la participation de tous les acteurs concernés et permettant la mise en place de mesures de gestion du risque sismique par l'établissement de règles de décision est utile à cette fin. La démarche permet d'éclairer les positions respectives des acteurs du processus décisionnel et, pratiquement, de définir des recommandations pour chacun d'entre eux sur les actions à entreprendre pour différents types de bâtiments considérés. La spécificité de l'approche présentée dans ce document réside dans la considération de la multiplicité des critères et de la multiplicité des acteurs. Elle fournit ainsi un cadre rationnel menant à la sélection de mesures ou de stratégies de gestion du risque sismique.

1.4. PARTICULARITÉS DE LA DÉMARCHE

1.4.1. Un projet transdisciplinaire

Après avoir positionné la problématique, le risque sismique actuel d'un portefeuille de bâtiments est estimé [Brennet 2001] [Pellissier 2003a]. Ensuite, la comparaison des mesures et des stratégies envisageables est menée. Afin d'illustrer les concepts théoriques développés, des projets pilotes ont servi de supports pratiques. Le raisonnement s'est construit partant de bâtiments individuels pour être ensuite étendu à un ensemble de bâtiments, dans notre cas, une petite ville des Alpes suisses. De nombreuses disciplines sont requises tout au long du processus de gestion. Ce travail cherche à concilier autant que possible les spécificités propres à chacune d'entre elles.

1.4.2. Notion de risque

Un modèle d'estimation du risque sismique pour une population de bâtiments est développé au chapitre 3. Après les avoir définis, le modèle proposé couple les différents paramètres constitutifs du risque que sont l'*aléa* [Glossaire], la vulnérabilité et les valeurs exposées au risque considéré. Le risque sismique est exprimé sur la base des termes classiques des équations (1.1) et (1.2), définies par l'Organisation des Nations Unies [UN 2002]. Les éléments constitutifs du risque sont présentés schématiquement à la figure 1.3.

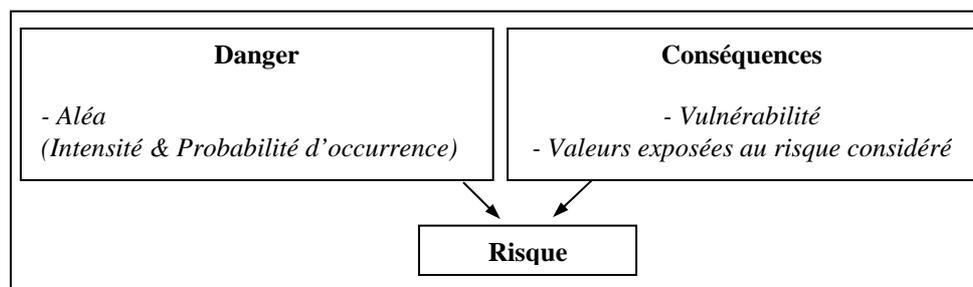


Figure 1.4 – Eléments constitutifs du risque sismique

$$Risque = Danger \times Conséquences \quad (1.1)$$

$$Risque = Aléa \times \overbrace{Vulnérabilité \times Valeur} \quad (1.2)$$

Avec:

Risque Le risque est une mesure probabilisée des impacts pouvant affecter un système. Il représente l'espérance mathématique des pertes au cours d'une période de référence pour un site ou une région donnée.

Aléa L'aléa est la probabilité d'occurrence d'un événement en termes d'intensité, reprenant les degrés de l'échelle macrosismique européenne [EMS98 1998]. Cette échelle classe les séismes en fonction de leurs effets à un endroit donné. Évaluer l'aléa revient donc à calculer, en un site donné, la fonction de répartition des paramètres caractéristiques de l'événement que sont l'intensité et la probabilité d'occurrence.

Vulnérabilité La vulnérabilité du système considéré décrit le degré d'endommagement pour différents événements. Cette vulnérabilité dépend des caractéristiques physiques et géométriques des bâtiments.

Valeur La valeur exposée du système au risque considéré. Elle est de nature socio-économique. Dans le cas du danger naturel sismique, la « valeur exposée au risque » est avant tout celle des bâtiments, de leurs occupants et de leur contenu ainsi que des activités économiques qu'ils abritent.

Le risque peut être exprimé comme le produit de l'aléa (probabilité d'occurrence), de la vulnérabilité (degré d'endommagement) et des valeurs du système exposées au risque. Le risque total est calculé comme la somme des risques des événements provoquant une perte de valeur.

1.4.3. Les projets-pilotes

Les études réalisées tout au long de ce travail pour illustrer la formalisation du processus développé dans cette thèse sont rassemblées en annexe A [Bâtiments individuels] et B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle]. Deux niveaux sont ainsi abordés, tout d'abord le niveau du bâtiment considéré individuellement, puis une population de bâtiments existants, à savoir l'ensemble du parc immobilier d'une petite ville assuré auprès d'un assureur immobilier de type monopolistique.

1.5. ORGANISATION DU DOCUMENT

Le modus operandi a été formalisé dans un cadre de gestion. Cette formalisation consiste à décomposer le processus de diagnostic, d'élaboration de mesures ou de stratégies, de choix et de mise en œuvre en plusieurs étapes. Cette démarche analytique est schématisée à la figure 1.5 comme un processus itératif visant à simplifier la réalité. La méthode de comparaison des

mesures et des stratégies qui est proposée est détaillée et étayée par un argumentaire théorique.

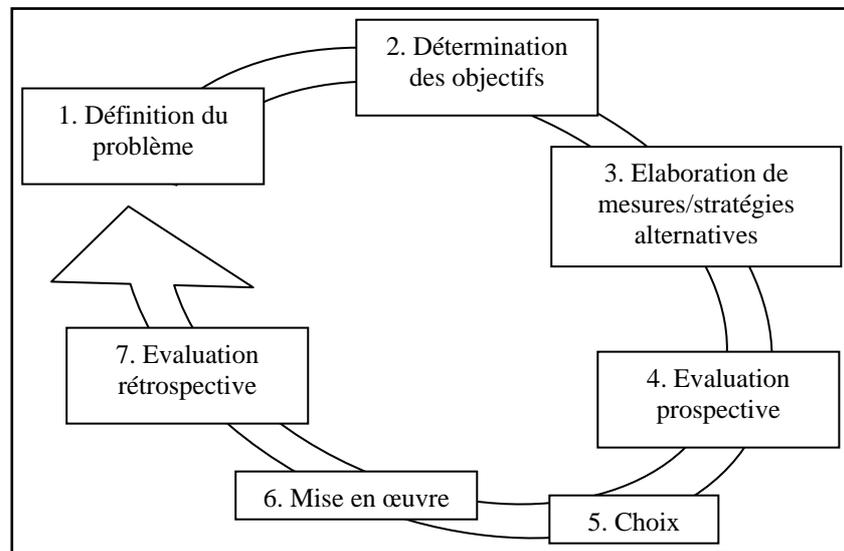


Figure 1.5 – Schématisation des étapes du cadre de gestion

Pour présenter le travail effectué au cours de cette recherche, la structure de présentation suivante a été retenue. Dans un premier temps, les chapitres préliminaires s’attachent aux étapes 1 à 3 du cadre de gestion illustré à la figure 1.5. Ces chapitres traitent des aspects suivants:

- **1^{er} étape: Définition du problème**
 Cette première étape débute au chapitre 2 de ce document où un état des connaissances est présenté. Le chapitre 3 permet quant à lui de faire un diagnostic du risque existant grâce au développement d’un modèle d’estimation du risque.
- **2^{ème} étape: Détermination des objectifs de protection**
 Le chapitre 4 propose une méthode de détermination des objectifs de protection face au risque sismique pour des bâtiments existants. La notion d’objectif de protection permet de fixer le niveau d’acceptabilité [Glossaire] de la société face au risque sismique.
- **3^{ème} étape: Elaboration des mesures et des stratégies**
 Le chapitre 5 établit un catalogue des différentes mesures à disposition des décideurs pour la gestion du risque sismique. Une classification des mesures est proposée qui différencie la composante sur laquelle elles agissent; l’aléa, la vulnérabilité ou la valeur. Ces mesures sont classées dans trois catégories principales appelées, mesures de *prévention*, de *protection* et d’*intervention*. Des stratégies pour un ensemble de bâtiments sont également élaborées. Une stratégie est constituée d’un ensemble des mesures préalablement cataloguées.

Dans un second temps, le cadre de gestion est repris au chapitre 6 pour être formalisé. Les trois étapes détaillées précédemment sont alors intégrées dans ce cadre grâce à une approche systémique. Dans le même chapitre, les étapes suivantes sont présentées:

- **4^{ème} étape: *Evaluation prospective***
Afin de faire une évaluation prospective des différentes mesures ou stratégies élaborées plus en avant, des critères objectifs permettant par la suite la comparaison sont proposés. Un historique de l'évolution de la prise en compte du risque naturel par nos sociétés est également esquissé.
- **5^{ème} étape: *Choix***
Finalement, une méthode de comparaison multicritère prenant en compte la multiplicité des points de vue est proposée.

Les deux dernières étapes du processus itératif de gestion illustré à la figure 1.5, que sont la mise en œuvre et l'analyse rétrospective, ne sont pas abordées dans cette recherche.

1.6. PRINCIPAUX RÉSULTATS

1.6.1. Apports scientifiques

La recherche présentée ici balaie un champ large. Des apports scientifiques ont pu être réalisés à plusieurs moments lors des réflexions et études. Ces apports sont résumés brièvement ci-dessous:

- Un modèle de quantification du risque sismique d'un portefeuille de bâtiments, et du sinistre maximum potentiel pouvant l'affecter, est développé. Les éléments du risque entrant dans le modèle sont identifiés et détaillés. Les incertitudes et le manque de connaissances de certains de ces éléments sont mis en lumière. Les informations à recueillir lors de la réalisation d'inventaires sismiques à des fins de gestion sont également définies. Enfin, ce modèle est appliqué à une ville pilote.
- Un cadre de gestion a ensuite été élaboré en identifiant clairement les différentes étapes entrant dans le processus. Cette démarche est dès lors reproductible.
- Les différentes mesures techniques et non techniques de gestion du risque ont été identifiées et cataloguées selon une classification systématique, fonction de l'élément constitutif cible de l'équation du risque sur lequel agit la mesure.
- Une contribution supplémentaire réside dans la proposition d'une démarche permettant la détermination du niveau cible de protection. Cette démarche soupèse les principes souvent contradictoires de précaution et de proportionnalité. Elle repose sur la normalisation de deux indices exprimant les valeurs exposées (humaines et économiques) mais également la durée de vie restante et la fonction de l'ouvrage.
- Une méthode de comparaison des mesures (pour des bâtiments individuels) et des stratégies (pour un portefeuille de bâtiments) a été formalisée en identifiant les acteurs et des critères comparatifs. Cette méthode permet une comparaison aboutissant à des

choix. Elle définit le rôle respectif des principaux acteurs impliqués dans le processus décisionnel.

1.6.2. Originalité

Cette recherche tente de considérer le problème étudié dans sa globalité. La formalisation systématique du processus vise cette complétude. Dès lors, une démarche originale pour mener une analyse structurée, comblant les lacunes identifiées, est proposée. Un inventaire sismique détaillé d'une ville de taille moyenne selon une approche orientée risque met en évidence le bien fondé et les limites de la politique actuelle de gestion du risque sismique et propose des améliorations.

1.6.3. Contributions pratiques

Les étapes permettant de mener une évaluation sismique de bâtiments existants sont ici fixées clairement. L'analyse intègre la dimension du risque et va au-delà des pures considérations normatives puisque les principes de proportionnalité et de précaution sont également introduits. L'application à des cas concrets de bâtiments du cadre formalisé peut déboucher sur l'élaboration de recommandations pour la prise en compte de l'aléa sismique. Cette démarche est évidemment reproductible.

La définition claire d'un modèle d'estimation du risque sismique a permis de proposer une solution aux faiblesses constatées des approches statistiques classiques. Ce type d'approches, appliquées habituellement par les assureurs pour déterminer le niveau de primes de risque ou encore le sinistre maximum potentiel, n'est pas adapté aux dangers ayant une très faible probabilité de survenance, telle qu'observée pour l'aléa sismique.

Le cadre ici formalisé permet de mener une négociation entre acteurs sur la meilleure politique à mettre en place pour une population de bâtiments tout en distinguant les éléments objectifs des éléments subjectifs.

La recherche permet aux institutions étatiques de mieux se positionner quant au rôle qu'elles entendent jouer dans la gestion de cette problématique. Elle leur fournit des outils qui permettent une meilleure connaissance des actions pouvant être entreprises et d'argumenter des choix de politique publique.

Enfin, le contexte réglementaire helvétique est passé en revue, ce qui contribue à une clarification de la problématique pour la Suisse.

2 ETAT DES CONNAISSANCES DES ÉLÉMENTS DE GÉNIE PARASISMIQUE

Ce chapitre s'insère dans la 1^{ère} étape du cadre de gestion proposé à la figure 1.5. qui vise à définir le problème étudié. Un aperçu de l'état des connaissances des éléments de génie parasismique auxquels ce travail fait référence est ainsi donné.

2.1. LE RISQUE SISMIQUE

2.1.1. Les événements historiques en Suisse

De par les mouvements tectoniques, la plaque africaine et plus particulièrement la plaque adriatique pousse en direction du Nord contre la plaque eurasiennne. Cette collision provoque des mouvements brusques le long des anciennes cassures de la croûte terrestre (failles). Ces mouvements sont responsables de la majorité des tremblements de terre que nous rencontrons dans notre pays.

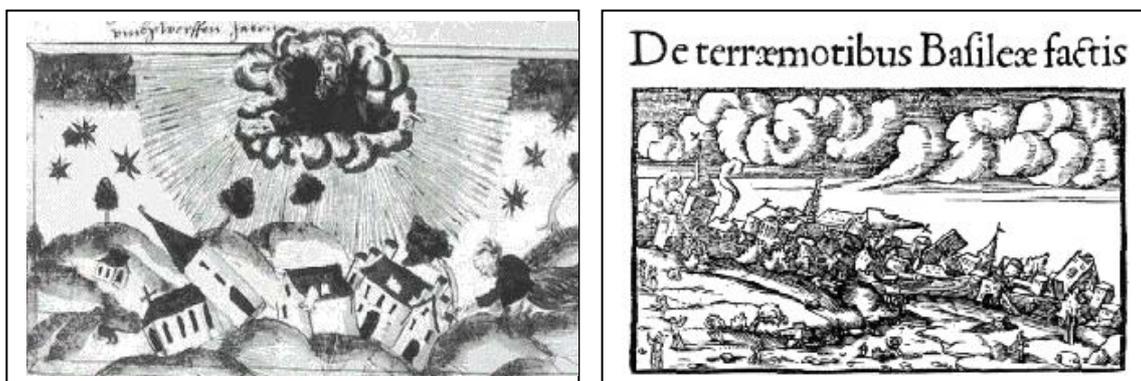


Figure 2.1 – Gravures du séisme de Lausanne de 1584 [Delacrétaz 1982] et du séisme de Bâle de 1356 [Wurstisen 1978]

Le tableau 2.1 ci-après, recueille les principaux *événements* [Glossaire] historiques contemporains qui ont eu lieu en Suisse et qui ont, comme par exemple à Bâle au XIV^{ème} siècle, marqué leur époque. Il fournit également une estimation des pertes immobilières et humaines qui seraient provoquées par certains de ces séismes s'ils se reproduisaient aujourd'hui. Ces valeurs sont tirées d'une étude du Pool suisse des assurances pour la couverture contre les tremblements de terre [Schaad 1988] et de [Kozák 1991].

Les études précitées ne prennent en compte que les *dommages* [Glossaire] immobiliers et le nombre de morts. D'autres dommages (pertes de production, dommages environnementaux,...) n'ont pas été examinés. Cependant, on évalue actuellement ces dommages, sur la base de l'expérience d'autres séismes importants récents, à l'aide d'un

facteur multiplicateur λ . Par exemple, le facteur λ estimé suite au séisme qui s'est produit en Ombrie en 1997 est d'environ 0.4 [Wenk 1997]. Ces dommages peuvent néanmoins atteindre plusieurs fois les dommages immobiliers. Les conséquences sociales, survenant à la suite d'un événement catastrophique, ne sont également pas prises en compte, bien que pouvant être extrêmement importantes.

Ces estimations de dégâts doivent être considérées avec prudence étant donné les incertitudes qui y sont attachées. Elles montrent néanmoins que le risque sismique en Suisse ne peut pas être occulté. L'importance considérable de ce risque a poussé à l'envisager dans le cadre d'une politique nationale de gestion des risques naturels [Giardini 1999] [OFEG 2001].

Siècle	Date	Lieu	Intensité [MSK]	Dommages immobiliers [milliards Frs] ⁽¹⁾	Perte de vie humaine ⁽¹⁾
20 ^{ème}	1971	Glaris	VII	0.03 – 0.16	-
	1946	Rawyl	VIII	Eboulements, dommages au barrage 0.43 – 1.90	20 – 40
19 ^{ème}	1881	Bern	VII	0.28 – 1.25	30 – 50
	1855	Vallée de la Viège	VIII-IX	0.58 – 8.72	200 – 400
18 ^{ème}	1774	Altdorf	VIII	0.45 – 3.10	-
17 ^{ème}	1601	Lucerne	VIII-IX	0.76 – 8.95	-
16 ^{ème}	1584 [Delacrétaz 1982]	Lausanne	VII	Dommages légers	aucun
14 ^{ème}	1356	Bâle	IX	13.10 – 47.10	1000 – 2000
6 ^{ème}	563 [Beres 2000]	Chablais valaisan	-	Villages détruits, éboulements, nombreux morts	

⁽¹⁾ Estimation en cas de survenance aujourd'hui d'un séisme identique

Tableau 2.1 – Principaux séismes historiques de Suisse

A des fins de comparaison, on peut relever qu'un séisme de l'ampleur de celui survenu en Ombrie, région du Nord de l'Italie, en septembre 1997 (Magnitude 5.5, Intensité MSK VIII) peut se produire dans la région où se situe la ville ayant servi de support pratique à cette étude, à savoir Aigle. Le séisme d'Ombrie est survenu dans une région à l'urbanisation comparable à celle rencontrée dans notre pays. Il est donc pertinent de relever qu'il a fait 11 morts, 126 blessés et 23'000 sans-abris. Des dommages, pour la plupart légers, ont été constatés sur 90'000 bâtiments, principalement des vieux édifices. Des bâtiments historiques importants ont été irrémédiablement endommagés, comme la basilique d'Assise. Des infrastructures ont aussi été affectées, comme les réseaux électriques, routier ou ferroviaire. Le total des pertes économiques consécutives est estimé à plus de deux milliards de francs. De cette somme, seul environ 5% étaient couverts par une assurance [Wenk 1997].

2.1.2. Tendances

Actuellement, une tendance claire à l'augmentation des pertes liées aux dangers naturels en général et aux tremblements de terre en particulier est observée de par le monde. Cette évolution s'explique principalement par la croissance constante du parc d'ouvrages menacés et par l'augmentation importante de la valeur exposée au risque. De plus, la vulnérabilité des systèmes exposés ne baisse pas ou que très lentement.

En effet, la concentration de valeurs dans des zones à forte probabilité d'occurrence de séismes pouvant provoquer des dommages entraîne une augmentation du risque selon les termes classiques de son équation (1.1). Dans le même temps, la vulnérabilité d'ensemble du patrimoine bâti ne baisse pratiquement pas, du fait principalement du faible taux de remplacement des immeubles et des infrastructures de l'environnement bâti. De plus, cet état de fait est encore aggravé par le non-respect fréquent des dispositions parasismiques lors de la construction de nouveaux ouvrages.

2.2. L'ALÉA SISMIQUE

2.2.1. L'aléa régional

La Suisse est soumise, en comparaison internationale, à un aléa modéré à faible. Certaines régions, comme le canton du Valais ou la région bâloise, sont néanmoins sujettes à des tremblements de terre pouvant provoquer des dégâts importants de manière plus fréquente.

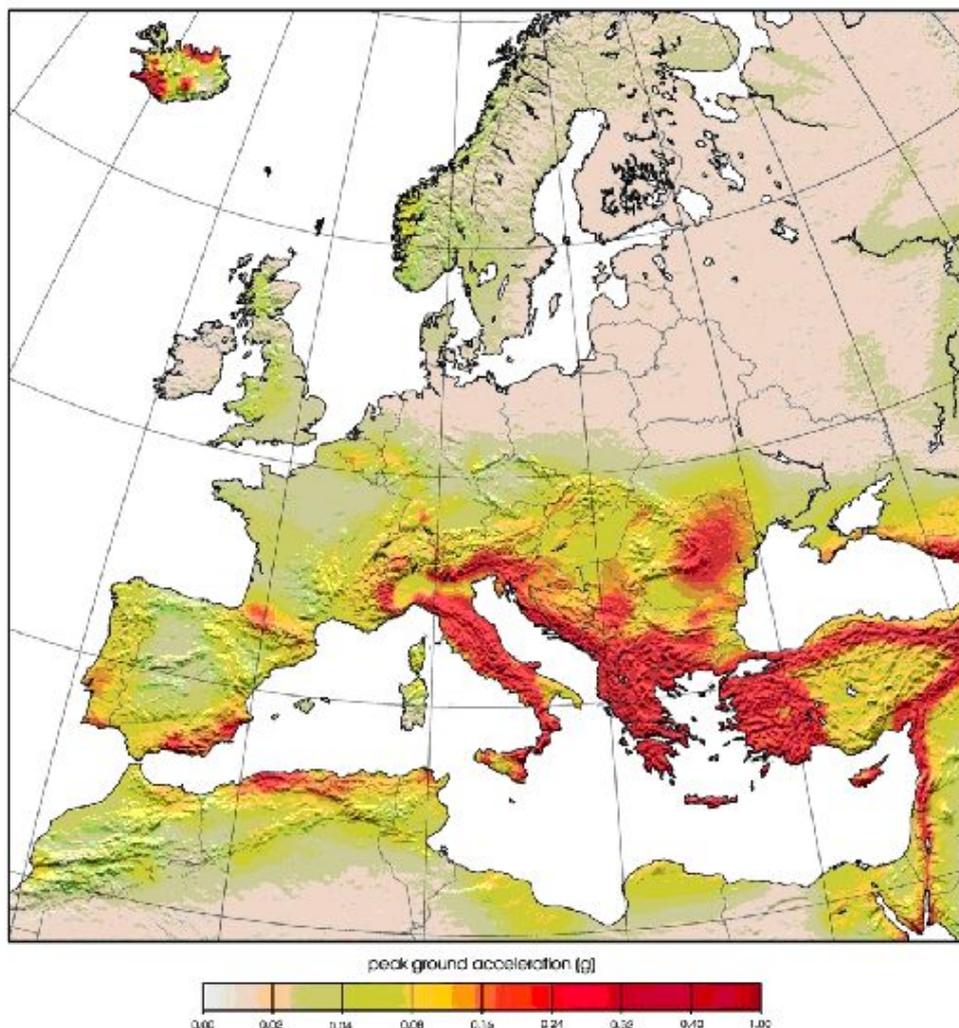


Figure 2.2 – Carte des pics d'accélération maximale (Avec une probabilité de non excédance de 90% sur 50 ans) [Jimenez, 2003]

Les données historiques nous apprennent que la Suisse est soumise à de très nombreux séismes. Environ 100 séismes de magnitude 4 ou supérieure se sont produits lors des cent dernières années. Cela signifie statistiquement qu'un événement sismique clairement ressenti par la population a lieu en moyenne chaque année. De ces secousses, 10 ont atteint une magnitude de 5, soit en moyenne un événement sismique causant des dégâts au patrimoine immobilier tous les 10 ans. En outre, un événement sismique de magnitude 6, ou d'intensité maximale VII, a eu lieu, soit un séisme provoquant des dégâts importants durant le siècle écoulé [Weidmann 2002]. Un séisme d'une intensité de IX est survenu en 1356 à Bâle et peut se reproduire [Giardini 1999]. Ce type d'événement est habituellement considéré comme le séisme maximum pouvant survenir en Suisse. La probabilité d'occurrence des différentes intensités de tremblement de terre s'obtient en se basant sur les connaissances historiques et géologiques.

Une étude récente [Rüttener 1995] aborde l'évaluation de l'aléa sismique en tenant compte des incertitudes sur les données. C'est cette étude qui a été retenue comme source principale pour l'établissement des caractéristiques d'aléa. L'auteur utilise une technique d'estimation bayésienne dans laquelle les estimations a priori des paramètres de l'aléa sont corrigées à l'aide des données observées. Il est important ici de préciser que la période d'observation, d'au maximum 700 ans pour les séismes d'intensité IX, est très courte à l'échelle géologique terrestre, particulièrement pour les séismes importants.

Depuis, la carte d'aléa suisse a fait l'objet d'une mise à jour complète sous l'impulsion du Prof. Dr Domenico Giardini du Service Sismologique Suisse (SED). Cette carte d'aléa est accessible actuellement directement sur l'Internet [<http://seismo.ethz.ch>]. Sans entrer dans le détail, elle est basée sur des notions de sismologie tectonique, de recoupements par sismologie historique et sur les enregistrements disponibles de séismes historiques.

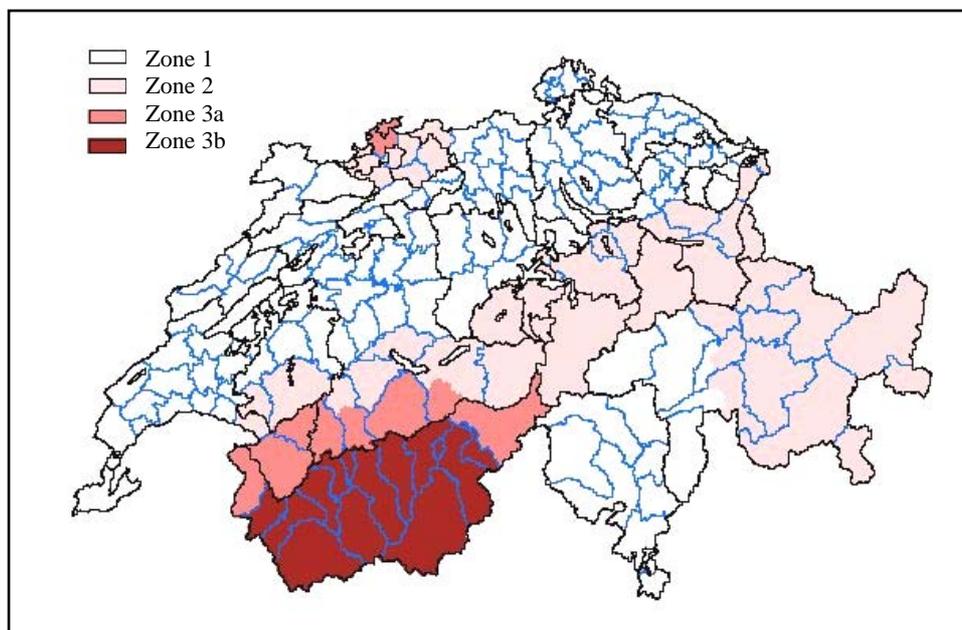


Figure 2.3 – Zones d'aléa sismique, tirées de [Wenk 2003]

La qualité et la précision des informations relatives aux événements sismiques augmentent au cours du temps. Seules des informations descriptives sur les événements importants sont disponibles pour les périodes plus anciennes, alors que de plus en plus d'informations pour des séismes de plus en plus faibles sont disponibles de nos jours. Par contre, comme déjà dit précédemment, la période d'observation est relativement courte à l'échelle géologique. Ce manque d'observations d'événements sismiques importants implique une extrapolation des courbes d'aléa, obtenues à l'aide de la formulation classique de Gutenberg-Richter [Güttenberg 1944]. La magnitude maximale physiquement admise pour la Suisse est usuellement fixée à environ 7.

En terme d'implications normatives, la Suisse est ainsi divisée en quatre zones d'aléa sismique distinctes présentées à la figure 2.3 et qu'on retrouve à l'annexe F de la norme helvétique actuelle [SIA261 2003].

2.2.2. Courbes d'atténuation

Les séismes affectent de très grandes surfaces. Les dégâts peuvent s'étendre dans un rayon de plusieurs dizaines de kilomètres. L'énergie des ondes sismiques est dissipée par des ondes élastiques dans le sol. Cette dissipation est exprimée par des courbes d'atténuation dont l'allure caractéristique est illustrée à la figure 2.4. Pour la Suisse, de telles courbes sont exposées dans [Bay 2002].

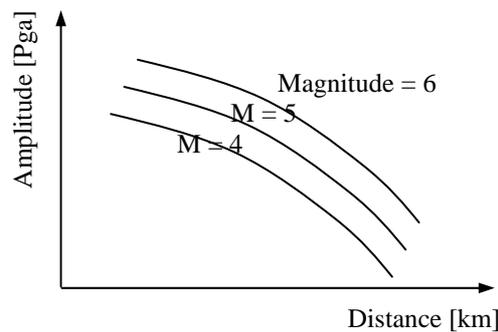


Figure 2.4 – Allure type de courbes d'atténuation

2.2.3. L'aléa local

Les conditions géologiques locales peuvent avoir une influence déterminante sur l'amplification des ondes sismiques. L'effet de site d'une région étudiée peut mieux s'envisager au travers d'un microzonage conduit par exemple à l'aide d'une méthode de détermination expérimentale des fréquences propres in situ [Widmer 2002]. Le microzonage sismique a pour but la quantification locale des effets de site. Il est réalisé en quatre étapes.

- Zonage indicatif

Un microzonage indicatif de la région d'étude est conçu par le biais de la transcription de la légende géologique de la carte existante en classes de sols de fondation définies par la nouvelle norme SIA 261 [SIA261 2003]. Cette carte indicative permet de mettre

rapidement en évidence les zones au comportement potentiellement défavorable en cas de séisme (effets de site).

- Détermination du spectre H/V avec la méthode Nakamura

On détermine le spectre H/V par la méthode de Nakamura [Nakamura 2000]. Cette méthode est basée sur l'étude du rapport de la composante horizontale (H) sur la composante verticale (V) du mouvement du sol engendré par le bruit de fond sismique (« rapport H/V »). Elle est utilisée pour évaluer les fréquences propres de plusieurs points représentatifs d'acquisition. L'efficacité de la méthode a été reconnue par des études récentes, par exemple [Fäh 2001], mais son aptitude à déterminer le facteur d'amplification du sol reste encore à démontrer. Cette méthode a néanmoins été retenue pour notre étude pilote.

- Approximation de l'amplification du signal sismique

On obtient lors de cette étape une bonne approximation de l'amplification de l'accélération horizontale maximale du sol. Cette approximation permet de fournir un spectre de réponse élastique propre au site étudié qui peut par la suite être comparé aux spectres de réponse recommandés par les normes dans les conditions rencontrées. En procédant au rapport du spectre de réponse calculé en surface sur le spectre calculé au rocher, d'après les enregistrements des séismes de référence, on estime ainsi la fonction d'amplification spécifique du site. Le spectre de réponse élastique au rocher est le spectre de référence d'un lieu, sans amplification liée aux conditions hydrogéologiques locales. Il correspond à la classe de sol A de la norme actuelle [SIA261 2003], illustrée à la figure 2.5 (réponse élastique d'un bâtiment en fonction de sa période de vibration fondamentale, exprimée en seconde).

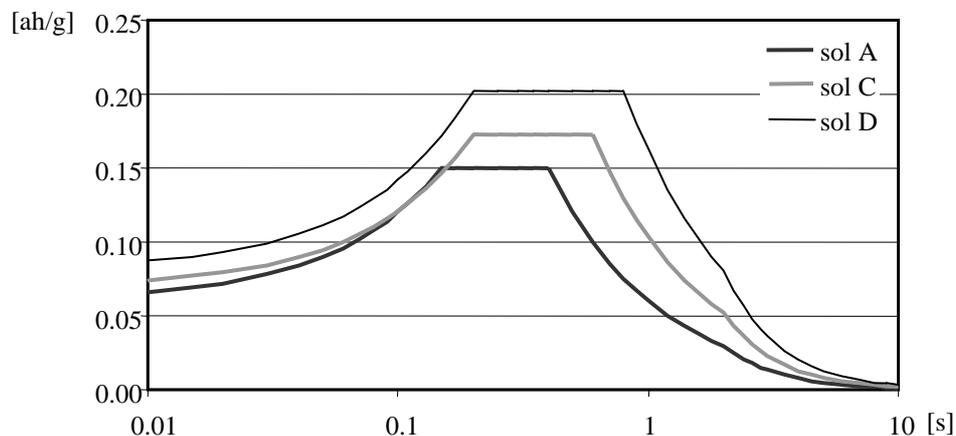


Figure 2.5 – Spectres de réponse élastique pour certaines classes de sol [SIA261 2003]

- Interprétation en terme d'augmentation d'intensité

Une interprétation permettant d'exprimer en terme d'augmentation d'intensité a été réalisée pour notre étude sur la base d'une *méthode expert* [Glossaire]. Cette méthode a permis d'esquisser cette augmentation à l'aide d'informations objectives. Elle repose sur l'expérience de séismes ayant eu lieu dans d'autres régions présentant des caractéristiques comparables et sur les connaissances hydrogéologiques [Cédra 1988], [Badoux 1960] et [NRP-20 1997].

2.3. LA VULNÉRABILITÉ

La vulnérabilité exprime la capacité de réponse d'une structure, ici d'un bâtiment, à une sollicitation sismique donnée. Elle est fonction de nombreux paramètres physiques, comme par exemple le matériau de construction utilisé, les périodes de vibration fondamentales ou encore la géométrie en plan ou en élévation de l'ouvrage. Cette vulnérabilité revêt un caractère essentiel pour le risque sismique, puisque c'est principalement cette composante de l'équation du risque que va pouvoir modifier l'ingénieur. Il est courant de différencier dans l'étude de la vulnérabilité les nouvelles constructions, pour lesquelles une modification de la structure porteuse est relativement aisée et impacte faiblement le coût, du bâti existant, qui doit être évalué en l'état et dont une modification nécessite fréquemment des interventions délicates et onéreuses.

2.3.1. Nouvelles constructions

Il s'agit de construire des bâtiments qui présentent une réponse satisfaisante pour tous les niveaux d'intensité sismique. Selon les principes du "*performance based design*" [Holmes 2000], une performance satisfaisante signifie peu ou pas de dégâts pour les séismes de faible intensité et relativement fréquents, et la garantie de la sécurité structurale pour les séismes intenses et rares. Le comportement sismique d'un bâtiment est le résultat principalement de l'interaction des vibrations du sol et du bâtiment compte tenu de sa masse, de sa rigidité et de sa résistance latérale. Les vibrations du sol résultent de la combinaison de la sismicité et du sol de fondation. Si un certain niveau d'accélération du sol est dépassé, le comportement du bâtiment devient inélastique et la rigidité latérale diminue. Si la ductilité de la structure porteuse est petite, la résistance latérale peut se dégrader rapidement. La sécurité structurale n'est dès lors plus assurée.

Des méthodes de construction basées sur des connaissances modernes sont actuellement mises à disposition des ingénieurs praticiens. Un effort important est actuellement en cours en Suisse [SIA-Vs 2003] [SIAD0191 2003] pour former les ingénieurs aux techniques de dimensionnement exploitant la ductilité des ouvrages et permettant ainsi de dissiper l'énergie du séisme dans le bâtiment de manière plastique. Ce mode de dimensionnement implique de grandes déformations dans les zones plastiques et donc un remplacement ou une rénovation de ces zones après un événement majeur. Ces zones ductiles se comportent comme des fusibles pour un système électrique.

2.3.2. Bâti existant

La vulnérabilité sismique du patrimoine bâti existant, en particulier des bâtiments construits en Suisse avant l'introduction de prescriptions parasismiques modernes dans les normes de construction en 1989, est centrale pour l'évaluation du risque. Cette vulnérabilité est encore mal connue et difficile à quantifier [Badoux 1999]. En l'absence de séismes importants et donc révélateurs, l'évaluation réaliste de la vulnérabilité d'un bâti existant aussi diversifié que celui de la Suisse est une tâche difficile qui requiert un vaste effort de recherche. Les études conduites à ce jour ne permettent qu'une estimation limitée de la vulnérabilité effective du bâti existant. Des projets d'évaluation sur des bâtiments types doivent donc se poursuivre afin de mieux la quantifier et d'identifier les types de bâtiments existants les plus vulnérables. Deux principaux types de vulnérabilité peuvent être identifiés, avec des conséquences très différentes selon les valeurs considérées (humaine ou économique).

- Le premier type de vulnérabilité est celui des bâtiments qui ne satisfont pas les exigences de la sécurité structurale pour le séisme de référence (état limite d’effondrement). Il s’agit donc de bâtiments qui représentent une menace de perte de vies humaines dans le cas d’un séisme important. Bien que cette menace concerne théoriquement 90% du bâti existant n’ayant pas été conçu et dimensionné explicitement selon les règles de l’art du génie parasismique, il semble que la grande majorité des bâtiments en béton armé ont une « résistance sismique par défaut » adéquate pour prévenir un effondrement pour le séisme de référence des normes en vigueur pour leur région [Badoux 2000a]. Cependant, il existe un nombre significatif de bâtiments pour lesquels un effondrement est probable lors d’un séisme de forte intensité. A titre d’exemple, on dénombre environ 12% des bâtiments de la ville d’Aigle présentant des degrés de dommages correspondant à un effondrement partiel ou total en cas de survenance d’un séisme d’intensité VIII. Cette proportion est illustrée à la figure B5 de l’annexe B [Population de bâtiments – Ville d’Aigle].
- Le second type de vulnérabilité est lié à la non-satisfaction des exigences des états limites d’aptitude au service tels que l’état limite de fonctionnement ou l’état limite d’endommagement. De nombreux bâtiments existants suisses sont vraisemblablement vulnérables selon ces critères. Mais au vu du coût des opérations de renforcement, ce critère d’aptitude au service ne devrait être considéré que pour une catégorie restreinte de bâtiments particuliers. Ces derniers incluent l’infrastructure du réseau vital ou *LIFELINE* [Glossaire]: hôpitaux, casernes de pompier, bâtiments de police, centres de télécommunication, systèmes de transports, etc., les installations dangereuses (industrie chimique ou installations nucléaires par exemple) et les constructions appartenant à la richesse patrimoniale et historique d’un pays.

Il faut encore remarquer ici que les normes actuelles ont été développées pour la conception et le dimensionnement de nouvelles structures. Dans une nouvelle structure, de bonnes performances parasismiques peuvent être réalisées facilement et à bas coûts. Les normes peuvent donc proposer des approches qui produisent des réserves de performance ("approches conservatrices"). La situation est différente dans le cas des structures existantes. Vu les coûts généralement très élevés des renforcements, il est souhaitable de connaître le plus exactement possible la performance d’une structure afin d’intervenir judicieusement [Brühwiler 2002a]. Par conséquent, les analyses les plus réalistes possibles pour une évaluation parasismique ne doivent pas se faire uniquement sur la base des séismes de référence et des critères d’acceptabilités définis par la norme en vigueur. Le « *Performance Based Engineering* » propose une approche mieux adaptée à la problématique de l’évaluation sismique.

2.4. OUTILS ET MÉTHODES DE CALCUL

Les ingénieurs ont à disposition de nombreuses méthodes de calcul pour dimensionner une nouvelle construction ou évaluer un bâtiment existant pour la situation de projet considérant le séisme. L’expérience montre que pour des nouvelles constructions, des méthodes simples permettent sans surcoût notable de dimensionner avec des réserves de performance. Par contre, pour des constructions existantes, il peut être utile d’étudier les structures plus en détail pour ainsi, éventuellement, éviter une intervention constructive, onéreuse et très souvent disproportionnée.

Élément investigué	Méthode usuelle	Méthode approfondie
Aléa régional	Carte d'aléa sismique de la norme SIA 261 ⁽¹⁾	Détermination de l'aléa régional auprès du SED ⁽²⁾
Aléa local	Carte indicative de micro-zonage au 1:25'000 ⁽³⁾ [OFEG 2003]	Micro-zonage spectral par mesure in situ
Détermination des périodes de vibration fondamentale	Formule simplifiée proposée par la norme SIA 261 ⁽⁴⁾	- Méthode du Quotient de Rayleigh [Lestuzzi 2002] - Modèle dynamique par éléments finis
Détermination des sollicitations	Méthode des forces de remplacement	- Méthode du spectre de réponse - Analyse temporelle non-linéaire - Spectre de capacité
Résistance de la construction	Méthode basée sur les forces	Méthode basée sur les déformations [Peter 2000] [Lang 2002]
Technique de dimensionnement	Dimensionnement conventionnel	Dimensionnement en capacité
Valeur exposée	Formulaire simplifié [OFEG 2002]	Etude individuelle détaillée

⁽¹⁾ [SIA261 2003] Annexe F, p. 109

⁽²⁾ [<http://www.seismo.ethz.ch>]

⁽³⁾ [SIA261 2003] Classes de sol de fondation, tableau 25, p. 60

⁽⁴⁾ [SIA261 2003] équation 38, p. 65

Tableau. 2.2 – Principaux outils et méthodes de calcul entrant dans le dimensionnement ou l'évaluation sismique

Le tableau 2.2 passe en revue, sans être exhaustif, les possibilités que l'ingénieur peut exploiter. Des gains importants peuvent être obtenus lors de la mise en œuvre de ces méthodes approfondies. De plus, les prescriptions normatives helvétiques permettent d'y avoir recours. Une bonne connaissance de ces techniques est cependant nécessaire pour appliquer des méthodes en dérogation. Elles nécessitent l'exploitation de compétences pouvant impliquer un surcoût mais qui sont valorisées avec un fort effet de levier. A titre d'exemple, le tableau 2.3 détaille les méthodes d'analyse sismique à disposition de l'ingénieur pour évaluer la résistance d'une construction.

Méthode	Modèle structural	Prise en compte du comportement non-linéaire	Détermination des forces extérieures sismiques et des efforts internes
Linéaire statique	Elastique (linéaire)	Estimation globale	Estimation des forces extérieures sismiques, calcul linéaire des efforts structuraux internes
Linéaire dynamique			Forces extérieures estimées sur la base des modes de fréquence, calcul des efforts internes par une intégration incrémentale
Non-linéaire statique	Non-linéaire	Inclus dans le modèle	Forces extérieures estimées sur la base des modes de fréquence, calcul des efforts internes par une intégration incrémentale sous des forces croissantes monotones
Non-linéaire dynamique			Intégration incrémentale des efforts extérieurs et des efforts internes

Tableau. 2.3 – Méthodes d'analyse sismique

2.5. SYNTHÈSE

Les différents éléments de génie parasismique présentés dans ce chapitre nécessitent encore des efforts de recherche importants. Ces éléments ont une influence différente sur le risque total et peuvent donc être priorisés relativement à leur impact sur le risque.

Des moyens modernes et une bonne connaissance permettent d'exploiter les informations relatives à l'aléa régional. La nécessité de connaître plus précisément l'influence des conditions locales sur l'aléa a néanmoins été mise en évidence.

Plus de 9 bâtiments sur 10 ont été construits avant l'introduction, en 1989, de prescriptions parasismiques efficaces dans les normes suisses. Dans la mesure où les normes en vigueur sont respectées, c'est principalement la vulnérabilité sismique du bâti construit avant 1989 qui détermine le risque sismique en Suisse. Un besoin de connaissance accrue du comportement des structures en maçonnerie et en béton faiblement armé, qui composent l'essentiel du patrimoine bâti helvétique, est donc essentiel.

Ces aspects, bien que prioritaires, ne doivent cependant pas occulter les autres aspects entrant dans le processus d'estimation du risque sismique, comme par exemple les méthodes d'analyse du comportement des bâtiments existants. De même, les mesures de gestion du risque nécessitent également un approfondissement quant à leur efficacité et à leurs difficultés de mise en œuvre. Ces aspects sont également essentiels pour une saine gestion du risque. Dès lors que de nombreux domaines de recherche restent inexplorés, leurs développements vont permettre dans le futur d'améliorer la qualité de l'estimation du risque sismique et donc d'améliorer sa gestion.

3 MODÈLE D'ESTIMATION DU RISQUE SISMIQUE

Toujours pour définir le problème étudié, qui correspond à la première étape du cadre de gestion énoncé comme thèse centrale illustrée à la figure 1.5, ce chapitre fournit un modèle permettant d'estimer le risque sismique d'un portefeuille de bâtiments. Ce paragraphe passe en revue les considérants et les aboutissants de ce modèle.

3.1. BASES DU MODÈLE

3.1.1. De la dimension individuelle à la dimension plurielle

Un des défis majeurs rencontré dans la gestion du risque sismique est de passer de la dimension individuelle à la dimension plurielle, c'est-à-dire d'un bâtiment à un grand nombre de bâtiments. En effet, ce passage nécessite l'implication de nombreux acteurs supplémentaires, ce qui augmente la complexité. Cependant, un modèle permettant d'estimer le risque est essentiel à bien des acteurs. On pense par exemple aux autorités étatiques, à un gestionnaire de portefeuille immobilier ou encore à une institution de crédit hypothécaire. Ce chapitre présente le modèle utilisé dans cette recherche [Pellissier 2002b] qui postule du caractère central des objectifs des acteurs. Ce modèle a été mis en œuvre dans le cadre d'un projet pilote d'une petite ville des Alpes helvétiques. Ce projet-pilote est présenté à l'annexe B [Population de bâtiments]. Il a permis d'identifier les faiblesses des méthodes actuelles et les pistes de recherche pour améliorer la qualité de l'estimation. Les enseignements généraux tirés de cette mise en application sont finalement présentés.

3.1.2. Les modèles existants

Pour estimer le risque sismique affectant un portefeuille de bâtiments deux approches différentes sont usuellement utilisées. La distinction principale entre ces deux approches porte sur l'utilisation de la magnitude ou de l'intensité pour définir l'aléa et sur la génération de courbes de vulnérabilité.

Région	Importance	Zone sismique PGA ₄₇₅ ⁽¹⁾	Microzonage effectué	Classes de vulnérabilité	Prime de risque ⁽²⁾
Bâle ville	166'000 habitants 18'500 bâtiments	3a/0.13 g	Non	unique	0.33 ‰
Sion	28'000 habitants 4'200 bâtiments	3b/0.16 g	Non	unique	0.45 ‰
Stans [R&S 2000]	6'700 habitants 1'400 bâtiments	2/0.10 g	Oui	5 classes	0.80 ‰
Aigle [Pellissier 2003a]	7'500 habitants 1'500 bâtiments	3a/0.13 g	Oui	5 classes	0.28 ‰

⁽¹⁾ PGA pour le séisme de dimensionnement d'une période de retour de 475 ans

⁽²⁾ en Frs. par année

Tableau 3.1 – Primes de risque pour les dommages immobiliers de diverses études
(en grisé, les résultats obtenus pour le projet-pilote présenté en annexe)

Le développement du logiciel Hazus[®] [FEMA 1999] qui se base sur des modèles analytiques pour définir la *matrice de probabilité de dommages* (abrégé ci-après par DPM) [Glossaire] procède d'une de ces approches. La méthode utilisée pour ce logiciel définit l'aléa en terme d'accélération spectrale, de vitesse et de déplacement ainsi que la vulnérabilité à l'aide de fonctions basées sur les déplacements.

L'autre alternative principale est basée sur l'échelle macrosismique européenne [EMS98 1998]. Elle définit l'aléa en terme d'intensité EMS et la vulnérabilité comme des fonctions liées à ce paramètre.

Le modèle proposé dans cette recherche est du deuxième type et se réfère donc à l'intensité EMS. Les DPM sont basées sur l'analyse statistique des observations des dommages dus aux séismes passés. Les deux modèles ont leurs intérêts respectifs et aucun n'a montré de supériorité évidente. De nombreuses études récentes mettent en œuvre ces deux types d'approches.

Le tableau 3.1 fournit les principaux résultats d'études récentes consacrées à la Suisse. Elles conduisent à des niveaux de primes de risque d'un ordre de grandeur similaire [Duvernay 2004]. Au niveau international on peut relever un effort important dans ce domaine. A titre d'exemple, sans être exhaustif, le lecteur trouvera les résultats d'applications dans les publications récentes suivantes: [Carvalho 2002], [Campos 2002], [Deodatis 2001], [Fäh 2001], [Kappos 2002], [Lungu 2002], [Nordenson 2000], [Schwartz 2002], [Risk-UE 2004].

3.1.3. Méthodologie utilisée

Les éléments constitutifs du modèle d'estimation du risque sismique utilisé ici pour un portefeuille de bâtiments sont fixés dans ce paragraphe. La méthodologie en 5 phases est décrite ci-dessous et illustrée schématiquement à la figure 3.1.

1. La première phase consiste à déterminer la sismicité régionale par identification des caractéristiques (intensité et période de retour) des séismes susceptibles de causer des dommages.
2. A partir d'un modèle géotechnique sommaire, la deuxième phase fournit un microzonage rapide, validé par interviews. Les courbes d'atténuation permettent de prendre en considération l'éloignement de l'épicentre. Une estimation de l'effet de site basée sur des mesures in situ peut, le cas échéant, compléter cette phase.
3. Lors de la troisième phase, la vulnérabilité du bâti et les dommages prévisibles sur l'ensemble de la ville sont évalués. Un inventaire par catégorisation des bâtiments en classes de vulnérabilité ainsi que leur répartition permet de les positionner par zone géographique sur l'ensemble de la région étudiée [Brennet 2001]. Une courbe de vulnérabilité est affectée à chaque catégorie de bâtiments (taux de dommages en fonction de l'intensité des séismes) puis à l'ensemble du bâti de la ville.
4. Le calcul des pertes potentielles est effectué dans cette quatrième phase par analyse des éléments exposés au risque portant sur la population et sur les valeurs assurées. Il est possible d'affecter des courbes d'endommagement selon les dommages constatés aux bâtiments à la phase précédente (taux et gravité des pertes humaines, ou

pourcentage de perte de la valeur (mobilière ou immobilière) assurée, en fonction du niveau de dommages des bâtiments). Les scénarii de pertes par valeurs considérées sont ainsi déterminés en fonction de divers événements sismiques (intensités et périodes de retour différentes). Le *sinistre maximum potentiel* (abrégié par SMP) [Glossaire] est également déterminé à ce stade.

- En dernière phase, le risque total est finalement déterminé par couplage des différents éléments énoncés ci-dessus. C'est donc un modèle déterministe de paramètres qui sont pour certains probabilistes. Principalement, l'aléa et la vulnérabilité revêtent ce caractère probabiliste et possèdent une fonction de répartition à déterminer. La valeur, tant humaine qu'économique, a été considérée ici par hypothèse simplificatrice acceptable comme déterministe.

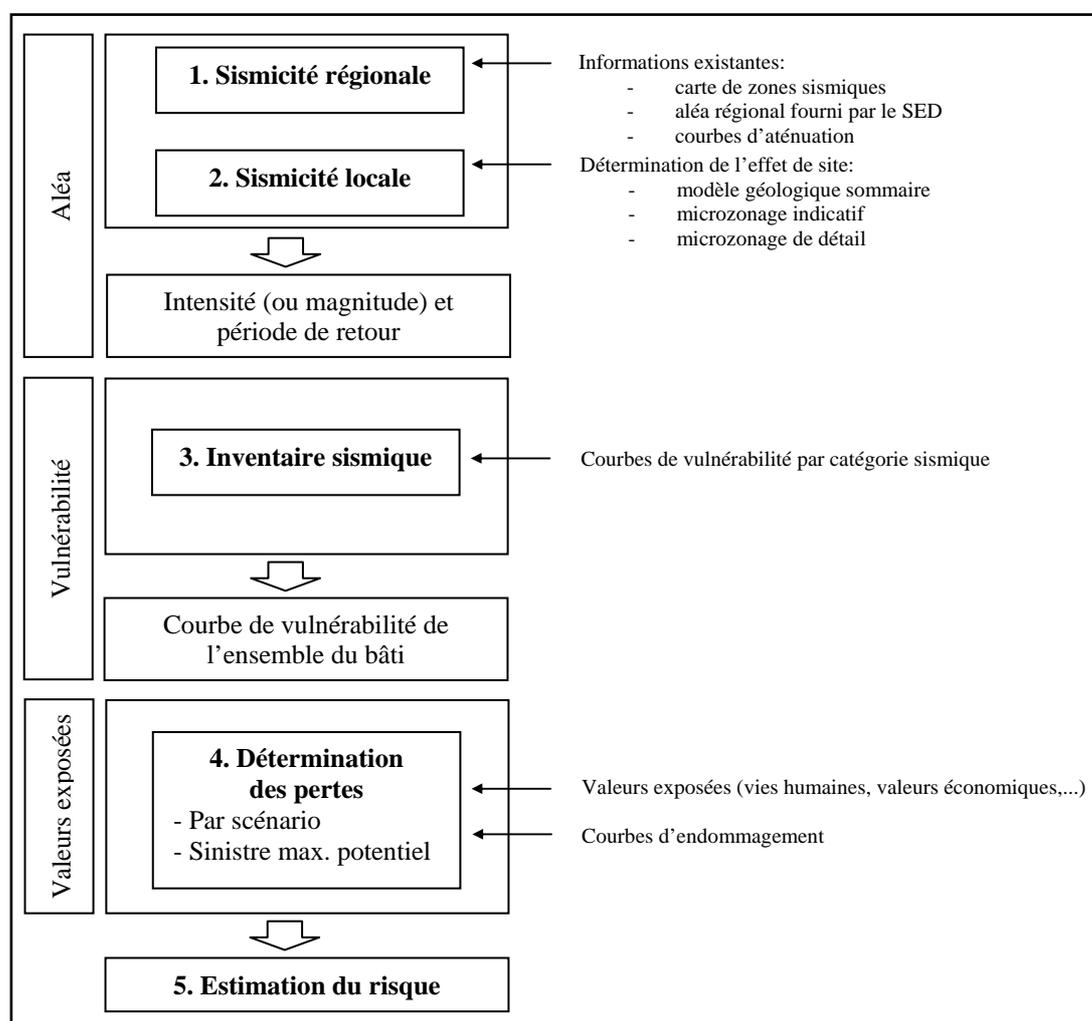


Figure 3.1 – Méthodologie d'estimation du risque

Ces différents points peuvent être intégrés dans un logiciel informatique permettant un géoréférencement. De nombreux exemples basés sur cette technologie se trouvent dans la littérature, comme par exemple [Kiremidjian 1998] ou [Risk-UE 2004]. Ce type d'outil donne des indications précieuses pour la gestion du risque par exemple pour l'organisation des secours.

3.2. ELÉMENTS PHYSIQUES DU MODÈLE

3.2.1. Aléa sismique

Aléa régional

L'aléa régional est déterminé à l'aide des études existantes disponibles pour la région d'étude considérée. L'état actuel des connaissances est présenté de manière plus détaillée au chapitre précédent. Les courbes d'aléa régional sont par exemple disponibles actuellement par simple saisie des coordonnées géographiques pour l'ensemble du territoire helvétique.

Aléa local

Les différentes informations géologiques à disposition doivent être regroupées. Celles-ci proviennent principalement de sondages ou de campagnes de mesures in situ existants. A défaut d'information de qualité suffisante, des mesures permettant d'évaluer les effets de site locaux peuvent être envisagées. Ces mesures, selon le degré de précision requis, se font soit de manière rapide conformément à [OFEG 2003], soit plus précisément à l'aide d'un microzonage spectral.

3.2.2. Inventaire sismique

Considérations

Dans l'étude de la vulnérabilité sismique d'une grande population de bâtiments, chaque bâtiment ne peut être analysé séparément en détail. C'est pour cela qu'il est nécessaire de faire un inventaire, c'est-à-dire de considérer une approche globale, simple et statistique du comportement des bâtiments. Il existe actuellement plusieurs outils pour effectuer ce type d'inventaire. A titre d'exemple la technique proposée par [FEMA 1998a] a été adaptée pour la Suisse [OFEG 2002]. Cette technique est basée sur des paramètres structuraux et les conditions de sol rencontrées. Elle fournit une information sur la vulnérabilité du bâtiment investigué. En particulier, elle permet de dire si cette vulnérabilité est satisfaisante, si elle mérite une étude plus approfondie ou si elle n'est clairement pas satisfaisante. Cette technique permet également d'allouer un indice de risque relatif en classant les bâtiments d'un portefeuille des plus vulnérables aux moins vulnérables. Cela permet de fixer plus facilement les priorités dans les interventions à entreprendre.

La figure 3.2 illustre de manière schématique la méthodologie utilisée dans cette recherche pour l'élaboration de l'inventaire sismique. La première étape nécessite l'allocation de chaque bâtiment dans une catégorie sismique en fonction du matériau de la structure porteuse (par exemple, des bâtiments de maçonnerie moderne, des bâtiments avec murs en béton armé ou encore des bâtiments en construction métallique). Généralement, il existe, à l'intérieur d'une population de bâtiments, plusieurs types de structures et de géométries. Cette réalité complexe est simplifiée par la segmentation des bâtiments en groupes ayant des caractéristiques similaires en termes de performances sismiques. Ces catégories sismiques sont directement liées aux types de structures se retrouvant dans la population de bâtiments. Le nombre de catégories sismiques doit être choisi sur la base d'impératifs, parfois contradictoires, de simplicité et de représentativité de la grande diversité de bâtiments.

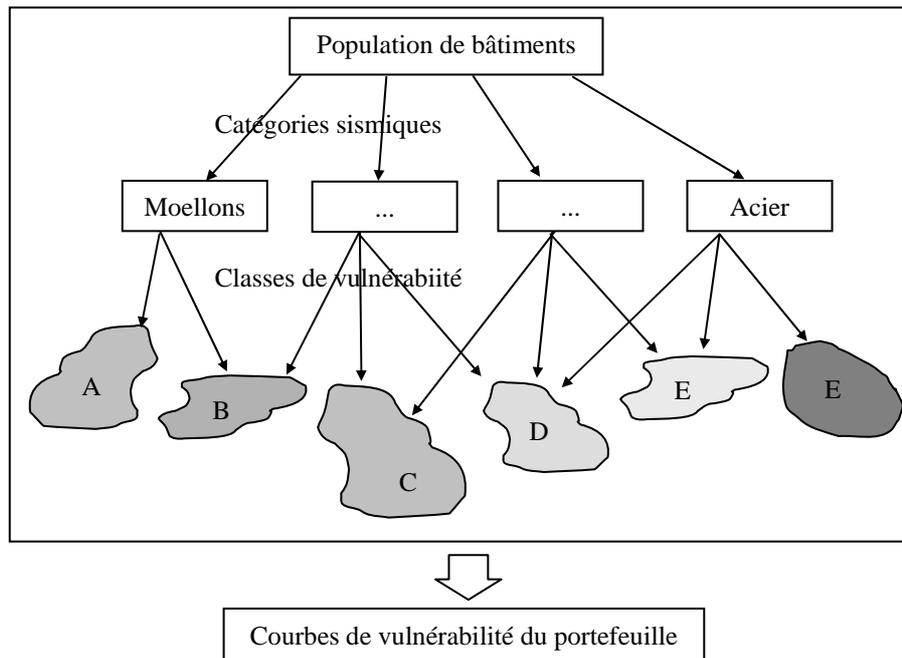


Figure 3.2 – Méthodologie pour l'inventaire sismique

La vulnérabilité de chaque catégorie sismique est quantifiée par la distribution des bâtiments dans les différentes classes de vulnérabilité. Les classes de vulnérabilité sont définies par leur courbe de vulnérabilité. Ces courbes sont basées sur les indications de l'EMS 98 [EMS98 1998], qui pour chaque intensité de séisme propose un certain taux de bâtiments subissant un certain niveau de dégâts. Les dégâts se réfèrent aux éléments structuraux et non structuraux d'un ouvrage. L'approche est statistique. Elle propose un certain pourcentage de bâtiments souffrant d'un certain niveau de dégâts. Un lien est ensuite établi entre le degré probable de dégâts et les pertes résultantes. Combiné avec les données d'aléa, cela permet une évaluation du risque sismique de la population de bâtiments.

Comme schématisé à la figure 3.2, la première étape de l'inventaire est d'assigner chaque bâtiment à une catégorie sismique (un type de structure). Cette classification est réalisée sur la base d'observations visuelles de l'extérieur des bâtiments, complétées par les données immédiatement disponibles. Chacun d'entre eux est alors individuellement placé dans une catégorie sismique. Pour cette étape, aucune démarche probabiliste n'est utilisée, chaque bâtiment a été visualisé et analysé séparément. La catégorie sismique n'est pas le seul paramètre pris en compte pour l'inventaire. La première différenciation faite est la zone géographique dans laquelle se trouve le bâtiment. Les plans cadastraux des villes proposent fréquemment une division de celles-ci en plusieurs zones. On distingue généralement les différents quartiers du centre ville des zones résidentielles ou encore des zones industrielles ou agricoles. Cette zonification des bâtiments s'avère très utile lors de l'évaluation des dommages directs et indirects. En plus de la catégorie sismique et de la zone, le nombre d'étages et l'affectation (habitation, commerce, industrie, publique et agricole) sont aussi collectés pour chaque bâtiment.

Les catégories sismiques utilisées correspondent approximativement aux types de construction. Elles sont largement basées sur celles proposées dans l'EMS 98 [EMS98 1998]

et dans [Risk-UE 2004] et ont été adaptées pour la population de bâtiments de villes helvétiques. Elles sont énoncées ci-dessous:

- Bâtiments en maçonnerie traditionnelle (moellons et autres),
- Bâtiments en maçonnerie traditionnelle (pierres taillées),
- Bâtiments en maçonnerie moderne,
- Bâtiments avec cadres en béton armé,
- Bâtiments en construction métallique (acier),
- Bâtiments en bois,
- Bâtiments avec murs en béton armé.

L'EMS 98 [EMS98 1998] propose des exemples de bâtiments pour chaque catégorie sismique. Les bâtiments en maçonnerie traditionnelle (par exemple le bâtiment illustré à la figure 3.3) représentent fréquemment, dans les petites villes européennes, la catégorie sismique la plus représentée. Cette constatation est très importante d'un point de vue sismique étant donné que les séismes ont montré à maintes reprises que ces bâtiments ont tendance à être très vulnérables.

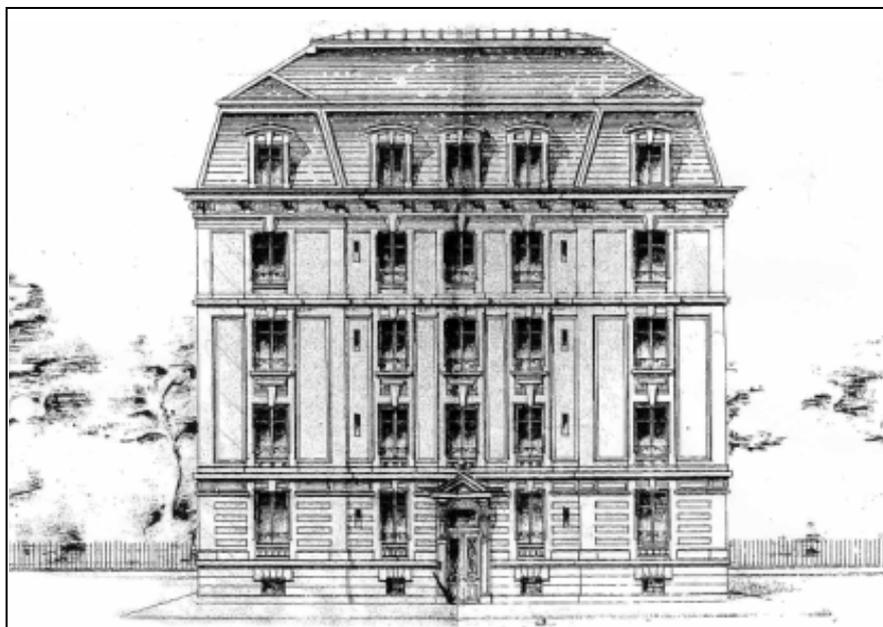


Figure 3.3 – Exemple d'un bâtiment en moellons étudié dans le détail

Le tableau 3.2, tiré d'une étude statistique [Wüst 1994], fournit la répartition des bâtiments selon leurs années de construction. Cette étude est basée sur les renseignements obtenus lors des recensements fédéraux effectués tous les dix ans. Les valeurs qui apparaissent ci-dessous sont celles de l'étude publiée en 1994. Selon cette étude, environ la moitié des bâtiments datent d'avant les années 1950 dont une grande partie est en construction traditionnelle de

moellons. A ce jour on peut estimer que plus de 90% du bâti actuel a été construit avant l'introduction des premières normes suisses intégrant des prescriptions parasismiques modernes [SIA160 1989]. Toujours selon cette étude, en 1990, le nombre total de bâtiments en Suisse était d'environ 2'300'000 et la valeur totale assurée était de 1'584 milliards de francs suisses [Wüst 1994].

Année de construction	Nombre de bâtiments	Volume (valeur assurée)
Avant 1947	47%	40%
1947 – 1960	13%	11%
1961 – 1975	21%	27%
1976 - 1990	19%	22%

Tableau 3.2 – Période de construction des bâtiments suisses [Wüst 1994]

Courbes de vulnérabilité

La vulnérabilité peut être définie comme le degré de pertes pour un élément de risque donné résultant d'un certain niveau d'aléa. Dans cette recherche, la description de la vulnérabilité est basée sur la nomenclature et les indications formulées dans l'EMS 98 [EMS98 1998]. Les bâtiments répertoriés dans les catégories sismiques sont distribués dans six classes de vulnérabilité. La classe A comprend les structures les plus vulnérables comme les bâtiments en maçonnerie traditionnelle et la classe F, les structures les moins vulnérables comme par exemple la plupart des structures en acier. Il est toutefois important de relever qu'il n'existe pas de bijection entre les catégories sismiques et les classes de vulnérabilité, comme l'illustre la figure 3.2.

Chaque classe de vulnérabilité peut être caractérisée par une courbe de vulnérabilité. A titre d'exemple, la figure 3.3 donne le taux de dégâts probables pour une certaine intensité pour la classe de vulnérabilité A.

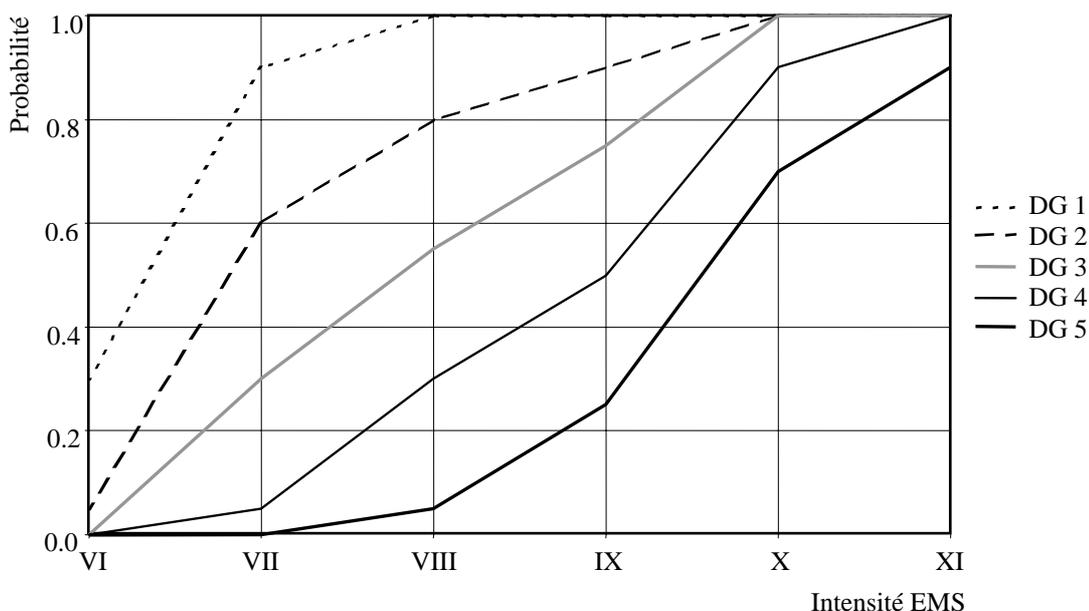


Figure 3.4 – Courbe de vulnérabilité (classe A)

Ces courbes décrivent le degré de dommages (pour une population de bâtiments) pour une certaine échelle d'intensité. Ainsi, par exemple, pour un séisme d'une intensité EMS de VII, il est supposé qu'aucun bâtiment ne subisse de dégâts de degré 5, 5% des bâtiments subiront des dommages de degré 4, 25% de degré 3, 30% de degré 2, 30% de degré 1 et 10% ne subiront aucun dommage. La démarche, ainsi que les courbes de vulnérabilité par classe, sont présentées en détails dans [Brennet 2001].

Les degrés de dommages (abrégés ci-après par DG) sont ceux proposés par l'EMS 98 [EMS98 1998]. L'illustration de ces degrés de dommages est présentée dans ce même document pour les bâtiments en maçonnerie ainsi que pour les bâtiments en béton armé:

- Degré 1: Dommages négligeables à légers (pas de dommages structuraux et de légers dommages non structuraux).
- Degré 2: Dommages modérés (légers dommages structuraux et dommages non structuraux modérés).
- Degré 3: Dommages importants à lourds (dommages structuraux modérés et lourds dommages non structuraux).
- Degré 4: Très lourds dommages (lourds dommages structuraux et très lourds dommages non structuraux).
- Degré 5: Destruction (très lourds dommages structuraux).

Des bâtiments subissant des degrés de dommages 4 ou 5 sont considérés comme devant être démolis et reconstruits. En conséquence, d'un point de vue économique, la valeur totale du bâtiment est considérée comme perdue.

Les courbes de vulnérabilité sont basées sur les indications de l'EMS 98 [EMS98 1998]. Il y est indiqué par exemple que pour un séisme d'intensité EMS de IX, « beaucoup de bâtiments de la classe de vulnérabilité A subiront des dommages de degré 5 » ou « que beaucoup de bâtiments de la classe de vulnérabilité D subiront des dommages de degré 2 et quelque uns de degré 3 ». Ces indications ont été interprétées quantitativement afin de développer les courbes de vulnérabilité pour chacune des six classes de vulnérabilité. Ces indications ont permis de générer trois courbes de vulnérabilité types, correspondant à une répartition choisie par hypothèse gaussienne de la vulnérabilité. Cette hypothèse se base sur la théorie des grands nombres. Elle est donc pertinente pour un portefeuille de bâtiments suffisamment important.

A partir du moment où les catégories sismiques et les classes de vulnérabilité sont définies, il devient possible de les relier. L'EMS 98 [EMS98 1998] est une fois de plus utilisée comme point de départ pour cette opération, adaptée aux caractéristiques du bâti suisse. Dans le but de produire un inventaire sismique orienté vulnérabilité, la relation entre les catégories sismiques et les classes de vulnérabilité a été quantifiée, comme indiqué dans l'exemple suivant. Pour les bâtiments en maçonnerie moderne (i.e., les bâtiments avec les murs en maçonnerie de briques et les dalles en béton armé), la distribution est de 20% pour la classe de vulnérabilité B, 70% pour la classe C et 10% pour la classe D. Cette distribution a été appliquée aux bâtiments ayant entre 3 et 3.5 étages. Elle a été ensuite modifiée pour tenir compte de l'influence du nombre d'étages sur la vulnérabilité sismique. Pour les bâtiments avec 1 à 2.5 étages, la distribution est de 10% pour la classe de vulnérabilité B, 50% pour la

classe C et 40% pour la classe D. Par contre, pour les bâtiments avec 5.5 étages, la distribution est de 20% pour la classe de vulnérabilité A, 70% pour la classe B et 10% pour la classe C. Le détail de cette distribution est donné dans [Brennet 2001]. Le tableau qui y est présenté donne pour chaque catégorie sismique et pour chaque nombre d'étages, la répartition des bâtiments dans les différentes classes de vulnérabilité.

Pour la plupart des catégories sismiques, cette adaptation s'est faite sur la base de résultats de recherches à disposition dans la littérature scientifique et reprises dans [Brennet 2001]. Des renseignements utiles provenant aussi bien d'études théoriques que de rapports de dommages « post-earthquake » sont en effet disponibles pour les constructions de type moderne. Pour les bâtiments en béton armé par exemple, une étude sur la vulnérabilité des bâtiments suisses existe [Peter 2000]. L'exception étant les bâtiments en maçonnerie traditionnelle, la distribution utilisée est basée sur les résultats de l'analyse détaillée de cinq bâtiments de la ville pilote [Brennet 2001].

Courbes de vulnérabilité de l'ensemble du bâti

En utilisant les courbes de vulnérabilité et la répartition des bâtiments dans les différentes classes de vulnérabilité obtenues dans l'inventaire sismique [Brennet 2001], il est possible de développer une estimation d'ensemble des dommages pour le portefeuille, et ce pour différents événements sismiques. L'endommagement des bâtiments est exprimé à l'aide de la notion de degré de dommage, développée dans l'EMS 98 [EMS98 1998].

Trois courbes de vulnérabilité du bâti sont construites afin de considérer les incertitudes sur le comportement physique des bâtiments lors de sollicitations sismiques. Comme déjà discuté plus haut, la répartition a été admise de type gaussien. Trois niveaux ont été déterminés par méthode expert. Une courbe moyenne, une courbe correspondant à un comportement optimiste et une autre correspondant à comportement pessimiste. Chacune des deux courbes (optimiste et pessimiste) a été considérée comme étant l'expression de plus ou moins un écart-type autour de la valeur moyenne. Ces trois valeurs (valeur moyenne et plus ou moins un écart-type) ont été admises, par hypothèse, comme valeurs caractéristiques d'une fonction de distribution gaussienne.

3.3. PERTES CONSIDÉRÉES

Les pertes totales qui peuvent résulter d'un séisme sont difficiles à prédire. Les pertes directes sont plus facilement quantifiables que les pertes indirectes. Ce travail porte uniquement sur les pertes pouvant affecter le portefeuille immobilier et mobilier assuré auprès d'un assureur ainsi que sur les pertes humaines potentielles. Les différents secteurs pouvant être touchés à la suite d'un tremblement de terre sont passés en revue de manière détaillée dans [Weidman 2002]

3.3.1. Pertes directes

Un séisme cause d'importants dommages humains et matériels directs. L'aspect humain est développé afin de déterminer le nombre de morts et de blessés potentiellement causé par un événement sismique déterminé. Les pertes immobilières et mobilières sont évaluées quant à elles en unité monétaire.

Pertes humaines

Plusieurs éléments entrent en considération pour déterminer les dommages humains. Par exemple, le nombre de personnes touchées lors du tremblement de terre ou encore la gravité des atteintes, allant des blessures légères ne nécessitant pas d'hospitalisation jusqu'au décès des personnes surprises par un événement sismique.

Contenance

Par contenance d'un bâtiment, on entend le nombre maximal de personnes qu'il peut contenir, sans tenir compte d'un instant particulier. Cette contenance est déterminée par échantillonnage statistique de bâtiments représentatifs. La capacité totale d'un portefeuille de bâtiments peut dès lors se déterminer par sommation des capacités individuelles moyennes.

Occupation des bâtiments en fonction du temps

La saison, le jour de la semaine et l'heure de la journée ont une influence sur le nombre de personnes pouvant se trouver à l'intérieur des bâtiments effondrés et jouent donc un rôle direct sur le nombre de personnes pouvant in fine être blessées ou tuées. Cette occupation est différente si on a à faire à un bâtiment d'habitation ou à un bâtiment abritant des bureaux. Cet aspect a été intégré au modèle en considérant une occupation moyenne de l'ouvrage, tirée de [Coburn 2000].

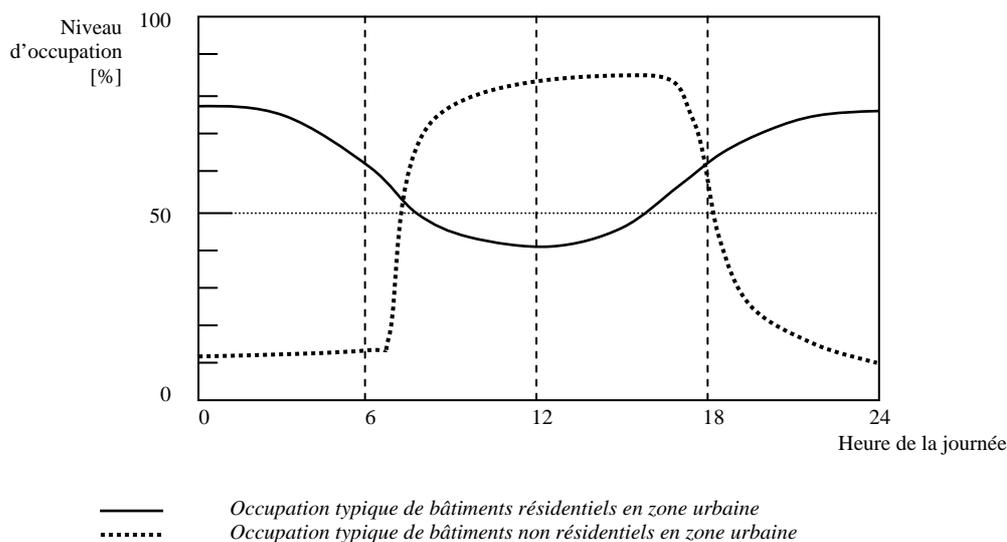


Figure 3.5 – Occupation des bâtiments [Coburn 2000]

Courbe d'endommagement de la vie humaine

Seule une partie des occupants sont blessés ou tués en cas d'effondrement d'un bâtiment pendant un séisme. Certains d'entre eux peuvent s'échapper, particulièrement ceux du rez-de-chaussée, et d'autres se trouver dans une partie de la structure non complètement effondrée. On détermine « l'endommagement » de la vie humaine non en fonction de l'intensité EMS mais en fonction du degré d'endommagement de la construction.

La gravité des atteintes corporelles peut être fortement variable, allant des blessures légères ne nécessitant pas d'hospitalisation jusqu'au décès. Cette gravité dépend également du type de construction.

Dans notre étude, on ne prend en considération que les morts et les blessés comptabilisés juste après le tremblement de terre, bien qu'on devrait considérer également ceux qui seront effectifs quelques heures ou jours plus tard [Coburn 2000]. On pense notamment aux personnes décédées des suites des blessures engendrées par l'effondrement ou encore les survivants sous les décombres qui ne peuvent être secourus. Cet aspect dépend fortement de la qualité des moyens de secours mis à disposition en cas de *catastrophe* [Glossaire], comme les pompiers, l'armée, l'organisation d'une cellule de crise ou encore le fonctionnement des hôpitaux. Dans cette étude cette problématique est mise de côté du fait du haut niveau de préparation des secours, de la qualité des soins hospitaliers et de la capacité hospitalière importante de la région d'étude.

De la même manière que pour les courbes de vulnérabilité trois courbes d'endommagement ont été développées. La construction des courbes d'endommagement utilisées dans notre estimation, repose sur une approche de type expert étayée par les informations statistiques à disposition [SwissRe 2002] et finalement calée avec une approche similaire développée dans [Nichols 2002]. Le résultat pour la courbe moyenne est illustré à la figure 3.6.

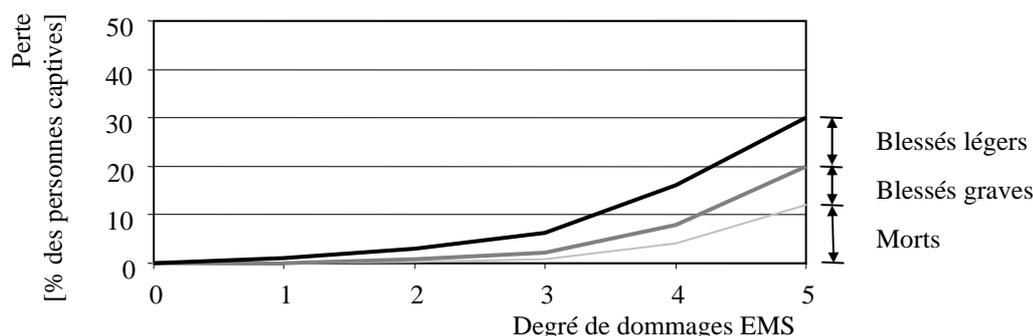


Figure 3.6 – Courbes moyennes d'endommagement de la vie humaine

Pertes immobilières et mobilières

Les pertes immobilières sont estimées à l'aide de courbes d'endommagement construites par une approche de type expert étayée par les informations statistiques à disposition [SwissRe 2002]. Elles donnent la relation entre le degré d'endommagement décrit par l'EMS 98 [EMS98 1998] et le pourcentage de la valeur de remplacement perdue. Ces courbes, illustrées à la figure 3.7, ont été validées par interviews de professionnels de l'estimation du domaine des assurances. Adoptant les mêmes hypothèses que pour la génération des courbes de vulnérabilité, pour chaque degré de dommage, trois niveaux de pertes sont déterminés, pessimiste, moyen et optimiste [Pellissier 2003a]. L'hypothèse faite sur la fonction de distribution gaussienne, discutée à la fin de paragraphe 3.2.2., est illustrée à la figure 3.7 par des courbes pointillées.

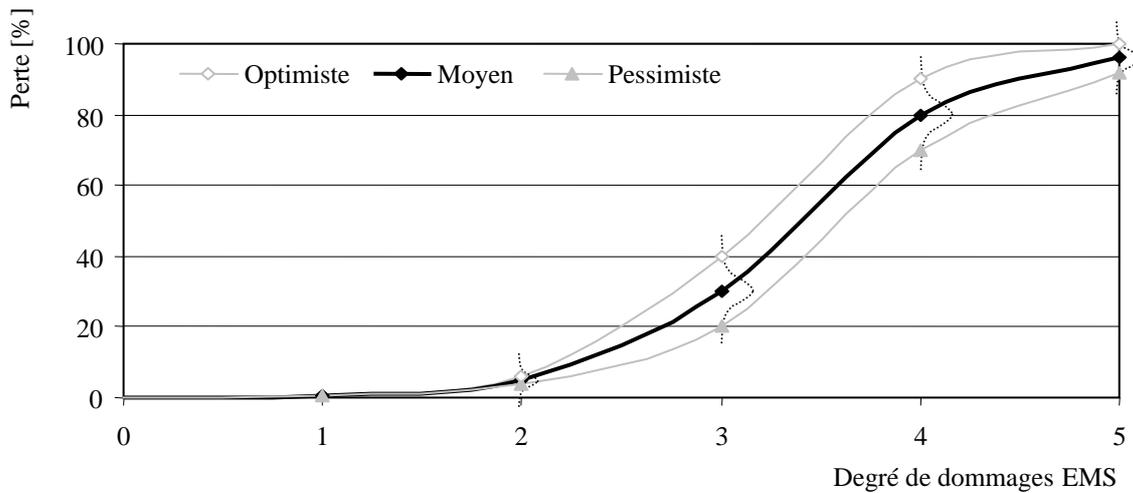


Figure 3.7 – Courbes immobilières d'endommagement

Les courbes d'endommagement mobilières sont construites suivant le même processus que les courbes d'endommagement immobilières. Elles fournissent la relation entre le degré d'endommagement décrit par l'EMS 98 [EMS98 1998] et le pourcentage de la valeur de remplacement du mobilier perdu lors d'un événement sismique. Ces courbes ont également été validées par interview de professionnels de l'estimation du domaine des assurances puis calées avec les connaissances les plus récentes [Saeki 2000]. Pour chaque degré de dommage, on présente trois niveaux de pertes, pessimiste, moyen et optimiste [Pellissier 2003a].

Les autres pertes directes

Les pertes liées à l'endommagement des infrastructures (réseau de distribution d'eau, d'alimentation électrique, de communication, de transports...) peuvent être très importantes. La vulnérabilité de ces infrastructures, particulièrement de l'influence sur les réseaux, est mal connue et nécessite un effort important de recherche. Les informations récentes d'autres séismes permettent d'estimer ces pertes à partir des pertes immobilières. Une étude récente pour la région de Bâle [SwissRe 2000] donne un rapport élevé entre les pertes immobilières et les pertes aux infrastructures (facteur multiplicateur de 0.8 à 1.6). D'autres tremblements de terre, comme celui survenu en Ombrie en 1997, donne un facteur multiplicateur plus bas, d'environ 0.4 [Wenk 1997], plus proche de ce qu'on peut attendre dans la région de la ville pilote. Ces pertes ne sont pas prises en considération dans ce travail.

3.3.2. Pertes indirectes

Des nombreuses autres pertes peuvent découler des dommages consécutifs à un tremblement de terre. Ces pertes incluent le manque à produire des biens et services et le coût estimé pour fournir des services intérimaires pendant la période de recouvrement de la capacité opérationnelle initiale, les pertes environnementales ou encore les pertes de valeurs historiques. L'estimation de ces pertes dépasse le cadre de cette étude.

3.4. QUANTIFICATION DU RISQUE

3.4.1. Principe de détermination

Le risque (humain, immobilier et mobilier) est ensuite calculé pour chaque niveau d'intensité à l'aide des équations (3.1) et (3.2), selon les termes classiques de l'équation du risque défini au chapitre 1. Le calcul fournit le risque pour chaque degré d'intensité.

$$R_{EMS=i} = Aléa \times Conséquences \quad (3.1)$$

Avec

$R_{EMS=i}$ Risque pour une intensité donnée i , i allant de 0 à XII

A Fonction d'aléa (Hazard Function) (pour une intensité donnée): Produit de l'aléa régional et des conditions locales

C Fonction de conséquences (Consequences Function) (pour une intensité donnée): Produit de la vulnérabilité physique du bâti et des valeurs exposées

La somme de toutes les intensités permet d'obtenir le risque total, déterminé à l'aide de l'équation (3.2).

$$R_{Total} = \sum_{i=I}^{XII} R_i \quad (3.2)$$

Avec

R_{Total} Risque total

De petites intensités ($I_{EMS}=VI$ ou plus petit) ont des conséquences faibles. Leur probabilité d'occurrence est quant à elle élevée, ce qu'expriment des périodes de retour petites. Le risque, est calculé comme le produit de ces deux éléments. De la même façon, de grandes intensités ($I_{EMS}=X$ ou plus grand) auront des conséquences importantes, par contre leurs probabilités d'occurrence seront quant à elles plus petites.

3.4.2. Risque humain

Ce paragraphe présente les résultats du calcul du risque humain. Ce risque est déterminé pour la population de la région étudiée comme la somme des risques individuels. Les périodes de retour probables pour les événements sismiques retenus sur la base de la connaissance de la sismicité en tenant compte de la valeur moyenne pour l'occupation des bâtiments sont nécessaires à ce stade du modèle. Elles sont de nature probabiliste.

Le risque moyen de décès exprimé en [1/100'000 personnes] et par année représente la mortalité effective du risque considéré, pour une population dans une région. Le niveau de risque obtenu pour les agglomérations suisses, de l'ordre de 0.1 à 0.5 décès annuel pour 100'000 habitants, est relativement bas. Les risques de ce niveau n'inquiètent en général pas l'individu moyen, qui a conscience de leur existence mais ne se sent pas vraiment concerné. Il adopte habituellement une attitude fataliste face à de tels risques qui rejoignent ceux liés à d'autres éléments naturels [Schneider 1994]. Ce risque est comparé à titre informatif à d'autres risques affectant les sociétés industrialisées au tableau 3.3 [Sarlos 2003].

Types de risque	Mortalité annuelle ⁽¹⁾
20 cigarettes par jours	400.00
10'000 km annuel de voiture	10.00
10'000 km annuel de train	1.00
Décès dus au feu	1.00
Séisme en Suisse	0.10 à 0.50
Foudroiement	0.10

⁽¹⁾ Pour 100'000 personnes exposées au risque

Tableau 3.3 – Risques annualisés comparés

Partant de ces constatations, il est intéressant de comparer cette valeur avec celle liée aux séismes en Californie, déterminée uniquement sur la base de statistiques des tremblements de terre historiques. Cette valeur se monte à environ 0.50 morts par année et pour 100'000 personnes. L'ordre de grandeur similaire peut surprendre. Cependant, au-delà des différences de vulnérabilité des bâtis, il faut garder à l'esprit que la démarche de détermination qui aboutit à cette valeur est différente. En effet, si on ne considère que les statistiques des séismes historiques, cette valeur est quasi nulle pour la Suisse, puisque aucun événement majeur n'est survenu durant la période contemporaine. Le risque potentiel en Californie est donc beaucoup plus important si on tient compte des séismes futurs, tel que celui que les californiens redoutent et appellent le « Big One ».

Le calcul basé sur les statistiques historiques, usuellement appliqué pour la détermination de primes d'assurance, n'est donc pas adapté à ce type de risque ayant une très faible probabilité de survenance, comme c'est le cas pour la Suisse. Ce mode de calcul n'inclut pas des événements possibles de grande ampleur qui ne se sont pas produits dans la période d'observation, très courte à l'échelle géologique, et donne une vision faussée de la réalité. Le risque obtenu à l'aide du calcul statistique aboutit donc à une valeur inférieure à celle obtenue à l'aide du modèle présenté dans ce chapitre qui représente mieux la réalité.

3.4.3. Risque immobilier et mobilier

Sur la base de la méthode de détermination des pertes immobilières présentées plus avant dans ce chapitre une estimation du risque immobilier est établie, en particulier à l'aide des équations (3.1) et (3.2). Ce risque, appelé le *sinistre raisonnablement escomptable* [Glossaire], correspond au niveau de prime d'assurance permettant de couvrir un portefeuille, par exemple assuré auprès d'un assureur. Les pertes s'élèvent annuellement à quelques dizaines de centimes par millier de francs assurés. Par exemple pour la ville d'Aigle, on obtient une valeur du risque immobilier de 28 centimes annuels par millier de francs assurés. Les indications obtenues lors de l'application au projet-pilote établissent que les événements de moyenne intensité (V et VI) représentent une part importante du risque total. Une franchise, par exemple de 10% de la valeur assurée, permettrait de diminuer fortement la prime réelle payée par le preneur d'assurance.

Pour le risque mobilier, la perte potentielle s'obtient de la même manière. Les indications obtenues du projet-pilote nous fournissent une prime d'un ordre de grandeur équivalent que pour les pertes immobilières. Suivant une constatation identique à celle portant sur le risque immobilier sur la part des événements de moyenne intensité, cette somme peut fortement être réduite par l'utilisation d'une franchise, par exemple de 10% ou de quelques dizaines de milliers de Francs.

L'approche actuarielle statistique ne permet pas d'appréhender correctement les risques liés à des dangers ayant une très faible probabilité d'occurrence. La construction du modèle physique présenté dans ce chapitre donne un outil efficace pour palier à cette faiblesse.

3.4.5. Sinistre maximum potentiel

Pour un gestionnaire du risque il est important, en plus de connaître le risque moyen, d'avoir des indications sur le scénario extrême qu'on appelle usuellement le *sinistre maximum potentiel* [Glossaire]. Ce scénario permet principalement de planifier les situations de crise. Il peut également s'avérer utile pour un assureur afin de déterminer la capacité financière nécessaire pour faire face à une telle éventualité ou dans le cadre d'un contrat de réassurance [Glossaire].

Ce scénario est obtenu pour une intensité donnée en fonction de la zone de risque. En Suisse, on admet que l'intensité maximale atteignable est de l'ordre de grandeur $I_{EMS} = IX$ à X pour la zone sismique 3b. Les éléments constitutifs du modèle de risque sont pris en compte avec leurs valeurs pessimistes pour les éléments probabilistes et effectives pour les éléments déterministes. Ce scénario garantit une faible probabilité de dépassement.

3.5. SYNTHÈSE

Le modèle d'estimation du risque présenté dans ce chapitre fournit une estimation du risque sismique et du sinistre maximum potentiel. Les incertitudes portant sur les différents éléments entrant dans l'équation du risque sont identifiés et quantifiés. Une amélioration des connaissances de ces éléments, particulièrement l'aléa local et la vulnérabilité des types de bâtiments les plus courants (béton faiblement armé et maçonnerie), vont permettre dans le futur d'améliorer la précision de cette estimation.

Le modèle proposé permet de palier aux faiblesses des approches statistiques classiques des assureurs pour des dangers ayant une probabilité d'occurrence faible, comme l'est le tremblement de terre. Il fournit aussi aux gestionnaires des indications précieuses pour la préparation des situations de crise.

4 OBJECTIFS DE PROTECTION

4.1. PARTICULARITÉS

L'étape suivante du cadre de gestion est la fixation des objectifs de protection. Ces objectifs expriment le niveau de sécurité attendue par la société face au risque sismique. Dans la gestion du risque, il est usuel de distinguer deux questions fondamentales, l'une étant du ressort du technicien, appelée analyse de risque, l'autre étant du ressort du sociologue, appelée évaluation du risque. La première question peut être formulée par « Que peut-il arriver ? » et se résout à l'aide d'outils techniques d'analyse de risque décrit dans ce travail. La deuxième question peut quant à elle s'articuler ainsi; « Qu'est-ce qui est admissible ? » et fait appel à une représentation des valeurs. C'est l'ensemble de ces deux questions qui forge le jugement sur l'acceptabilité du risque [Schneider 1994].

4.1.1. Les états limites

Dans les normes helvétiques, on distingue deux états limites distincts; la sécurité structurale qui garantit la survie des occupants en évitant la ruine partielle ou totale de la structure (life safety), ainsi que l'aptitude au service qui permet de garantir la fonctionnalité de l'ouvrage après un événement sismique (immediate occupancy). La vérification de la sécurité structurale doit être effectuée pour toutes les classes d'ouvrage (ci-après abrégée par CO), alors que celle de l'aptitude au service n'est requise que pour la classe d'ouvrage CO III. On donne dans le tableau 4.1 le descriptif des classes d'ouvrage définies par la norme SIA 261 [SIA261 2003]. La vérification de l'aptitude au service a été abandonnée par rapport à la norme SIA 160 [SIA160 1989] pour les ouvrages appartenant à la CO I ou à la CO II car elle n'est généralement pas déterminante. De plus, elle est implicitement incluse dans les mesures constructives et de conception.

Les principes de dimensionnement pour tenir compte du séisme figurent dans les normes SIA 260 et ss. La vérification de l'aptitude au service ne s'effectue pas avec la même valeur de calcul que celle utilisée pour la vérification de la sécurité structurale, mais avec une valeur réduite de 50%. Cependant, il faut bien noter que cette diminution de moitié se rapporte aux valeurs de référence multipliées par le facteur d'importance. Comme il faut considérer un facteur d'importance de $\gamma_f = 1,4$ pour les ouvrages appartenant à la CO III, globalement, et conformément à l'Eurocode 8 [Eurocode 8 1996], la diminution pour l'aptitude au service représente une réduction de la période de retour du séisme considéré à environ 200 ans au lieu des 475 pour l'état limite ultime. En fait, la vérification de l'aptitude au service nécessite le calcul des déformations dues au séisme. Des valeurs limites des déformations pour les bâtiments sont fixées dans la même norme en distinguant le comportement ductile ou non des éléments porteurs. Ainsi, en général, un comportement non ductile de la structure porteuse n'est adapté que dans le cas de faibles sollicitations sismiques, c'est-à-dire pour des ouvrages légers dans les zones sismiques inférieures et dans des conditions favorables du sol de fondation. Dans les autres cas, l'application de ce concept peut aboutir à des solutions peu économiques et il faut donc plutôt privilégier le concept du comportement ductile [SIAD0191 2003].

Classe d'ouvrage	Caractéristiques	Exemples	γ_f
CO I	-pas de rassemblements importants de personnes -pas de marchandises ou d'installations ayant une valeur particulière -pas de risque d'atteinte à l'environnement	-bâtiments d'habitation, administratifs et artisanaux -bâtiments industriels et entrepôts -parking -pont dont l'importance après un séisme est faible	1.0
CO II	-fréquentation possible par un grand nombre de personnes -marchandises ou installations ayant une valeur importante -infrastructure ayant une fonction importante -risque limité d'atteinte à l'environnement	-hôpitaux avec leurs équipements et installations s'ils n'appartiennent pas à la classe d'ouvrage III -centres d'achats, stades, cinémas, théâtres, écoles et églises -bâtiments de l'administration publique ponts d'une grande importance après un séisme ou pont franchissant des voies de communication importantes après un séisme -murs de soutènement et talus bordant des voies de communication importantes après un séisme -ouvrages, équipements et installations destinés à l'approvisionnement, à l'évacuation et aux télécommunications s'ils n'appartiennent pas à la classe d'ouvrage III -cheminées de grande hauteur	1.2
CO III	-infrastructures ayant une fonction vitale -risque considérable d'atteinte à l'environnement	-hôpitaux d'urgence avec leurs équipements et installations -ouvrages, équipements et installations servant à la protection en cas de catastrophe (par exemple : bâtiment du service du feu ou garage des ambulances) -pont d'une grande importance pour la desserte d'une région après un séisme -murs de soutènement ou talus bordant des voies de communication essentielles pour la desserte d'une région après un séisme -ouvrages d'importance vitale pour l'approvisionnement, l'évacuation et les télécommunications	1.4

Tableau 4.1 – Classes d'ouvrage [Tableau 26. SIA261 2003]

4.1.2. Des ressources limitées

Une réduction significative de la vulnérabilité sismique du parc actuel est uniquement possible en intervenant sur de nombreux bâtiments existants, ce qui va prendre du temps et nécessiter un engagement financier important. Les interventions techniques doivent par conséquent s'effectuer suivant un ordre objectif tenant compte des priorités. Elles doivent de plus viser un niveau de sécurité dont l'investissement soit proportionnel. Une phase transitoire relativement longue pour adapter le parc immobilier existant se révèle par conséquent inévitable. La durée de cette phase transitoire dépendra de la volonté des autorités à dégager les moyens financiers pour ce danger particulier et des mesures de politique publique qui seront effectivement mises en œuvre par les autorités. Cet aspect est traité en annexe E [Contexte réglementaire].

4.2. OBJECTIFS CIBLES DE PROTECTION

4.2.1. Nouvelles constructions

Les prescriptions relatives aux séismes contenues dans les collections de normes de construction sont en premier lieu destinées aux nouvelles constructions. Ce sont ces exigences qui font office de règles de l'art, comme explicité à l'Annexe E [Contexte réglementaire], et qui fixent le niveau cible de sécurité. Evidemment, pour des ouvrages particuliers, le maître d'œuvre peut exiger un niveau de sécurité différent, mais au minimum équivalent. On pense en particulier aux ouvrages soumis à l'ordonnance sur la protection des accidents majeurs [RS 814.012 1991], comme par exemple les barrages ou les centrales nucléaires. Le niveau de sécurité se détermine dès la phase de projet et va guider le dimensionnement.

4.2.2. Constructions existantes

Pour les constructions existantes, le niveau de sécurité de la nouvelle collection de normes SIA [SIA260 2003], plus élevé que celui fixé par les anciennes, doit être considéré avec proportionnalité. C'est pourquoi, dans tous les cas où une évaluation sur un bâtiment existant est entreprise, une approche risque est requise pour déterminer ce niveau de sécurité cible.

Pour répondre aux cas pratiques de réhabilitation de bâtiments existants, un groupe d'experts a rédigé des recommandations [Badoux 2003]. Elles se basent sur la nouvelle collection de normes SIA [SIA260 2003] et sur la norme SIA 462 [SIA462 1994]. Elles postulent que les sollicitations sismiques peuvent être réduites pour les bâtiments existants. Pour ce faire, les sollicitations peuvent être multipliées par un facteur p compris entre 0.5 et 0.7, en fonction des deux éléments suivants:

- La fonction du bâtiment. Elle est intégrée par les normes à l'aide du facteur d'importance γ_f que détermine la classe d'ouvrage, notion déjà définie plus haut (tableau 4.1.).
- L'importance des coûts que nécessite une mise en conformité par rapport au nombre de vies humaines en jeu.

Ces recommandations revêtent un caractère transitoire, puisqu'elles permettent une mise à niveau proportionnée du parc de bâtiments existants sur un horizon de temps non fixé. Elles se concentrent également sur la protection de la vie humaine et non sur les autres valeurs exposées, comme par exemple la valeur immobilière. Des recommandations définitives du groupe d'experts [SIA2018 2004] sont actuellement en cours de consultation.

Le seuil de dangerosité pour la vie humaine se situe habituellement à une valeur supérieure ou proche de un mort pour cent mille personnes et par année. Cette valeur est communément admise en Suisse pour d'autres types de risques similaires [Schneider 1994]. Elle constitue le niveau cible inférieur d'une réhabilitation. De plus, un montant d'un million de francs par vie humaine sauvée représente ce qui est communément admis pour la proportionnalité de l'investissement.

Pour les bâtiments existants de CO I et de CO II, les cas étudiés montrent que le niveau cible de sécurité fixé par la norme SIA 160 [SIA160 1989] présente bien souvent le niveau adéquat en terme de proportionnalité des investissements. Cela étant, les applications à des cas

concrets nous apprennent qu'en terme de préservation de la valeur économique, ce niveau cible de protection s'accompagne fréquemment d'une mesure d'assurance complémentaire. L'approche orientée risque utilisée, intégrant les notions de précaution et de proportionnalité, est présentée au chapitre 6. Elle permet de fixer le niveau cible de sécurité à atteindre en distinguant clairement les éléments objectifs des éléments subjectifs.

Sur la base des enseignements tirés des bâtiments étudiés dans ce travail un facteur de réduction des sollicitations sismiques p est proposé pour les bâtiments existants. Il est important de relever que ce facteur, bien qu'ayant une signification identique que le facteur p utilisé dans [Badoux 2003], ne s'obtient pas de la même manière. Malgré le risque de confusion, la notation a néanmoins été volontairement conservée. Cette réduction est fournie par l'abaque présenté graphiquement à la figure 4.4 qui propose des droites d'isovaleur de p . Ce facteur p , dit de correction, détermine la diminution des sollicitations prévues pour le dimensionnement d'un nouveau bâtiment qui soit acceptable pour des structures déjà construites.

Le principe de proportionnalité

Une mesure de gestion d'un risque est dite proportionnée si ladite mesure est d'un ordre de grandeur, dans son amplitude, acceptable du point de vue de la société, en fonction de l'efficacité face au risque qu'elle tente de diminuer. Selon ce principe, on mettra en œuvre uniquement des mesures qui se justifient d'un point de vue économique ou de sécurité des personnes. Par exemple, on ne renforcera pas par une mesure technique onéreuse un bâtiment vide. La proportionnalité exprime dès lors une action adaptée par son ampleur à une situation donnée. De plus, cette action ne devrait pas mettre en péril la pérennité d'une activité, d'une personne, d'un groupe de personnes ou de la société.

Le principe de précaution

On doit également tenir compte de ce qu'on appelle le tiers absent, c'est-à-dire les générations futures. Il faut donc appliquer le principe dit de précaution dans le mode de processus décisionnel. La gravité, voire l'irréversibilité, dans le cas de la vie humaine, des pertes et dommages attendus justifie l'engagement précoce d'actions de prévention, alors même que le risque envisagé n'est que potentiel ou très faible. Par exemple, certains produits bovins (cervelle, moelle, nerfs) ont été retiré du marché par les pouvoirs publics avant l'établissement formel de la preuve scientifique d'une relation entre la maladie de la vache folle (Encéphalite spongiforme bovine) avec la maladie de Creutzfeld-Jakob.

Le principe de précaution se fonde toujours sur les deux principes contradictoires suivants: la prise en charge par anticipation de risques potentiels et la proportionnalité des mesures de précaution à mettre en œuvre. Ainsi pour justifier un investissement lourd de renforcement d'un immeuble existant, il doit se dégager clairement un intérêt public prépondérant. Cela peut être le fait de cas rares, par exemple pour des hôpitaux ou une centrale d'intervention de secours. La proportionnalité se traite au cas par cas à l'aide du cadre systématique formalisé dans cette recherche au chapitre 6.

4.2.3. Eléments considérés pour l'adaptation des sollicitations sismiques

Selon [Badoux 2003] les actions sismiques déterminées par la norme SIA 261 [SIA261 2003] pour garantir la sécurité structurale peuvent être multipliées par un facteur p de correction, inférieur ou égal à 1, qui varie en fonction des éléments présentés plus bas. Cette notation est reprise dans cette recherche.

La durée de vie restante de l'ouvrage

La durée de vie restante va influencer la proportionnalité de l'investissement à consentir pour une évaluation sismique. En effet, en diminuant la durée restante d'utilisation, on diminue également l'exposition potentielle à un événement sismique. Cette durée entre dans les équations des indices de valeur de l'ouvrage, présentés plus loin dans ce chapitre, par l'intermédiaire du coefficient de durée $\gamma_{\text{durée}}$. Ce coefficient s'obtient à l'aide de l'abaque proposé à la figure 4.1. Elle postule que les exigences peuvent être réduites de moitié pour une courte durée de vie restante, ici fixée à 10 ans, et ce conformément à ce qui est proposé dans [Badoux 2003]. Pour une durée de vie supérieure ou égale à 35 ans, qui représente la durée de planification générationnelle, on estime être en droit d'attendre d'un ouvrage un comportement conforme à l'entier des exigences normatives. Dans l'intervalle, on interpole linéairement. Cette hypothèse est raisonnable.

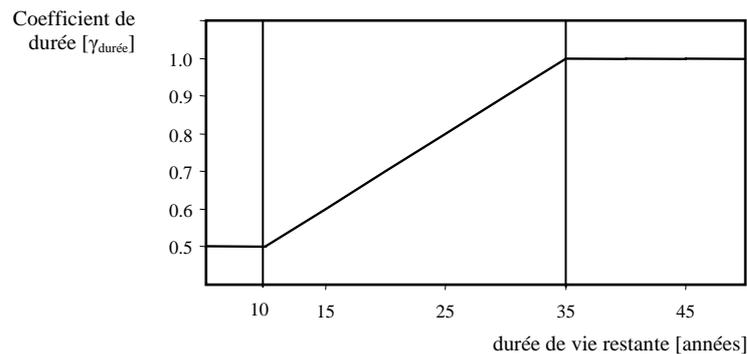


Figure 4.1 – Coefficient de durée

Le nombre de vies humaines menacées

Le nombre personnes pouvant être atteintes dans leur intégrité corporelle est prise en compte par le nombre de vies humaines menacées N_h obtenu à l'aide de l'équation (4.1). Ce nombre tient compte de la présence réelle de personnes dans le bâtiment en cas de survenance d'un événement catastrophique.

$$N_h = \text{nombre moyen d'habitant(s)} \times \text{taux d'occupation} \quad (4.1)$$

Avec

N_h Nombre de vies humaines menacées

Taux = 0.65 pour un bâtiment d'habitation

d'occupation = 0.40 pour les autres utilisations [Coburn 2002]

D'autres propositions pour déterminer le nombre de vies humaines menacées existent. Ainsi, un groupe d'experts propose une équation dans [SIA2018 2004]. Cette formulation peut naturellement être utilisée en remplacement de celle proposée dans ce document.

Indice de valeur humaine de l'ouvrage

Un indice de valeur humaine V_h exprimant la valeur humaine potentiellement menacée est calculé à l'aide de l'équation (4.2). Une diminution de la probabilité de survenance, du fait d'une utilisation réduite d'un ouvrage existant par rapport à un ouvrage neuf, est intégrée à cet indice à l'aide d'un coefficient de durée.

$$V_h = N_h \times \gamma_{durée} \quad (4.2)$$

Avec

V_h	Indice de valeur humaine
N_h	Nombre de vies humaines menacées
$\gamma_{durée}$	Coefficient de durée

La valeur économique de l'ouvrage

La valeur économique de l'ouvrage est estimée à l'aide de l'équation (4.3) qui tient compte d'un prix unitaire au m^3 multiplié par le volume. Ce prix dépend fortement de l'emplacement et des conditions locales d'un marché, de la qualité de la construction ou des matériaux utilisés, de l'âge ou encore de la vétusté de la construction. Des variations très importantes peuvent être observées.

$$V_e = m^3 (SIA) \times \text{prix unitaire par } m^3 (SIA) \quad (4.3)$$

Avec

V_e	Valeur économique de l'ouvrage, [Frs.]
$m^3 (SIA)$	Volume SIA de l'ouvrage, défini dans [SIA416 2003], [m^3]

L'utilisation de l'ouvrage

L'utilisation qui est faite de l'ouvrage étudié influence sa valeur. Cela est vrai aussi bien pour la valeur humaine que pour la valeur économique. De plus, fréquemment, les ouvrages de CO II et CO III ont une incidence sur les dommages indirects plus importants que les ouvrages de CO I du fait du rôle qu'ils peuvent jouer dans la chaîne de sauvetage.

CO	γ_{CO}	Ampleur des dommages consécutifs	Exemple
I	0.40	Pas de dommage consécutif	Bâtiment d'habitation
II	0.80	Même ordre de grandeurs que les dommages directs	Hôpital secondaire inutilisable
III	2.00	Dommages consécutifs considérables	Garage d'ambulances inaccessible

Tableau 4.2 – Coefficient d'importance

Pour en tenir compte, on se base sur les définitions de classes d'ouvrages définies dans la norme SIA 261 [SIA261 2003] et présentées au tableau 4.1. L'utilisation de l'ouvrage se retrouve dans l'équation de l'indice de valeur économique mixte présentée plus bas, par le coefficient d'importance γ_{CO} . Cette relation entre classe d'ouvrage et coefficient d'importance est montrée au tableau 4.2 et est tirée de [OFEG 2002].

Les impacts économiques consécutifs, comme par exemple les pertes liées à la cessation d'une activité à la suite de l'effondrement d'une usine, sont également considérés à l'aide d'un coefficient d'impacts économiques γ_{CI} déterminé au tableau 4.3. Les ouvrages sont classés en classes d'impact CI. Les bâtiments dont les dommages consécutifs en cas de ruine sont faibles sont classés en CI=I, alors que les bâtiments dont les dommages consécutifs peuvent être considérables sont classés en CI=III. Ce coefficient entre dans la détermination de l'indice de valeur économique mixte de l'ouvrage défini au paragraphe suivant.

CI	γ_{CI}	Ampleur des dommages consécutifs	Exemple
I	1.00	Pas de dommage consécutif	Bâtiment d'habitation
II	1.50	Même ordre de grandeurs que les dommages directs	Bâtiment de bureaux
III	2.00	Dommages consécutifs considérables	Principale usine d'une région

Tableau 4.3 – Coefficient d'impacts économiques

Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage

La valeur économique est prise en compte pour composer un indice de l'ouvrage intégrant la durée de vie restante et les impacts consécutifs dudit ouvrage. Pour déterminer cette valeur, on calcule un indice de valeur économique mixte de l'ouvrage V_{em} à l'aide de l'équation (4.4). Cet indice prend en compte la valeur économique, définie plus haut, l'utilisation qui est faite du bâtiment par le biais du coefficient d'importance, les impacts économiques potentiels, par le coefficient d'impacts économiques, ainsi que la durée de vie restante du bâtiment au travers du coefficient de durée.

$$V_{em} = V_e \times \gamma_{CO} \times \gamma_{CI} \times \gamma_{durée} \quad (4.4)$$

Avec

V_{em}	Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage, [Frs.]
V_e	Valeur économique de l'ouvrage, [Frs.]
$\gamma_{durée}$	Coefficient de durée
γ_{CO}	Coefficient d'importance
γ_{CI}	Coefficient d'impacts économiques

Plan indiciel de valeurs

Les deux indices déterminés expriment les valeurs exposées au risque considéré. Il est possible de représenter les bâtiments étudiés sur un plan formé en abscisses de l'axe d'indice de valeur économique mixte normalisée et en ordonnées de l'axe d'indice de valeur humaine normalisé. La normalisation est expliquée plus loin dans ce chapitre. Ce plan est appelé le plan indiciel de valeurs. Il est illustré à la figure 4.2. Dans ce plan, des zones préférentielles pour lesquelles des types de mesures seront privilégiées peuvent être identifiées. Par exemple, pour des constructions ayant une forte valeur humaine, à savoir un bâtiment abritant de nombreuses personnes et ayant une durée de vie restante importante, l'indice de valeur

humaine sera élevé. Par conséquent, des mesures visant à protéger ce genre de valeur, c'est-à-dire des mesures techniques de protection, seront dans ce cas favorisées. Par contre, pour des bâtiments dont l'indice économique mixte est très important, on aura plutôt tendance à privilégier des mesures protégeant la valeur, par exemple une assurance. Cependant, il arrive fréquemment que les deux valeurs indicielles soit fortement corrélées. A titre d'exemples, les positions probables d'un bâtiment d'habitation (forte valeur humaine), d'une usine (forte valeur économique) et d'un hôpital (à la fois forte valeur humaine et forte valeur économique) sont illustrées à la figure 4.2.

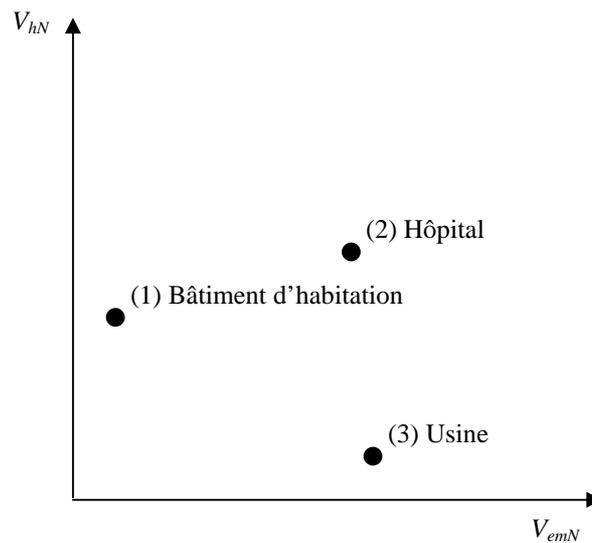


Figure 4.2 – Plan indiciel de valeurs et position de (1) un bâtiment d'habitation, (2) une usine et (3) un hôpital

4.2.4. La zone d'aléa sismique

La Suisse est divisée en 4 zones de séisme Z1, Z2, Z3a et Z3b, selon l'exposition à l'aléa sismique, admis constant dans chaque zone. La valeur de l'accélération horizontale du sol a_{gd} est attribuée à chaque zone de séisme [SIA261 2003] au tableau 4.4 ci-dessous. Le coefficient de zone γ_Z exprime l'augmentation relative par rapport à la zone sismique la moins exposée Z1. Ces valeurs sont établies pour des ouvrages dont les périodes de vibration fondamentale se trouvent sur le plateau du spectre de réponse de dimensionnement au rocher (Classe de sol de fondation A selon [SIA261 2003]).

Zone sismique	a_{gd} [m/s ²]	γ_Z
Z1	0.6	1.00
Z2	1.0	1.67
Z3a	1.3	2.17
Z3b	1.6	2.67

Tableau 4.4 – Accélération horizontale du sol

La zone de séisme entre directement dans la détermination du spectre de dimensionnement et par conséquent des sollicitations à considérer pour l'évaluation. Ainsi, un ouvrage en zone sismique Z3b devra être plus résistant qu'un ouvrage en zone sismique Z1. En ce qui concerne le patrimoine bâti existant un effort prioritaire doit naturellement être entrepris dans

les zones à plus haute sismicité. La zone sismique n'a cependant pas d'influence directe sur la détermination du facteur de correction. Mais, bien que le facteur de réduction des sollicitations sismiques soit identique pour deux bâtiments identiques dans deux zones différentes, la résistance cible de ces ouvrages ne sera pas équivalente.

Il a néanmoins été constaté que plus la zone est exposée à l'aléa, plus le risque est élevé et plus l'unité monétaire investie sera efficace. Cela signifie qu'en terme de proportionnalité des coûts, la somme investie par vie humaine sauvée, exprimée dans cette étude par le coût de sauvetage, sera plus petite en zone Z3b qu'en zone Z1. Des interventions se justifient donc plus facilement dans les zones à plus forte sismicité.

4.2.5. Fixation par objectifs

Les paragraphes précédents permettent d'estimer les valeurs exposées d'un ouvrage par le biais de deux indices: l'indice de valeur économique mixte et l'indice de vie humaine. Les exemples de bâtiments individuels ont fourni plusieurs enseignements généraux, rapportés plus bas. En particulier, l'allure de générales de droites d'isovaleur du facteur de correction a pu être esquissée et présentée à la figure 4.4.

Normalisation

Pour passer du domaine particulier au domaine général, les bâtiments ont été normalisés. L'unité de normalisation choisie est le m^3 (SIA) qui rapporte les indices de valeur de l'ouvrage à une unité comparative commune qui soit indépendante de la taille du bâtiment. Cette étape est effectuée à l'aide des équations (4.5) et (4.6) ci-dessous, pour obtenir, respectivement, l'indice de valeur humaine normalisé et l'indice économique mixte normalisé. L'indice de valeur humaine est multiplié 10^4 afin de faciliter la lecture dans le plan indiciel.

$$V_{hN} = 10^4 \times V_h / m^3 (SIA) \quad (4.5)$$

Avec

V_{hN}	Indice de valeur humaine normalisé
V_h	Indice de valeur humaine
$m^3 (SIA)$	Volume SIA de l'ouvrage, [m^3]

$$V_{eN} = V_{em} / m^3 (SIA) \quad (4.6)$$

Avec

V_{emN}	Indice de valeur économique mixte normalisé, [Frs./ m^3]
V_{em}	Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage, [Frs.]
$m^3 (SIA)$	Volume SIA de l'ouvrage, [m^3]

4.2.6. Droites d'isovaleur du facteur de correction p

Ce paragraphe expose l'allure générale de droites d'isovaleur du facteur de correction **p** obtenues à l'aide des enseignements particuliers obtenus des projets-pilotes. Ces droites de

correction illustrées à la figure 4.3 dans le plan indiciel de valeurs peuvent être construites par régression linéaire simple. Des exemples numériques sont présentés à l'annexe A [Bâtiments individuels]. Un nombre plus élevé d'exemples permettrait de mieux calibrer ces droites, principalement en prenant en compte les typologies de bâti les plus représentatives. Les quelques enseignements généraux énoncés plus bas ont néanmoins pu être renseignés.

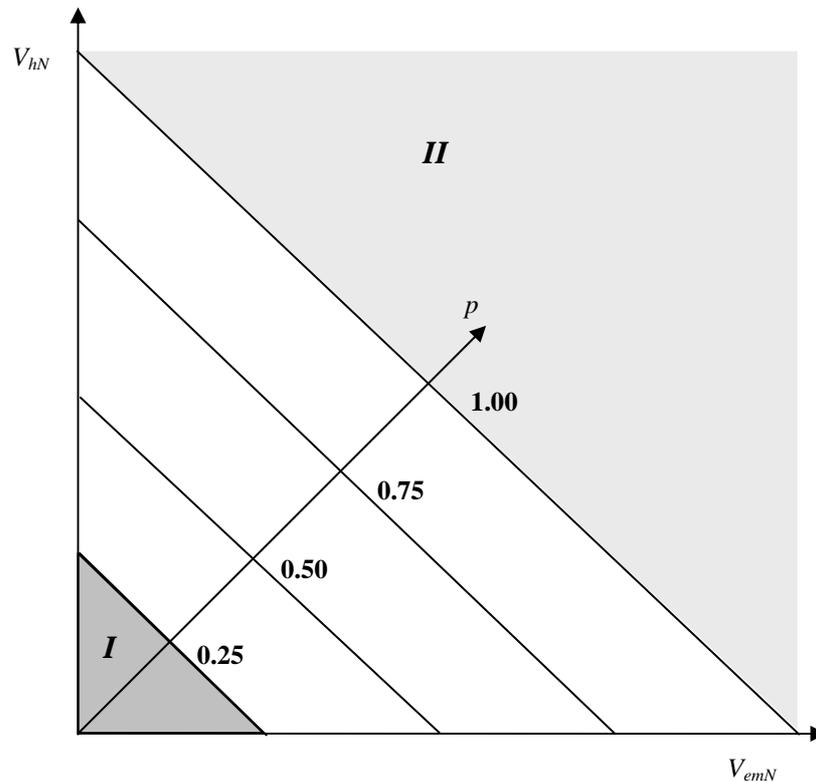


Figure 4.3 – Droites d'isovaleur du facteur de correction p , représentées dans le plan indiciel de valeurs

Le seuil de veto appliqué à la dimension sécuritaire ou humaine reflète le principe de précaution. Cette considération détermine un plancher, qui définit une zone, dite de précaution. Cette zone, soit la zone I représentée à la figure 4.3, fixe une diminution des sollicitations sismiques en dessous de laquelle il n'est pas acceptable de descendre pour les acteurs au processus décisionnel. Cette valeur représente les objectifs actuels des acteurs. Il se peut, et l'expérience nous le montre dans d'autres domaines, que cette valeur du coefficient de réduction peut évoluer au cours du temps. Les attentes de la société étant de plus en plus fortes face à ce type de risque pouvant être géré de manière préventive, il faut s'attendre à ce que cette valeur augmente à l'avenir.

La zone II définit des ouvrages ayant une valeur extrêmement importante. Pour cette raison, des exigences plus élevées que celles fixées dans la norme actuelle pour le dimensionnement des ouvrages sont requis. Cela est envisageable, par exemple, pour des ouvrages vitaux, comme des hôpitaux ou encore pour des ouvrages dont la ruine peut entraîner des dommages d'une extrême importance. On pense ici par exemple aux barrages ou encore aux ouvrages soumis à l'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs [RS 814.012 1991], comme par exemple les centrales nucléaires.

Ces éléments sont illustrés par les bâtiments individuels pilotes qui ont fait l'objet d'une étude de détails et dont les résultats sont rassemblés dans la figure 4.4. Le détail des études pilotes est présenté à l'annexe A [Bâtiments individuels]. Les résultats tirés des projets pilotes sont rassemblés sur le plan indiciel de valeur. Les points expriment le niveau de protection « optimal » obtenu pour 5 bâtiments existants à l'aide de la méthode d'analyse multicritère proposée au chapitre 6.

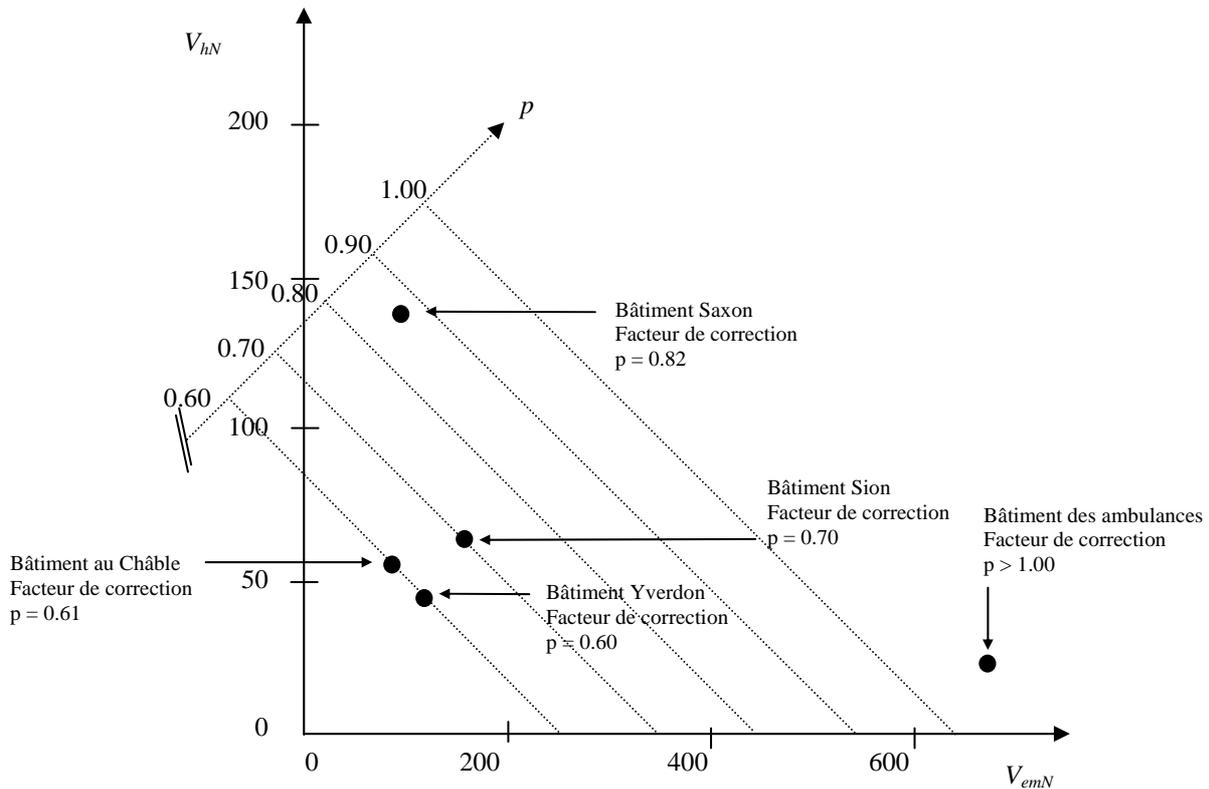


Figure 4.4 - Positions des bâtiments pilotes dans le plan indiciel de valeurs

Les droites d'isovaleur illustrées à la figure 4.4. ont pu être construites par simple interpolation graphique des points optimaux. Pour obtenir une validité supplémentaire, un nombre plus important de comparaisons de mesures doit être entrepris.

En outre, le niveau de protection cible acceptable évolue avec le temps. Ces droites ne sont dès lors pas figées mais évolutives, également du fait de l'évolution technologique des mesures. Elles donnent néanmoins une indication rapide sur le niveau de sécurité d'un bâtiment pour lequel une transformation ou une rénovation est envisagée. Evidemment, le mode de détermination de ce facteur de réduction est reproductible en tenant compte du contexte d'étude.

Ce diagramme peut être utilisé par l'ingénieur praticien pour obtenir rapidement une indication sur le niveau de protection d'un ouvrage existant. Cette indication va lui permettre de vérifier si un bâtiment répond aux attentes conformes en terme de proportionnalité et de précaution ou si une intervention est requise.

4.2.7. Variabilité des paramètres

Ce paragraphe passe en revue les différents paramètres entrant dans les équations des indices présentés dans les paragraphes précédents et l'influence de leur variation dans le plan indiciel de valeurs. Ces paramètres vont jouer un rôle lors de la fixation du facteur de correction p qui réduit les sollicitations sismiques auxquels doit être capable de résister un ouvrage. Les bâtiments individuels pilotes ont permis d'illustrer cette variabilité. Les paramètres ayant fait l'objet d'une étude de variabilité sont résumés au tableau 4.5, avec les bornes retenues

N°	Caractéristique étudiée	Borne A	Situation actuelle	Borne B
1	Vulnérabilité	Petite (béton armé dimensionné en capacité)	Moyenne	Grande (moellons non dimensionnés)
2	Nombre de personnes	Petit nombre	50	Grand nombre
3	Valeur économique de l'ouvrage	Petite valeur	2'615'000	Grande valeur
4	Durée de vie restante	Petite (inférieure à 10 ans)	20 ans	Grande (supérieure à 35 ans)
5	Fonction / utilisation	Aucune fonction particulière	Habitation	LIFELINE
6	Impacts économiques résultants	Très faibles	Faibles	Très importants

Tableau 4.5 – Variabilité des paramètres

En faisant varier un des paramètres, tout en conservant inchangés les autres, on effectue la comparaison des mesures à l'aide de la méthode développée dans le chapitre 6 pour un bâtiment de base donné. Leurs variations sont représentées sur le plan indiciel de valeurs à la figure 4.5.

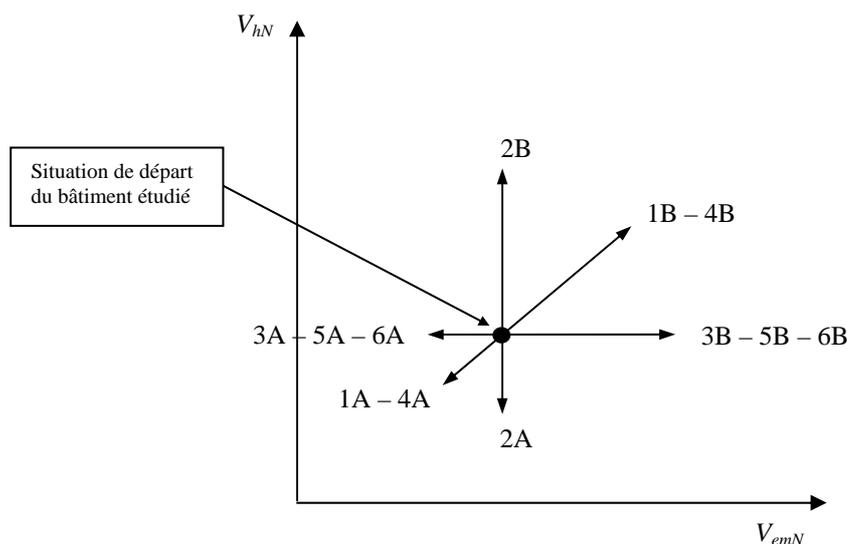


Figure 4.5 – Evolution du facteur de correction p en fonction de la variation des paramètres dans le plan indiciel de valeurs

Un bâtiment ayant une plus forte vulnérabilité à l'aléa sismique, ici par exemple un bâtiment en maçonnerie traditionnelle, autorise un facteur de réduction des actions sismiques plus petit

qu'un même ouvrage mais construit en béton armé dimensionné en capacité. En terme de proportionnalité, plus le bâtiment est vulnérable et plus l'investissement consenti sera efficace.

Plus un bâtiment expose peu de valeur humaine au risque sismique et plus le facteur de réduction sera petit. Cela se traduit par une variation du facteur de correction p sur l'axe vertical du plan indiciel illustré à la figure 4.5. Un bâtiment avec une forte concentration de personnes nécessite donc une résistance plus haute qu'un bâtiment avec une faible concentration de personnes.

De manière identique, un bâtiment avec une forte concentration de valeurs ou avec une utilisation importante, comme un hôpital, demande une résistance plus grande qu'un bâtiment ne comportant qu'une faible valeur économique ou sans aucune fonction particulière. Cette influence se traduit par une variation du facteur de correction p sur l'axe horizontal de la figure 4.5.

La durée de vie intervient dans les deux équations définissant les indices de valeur économique mixte et humaine. Son influence se traduit donc par une variation du facteur de correction p sur l'axe diagonal de la figure 4.5. Plus un bâtiment a une durée d'utilisation restante importante et plus son facteur de réduction est élevé.

La dernière variabilité abordée traite de la faisabilité et du coût d'une mesure technique envisageable sur un ouvrage existant. L'influence de son efficacité en fonction du coût investi influence fortement le niveau de protection cible, exprimé par le facteur de réduction. Pour aboutir à une telle considération portant sur les mesures, une réflexion en amont de la part d'un spécialiste est impérative. En effet, l'impact de ce paramètre sur le niveau de protection cible s'est relevé être important dans notre étude. Il est difficile en l'état des connaissances de fournir une allure générale de droites de correction pour l'ensemble des typologies de bâti rencontrées. Un effort important reste à fournir dans cette direction pour garantir la représentativité de l'ensemble des typologies de construction. Cet aspect influence la détermination du facteur de réduction sur l'axe diagonal de la figure 4.5.

4.3. SYNTHÈSE

Le niveau de protection cible d'un ouvrage peut varier fortement. Tout d'abord, on distingue les nouvelles constructions, qui se doivent de respecter les exigences normatives. Ceci n'implique fréquemment qu'un faible surcoût. Par contre cela nécessite un contrôle de la conformité de la mise en œuvre adéquate de ces exigences.

Pour les constructions existantes, les deux principes souvent contradictoires de précaution et de proportionnalité doivent être mis en balance lors d'une évaluation. Un transfert d'une part de la sécurité, sans descendre en dessous d'une limite dite de précaution, s'opère ainsi par l'utilisation la plus efficace et judicieuse des ressources économiques limitées à disposition. Ce chapitre propose une méthode basée sur deux indices de valeur (l'indice de valeur humaine normalisé et l'indice de valeur économique mixte normalisé) qui vont permettre de déterminer le niveau de protection cible. Ce niveau est exprimé par la multiplication des exigences normatives par un facteur de correction p . De nombreux enseignements sont tirés de la démarche comparative appliquée à des bâtiments individuels,

comme par exemple l'influence des différents paramètres constitutifs du risque ou encore la détermination d'un plancher que fixe le principe de précaution. Des droites d'isovaleur du facteur de correction p sont enfin esquissées sur la base des projets pilotes. Un calibrage de ces droites passe par une campagne nécessitant plusieurs évaluations supplémentaires. Ce travail doit être envisagé pour augmenter la pertinence et l'utilisabilité de ces droites.

5 MESURES ET STRATÉGIES DE GESTION DU RISQUE SISMIQUE

5.1. CLASSIFICATION DES MESURES DE GESTION DU RISQUE SISMIQUE

L'étape suivante du processus de gestion est l'élaboration de mesures et de stratégies pour envisager la gestion du risque identifié préalablement. Ce chapitre présente donc initialement une classification systématique et originale des différentes mesures disponibles pour appréhender le risque sismique. Les stratégies de gestion sont abordées en fin de chapitre.

Le tableau 5.1 fournit une vue synthétique du classement des mesures. Ces mesures sont classées dans une matrice croisée, fonction de la cible sur laquelle la mesure agit (à savoir l'aléa, la vulnérabilité ou la valeur) et la catégorie de mesures, présentées dans les paragraphes suivants. Cette vision synthétique est complétée par le tableau 5.2 qui donne pour chaque catégorie identifiée dans la matrice un exemple concret de mesure.

Mesures	Prévention	Protection	Intervention		
Action sur					
L'Aléa	Aménagement du territoire	Warning system			
La Vulnérabilité	Mesures constructives et incitatives	Mesures techniques	Mesures de préparation	Mesures d'atténuation	
La Valeur	Mesures orientées valeur	Mesures d'adéquation			Mesures de réparation

⇔ Actions pré événementielles ↓ Actions post événementielles ⇔
 Événement catastrophique

Tableau 5.1 – Matrice synthétique des mesures à disposition pour la gestion du risque

Mesures	Prévention	Protection	Intervention		
Action sur					
L'Aléa	Mise à disposition des cartes indicative des sols de fondations	Système avertissant la population de la propagation des ondes			
La Vulnérabilité	Dimensionnement adapté (par exemple en capacité)	Augmentation de la résistance d'un bâtiment existant	Création d'un corps de spécialistes équipé pour la recherche de personnes enfouies	Intervention de ce corps de spécialiste	
La Valeur	Déplacement d'une activité importante d'un bâtiment vulnérable vers un bâtiment moins vulnérable	Fixation de l'état limite de service pour un hôpital afin qu'il puisse fonctionner après une événement sismique d'intensité définie			Mise à disposition d'un fond garantissant le remboursement des dommages

Tableau 5.2 – Exemples de mesures répertoriées dans la matrice synthétique

5.2. LES MESURES DE PRÉVENTION

5.2.1. Définition

Ces mesures sont de nature préventive. Elles se positionnent donc dans le temps durant la période qui précède un événement catastrophique. Elles permettent une limitation, voire une réduction, des dommages potentiels. Ces mesures s'appliquent aux nouvelles constructions. Elles visent à les concevoir de manière adaptée au risque potentiel auquel elles sont exposées.

5.2.2. Mesures de gestion territoriale

Mise à disposition de cartes de microzonage des classes de sols de fondation pour le dimensionnement

Un outil de gestion territorial complémentaire, en cours de développement, repose sur la mise à disposition des concepteurs de nouvelles constructions d'une carte de microzonage des classes de sol de fondation au 1:25'000, définies dans la norme SIA 261 [SIA261 2003] au tableau 25. Ces documents sont en cours de réalisation sous l'égide de l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG).

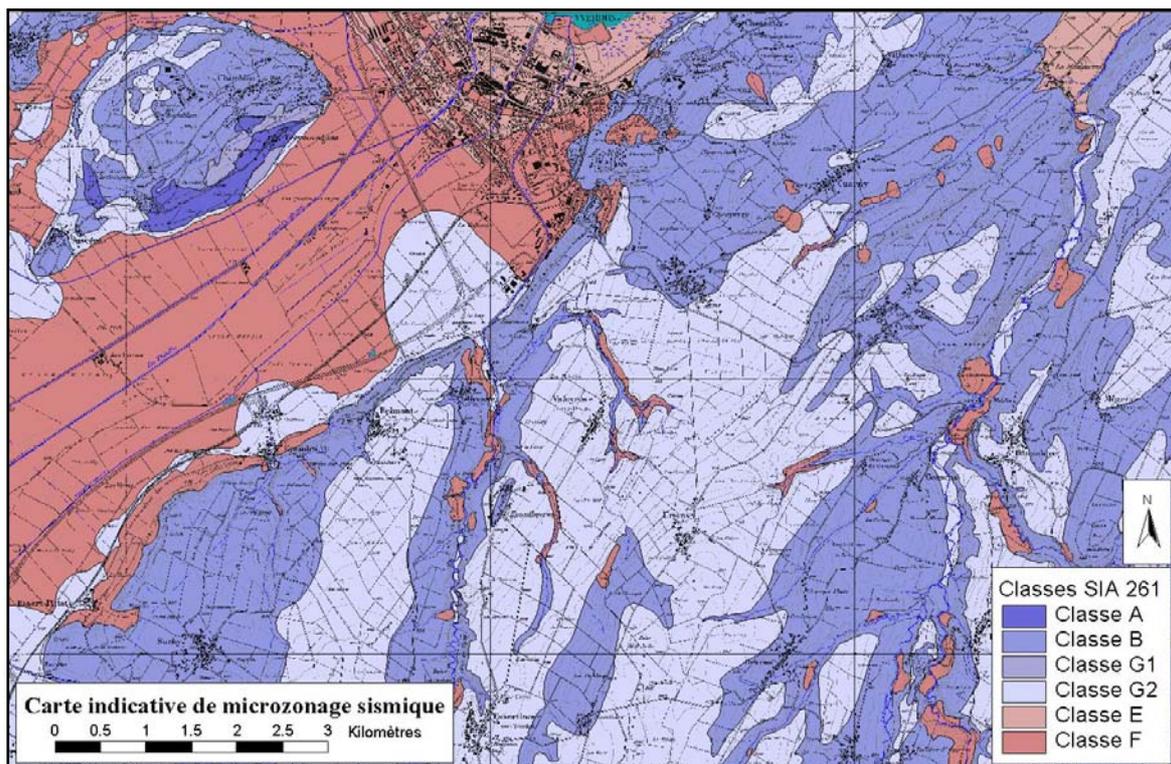


Figure 5.1 – Extrait de la carte de microzonage des classes de sol de fondation de la feuille au 1 :25'000 Yverdon-les-Bains d'après [Widmer 2000]

La priorité porte principalement sur les zones à sismicité élevée et sur les ouvrages qui concentrent de manière importante les valeurs, aussi bien humaines qu'économiques. Une directive en cours de préparation permet d'uniformiser la création de ces cartes indicatives [OFEG 2003].

5.2.3. Mesures orientées valeur

Lors de la planification et de la réalisation de nouveaux bâtiments ou infrastructures, il est opportun d'éviter autant que possible, sauf si un intérêt prépondérant l'impose, de construire des ouvrages ayant une valeur particulière importante (essentiellement les ouvrages entrant dans la CO III) qui présentent une conjonction de composants du risque par trop défavorable.

5.2.4. Mesures constructives

Ces mesures se concentrent sur la vulnérabilité du patrimoine à construire. Elles peuvent se positionner à plusieurs niveaux.

Transfert de l'évolution de l'état des connaissances

Les normes de construction sont le reflet de l'évolution des connaissances. Les milieux académiques et les associations professionnelles, en particulier la Société suisse des ingénieurs et architectes et son groupe spécialisé, la Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures (SGEB), font office de lien permettant la mise en application pratique de cette évolution. Un effort important est en cours aussi bien pour former les nouveaux ingénieurs que pour mettre à niveau les connaissances des professionnels déjà en exercice. En effet, des techniques de dimensionnement, appelées dimensionnement en capacité [Lestuzzi 2004], sont disponibles. Elles permettent d'exploiter la ductilité d'un ouvrage pour y dissiper l'énergie d'un séisme. Ces techniques impliquent, outre un niveau de formation élevé, des contraintes technologiques supplémentaires. Par exemple, il est intéressant d'avoir recours à des aciers de ductilité plus élevée, par exemple des aciers de classe de ductilité C [SIA262 2003]. Ce type d'acier commence seulement à être disponible auprès de fabricants ou nécessite des délais de livraison importants. Cette mise à disposition devrait être accélérée pour permettre au plus vite de réduire les coûts de construction des nouveaux ouvrages tout en garantissant les prescriptions normatives actuelles. Afin de rendre compétitif le recours à ce type d'acier, des mesures incitatives sont envisageables.

Actions découlant des bases légales

Il faut tout d'abord relever l'ordonnance sur la protection des accidents majeurs [OPAM 1991] qui soumet à des contraintes particulières la conception, la construction et l'exploitation de certains ouvrages. Au niveau cantonal, les lois sur les constructions introduisent la notion de sécurité publique et les moyens pour la faire respecter. Un effort de clarification dans le domaine spécifique au séisme est à faire lors des révisions périodiques de cette législation.

Comme vu au paragraphe traitant des mesures de gestion du territoire, des mesures complémentaires basées sur les règlements de construction communaux sont possibles. Les cantons délèguent la compétence aux communes quant à la prise en compte de ce risque, demeurent réservés les ouvrages d'importance cantonale par le biais de ces règlements. La question portant sur le contrôle de la conformité reste cependant à régler, notamment quant aux moyens à mettre en œuvre, à la procédure et à l'autorité compétente. On peut envisager les mesures suivantes:

- Rendre force obligatoire les prescriptions sismiques des normes, comme cela est déjà le cas dans le canton de Vaud et la Principauté du Lichtenstein,

- contrôler la conformité des prescriptions normatives par auto-contrôle de la profession,
- mettre en place un organe et une procédure de contrôle ad hoc. Le contrôle peut se faire lors de la mise à l'enquête publique, avant délivrance du permis de construire. La validation finale peut se faire lors de la délivrance du permis d'habiter.

5.2.5. Mesures incitatives

Dans une période transitoire, dont la durée permettrait une mise à niveau des connaissances des professionnels, l'intérêt prépondérant du public justifie la mise à disposition à bien plaisir d'un pôle de compétences. Cela sous la forme de financement d'experts ou de la création d'un service spécialisé. Ces mesures permettent de garantir une meilleure mise en œuvre des prescriptions normatives. Une autre mesure incitative est le subventionnement de la part excédentaire du coût des aciers de ductilité de classe C, permettant d'appliquer un coefficient de ductilité plus élevé. Le surcoût est lié au volume façonné, actuellement faible, de ce type d'acier. Les prix au kilogramme vont naturellement baisser avec le recours systématique à cette classe dans le futur. Cette mesure vise à inciter la mise en œuvre du dimensionnement parasismique dans les zones les plus sensibles sans plus-value notable. Afin de conserver un caractère transitoire limité dans le temps, ces mesures devraient s'accompagner de la formation ad hoc des nouveaux ingénieurs et architectes ainsi que par une mise à niveau, par des cours de formation continue, des professionnels déjà actifs. Une limitation de la compétence par la délivrance, par exemple, d'un certificat de qualification, sous certaines conditions, est envisageable.

5.3. LES MESURES DE PROTECTION

5.3.1. Définition

Ces mesures permettent de réduire le risque potentiel dans les zones dangereuses là où existe une utilisation digne de protection et après avoir pris les mesures de planification utiles. Elles s'appliquent également sur des ouvrages déjà existants, là où une activité ne peut être cessée de manière proportionnée. Ces mesures influencent la réponse du système étudié au phénomène catastrophique en modifiant la vulnérabilité de celui-ci. Il peut s'agir de mesures ponctuelles (par exemple le renforcement d'un élément LIFELINE) ou extensive (par exemple une campagne de renforcement des bâtiments en maçonnerie).

5.3.2. Mesures techniques de mitigation de la vulnérabilité

Axes fondamentaux des mesures

En Suisse, seuls quelques exemples de renforcement techniques existent [Bachmann 2000b] [Borgogno 2001]. Le choix de mesures techniques se fait selon plusieurs axes fondamentaux. Ces axes sont illustrés à l'aide du graphique des spectres de réponse des accélérations présenté à la figure 5.2. Selon la terminologie usuelle les cinq axes fondamentaux de mesures suivants sont distingués:

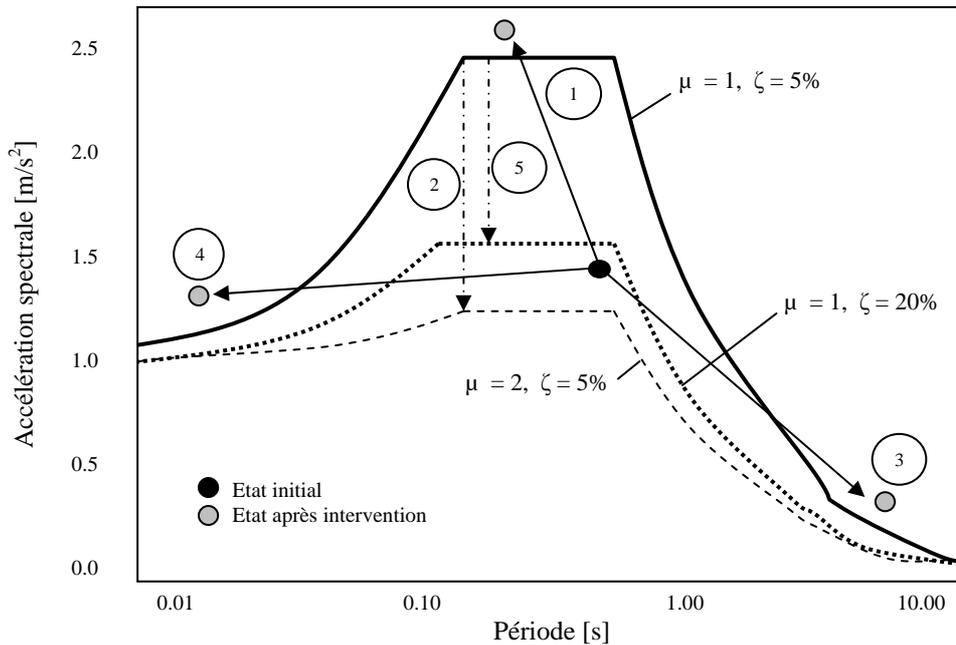


Figure 5.2 – Représentation des axes fondamentaux des mesures [Koller 2000] et [Badoux 1987]

1. **Augmentation de la résistance:** L'action souhaitée est l'augmentation de la résistance soit par l'ajout de nouveaux éléments, soit par le renforcement d'éléments existants. Il faut veiller autant que possible à faire concorder les centres de masse et de torsion afin d'éviter des efforts de torsion, garantir la compatibilité des déformations entre les matériaux (ce qui gouverne fréquemment le dimensionnement). Le fait qu'on essaye d'intervenir sur le moins possible d'éléments pour limiter les impératifs liés aux contraintes pratiques présentées plus bas provoque des problèmes supplémentaires. On a une concentration des efforts sismiques dans ces éléments qui peut se résoudre par l'adoption d'un dimensionnement en capacité. Les fondations sont fortement sollicitées et peuvent nécessiter également une intervention, ce qui est souvent onéreux.
2. **Augmentation de la ductilité:** L'effet escompté vise à augmenter la ductilité de certains éléments ou sections. Ainsi, des zones dimensionnées de manière ad hoc dissipent plastiquement l'énergie du tremblement de terre. Cela implique des déformations permanentes importantes dans lesdites zones ainsi que des déplacements importants lors du séisme.
3. **Réduction de la fréquence propre:** L'effet visé le long de cet axe est une réduction, souvent de manière significative, de la fréquence propre. Le prix à payer pour la mise en œuvre de ce type de mesure sont de grands déplacements et une diminution de la résistance. Elles sont cependant intéressantes à bien des égards lorsque ces déplacements sont tolérables.
4. **Augmentation de la rigidité:** C'est ici une augmentation de la rigidité globale de la structure qui est visée. Cela implique une augmentation de la fréquence propre de l'ouvrage. Les besoins de rigidité du fait de la compatibilité des déformations

imposées par des contraintes de fonctionnalité contrôlent très souvent le dimensionnement du renforcement. Cette augmentation se fait par l'ajout d'éléments d'attache (bracing).

5. **Augmentation de l'amortissement:** Le long de cet axe, on cherche à augmenter l'amortissement de certains éléments. Jouer sur l'amortissement provoque une petite réduction des déplacements qui ne peut être envisagée que si la ductilité est faible.

Importance de l'effet de site pour le choix de la mesure

Il est important d'identifier les caractéristiques fréquentielles spécifiques du site étudié. En effet, cette démarche a un coût faible et permet d'éviter le recours à une mesure technique qui peut s'avérer parfois contre-productive. Par exemple, une amplification due à l'effet de site dans la plage du spectre cible de l'intervention peut s'avérer catastrophique.

Quels critères pratiques d'évaluation faut-il considérer ?

Des contraintes pratiques lors de l'application de ces mesures aussi bien que des critères économiques ou de sécurité doivent être considérés lors de la phase de choix de la mesure adaptée. Ces contraintes peuvent être de plusieurs natures:

- Des contraintes de calendrier et de ressources allouables: La priorité sera donnée principalement aux zones à sismicité élevée et présentant une concentration importante de valeurs.
- Des contraintes réglementaires et légales: Les aspects réglementaires et légaux, en particulier les règlements de constructions communaux doivent être considérés dès la phase de projet. Le cas échéant, des dérogations doivent être demandées rapidement et étayées par un argumentaire solide en terme de protection des personnes.
- Des aspects politiques: La volonté politique de promouvoir la protection face au risque sismique permet d'envisager une participation des autorités publiques sous la forme d'un soutien. Ce soutien peut se manifester aussi bien sous la forme de mise à disposition de compétences des services de l'Etat, comme les bureaux techniques communaux, un service cantonal ou encore un établissement d'assurance, mais aussi par subventionnement. Ces subventions peuvent être destinées aussi bien à la phase d'étude qu'à financer tout ou partie de la mesure.

Une analyse multicritère mettant en relation le niveau de sécurité cible (principe de précaution) et le niveau d'investissement (principe de proportionnalité) est formalisé dans le chapitre 4. On passe ci-après en revue les différents critères pouvant entrer en matière lors d'une réflexion menant au choix d'une mesure. Les critères retenus dans cette recherche seront détaillés au chapitre 6.

- La fonctionnalité: L'utilisation du bâtiment impose des dispositions architecturales particulières. Ce sont bien souvent ces contraintes d'utilisation qui vont être prépondérantes.

- Critères techniques: Ces critères de faisabilité sont imposés par les conditions particulières propres à chaque situation.
- Critères économiques: Ces aspects sont souvent déterminants dans le choix de la mesure. Ils sont toujours mis en proportionnalité avec le niveau de protection visé. La valeur actuelle nette du projet permet d'évaluer l'investissement. Autant que possible, ces aspects doivent non seulement intégrer des éléments de rentabilité directe pour le maître d'œuvre, mais aussi des éléments de rentabilité indirecte pour la société. Cette démarche rejoint l'annexe E traitant du rôle de l'Etat [Contexte réglementaire]. La figure 5.3 illustre les éléments entrant dans la détermination de la rentabilité. Certains de ces éléments vont permettre la comparaison des mesures de gestion. Ils sont traités plus en détails au chapitre 6 de même que la pluralité des acteurs (ici le propriétaire privé ainsi que la collectivité) qui apparaît sur cette figure.

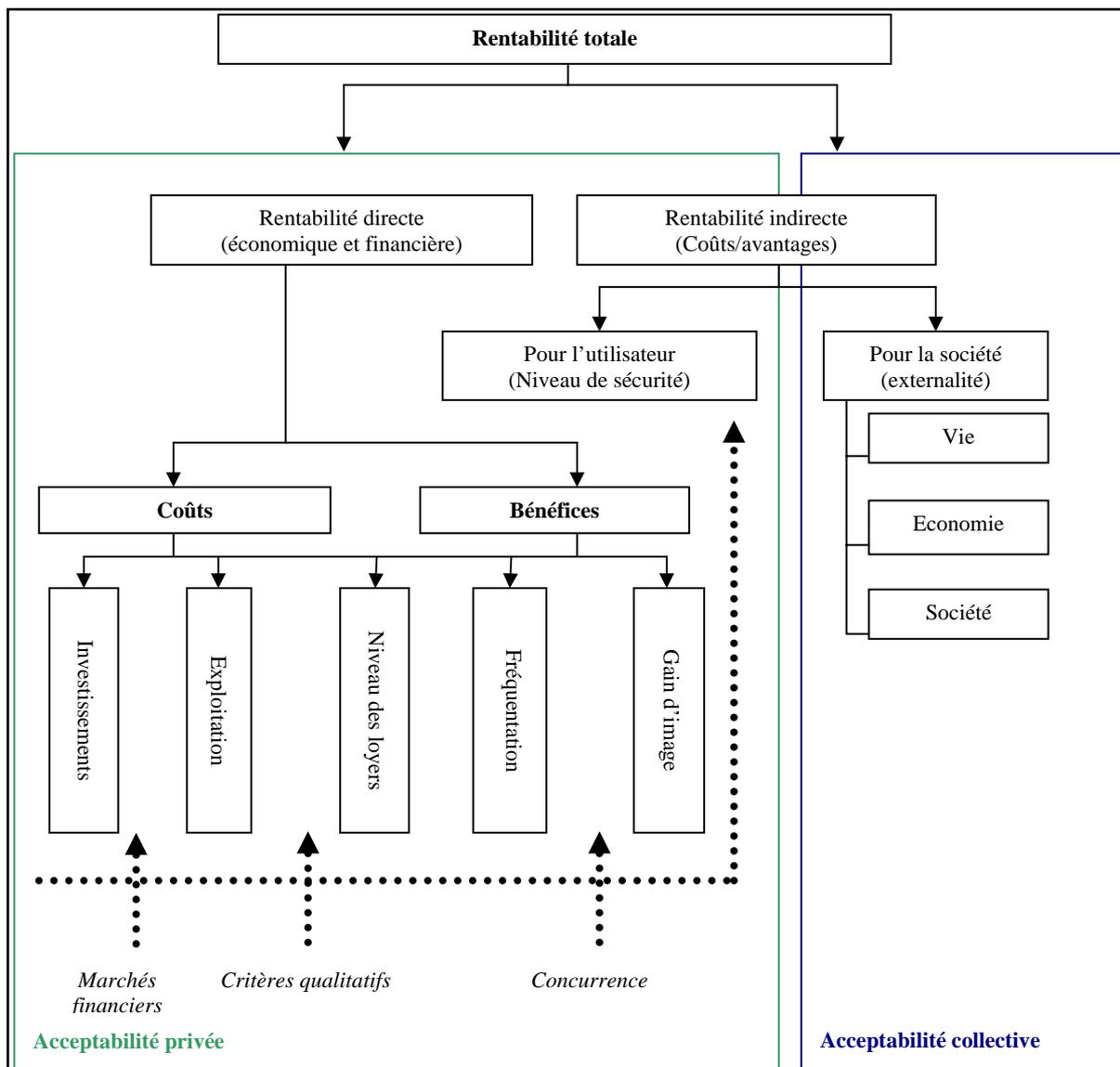


Figure 5.3 – Critères de rentabilité totale pour un immeuble d'habitation

- Critères sécuritaires: Ces critères ont pour objectif de déterminer le niveau de sécurité des personnes.

5.3.3. Mesures d'adéquation

Ces mesures visent à mettre en adéquation la vulnérabilité physique du bâtiment avec son affectation. Par là, on entend principalement le fait de déplacer des activités importantes vers des bâtiments ayant, de par leur construction, un haut niveau de sécurité sismique. Ces activités sont principalement celles liées au réseau LIFELINE, mais également celles qui ont une haute valeur selon plusieurs critères: impact économique (usine, centre de recherche,...), impact humain (bâtiments à forte concentration comme les écoles ou encore les centres commerciaux), ou impact environnemental. Ce type de mesure n'est pas toujours envisageable quand, par exemple, la valeur tient dans l'ouvrage lui-même et non pas dans son contenu. On pense en premier lieu à des ouvrages ayant une forte valeur historique ou symbolique.

5.4. LES MESURES D'INTERVENTION

5.4.1. Définition

Ces mesures sont destinées à réduire le risque résiduel. Ce type de mesure inclut les services d'intervention (police, pompiers, protection civile). Un autre domaine important porte sur les mesures de réparation et en particulier les mesures de transfert du risque économique par le biais d'assurances.

5.4.2. Positionnement temporel

Une distinction est faite en fonction du positionnement dans le temps par rapport à l'événement catastrophique, soit pré événementiel, par ce qu'on appelle des mesures de *préparation*, soit post événementiel par des mesures dites d'*atténuation* et de *réparation*.

5.4.3. Mesures de préparation et d'atténuation

Ces deux types de mesures se différencient uniquement sur la base du moment où elles sont mises en œuvre. Elles sont complémentaires et indissociables les unes des autres. Elles n'influencent pas la cause mais limitent autant que possible les conséquences ou accélèrent la capacité de résilience d'un système socio-économique.

Elles sont principalement du ressort des autorités publiques. Ces actions se classifient par acteur ou par fonction comme présenté au tableau 5.3.

Des difficultés de coordination apparaissent aussi bien pour les actions avant un séisme que lors de la survenance d'un événement catastrophique. Une meilleure mise à contribution des forces permettrait de minimiser les conséquences.

Acteur	Fonction	Action/rôle
Police/pompiers	Sécuritaire De secours Informationnelle Fonctionnelle	Garantir l'ordre public Disponibilité des moyens: <ul style="list-style-type: none"> ▪ matériel et équipement (unités de premier secours, brancards, (ambulances, machine de levage, appareil de recherche, véhicule de lutte incendie,...) ▪ personnel ad hoc formé et chiens Planification de campagnes d'information : <ul style="list-style-type: none"> ▪ exercice ▪ information Rendre utilisable les infrastructures vitales
Armée Corps suisse d'aide humanitaire	De secours	Disponibilité des moyens: <ul style="list-style-type: none"> ▪ matériel (hôpitaux de campagne, unités mobile de secours,...) et équipement (machines de chantier, véhicules sanitaires,...) ▪ personnel ad hoc formé
Hôpitaux	De secours	Préparation à un événement catastrophique: <ul style="list-style-type: none"> ▪ disponibilité des moyens ▪ gestion logistique des capacités (mise en réseau hospitalier) ▪ exercice
Corps de spécialistes - SGEB	Sécuritaire	Création d'un groupe d'experts post événementiel pouvant intervenir après un séisme pour le marquage et l'évacuation des ouvrages dangereux
Autres administrations publiques : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Confédération ▪ Cantons ▪ Communes 	Organisationnelle Événementielle	Préparation: <ul style="list-style-type: none"> ▪ information du public Gestion de la crise : <ul style="list-style-type: none"> ▪ coordination des secours ▪ communication

Tableau 5.3 – Mesures de préparation et d'atténuation selon les acteurs du contexte helvétique

5.4.4. Mesures de réparation

Par mesures de réparation, on entend les mesures augmentant la vitesse de recouvrement d'un système affecté par un tremblement de terre. Ces mesures sont principalement des outils d'assurance. On se pose depuis un certain temps la question de l'assurabilité du risque sismique dans le monde [Eugster 2001], [Eyer 1998], [Kunreuther 2001] et en Suisse, [Schmid 2000].

Situation actuelle en Suisse

Contrairement à ce que croit habituellement la population helvétique, il n'y a pas d'assurance obligatoire contre le risque sismique. La couverture est donc largement insuffisante. Si un violent séisme survenait et affectait une région fortement peuplée, elle ne couvrirait que quelques pourcents des dommages économiques [Fäh 2001]. Seul quelques grandes multinationales sont couvertes contre ce risque par des assurances internationales. La majorité des personnes privées et des entreprises sont dans un état de sous-couverture quasi totale. Ces personnes et firmes seraient donc directement affectées dans leur pérennité économique. De plus, les institutions de crédits hypothécaires verraient la valeur des objets gagés disparaître, pouvant également mettre en péril leur activité. Cela est particulièrement vrai pour des institutions ayant une activité de crédit locale, comme les banques cantonales. Cette concentration régionale augmente leur vulnérabilité car elles ne peuvent diversifier géographiquement leurs risques.

L'assurance des bâtiments contre le feu et les dégâts élémentaires est en main de monopoles de droit public dans 19 cantons. Il est laissé aux mains des assureurs privés dans les 7 autres cantons. Cependant, aussi bien les différentes lois cantonales que l'Ordonnance sur l'assurance contre les dégâts élémentaires [OADE 1995] (art. 3 let. C) excluent la couverture des dégâts liés aux séismes. Néanmoins, le Pool suisse de l'assurance contre les séismes, fondé en 1978 par 18 assurances cantonales, sur la base de contributions bénévoles, met à disposition des assurés une somme de 2 milliards de francs. L'assurance immobilière du canton de Zurich couvre pour sa part les dégâts consécutifs à un événement jusqu'à concurrence de 1 milliard de francs. Enfin, les 7 cantons connaissant un régime d'assurance privé ont à disposition un fonds de 200 millions de francs pour des dédommagements bénévoles. On se rend compte que ces sommes ne représentent qu'une petite partie des dommages attendus en cas de survenance du séisme millénal. Pour mémoire, un tel séisme dans la région bâloise provoquerait selon les modèles des sociétés suisses de réassurances des dommages aux constructions et aux biens immobiliers s'élevant à plusieurs dizaines de milliards de francs.

Le niveau des primes d'assurance pour une couverture a pu être déterminé grâce au modèle d'estimation du risque proposé au chapitre 3. Il se monte, uniquement pour la prime de risque, pour l'ensemble du portefeuille immobilier de la commune ayant fait l'objet du projet-pilote à environ **28 centimes annuels par milliers de francs assurés**. Une mutualisation du risque sur l'ensemble du territoire donne un niveau de prime identique. La Compagnie Suisse de Réassurance (ci-après la SwissRe), si l'on exclut les dommages insignifiants et une franchise de dix pour cent, estime quant à elle qu'une prime annuelle de 100 francs pour la couverture d'une valeur immobilière de 500'000 francs est nécessaire pour une telle zone d'aléa sismique, soit 20 centimes annuels par millier de francs assurés. Cet ordre de grandeur est conforme à celui obtenu par d'autres auteurs. En cas de non mutualisation du risque, les zones à sismicité plus élevées auront naturellement un niveau de prime plus élevé [Aquaterra 2003].

L'assurance, la co-assurance et la réassurance

On parle usuellement de catastrophe pour des événements provoquant des pertes assurées qui dépassent 25 millions de dollars et d'un cataclysme lorsque ce montant dépasse 5 milliards de dollars [Godard 2002]. Un événement du niveau de la répétition du séisme de 1356 à Bâle est communément appelé *Big One* ou *Big Cat*.

Actuellement, les compagnies privées d'assurance prennent conscience du marché potentiel d'un produit spécifique en Suisse. Certaines d'entre elles proposent une couverture classique. En cas de couverture d'un portefeuille important pour une région, ces couvertures représentent des pertes potentielles énormes comparativement aux capacités financières des dites compagnies. L'assurance offre une capacité remarquable à protéger chacun contre les risques particuliers et suffisamment indépendants, ce qui n'est pas le cas de séismes importants. Les risques susceptibles de provoquer des dommages à grandes échelles sont habituellement réglés par le recours à la co-assurance ou à la réassurance mondiale.

La co-assurance répartit le risque entre plusieurs acteurs du même domaine d'activité. Comme montré plus haut, les pools de co-assurance pour la couverture des dommages sismiques ne possèdent pas la capacité financière et le pouvoir de diversification suffisants pour un cataclysme.

Le marché de la réassurance étant mondial, il permet réellement de diversifier les risques géographiquement et de couvrir des risques de natures diverses. La réassurance est donc un candidat naturel au partage des risques catastrophiques, puisqu'elle permet de limiter les risques de faillite des assureurs. Cependant, des cataclysmes peuvent mettre en péril son équilibre financier. Le montant des primes versées aux réassureurs pour l'ensemble des assurances, exceptée la couverture vie, s'élève à environ 5% du montant total des primes totales encaissées par les assureurs, soit 922 milliards de dollars en 2000 (Source cabinet Deloitte & Touche). L'expérience montre qu'en cas d'évènements cataclysmiques, le recours à la réassurance peut s'avérer insuffisant. A la suite de l'ouragan Andrew, en 1992, et du tremblement de terre de Northridge, en 1994, une pénurie mondiale de capacité de réassurance est apparue, avec comme corollaire une augmentation des tarifs de la réassurance de plus de 50% (Indice Paragon).

La titrisation du risque

D'autres capacités financières plus importantes ont dès lors été explorées. Le transfert vers les marchés financiers de ce type de risques catastrophiques a été concrétisé dès le début des années 90. La capitalisation boursière des marchés américains approche, en 2003, 20 trillards de dollars, avec une fluctuation moyenne de 130 milliards de dollars. Ainsi un cataclysme pourrait être absorbé relativement facilement par ces marchés. Trois outils ont été mis en place, décrits dans [Godard 2002].

1. Les échanges de portefeuilles entre assureurs différemment exposés aux risques catastrophiques, proposé sur le Catastrophe Risk Exchange (CATEX) de New York,
2. les options sur indice du Chicago Board of Trade (CBOT),
3. les obligations, indexées sur la survenance de catastrophes, proposées sur le marché de Chicago, ou *Cat Bonds*.

Ces outils présentent plusieurs avantages, aussi bien pour les compagnies d'assurance et de réassurance que pour les investisseurs. Le nombre d'entrants sur ce type de marché est d'ailleurs croissant.

Vers un modèle mixte: Privé - Public

Pour les dangers naturels classiques, les risques attachés à un événement sont partagés entre de nombreux assureurs, qui peuvent transférer une partie de ce risque vers des réassureurs qui ont une activité mondiale ou encore vers les marchés financiers. Cependant, affronter les conséquences d'un tremblement de terre majeur pourrait bien dépasser les moyens de l'industrie de l'assurance et de la réassurance dans son ensemble; elle refuse d'ailleurs d'y consentir.

Comme il s'agit de pérennité publique et de solidarité, il apparaît normal que l'Etat intervienne, cela tant pour les victimes que pour les dommages matériels, ces derniers pouvant être couverts par les assurances en deçà d'une limite au-delà de laquelle l'Etat prend le relais. La notion de prévention joue ici un rôle déterminant en particulier en diminuant la vulnérabilité de l'environnement aménagé par l'homme. Cependant, en cas d'évènement majeur, la capacité d'un Etat à faire face peut s'avérer insuffisante.

Un système mixte privé-public existe en Suisse du fait du fédéralisme. Une assurance obligatoire nationale, basée sur la mutualisation du risque, a ainsi peu de chance de voir le jour. L'approche mutualiste, qui grâce au principe de solidarité permettrait cependant de diminuer le montant des primes (considéré souvent comme trop élevé dans les zones les plus exposées) ne peut donc être envisagée. C'est donc une logique de différenciation (prime adaptée en fonction du risque propre à chaque preneur d'assurance) qui tend à s'imposer. Elle favorise, de plus, la mitigation du risque par une diminution de la vulnérabilité du bâti et par la mise en place de mesure de prévention. Ce type de couverture demande en outre aux assureurs un niveau de connaissance suffisant pour déterminer le risque.

Du fait de l'ampleur des conséquences potentielles, les limites de l'assurabilité sont atteintes pour des événements cataclysmiques. Un partenariat entre les assureurs (assureurs privés et Etablissements cantonaux d'assurance) et l'Etat à son plus haut niveau, en l'occurrence la Confédération, est le seul envisageable pour garantir la pérennité du système comme illustré à la figure 5.4.

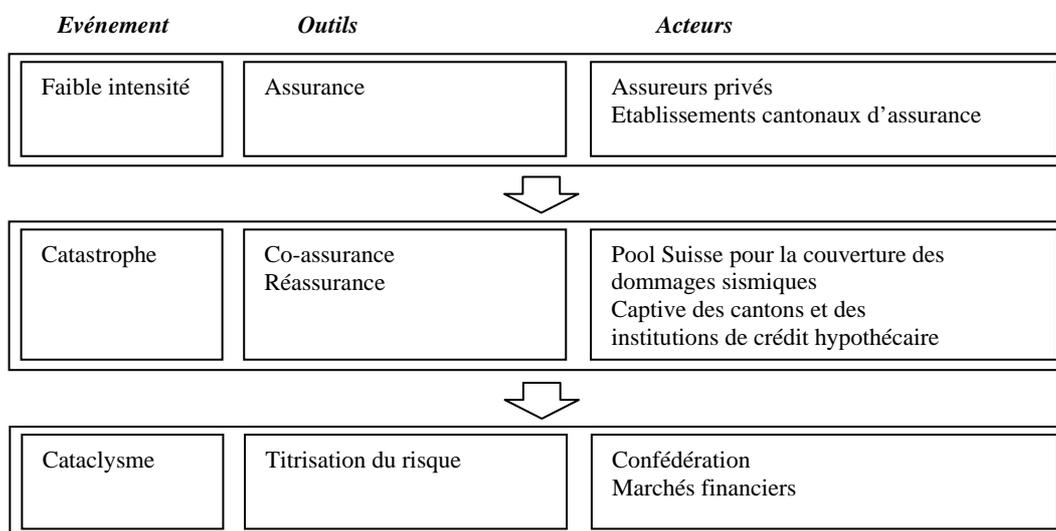


Figure 5.4 – Politique triple-étagée de couverture du risque sismique

De plus, les acteurs actifs dans le crédit hypothécaire, les assureurs et les réassureurs sont les partenaires naturels à la création d'une politique concertée de couverture. Une politique triple-étagée de couverture peut être mise en place, nécessitant des outils spécifiques à chaque niveau, pour à chaque fois la part excédentaire.

5.5. LES STRATÉGIES

5.5.1. Elaboration de stratégies

Une stratégie est un ensemble de mesures de gestion ayant des impacts sur les différents éléments de l'équation du risque. Les stratégies génériques sont les principales possibilités qui s'offrent de manière raisonnable aux décideurs. Elles sont détaillées à l'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle]. Elles sont définies selon les trois cibles complémentaires sur lesquelles elles agissent et résumées dans le tableau 5.4:

- Les nouveaux ouvrages et leur vulnérabilité,
- les ouvrages existants et les mesures constructives de mitigation de leur vulnérabilité,
- les mesures de réparation par transfert de risque en cas de survenance d'un événement sismique provoquant des dommages significatifs.

Ces stratégies ne sont évidemment pas exhaustives, mais elles donnent un aperçu des grands axes stratégiques pouvant être développés par une autorité publique. Les mesures d'atténuation ne sont pas ici abordées. Ce travail formalise le cadre de comparaison de ces différentes stratégies et permet de mener une discussion objective dans le cadre d'une réflexion portant sur la gestion de ce risque. Il peut dès à présent être appliqué dans le cas de mandats d'étude.

	Stratégie actuelle	Stratégie orientée valeur	Stratégie orientée vie
Nouveaux ouvrages	Pas de contrôle de conformité (auto-contrôle de la profession)	Contrôle de conformité pour les bâtiments à haut potentiel de dommages économiques	Contrôle de conformité pour les bâtiments à haut potentiel de dommages humains
Ouvrages existants	Aucune mesure particulière	- Campagne de renforcement technique ciblée des bâtiments à plus haut potentiel de dommages économiques	- Campagne de renforcement technique ciblée, par exemple de 5%, des bâtiments à plus haut potentiel de dommages humains - Mise en conformité de bâtiments LIFELINE
Mesures de réparation	Co-assurance (Pool Suisse pour la couverture des dommages sismiques)	Assurance ciblée, par exemple de 5%, des bâtiments à plus haut potentiel de dommages économiques	Aucune mesure particulière

Tableau 5.4 – Les stratégies comparées

Ces mesures s'accompagnent en pratique naturellement d'autres types de mesures présentées dans les paragraphes précédents, qui sont les compléments essentiels à une bonne politique de gestion. On pense en particulier aux mesures de préparation.

Pour étudier les différentes stratégies, de nombreuses hypothèses simplificatrices, présentées à l'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle], ont été faites. Ces hypothèses ne sont qu'approximatives, basées sur la littérature existante et sur les enseignements obtenus lors des évaluations individuelles des bâtiments à l'annexe A [Bâtiments individuels]. Elles sont néanmoins suffisantes pour mettre en œuvre le cadre de gestion énoncé comme thèse centrale. Un approfondissement de cet aspect sort du cadre de ce travail mais reste évidemment envisageable.

5.5.2. Stratégie actuelle

Cette stratégie décrit la situation qui régit actuellement la plupart des sociétés industrialisées soumises à une sismicité faible à modérée et en particulier la Suisse. Elle prend en compte les spécificités propres à notre pays en ce qui concerne la procédure d'autorisation de construire et le cadre lié à la couverture des dommages sismiques par le Pool Suisse pour la couverture des dommages sismiques. Les principales caractéristiques pour cette stratégie qui ont été admises sont les suivantes:

- Pas de contrôle de la vulnérabilité lors de la construction de nouveaux ouvrages,
- aucune mesure particulière coordonnée pour réduire la vulnérabilité des ouvrages existants,
- analyse du réseau LIFELINE en cours ou en projet,
- couverture par le Pool Suisse des dommages sismiques pour un montant suffisant en cas d'événement catastrophique.

5.5.3. Stratégie orientée valeur

Cette stratégie vise à préserver autant que possible la valeur du système exposé au risque. Selon une approche Pareto, on met un accent fort seulement sur une partie des bâtiments concentrant une quantité importante des valeurs économiques. Les principales caractéristiques pour cette stratégie qui ont été admises sont les suivantes:

- Contrôle de la vulnérabilité lors de la construction de nouveaux ouvrages par une autorité ad hoc,
- transfert du risque par le biais d'assurance pour un pourcentage restreint des bâtiments à forte valeur économique,
- campagne de renforcement des bâtiments à plus haut potentiel de dommages économiques.

Dans la ville pilote d'Aigle, une campagne de renforcement est envisagée pour les dix bâtiments ayant la conjonction de valeur économique importante et de vulnérabilité la plus défavorable. Il est intéressant de constater que 5% des bâtiments assurés regroupent 17% du nombre total de polices contractées auprès de l'ECA et représentent 62% de la valeur assurée [ECA 2001b]. Ce petit nombre de bâtiments ont une importance essentielle pour l'activité économique de la ville. Ces bâtiments sont principalement les grands complexes d'habitation ainsi que les bâtiments abritant des activités économiques importantes. En particulier, les bâtiments publics, par exemple les écoles et les commerces ou encore des bâtiments du centre ville, sièges de l'activité tertiaire, peuvent faire l'objet de renforcement. Cette campagne permettrait une diminution importante du risque économique total. Les impacts de cette stratégie, obtenus par approximation, sont présentés à l'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle].

5.5.4. Stratégie orientée vie

Cette stratégie vise à protéger en priorité la vie humaine. Pour ce faire, des actions diminuant le risque humain sont favorisées. Par exemple, une campagne ciblée sur les bâtiments pouvant accueillir de nombreuses personnes est envisageable. En particulier les bâtiments publics, par exemple les écoles et les commerces, mais également les grands complexes d'habitation, peuvent faire l'objet de cette campagne. Les principales caractéristiques pour cette stratégie qui ont été admises sont les suivantes:

- Contrôle de la vulnérabilité lors de la construction de nouveaux ouvrages par une autorité ad hoc,
- mesure particulière coordonnée pour réduire la vulnérabilité des ouvrages existants lors de rénovations importantes, c'est-à-dire soumises à autorisation de construire, et sur un pourcentage restreint des bâtiments accueillant un grand nombre de personnes,
- mise en conformité du réseau LIFELINE à court terme,

Les impacts de cette stratégie, obtenus par approximation, sont présentés à l'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle].

5.6. SYNTHÈSE

Une palette large de mesures et de stratégies est à disposition des gestionnaires du risque. Des actions à plusieurs niveaux fournissent des alternatives pour diminuer efficacement et durablement la vulnérabilité des sociétés modernes face au risque sismique. Ce chapitre propose une classification des mesures à disposition des gestionnaires. Les principales dimensions préférentielles permettant d'élaborer des stratégies alternatives à la situation actuelle sont présentées. Ces dimensions sont d'ordre économique, avec l'élaboration d'une stratégie orientée valeur et d'ordre humain, avec l'élaboration d'une stratégie orientée vie.

6 CADRE DE GESTION

Ce chapitre récapitule les différents points présentés jusqu'ici pour envisager la gestion du risque sismique avec méthode. Le chapitre s'articule conformément aux étapes usuelles appliquées pour la gestion des risques et formalisées dans un cadre de gestion. Ledit cadre, présenté au chapitre premier, est ici détaillé étape par étape. La problématique du positionnement contextuel est ici considérée au travers d'une approche systémique tout en intégrant la dynamique temporelle par un rappel de l'évolution historique. Cette approche systémique fournit une indication sur les attentes futures de la société et permet de fournir in fine des recommandations aux acteurs identifiés.

6.1. THÉORIE DE LA DÉCISION POUR LE RISQUE SISMIQUE

6.1.1. Formalisation du cadre de gestion

Ce paragraphe rappelle les étapes usuelles d'un processus de gestion. Ces étapes sont identiques, quelle que soit la problématique abordée. Leur formalisation stricte revêt une importance toute particulière dans la gestion du risque sismique du fait de la complexité et de l'ampleur des phénomènes attendus. Cette formalisation permet de mener de manière ordonnée une négociation entre les acteurs impliqués dans ledit processus et d'aboutir à une décision concertée et satisfaisante pour tous. Le caractère reproductible de la démarche autorise une application de ce cadre pour d'autres contextes, époques ou lieux.

Chacune des étapes du cadre formalisé ne peut être considérée pour elle-même, mais comme faisant partie d'un tout. On entend tout d'abord établir un diagnostic d'une situation jugée insatisfaisante.

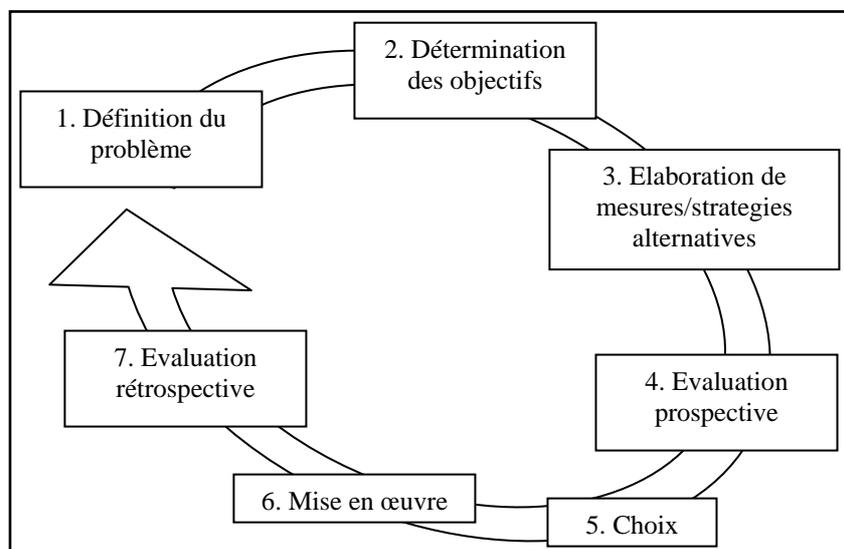
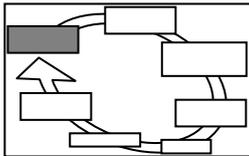


Figure 6.1 – Cadre de gestion du risque sismique

Cela implique plus ou moins implicitement une référence à une situation différente. L'analyse de la situation renvoie naturellement à des valeurs, des buts, des objectifs. La démarche proposée consiste à décomposer le processus d'élaboration de mesures ou de stratégies, de choix et de mise en œuvre en plusieurs étapes. Cette démarche analytique est représentée à la figure 6.1 comme un processus itératif visant à simplifier la réalité. Ces étapes forment le cadre de gestion, esquissé également dans [Pellissier 2002a].

Une des difficultés majeures que le cadre formalisé dans ce travail propose d'affronter est de répondre à des questions qui nécessitent une évaluation d'une situation future, c'est-à-dire inconnue, alors que les réponses s'appliquent à des données basées sur l'expérience empirique, qui se rapportent à des expériences passées. La validité des réponses dépend donc de la capacité à tenir compte du contexte futur probable dans lequel s'inséreront les mesures évaluées, contexte pouvant subir de profondes variations par rapport au moment où s'effectue l'évaluation. Ce travail ne traite pas de la mise en œuvre et par conséquent de l'analyse rétroactive mais se concentre sur les cinq premières étapes du cadre de gestion. L'évolution temporelle permet de mieux saisir la dynamique de gestion. Partant de là, une bonne connaissance de l'historique ayant créé la situation actuelle conduit à des indications pour l'évolution future.

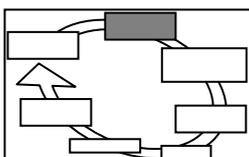


1. Définition du problème

L'étape préliminaire essentielle à toute étude est la mise en contexte de la problématique. Les enjeux doivent aussi être définis afin de comprendre les motivations de chacun des acteurs. Cette étape porte autant sur les aspects propres à la nature du risque, comme l'aléa ou encore la vulnérabilité, mais aussi sur les acteurs ou le contexte réglementaire d'une situation particulière. A la suite de ce diagnostic, les lacunes constatées expriment l'insatisfaction entre une réalité identifiée et une réalité désirée par les acteurs en présence. Cette étape préparatoire est essentielle à une bonne compréhension de la problématique et se doit d'être la plus détaillée possible.

Illustration pour le cas de la gestion du risque sismique

Pour ce qui est du risque sismique, l'évaluation du risque se fait conformément à son équation classique, qui couple l'aléa, la vulnérabilité et la valeur exposée. L'estimation du risque peut se faire à l'aide du modèle proposé au chapitre 3 de ce document. De plus, les conditions locales doivent être identifiées, comme par exemple, dans le cas d'un assureur, les termes contractuels des polices d'assurance pour le portefeuille d'une région.

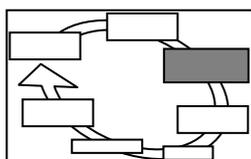


2. Détermination des objectifs

Une étape importante du processus est la détermination des objectifs des acteurs. En effet, le simple fait de mener une description de la situation peut corriger, positivement ou négativement, une situation ressentie. De plus, l'inventaire des ressources à disposition peut remettre en cause des buts par trop ambitieux. Une distinction importante est faite entre les objectifs cibles de protection de bâtiments nouveaux, pour lesquels un haut niveau de sécurité

n'implique qu'un faible surcoût économique, et les bâtiments existants. Dans le cas d'ouvrages déjà construits, les notions contradictoires de proportionnalité et de précaution doivent être soupesées pour déterminer un niveau de protection adéquat. Le chapitre 4 propose une méthode de fixation de cet objectif cible de protection.

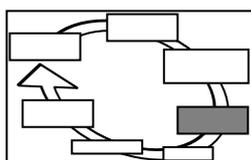
Illustration Pour les nouvelles constructions, les objectifs de protection cibles sont fixés par les exigences normatives. Pour les bâtiments existants, le chapitre 4 propose une méthode de détermination de ce niveau de protection. Pour un assureur, il est important de connaître son exposition au risque couvert pour un portefeuille par l'établissement du SMP, pour la fixation du niveau des primes, et du SMP, pour ce qui concerne la réassurance. Ces indications vont lui permettre de mettre en place une pratique commerciale adaptée à ses objectifs, comme par exemple exiger la conformité aux normes pour toutes nouvelles constructions.



3. *Elaboration des mesures et de stratégies de gestion*

A ce stade, des mesures, respectivement des stratégies, de gestion doivent être élaborées. L'ensemble des actions à disposition des gestionnaires doit par conséquent être considéré. De nombreux critères exercent une influence sur les mesures ou stratégies réalisables. Pour les mesures techniques, des critères de faisabilité impliquent le recours à un ingénieur qualifié et expérimenté. La capacité à proposer des mesures les mieux adaptées à une situation donnée joue un rôle important sur le choix d'une mesure.

Illustration L'élaboration de mesures ou de stratégies de gestion se fait partant des objectifs des acteurs qui cherchent à améliorer une des composantes valorisées du système. Le recours à un spécialiste est toujours requis pour cette étape. Par exemple, pour un assureur immobilier, la composante valorisée qui le concerne est la valeur des bâtiments assurés. Ce sont donc des mesures visant à protéger cette composante qui vont être privilégiées.

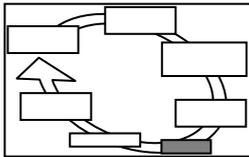


4. *Evaluation prospective*

C'est une évaluation prospective qui aide à choisir entre les différentes mesures inventoriées, respectivement entre les différentes stratégies de gestion. Il est important de considérer l'efficacité des mesures sur le risque initial. Cette efficacité exprime l'adéquation de la mesure aux objectifs visés. L'efficacité des mesures comporte une série de contraintes telles que l'acceptabilité politique, la faisabilité technique, le coût ou encore le temps à disposition pour atteindre les objectifs visés. L'évaluation prospective vise à donner une information la plus complète possible sur l'ensemble des effets des mesures envisagées. Ainsi, les conditions du meilleur choix sont mises en évidence. Cette étape repose sur la capacité à quantifier le

risque initial et, a priori, le risque résiduel après la mise en œuvre d'une mesure ou d'une stratégie de gestion.

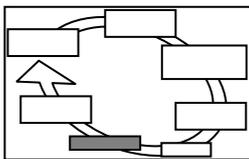
Illustration A ce stade, des indicateurs des impacts de mesures ou de stratégies doivent être établis, comme par exemple l'impact sur la vulnérabilité d'une mesure technique de renforcement. Pour un assureur, des indicateurs donnant une indication sur les impacts de mesures portant sur les aspects économiques seront privilégiés. De tels indicateurs sont proposés plus loin dans ce chapitre.



5. Choix

Il faut dans cette étape documenter et argumenter le choix d'une des mesures ou stratégies élaborées et évaluées aux étapes précédentes. Un processus interactif entre cette étape et les deux précédentes permet d'enrichir ou d'améliorer la pertinence et la qualité (en termes économiques et d'efficacité) des mesures ou des stratégies proposées. Un rôle important de cette étape est d'objectiver le choix par la génération de critères de comparaison ainsi que de leur échelle d'évaluation (quantification, incertitudes, impacts...). Ces critères sont validés par les acteurs en présence. La méthode de comparaison proposée dans cette étude prend en compte la multiplicité des points de vue et la multiplicité des critères. Elle est présentée plus loin dans ce chapitre.

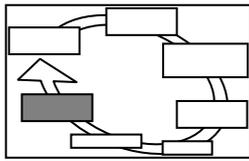
Illustration Pour effectuer un choix, on peut, par exemple, avoir recours à la méthode d'analyse multicritère présentée plus loin dans ce chapitre. Un assureur peut par exemple comparer les différentes mesures alternatives qui s'offrent à lui (réassurance, mutualisation, renforcement ciblé,...) afin d'améliorer sa politique de gestion.



6. Mise en œuvre

Une fois une action retenue, encore faut-il la mettre en œuvre. L'exploitation des résultats est parfois la partie la plus délicate du processus de gestion. Elle va cependant jouer un rôle décisif dans la réussite d'une politique de gestion du risque. Notre étude ne traite pas de cet aspect particulier. Un des projets-pilotes étudiés dans ce travail à néanmoins été mené jusqu'à la mise en œuvre de la mesure de renforcement technique proposée [Bâtiments individuels].

Illustration Cette phase du cadre de gestion n'est pas étudiée dans cette recherche. Cependant, des difficultés pour imposer la mise en œuvre de mesures onéreuses sont à craindre. Par exemple, la question du financement d'une intervention importante sur un bâtiment d'habitation privé vulnérable va se poser.



7. *Evaluation rétrospective*

Dans un processus apprenant, des corrections et adaptations se font sur la base d'évaluations rétrospectives constantes. Elles visent à améliorer la connaissance et, ainsi, la qualité des décisions prises dans le cadre ici formalisé. Notre étude n'aborde pas non plus cet aspect.

Illustration Ces évaluations rétrospectives sont possibles soit par des études ciblées, soit, a posteriori, par exemple en organisant des missions de reconnaissance à la suite de tremblements de terre.

6.1.2. Evolution de l'attitude face au risque

Trois périodes se retrouvent habituellement dans l'évolution des rapports sociaux autour de la question du risque [Ewald 2002]. La tendance va clairement dans le sens d'une attente toujours plus grande des consommateurs de la chose publique demandant à l'Etat d'être capable de neutraliser les risques qui peuvent affecter la vie de chacun et, à défaut, de pouvoir réparer les dommages occasionnés. C'est trois étapes sont communément intitulées: la prévoyance, la prévention et enfin la précaution. Le risque sismique se situe à la frontière des risques avérés et potentiels, du fait de sa rareté. Ainsi, la gestion de ce risque particulier puise pour l'essentiel ses composantes dans les deux étapes: **Prévention-Précaution**.

La prévoyance

Au XIX^{ème} siècle, le risque est principalement abordé en responsabilisant l'individu. Il faut en effet une causalité immédiate pour engager la responsabilité de quelqu'un. A cette idée fait écho la vertu de la prévoyance: une personne doit se soucier de ce qui peut lui advenir et prendre les dispositions nécessaires. Un défaut de prévoyance expose son auteur au dommage en cas de survenance d'un événement et il en supporte seul les conséquences. Les individus peuvent regrouper leurs efforts de prévoyance au sein d'organisations mutuelles. C'est, en Suisse, la période qui voit l'apparition des Etablissements cantonaux d'assurance, basés sur cette notion de mutualisation. De nombreux pays sont actuellement encore à cette étape. La fatalité est communément invoquée comme cause principale aux maux post tremblement de terre.

La prévention

Le début du XX^{ème} siècle voit la naissance du principe de solidarité de la société envers les victimes d'aléas et la naissance de l'« Etat-providence ». La réalisation d'événements catastrophiques n'est plus perçue comme l'expression d'une faute conduisant à une sanction, mais comme l'expression fatale due à la vulnérabilité des sociétés. Cette vulnérabilité étant considérée comme la contrepartie aux avantages d'activités utiles au bien commun (logement, infrastructure, appareil de production...). La société bénéficiant de ces activités se doit donc d'exercer une certaine solidarité avec les victimes qui sont dès lors dégagées de la faute. On voit apparaître une socialisation plus large des risques. La prise en considération du risque s'est ainsi déplacée de l'individu vers la société. Le risque s'appréhende par la prévention collective. Elle se manifeste sous la forme d'un ensemble d'instruments de politique publique: procédures d'autorisation, de recommandations d'associations professionnelles, d'incitations financières ou d'obligations faisant prévaloir l'intérêt collectif [Contexte réglementaire]. La

Suisse a depuis quelques années atteint ce stade d'évolution puisqu'elle a mis en place, pour la plupart des cantons, un fonds à disposition en cas d'événement sismique.

La précaution

La gravité voire l'irréversibilité des pertes et dommages craints justifie l'engagement précoce d'actions de prévention, alors même que les risques envisagés ne sont que partiellement connus ou hypothétiques. De nombreuses différences avec la prévention existent à ce niveau. Elles se manifestent principalement sur le calendrier (avec la nécessité de prendre en considération le risque avec précocité, ici de gérer le danger avant qu'il ne survienne), le mode de justification des actions à engager ou encore l'évolutivité de la situation qui demande une adaptation des mesures prises en fonction du développement des connaissances. Sans être en rupture avec la science, les actions prises invoquant le principe de précaution n'en font pas leur fondement exclusif. Elles s'appuient ainsi grandement sur la consultation d'experts. Le principe de précaution demande, dans la perspective d'une action, de tenir compte des risques potentiels. Pour invoquer le principe de précaution, il faut que les dommages envisagés soient sérieux et/ou irréversibles. L'irréversibilité a un poids particulier, car elle ferme la voie à la réparation. Ce stade ultime, en cours actuellement dans la plupart des pays industrialisés, comme les Etats-Unis, le Japon ou la Suisse, implique le développement de nouveaux outils préventifs ou de réparation. Cette recherche entre dans cet effort actuel.

6.1.3. Eléments de la décision

La caractérisation neutre du risque en théorie de la décision présente deux conditions. Un événement donné peut avoir plusieurs résultats possibles et chacun de ces résultats possède une probabilité telle que la somme de toutes ces probabilités est égale à l'unité. Ces probabilités sont dites objectives, basées sur une modélisation. Il existe une incertitude pour définir de manière objective ces probabilités pour les résultats attendus et il existe une part d'inconnu dans ces résultats.

Deux types d'actions se caractérisent dans deux univers distincts. Le premier, appelé risque, est le domaine des événements ayant une loi de distribution de probabilités disponible ainsi qu'une description précise des conséquences qui en découlent. Le deuxième, appelé incertitude, tente de développer des critères de décision en l'absence de probabilité. Les aspects positifs et négatifs des actions envisagées sont considérés selon ces deux univers lors de l'évaluation [Glossaire].

La fonction d'utilité des décideurs est définie comme la représentation de toutes les considérations qu'ils jugent pertinentes pour leurs décisions. Malheureusement, la théorie de la décision s'adresse à des décideurs isolés et par conséquent largement en décalage avec des processus interactifs impliquant de nombreux acteurs aux croyances, connaissances, attentes et intérêts divers. C'est ce décalage qu'on cherche à réduire en formalisant le cadre de gestion.

6.2. LES ÉTAPES MENANT AU CHOIX

Il s'agit dès à présent de comparer des mesures de gestion du risque. Deux niveaux de traitement distincts sont traités à deux niveaux dans ce chapitre. Le premier niveau porte sur des bâtiments individuels et le deuxième sur un ensemble de bâtiments, appelé un portefeuille.

On passe donc d'une investigation large, permettant d'identifier les éléments critiques, à une étude particulière de ces éléments. Les principales étapes permettant d'aboutir à la mise en œuvre d'une mesure de gestion du risque sont représentées schématiquement à la figure 6.2. Cette représentation exprime schématiquement le cadre général de la méthodologie de décision formulé comme thèse.

6.2.1. 1^{ère} étape: Identification des scénarios dangereux (Que peut-il se produire et où ?)

Cette première étape vise à produire une documentation la plus complète possible sur le phénomène dangereux étudié. L'effort d'acquisition de connaissances en cours dans les milieux académiques et professionnels va dans ce sens. Dans le cadre du tremblement de terre, des facteurs géologiques d'aléa (régional et local) sont liés à une composante de vulnérabilité du système étudié. La valeur exposée au risque entre également dans le modèle de détermination du risque. Cette valeur est de natures diverses, aussi bien humaine, économique, environnementale qu'historique. Notre étude s'attache uniquement au portefeuille de bâtiments, en excluant les autres infrastructures et se concentre sur les valeurs humaines, immobilières et mobilières. Le cadre développé dans ce travail est applicable pour les autres types de composantes infrastructurelles et les autres types de valeurs. Un travail important de recherche existe au niveau international et en Suisse pour améliorer les connaissances de chacun de ces paramètres. Cette première étape permet d'estimer l'existence ou l'absence d'un danger pour de grandes régions d'étude. C'est uniquement si le danger n'est pas insignifiant que l'on passera à l'étape suivante. Dans le cas contraire, le danger est jugé insignifiant. C'est par exemple le cas si l'aléa est extrêmement faible ou si quasiment aucune valeur n'est exposée.

6.2.2. 2^{ème} étape: Evaluation du risque (Avec quelle fréquence et quelles conséquences cela peut-il se produire ?)

La deuxième étape consiste à fournir une estimation quantitative du risque en se basant sur l'ensemble des analyses préalables. On a imaginé, dans le cas du tremblement de terre, une évaluation en deux temps demandant un effort progressif. On effectuera le deuxième temps uniquement si le premier montre un niveau de risque important. Les limites d'acceptabilité sont fixées par la pratique et évoluent au cours du temps. Dans les cas contraires, le risque est jugé trop faible et ne présente pas de danger pour la société.

- ***Cartographie indicative du risque.*** Elle est établie sur l'ensemble du territoire en combinant l'aléa régional (Carte des zones d'aléa sismique de la norme SIA 261 [SIA260 2003]), l'aléa local (Carte de microzonage des classes de sol de fondation au 1:25'000 (Cartes fournies pour la plaine du Rhône par le CREALP), les valeurs (humaines, économiques, environnementales) exposées au risque considéré par unité d'étude, par exemple par unité géopolitique comme une commune.

Ce premier pas permet de renseigner sur la présence ou l'absence d'un niveau suffisant de risque et de fixer les priorités pour passer à l'établissement d'une investigation de détails. Il s'effectue par la combinaison de la fréquence des phénomènes (probabilité de survenance) et de leurs conséquences attendues dans une matrice de risque. Des outils spécifiques permettant une inventarisation rapide ont été développés et sont usuellement appliqués dans notre pays [OFEG 2002].

- **Investigation de détails.** Cette investigation se fait dans un deuxième temps, si elle est jugée opportune lors de la génération de la cartographie indicative. Elle est établie pour une unité d'étude inférieure dans les secteurs où existe un potentiel de dommages significatif et identifié. Une étude approfondie permet alors de quantifier de manière plus précise le risque effectif, appelé le risque calculé. Un calcul détaillé doit être à ce niveau entrepris à l'aide des outils et méthodes de calcul à disposition de l'ingénieur. Par exemple, pour un bâtiment soupçonné d'une forte vulnérabilité, une meilleure compréhension de son comportement réel peut être établie. De même, un approfondissement des calculs sur les fréquences propres ou le recours à des mesures in situ peuvent être envisagés. Le recours à un modèle prenant en considération les masses modales est également souhaitable. De plus, une étude de l'effet de site est souvent recommandée. Une fois ce niveau de risque calculé déterminé, il renseigne le décideur s'il est acceptable ou non. S'il est jugé comme inacceptable, des mesures de gestion doivent être envisagées.

6.2.3. 3^{ème} étape: Détermination des mesures (Comment peut-on se protéger et quels moyens va-t-on mettre en œuvre ?)

L'étape précédente met en évidence les conflits, existants ou potentiels, entre le danger naturel étudié, l'occupation du sol, le type de construction (vulnérabilité) et les concentrations de valeurs. Il se pose alors la question des mesures à mettre en œuvre afin de réduire les dommages potentiels. Trois types d'actions peuvent être menées de façon complémentaire. Ces mesures sont présentées au chapitre 5 et rappelées pour mémoire ci-dessous.

- **Mesures de prévention.** Elles permettent une limitation des dommages potentiels dans la planification de nouveaux ouvrages. De telles mesures n'influencent pas le déroulement des événements catastrophiques mais visent à réduire l'ampleur des conséquences, soit par une utilisation adéquate du sol, soit par une adéquation entre le mode de construction et les conditions locales, soit par une soustraction de l'exposition des valeurs ou des personnes:
 - Mesures d'aménagement du territoire, elles sont pour le tremblement de terre difficiles à mettre en œuvre de manière proportionnée.
 - Mesures constructives prises lors de la construction d'un nouveau bâtiment.
 - Mesures agissant sur la valeur exposée au risque.
- **Mesures de protection.** Elles permettent de réduire le risque potentiel dans les zones dangereuses là où existe une utilisation digne de protection et après avoir pris les mesures de planification utiles. Elles s'adressent à des ouvrages déjà existants. Ces mesures influencent la réponse du système étudié au phénomène catastrophique en modifiant la vulnérabilité de celui-ci. Il peut s'agir de mesures ponctuelles (par exemple le renforcement d'un élément LIFELINE) ou extensives (par exemple une campagne visant à diminuer la vulnérabilité de l'ensemble des bâtiments en maçonnerie).
- **Mesures d'intervention.** Elles sont destinées à réduire le risque résiduel après que toutes les mesures de planification et de protection ont été mises en œuvre ou si ces dernières se révèlent insuffisantes ou disproportionnées. Ce type de mesure englobe les mesures d'intervention qui permettent de limiter les conséquences. On considère

également dans ce type de mesure les outils de transfert du risque économique par le biais d'assurances.

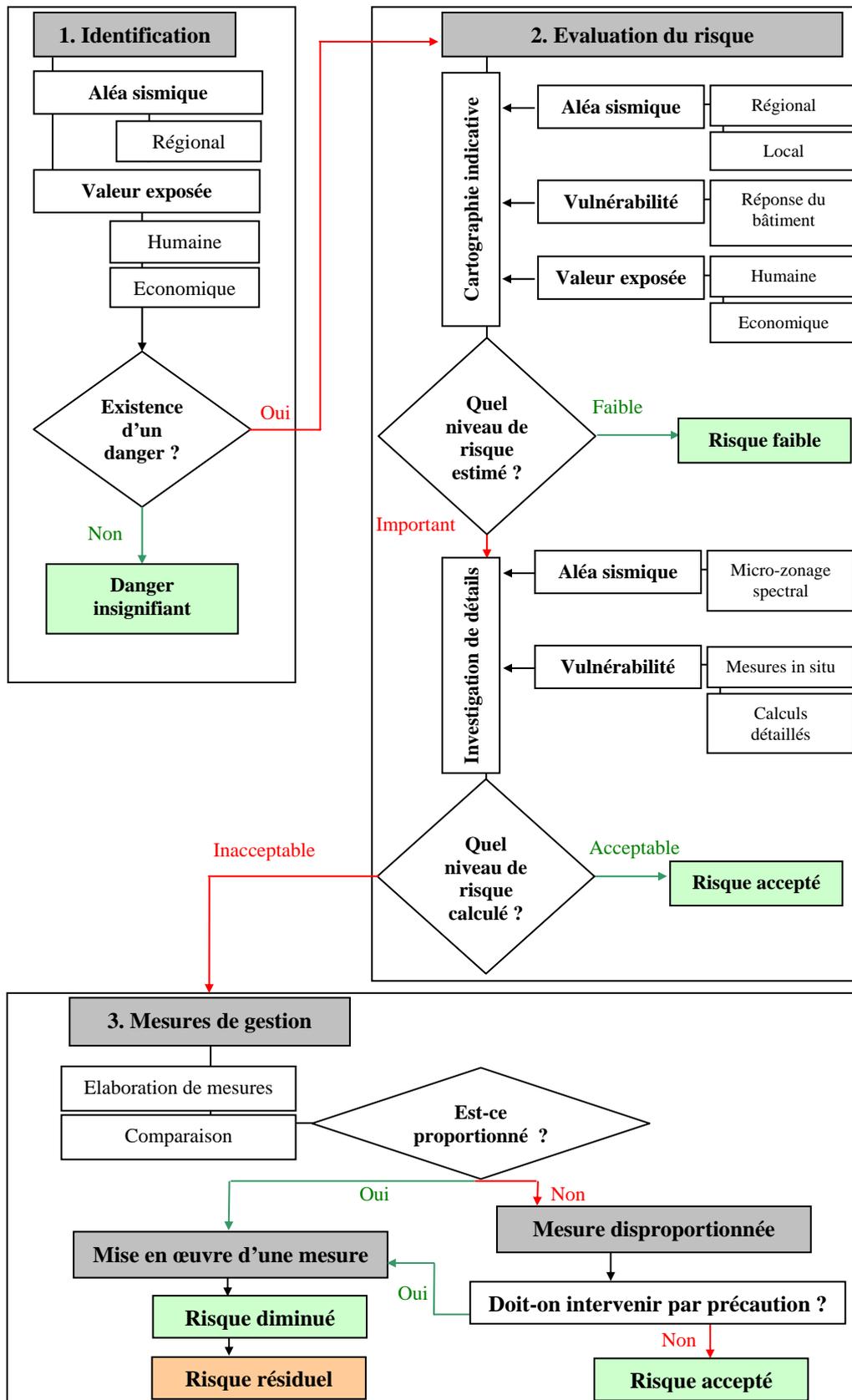


Figure 6.2 – Les étapes menant au choix

L'étape finale porte sur le choix d'une mesure ou d'une stratégie de gestion. Comme précédemment, les bâtiments individuels sont traités dans un premier temps, puis un portefeuille de bâtiments dans un deuxième. La philosophie appliquée reste néanmoins identique. Le processus décisionnel est présenté dans les paragraphes qui suivent.

6.3. ANALYSE SYSTÉMIQUE

6.3.1. Les acteurs du processus décisionnel

Identification des acteurs

Les *Acteurs* impliqués dans et par le processus de gestion sont illustrés à la figure 6.3. Ils sont définis comme les personnes individuelles, les groupements ou les institutions concernés lors de la survenance d'un tremblement de terre dans une région. Ils évoluent naturellement dans un contexte légal déterminé. Ces groupes sont intégrés dans le processus par la personne ou le groupe de personnes en charge de l'étude dans ce qui sera appelé ci-après le *Noyau*.

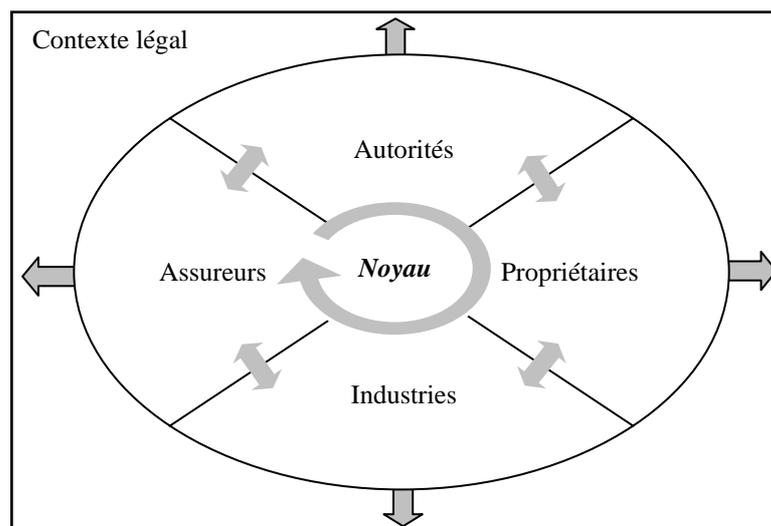


Figure 6.3 – Interactions entre acteurs de la gestion du risque sismique

Ils interagissent directement sur celui-ci, ou entre eux, et guident ainsi le processus menant aux actions [Abrams 2003]. Ces groupes sont concernés principalement par les risques liés aux atteintes à l'intégrité physique (morts et blessés), à la propriété (immobilière et mobilière) et à son revenu. Par la participation organisée de ces groupes d'acteurs, les éléments abordés dans le noyau sont coordonnés de sorte que tous puissent partager les avantages de la recherche tant fondamentale qu'appliquée. Une liste de ces acteurs est donnée, de manière non exhaustive, au tableau 6.1. Quatre groupes principaux, les autorités, les assureurs, l'industrie et les propriétaires, comportant pour chacun des sous-groupes, sont identifiés. Cette liste est établie en déterminant pour chacun d'entre ces groupes les éléments suivants:

- Les objectifs des acteurs,
- leurs préférences et *seuils* [Glossaire] d'acceptation sur les critères de comparaison sélectionnés et validés par l'ensemble des acteurs,
- leur pouvoir décisionnel respectif.

Ces aspects sont pris en compte dans l'approche proposée en ayant recours à des méthodes de détermination pour les pondérations des critères de comparaison ou encore par la fixation de différents types de seuils, présentés dans l'annexe D portant sur les méthodes d'analyse multicritère [Méthodes d'analyse multicritère].

	Domaines de compétence	Représentants
Assureurs	<ul style="list-style-type: none"> - Choses (mobilières & immobilières) - Vie - Perte de gains - Réassurance 	<ul style="list-style-type: none"> - Etablissements Cantonaux d'Assurance ⁽¹⁾ - Pool ⁽²⁾ étatique - Assureurs-choses privés - Pool ⁽³⁾ privé - Assureurs-vie privés - Assureurs perte de gain privés - Réassureurs privés
Authorities	<ul style="list-style-type: none"> - Constructions en mains propres - Permis de construire, d'exploiter et d'habiter - Gestion de la crise (pré et post événement) 	<ul style="list-style-type: none"> - Services ou offices communaux, cantonaux et fédéraux spécifiques - Divers corps de protection et de sécurité civiles (corps de pompiers, de polices, Protection civile,...) et militaires - Cellule de crise ad hoc
Propriétaires	<ul style="list-style-type: none"> - Immeubles et infrastructures - Financement 	<ul style="list-style-type: none"> - Particuliers - Entreprises - Communautés (privées, publiques, institutionnelles) - Institutions de crédits hypothécaires - Fonds d'investissement
Industries	<ul style="list-style-type: none"> - Construction (évolution et application des règles de l'art) - Renforcement (recherches techniques) - Transport (gestion des catastrophes, infrastructures) - Protection de l'environnement - Valeur historique 	<ul style="list-style-type: none"> - Formation (Hautes Ecoles) - Entreprises & milieu académique - Régies fédérales et transporteurs privés - Entreprises soumises à l'OPAM ⁽⁴⁾ - Organismes de protection de l'environnement - Organismes de protection du patrimoine

(1) 19 cantons sur 26 possèdent un monopole pour cette activité d'assurance

(2) Pool suisse pour la couverture des dommages sismiques

(3) Pool des assureurs privés pour la couverture des dommages sismiques

(4) Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs [RS 814.012 1991]

Tableau 6.1 – Identification des acteurs et de leurs représentants pour le contexte helvétique

Intérêts et motivations

La participation de tous les acteurs à la mise en place d'un outil d'aide à la décision favorise et renforce son adoption. Le travail au sein du noyau est coordonné aux recherches spécifiques effectuées par les différents acteurs afin de maximiser le potentiel et l'intérêt multiple. Ainsi, les recherches spécifiques des acteurs doivent s'intégrer dans le noyau, qui est prévu pour être générique. Les recherches spécifiques directement effectuées par les acteurs ou de manière

ciblée par les milieux académiques, viennent également s'imbriquer dans le noyau de recherche. Par exemple, la fourniture de fonctions de vulnérabilité pour différentes typologies de bâtiments (i.e. les bâtiments en moellons traditionnels) ou encore le développement d'outils d'analyse de l'efficacité (des impacts) des mesures de mitigation doivent s'appliquer à n'importe quel type de structure, le cas échéant à n'importe quel système. Avec l'appui des groupes intéressés, ces résultats génériques peuvent être extrapolés aux spécificités de chacun des acteurs et sont donc utiles à tous.

En dépit des différences, chaque groupe partage certains objectifs avec les autres, appelés objectifs primaires, et qui sont énoncés en substance ci-dessous:

- Assurer la survie et la pérennité, par là répondre à un impératif de sécurité (dont le niveau d'exigence peut varier au cours du temps). Cet impératif est la base commune dont les autres objectifs découlent directement,
- Etre en mesure de synthétiser les dommages pour leurs systèmes particuliers pour des régions d'intérêts spécifiques, et visualiser ainsi les conséquences d'un risque potentiel.
- Etre en mesure de déterminer les impacts de leurs actions dans le futur pour leurs systèmes propres.

L'hypothèse centrale qui postule que les acteurs sont d'accord sur la finalité et sur les objectifs primaires qui la sous-tendent est ici posée. Les acteurs ont cependant des petits désaccords sur les objectifs et de gros sur les moyens pour les atteindre. Ils sont donc amenés à négocier. On admet qu'il existe un objectif général reconnu par tous, c'est-à-dire la finalité.

Les objectifs primaires vont permettre de déterminer, en fonction des objectifs de chacun, la meilleure solution de gestion en terme d'utilité (moyens consacrés – gains espérés – atteinte des objectifs primaires) dans un espace de décision pluridimensionnel, détaillé plus loin. Ces relations croisées, illustrées à la figure 6.4, débouchent sur des motivations spécifiques à chacun des acteurs dans des dimensions de l'espace de décision.

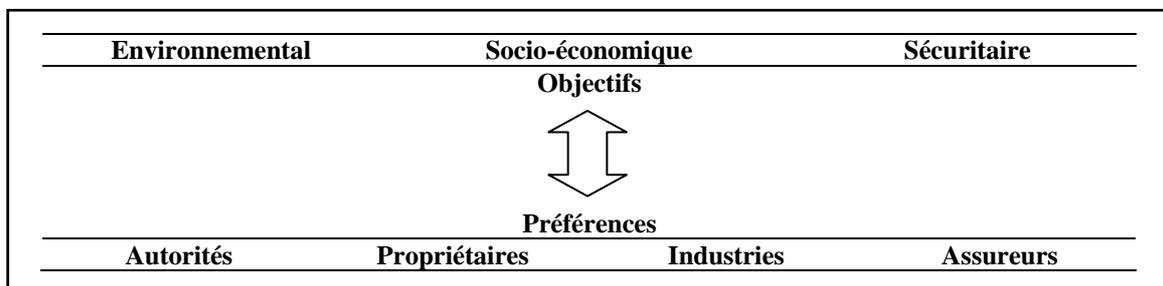


Figure 6.4 – Relations croisées entre les dimensions et les acteurs

Conditions initiales

De nombreux objectifs doivent être atteints (sécurité des nouveaux bâtiments et des bâtiments existants, conservation historique, protection de l'environnement pour les principaux). Les acteurs divergent sur les moyens à mettre en œuvre et sur le calendrier pour atteindre ces

objectifs. Ils sont cependant d'accord de confronter leurs points de vue pour trouver un compromis. De plus, une volonté de structuration existe. La démarche adoptée part du général pour aller vers le particulier. Elle est appelée démarche descendante. Ainsi, on détermine les besoins d'évaluation quantitative nécessitant le recours à des spécialistes uniquement pour les éléments du système jugés importants ou potentiellement significatifs.

6.2.2. Méthodes de comparaison

Les avantages et inconvénients de différentes méthodes à disposition dans la littérature sont présentées en annexe à ce document [Méthodes d'analyses multicritères]. On pense en particulier aux méthodes usuellement utilisées dans ce genre de problématique, dites « coût-bénéfice » et à un type de méthode qui s'impose actuellement dans le domaine de la gestion environnementale, dites de « surclassement ».

Analyse coût-bénéfice et coût-efficacité

L'analyse coût-bénéfice est basée sur la prise en compte en équivalent monétaire de tous les impacts positifs et négatifs d'un projet sur la société dans sa globalité. Lorsque les avantages d'une mesure ne sont pas quantifiables de manière monétaire ou lorsque le degré de réalisation du résultat à atteindre est donné, on parle d'analyse coût-efficacité. Ce type d'étude vise à minimiser les coûts nécessaires à la réalisation de l'objectif fixé et non pas à maximiser les avantages. C'est ce type de méthodes qui est le plus couramment utilisé actuellement [Kunreuther 2003].

Analyse multicritère par surclassement

Ce type de méthode est perçu comme un outil de travail qui tisse des relations entre l'homme d'étude et les acteurs engagés dans le processus de décision pour comparer sur des bases objectives les solutions qui leur sont soumises. Elles permettent de clarifier les points de vue, les contraintes et les conflits éventuels entre les acteurs.

Une méthode de ce type, appelée ELECTRE III [ROY 1985], a été retenue dans le cadre de cette étude. La méthode a été choisie pour ses qualités reconnues dans le domaine de la gestion environnementale [Simos 1990a] et [Simos 1990b]. Le choix d'une autre méthode d'agrégation, bien que tout à fait possible, n'est pas ici discuté. Une justification de ce choix tient dans le caractère novateur de la problématique ici abordée par ce genre de méthode. Cela nous a forcé à focaliser l'effort sur la compréhension des constituants entrant dans le cadre de gestion plutôt que sur la recherche de la meilleure méthode de comparaison. C'est donc la procédure propre au processus décisionnel pour la gestion du risque sismique, c'est-à-dire le cadre de gestion lui-même, qui a constitué le centre de la recherche.

6.2.3. Critères de comparaison

Espace de décision

Ce paragraphe pose les bases nécessaires à la caractérisation des impacts de différentes mesures ou stratégies à disposition. Usuellement on examine les dimensions d'ordre technique, socio-économique, environnementale et de sécurité [Kunreuther 2003] comme

montrées à la figure 6.5. Ces axes principaux forment l'espace dans lequel va s'articuler la décision. Il est possible de définir d'autres axes ou d'éclater les axes principaux. Par exemple, l'axe socio-économique peut se scinder en plusieurs axes secondaires, comme par exemple une dimension de valeur économique ou de valeur historique.

Les différents plans formés par les axes expriment les interactions entre les dimensions respectives. L'axe technique est ici clairement distinct des autres axes décisionnels au niveau de sa prise en compte temporelle. Les différentes mesures et stratégies sont évaluées d'un point de vue technique dans une phase préliminaire par des spécialistes du domaine, à même de fournir les indications quant aux impacts de chacune d'entre elles. Ces aspects font donc de facto partie intégrante des critères traitant des autres dimensions.

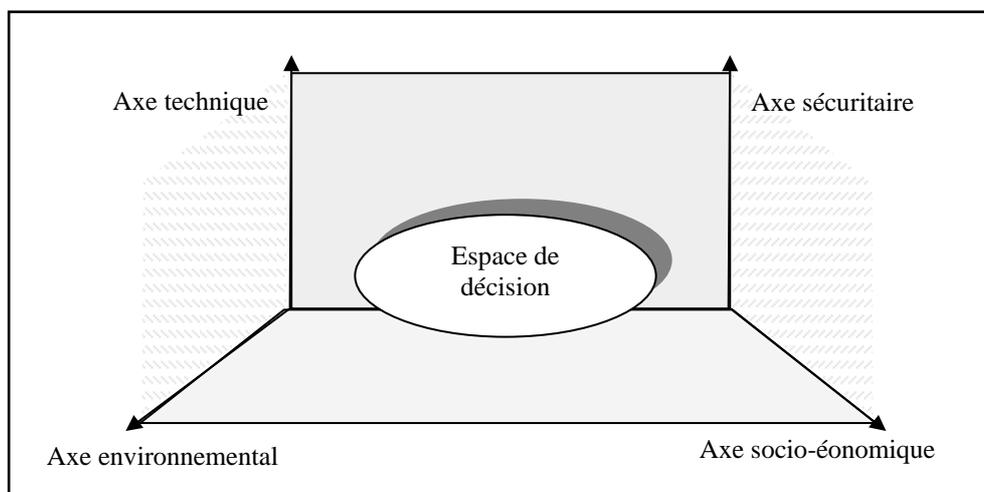


Figure 6.5 – L'espace de décision

La dimension environnementale est ici volontairement laissée de côté. Les dommages environnementaux entrant dans la catégorie des dommages indirects ne sont pas traités dans cette recherche. Une démarche similaire pour d'autres dimensions (valeur historique, culturelle, sociologique,...) peut naturellement être envisagée pour les intégrer dans le processus décisionnel.

Dimension économique

Trois indicateurs exprimant la dimension économique sont élaborés. Il est naturellement possible d'en définir d'autres. Ces indicateurs donnent une indication sur le niveau de risque économique pur, une indication sur l'efficacité de l'investissement et une dernière indication sur la valeur actuelle nette de l'investissement au moment du choix. Ces indicateurs sont explicités ci-dessous.

- **Risque économique**

Seule la valeur immobilière des bâtiments est ici considérée. La valeur mobilière n'est pas prise en compte lors de l'analyse faite pour un bâtiment individuel puisqu'elle est couverte par les personnes habitantes des lieux et non par le propriétaire des murs. Elle sera néanmoins internalisée pour la comparaison de stratégies de gestion pour un portefeuille de bâtiments. Le risque économique est calculé pour la situation initiale puis pour les différentes mesures de gestion envisageables. Le risque est calculé à

l'aide de l'équation classique du risque présentée au chapitre 3. Ce critère renseigne sur le niveau de risque économique d'un objet immobilier face au risque sismique.

- Retour sur investissement orienté risque sismique
Le retour sur l'investissement (ROI) consenti est déterminé à l'aide de l'équation (6.1). Il porte uniquement sur l'investissement destiné à l'amélioration du comportement sismique du bâtiment, c'est-à-dire la somme supplémentaire dépensée pour améliorer le niveau de risque. La somme économisée n'est que potentielle et ne se réalisera qu'en cas de survenance d'un séisme.

$$ROI_{sismique} = \frac{\text{Somme économisée [Frs]}}{\text{Investissement [Frs]}} \quad (6.1)$$

Le $ROI_{sismique}$ représente le rapport de la somme économisée par rapport à la somme investie dans une mesure de gestion et cela pour la durée de vie restant de l'ouvrage. Plus ce rapport est élevé, plus l'unité monétaire investie sera efficace pour préserver de la valeur économique par rapport à une situation initiale.

- Valeur actuelle nette du projet d'investissement
Les avantages et les coûts économiques surviennent pendant toute la durée du projet. C'est le taux d'actualisation qui les rend commensurables et qui permet de déterminer la rentabilité du projet. La valeur actuelle nette (VAN) s'obtient à l'année 0, soit au moment de l'investissement à l'aide de l'équation (6.2).

$$VAN = \sum_{n=0}^{\text{durée de vie}} \frac{A_n}{(1+r)^n} - \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (6.2)$$

Avec

A	avantages (avantages annuels, valeur résiduelle de l'investissement initial)
C	coût (investissement initial)
r	taux d'actualisation, ici fixé à 6%
n	année

Le projet est rentable économiquement si la valeur actuelle nette (VAN) est positive. Une variation du taux d'actualisation fait varier la VAN. Une augmentation du taux fait diminuer l'importance des avantages et des coûts qui surviennent dans le futur et vice versa.

Dimension sécuritaire ou humaine

Comme précédemment pour la dimension économique, trois indicateurs relatifs à la dimension humaine sont élaborés. Ils concernent la dimension humaine ou sécuritaire. Il s'agit d'une indication du niveau absolu du risque humain, d'un indicateur d'efficacité de l'investissement pour épargner des vies et enfin d'un indicateur renseignant sur la sécurité de l'ouvrage. Ces indicateurs sont détaillés ci-dessous.

- **Risque humain**
Le risque humain est calculé pour la situation initiale. Il correspond également au risque humain pour les mesures de transfert du risque par assurance. Il est calculé pour toutes les mesures techniques de mitigation proposées. Le risque est calculé à l'aide de l'équation classique du risque présentée au chapitre 3. La valeur exposée est ici la vie humaine.
- **Coût de sauvetage**
Le coût de sauvetage est déterminé à l'aide de l'équation (6.3) pour la durée de vie restante de l'ouvrage prévue lors de la planification des travaux. Ce coût représente l'investissement consenti pour chaque vie humaine sauvée sur la période de planification, c'est-à-dire la durée de vie restante de l'ouvrage.

$$C_{sauvetage} = \frac{\text{Investissement [Frs]}}{\text{Vie(s) humaine(s) sauvée(s)}} \quad (6.3)$$

Cet indicateur d'efficacité donne une indication sur la somme nécessaire pour épargner une vie humaine sur la durée de vie restante de l'ouvrage. La valeur obtenue permet rapidement d'établir si une mesure est proportionnée en terme d'investissement destiné à la protection de la vie humaine.

- **Indice de vulnérabilité**
La sécurité d'un ouvrage est exprimée par son indice de vulnérabilité. Il se quantifie comme le pourcentage de la résistance des exigences normatives actuelles. Il permet d'introduire la notion de précaution en fixant un seuil plancher en dessous duquel l'ouvrage est considéré comme dangereux en mettant par trop fortement en péril la sécurité de ses habitants. La capacité de l'ingénieur à déterminer cette valeur au plus proche de la réalité est essentielle. Cette capacité dépend de l'expertise et de l'expérience. La qualité de la détermination de cet indicateur va fortement influencer le choix de la mesure. Une attention particulière lors de l'établissement de cet indicateur est donc requise. Investir dans une étude pertinente s'avère toujours judicieux.

Pour des systèmes, composés d'un ensemble de bâtiments et de plusieurs personnes, des critères spécifiques sont développés plus loin dans ce chapitre. Ils reposent néanmoins sur une réflexion identique.

6.4. COMPARAISON

6.4.1. Comparaison pour des bâtiments individuels

Situation initiale

Pour valablement comparer des mesures de gestion, la situation initiale dans lequel se trouve l'objet étudié doit pouvoir être estimée au plus près. Pour ce faire, on détermine les valeurs initiales des critères retenus pour faire la comparaison et présentés préalablement dans ce chapitre.

Analyse comparative des mesures et enseignements généraux

Une fois les différentes mesures de gestion élaborées, une étude prospective vise à estimer leurs impacts sur les indicateurs établis préalablement dans ce chapitre. Le profil de risque initial est déterminé par les deux indicateurs de risque; humain et économique. Les autres critères permettent d'enrichir la comparaison.

Les différentes mesures sont évaluées par rapport à leur influence en termes relatifs pour chacun des critères. La figure 6.6 illustre schématiquement ces impacts pour deux mesures alternatives (renforcement technique et transfert du risque économique par assurance). Cela permet d'envisager une comparaison des mesures (des variantes ou des actions) deux à deux. Chaque critère possède son échelle propre, ainsi que son sens de maximisation. Par exemple, une diminution du risque, humain ou économique, est considérée comme bénéfique. De même, un coût de sauvetage faible est préférable, alors que pour le retour sur investissement sismique, la valeur actuelle nette et l'indice d'effondrement, une valeur élevée sera préférée à une valeur plus faible.

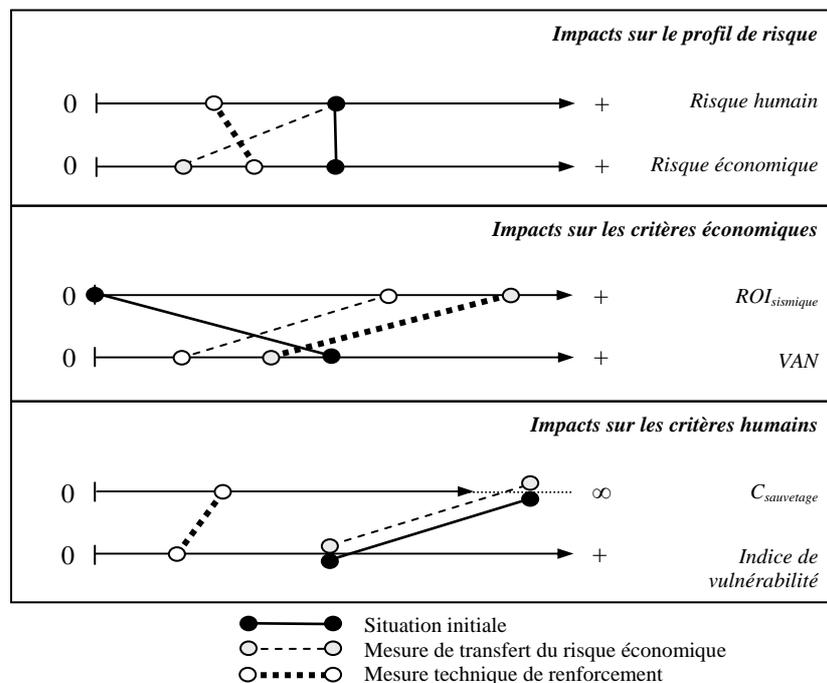


Figure 6.6 – Impacts des mesures de gestion sur le profil de risque initial et sur les critères de comparaison retenus

Il s'agit dès à présent de mettre en œuvre la méthode d'analyse multicritère participative retenue, à savoir ELECTRE III, présentée en annexe C [Méthodes d'analyses multicritères]. Pour ce faire, l'implication des acteurs est requise tout au long du processus. L'incidence sur le choix de la pondération des critères fait par la suite l'objet d'une étude de sensibilité sur les intervalles fixés par les acteurs. La notion de veto est également intégrée à la réflexion. Certaines tendances générales ont pu être établies et sont résumées dans le tableau 6.2 ci-après. Elles proviennent des informations obtenues lors de la mise en application du cadre de gestion à des bâtiments pilotes présentés à l'annexe A [Bâtiment individuels].

Caractéristiques du bâtiment étudié	Mesure préférentielle	Remarques
Bâtiment non dimensionné (construit avant 1989)	Mesure technique de renforcement	-La mesure ne doit pas être trop onéreuse -Le niveau de protection cible peut fortement varier
Bâtiment dimensionné selon les normes parasismiques modernes	Mesure de réparation	-Particulièrement en cas de fort indice de valeur économique mixte.
Bâtiment en béton armé	Mesure de réparation	-Très souvent, ce type de construction possède une résistance « naturelle » élevée -La plasticité du béton permet de dissiper une partie de l'énergie dans le bâtiment
Bâtiment en maçonnerie de moellons ou moderne	Mesure technique de renforcement	-Le rajout de murs de refends en béton armé est fréquemment envisageable

Tableau 6.2 – Tendances générales du choix de mesures

Il est également intéressant de relever que les efforts seront privilégiés dans les zones d'aléa sismique les plus défavorables, dans les terrains soumis à une forte amplification due à l'effet de site ou encore pour des bâtiments possédant une grande vulnérabilité. L'efficacité de l'investissement, traduit par un ROI_{sismique} élevé, est toujours favorable pour ce genre d'ouvrage. De même, les interventions sur les bâtiments ayant une forte valeur économique, une classe d'ouvrage élevée ou encore une durée de vie restante longue possèdent une valeur actuelle nette plus élevée que pour les bâtiments de moins d'importance ou sans affectation particulière. Ces bâtiments seront traités en priorité lors d'une campagne de renforcement. Enfin, les ouvrages contenant une forte valeur humaine verront privilégier des mesures techniques de renforcement. C'est sur les critères du risque humain et de l'indice de vulnérabilité qu'ont été invoqués les seuils de veto, selon le principe de précaution.

6.4.2. Comparaison des stratégies génériques

Critères retenus

Les critères doivent dès à présent s'appliquer pour un portefeuille et non plus pour des bâtiments individuels. Ces critères sont présentés plus bas. Ils s'articulent également selon les deux dimensions identifiées pour les bâtiments individuels, à savoir la dimension économique et la dimension humaine ou sécuritaire.

- **Coût de gestion**

Ce critère appartient à la dimension économique. Il représente la somme investie pour la sécurité sismique, pour une durée de planification fixée, par l'ensemble d'une communauté, par exemple d'une commune, divisée par le nombre d'habitants de ladite communauté. Il exprime ainsi l'effort financier, par exemple par année, par habitant, que consacre la communauté à la gestion du risque sismique. Ce critère s'énonce en francs par année et par habitant et s'obtient à l'aide de l'équation 6.4.

$$C_{gestion} = \frac{\sum I(t, a, r, p, \dots)}{t \times hab} \quad (6.4)$$

Avec	
$C_{gestion}$	coût de gestion
$I(t, a, r, p, \dots)$	investissements (dus à des mesures techniques, d'assurance, de réassurance, de prévention (par exemple les pompiers) pour la durée de planification
t	durée de planification, [années]
hab	habitants du système étudié

- Risque économique

Il se calcule comme la somme des risques économiques individuels des bâtiments composant le portefeuille. Il fait partie également de la dimension économique et se détermine au travers de l'équation 6.5.

$$R_{économique} = \sum_{i=1}^n R_{i \text{ éco-indiv.}} \quad (6.5)$$

Avec	
$R_{économique}$	risque économique du système, [Frs. / (année x 1'000 Frs. assurés)]
n	nombre de bâtiments du portefeuille étudié
$R_{i \text{ éco-indiv.}}$	risque économique individuel de chaque bâtiment i du portefeuille

- Proportion de bâtiments vulnérables

Ce critère appartient quant à lui à la dimension sécuritaire. Il s'obtient en cumulant le nombre de bâtiments ayant un indice de vulnérabilité inférieur à 30, divisé par le nombre total de bâtiments. Il se détermine grâce à l'équation 6.6. Il donne une indication sur la proportion de bâtiments qui sont les plus susceptibles de s'effondrer en cas de séisme, et donc de la vulnérabilité du système étudié.

$$Vul_{total} = \sum_{i=1}^n Vul_i \times \frac{100}{n} \quad (6.6)$$

Avec	
Vul_{total}	proportion des bâtiments vulnérables, [%]
n	nombre de bâtiments du portefeuille étudié
Vul_i	indice de vulnérabilité individuel de chaque bâtiment i du portefeuille

- Risque humain

Ce critère appartient également à la dimension humaine. Il se détermine comme la somme des risques humains des personnes appartenant au système étudié. L'équation 6.7 permet de le calculer. Il s'exprime en mort par année, pour 100'000 personnes.

$$R_{humain} = \sum_{i=1}^n R_{i \text{ humain-indiv.}} \quad (6.5)$$

Avec	
R_{humain}	risque économique du système, [mort / (année x 100'000 personnes)]
n	nombre de bâtiments du portefeuille étudié
$R_{i \text{ humain-indiv.}}$	risque humain individuel de chaque bâtiment i du portefeuille

Analyse comparative des stratégies

Le modèle d'estimation du risque pour un portefeuille de bâtiments présenté à l'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle] fournit la situation initiale du risque. Pour représenter graphiquement l'impact des différentes stratégies, un diagramme en étoile figurant les quatre critères retenus sur quatre axes est utilisé et illustré à la figure 6.7. Cette figure illustre la situation initiale, à savoir la stratégie actuelle pour le système étudié.

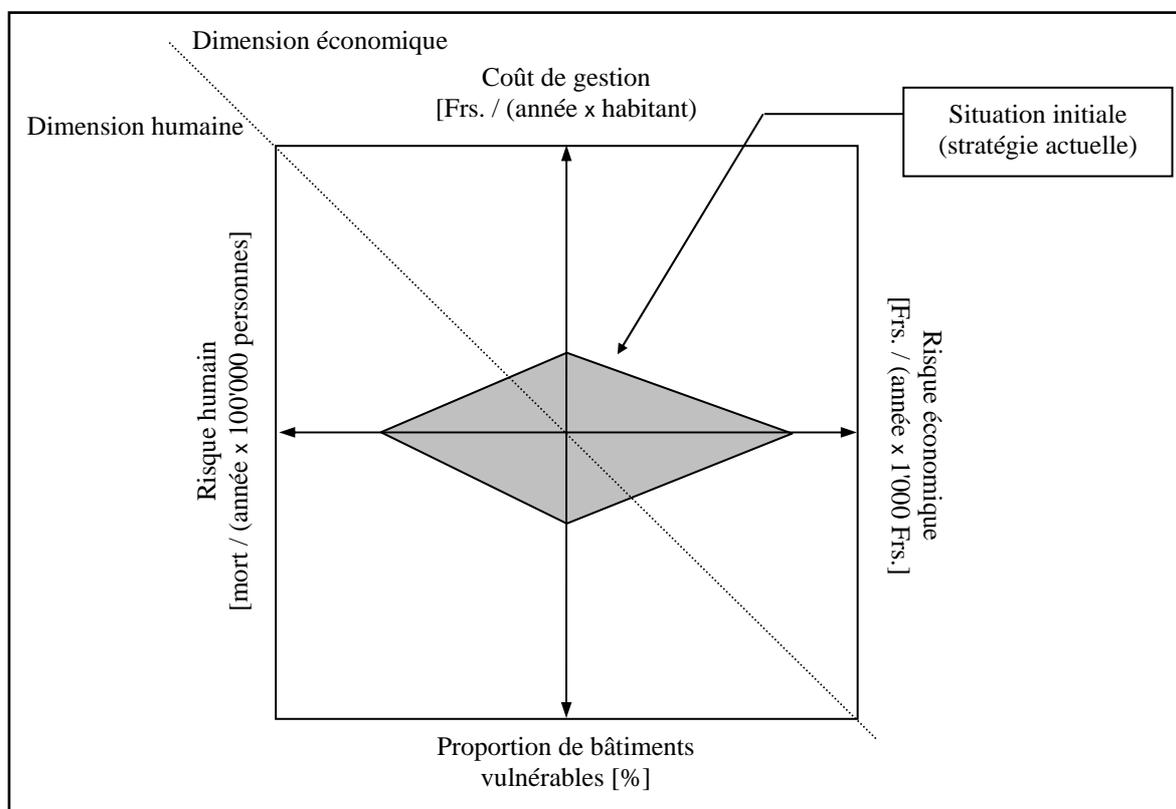
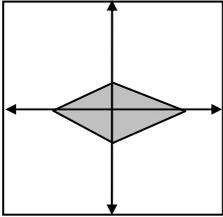
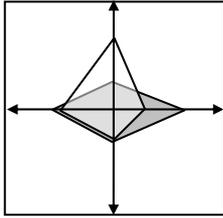
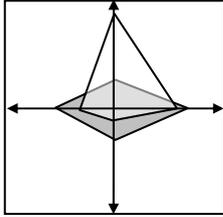


Figure 6.7 – Diagramme de représentation des impacts sur les critères retenus pour un système avec, en gris, la situation initiale correspondant à la stratégie actuelle

Le sens croissant de la flèche représente une péjoration du critère étudié. Par exemple, une diminution de la proportion de bâtiments vulnérables ou encore une diminution du coût de gestion vont faire diminuer la valeur du critère sur son axe. Celle-ci va donc se rapprocher du centre.

Selon les différentes stratégies élaborées au chapitre 5, une variation de chaque critère est observée. Les différentes stratégies élaborées sont ensuite comparées à l'aide de la méthode ELECTRE III présenté à l'annexe C [Méthodes d'analyse multicritère]. L'annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle] détaille ces étapes.

Stratégies	Critères	Impacts de la stratégie	Représentation graphique ⁽¹⁾
Stratégie actuelle	Risque humain	Aucune modification	
	Proportion de bâtiments vulnérables	Aucune modification	
	Risque économique	Aucune modification	
	Coût de gestion	Aucune modification	
Remarques	-La situation actuelle est par bien des égards jugée comme la meilleure (avec des limitations sur l'ampleur de l'événement) -Elle s'enrichit néanmoins au cours du processus négociatif de considérations relatives aux éléments LIFELINE et des bâtiments particulièrement vulnérables.		
Stratégie orientée valeur	Risque humain	Petite amélioration	
	Proportion de bâtiments vulnérables	Petite amélioration	
	Risque économique	Forte amélioration	
	Coût de gestion	Forte péjoration	
Stratégie orientée vie	Risque humain	Forte amélioration	
	Proportion de bâtiments vulnérables	Petite amélioration	
	Risque économique	Petite amélioration	
	Coût de gestion	Très forte péjoration	

⁽¹⁾ En clair la situation initiale et en foncé la situation modifiée

Tableau 6.3 – Tendances générales des impacts sur les critères

De plus, pour tenir compte du principe de précaution, les bâtiments ayant un indice de vulnérabilité inférieur à 30 (soit un bâtiment capable de résister seulement à 30% des sollicitations normatives) ont été dénombré pour chaque stratégie. De même, l'investissement annualisé nécessaire pour la mise en œuvre de chaque stratégie a été estimé. Ces éléments sont détaillés en annexe B [Population de bâtiments – Ville d'Aigle].

Enseignements généraux

Le risque humain pour le type d'environnement bâti rencontré est acceptable, exception faite de quelques ouvrages particulièrement vulnérables. Pour ces constructions, des mesures techniques de renforcement permettent de manière proportionnée d'atteindre un niveau de protection cible adéquat. Les bâtiments LIFELINE quant à eux nécessitent un traitement particulier selon leur importance dans la chaîne de sauvetage. Ces interventions se justifient par un coût de sauvetage faible. Par contre, le risque économique est important. La stratégie actuelle, qui transfère une partie de ce risque grâce à une co-assurance se classe la meilleure pour des événements de type catastrophique comme celui qu'on peut attendre pour une ville de la taille de la ville pilote étudiée. Cela n'est plus le cas pour un événement cataclysmique, pouvant survenir dans un bassin de population plus dense, comme par exemple la ville de Bâle. Il est important de relever que la stratégie actuelle, qui recourt à une couverture par co-assurance, n'est pas celle rencontrée sur tout le territoire helvétique. Le Canton du Valais,

bien que très exposé au risque sismique, ne possède par exemple pas d'établissement cantonal d'assurance et ne fait pas partie du Pool suisse pour la couverture des dommages sismiques.

Frontières d'application du modèle

Les enseignements tirés sont valables ici pour un événement catastrophique, de l'ampleur de celui qui peut survenir pour la région étudiée dans le projet-pilote. Cependant, l'enseignement portant sur la justesse du choix de la co-assurance perd de sa valeur dans le cas d'un événement de type cataclysmique, comme celui qui pourrait affecter une ville comme Bâle.

6.5. DISTINCTION

La problématique est abordée dans cette recherche dans son ensemble, c'est-à-dire jusqu'à la prise de décision, et ce dans une démarche systématique formalisée dans un cadre de gestion. En cela elle va au-delà des autres recherches qui ne traitent habituellement qu'une partie de l'ensemble du processus de gestion. La réflexion est donc ici formulée dans sa complétude ce qui permet d'enchaîner les éléments développés de manière cohérente et compatible. Ainsi, bien que de nombreuses études existent ou sont en cours actuellement le travail ici présenté intègre toutes les phases entrant dans le processus décisionnel.

Le tableau 6.4 ci-dessous présente, sans être exhaustif, des exemples d'études ou de méthodes existantes ou en cours et qui portent sur les différents points entrant dans le cadre de gestion. Ces exemples sont mis en parallèle avec les différents domaines qu'aborde la présente recherche et qui sont rappelés en grisé dans le tableau.

		Suisse	USA	Union Européenne
Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments	Visite in situ et diverses caractéristiques du bâtiment (Basé sur l'approche EMS)	1. Bâle ¹⁾ 2. Feuille d'évaluation rapide de l'OFEG ²⁾	FEMA 154-155 [FEMA 1998b]	EMS-98 [EMS-98 1998]
Détermination de scénarios de dommages/pertes	Basé sur l'EMS	1. Bâle ¹⁾ 2. Application du logiciel Hazus ³⁾ 3. Projet EQRISK-CH	Hazus ³⁾	Projet Risk-UE ⁴⁾
Evaluation du risque pour un portefeuille de bâtiments	Ville d'Aigle	Stans ⁵⁾	New York ⁴⁾	Nice ⁶⁾
Détermination du niveau cible de protection pour les bâtiments existants	Nouvelle proposition	1. Recommandation SGEB ⁷⁾ 2. [SIA2018 2004]	-	
Méthode de comparaison pour les mesures de mitigation relatives aux bâtiments individuels	Méthode multicritère innovante avec détermination de critères comparatifs	-		Méthode coût-bénéfice ⁸⁾

Méthode de comparaison pour les stratégies de gestion relatives à un portefeuille de bâtiments	Méthode multicritère innovante avec détermination de critères comparatifs	-		
Catalogage des mesures de gestion du risque	Selon une classification originale	Uniquement pour les mesures techniques		
Formalisation d'un cadre de gestion	Gestion orientée objectifs des acteurs (Objectives-based Management)	-	1. Consequences-based management ^{8) 9)} 2. Framework for Evaluating the Cost-Effectiveness of Mitigation Measures ¹⁰⁾	-

1) [Lang 2001]

2) [OFEG 2002]

3) [FEMA 1999]

4) [Risk-UE 2004]

5) [Duvernay 2004]

6) [Nordenson 2002]

7) [Badoux 2003]

8) FEMA 255-256 [FEMA 1994a][FEMA 1994b]

9) [Abrams2002][Abrams 2003]

10)[Kunreuther 2003]

Tab. 6.4. Tableau comparatif des domaines abordés

6.6. SYNTHÈSE

Ce chapitre fixe dans un cadre les principales étapes d'un processus de gestion du risque. Après avoir rappelé l'évolution de l'attitude de la société face au risque sismique, il définit les éléments du système étudié. Les acteurs sont ainsi identifiés puis l'espace dans lequel s'articule la décision et ses principaux axes, à savoir technique, socio-économique, environnemental et sécuritaire, sont présentés. Des critères de comparaison des actions envisageables sont proposés pour deux dimensions; sécuritaire et économique.

Le cadre de gestion développé permet de mener le processus aboutissant à une décision de manière formalisée et reproductible. L'utilisation d'une méthode multicritère comparant les mesures et stratégies deux à deux dans le cadre de projets-pilotes a permis de tirer des enseignements généraux applicables quel que soit le contexte abordé. Le cadre de gestion énoncé dans ce chapitre permet donc de réduire la complexité d'une prise de décision grâce à ses considérations systémiques et aide ainsi le décideur à choisir la meilleure variante.

7 CONCLUSIONS

7.1. ENSEIGNEMENTS

7.1.1. Les attentes

Les attentes qui ont guidé la recherche présentée dans ce document naissent principalement de l'ampleur, aujourd'hui avérée, des conséquences potentielles d'un événement sismique pouvant affecter les sociétés modernes.

La dimension de l'espace affecté et la multiplicité des acteurs concernés par le risque sismique impliquent en outre une appréhension nouvelle de ce risque particulier. La mise en place de nouvelles méthodes de gestion ne peut en effet se concevoir qu'avec une base comparative objective suffisamment robuste. Ainsi, la qualité du modèle d'estimation du risque sismique contribue à prendre des décisions qui soient conformes à la réalité, mais également conformes aux attentes des décideurs ainsi qu'aux autres acteurs non représentés dans le processus décisionnel. Cela signifie que le modèle doit être capable de prendre en considération les informations propres à chacun des acteurs et de plus de manière légitimée. L'amélioration de la connaissance du risque, des mesures et du processus de gestion vont donc permettre d'améliorer la qualité des réponses apportées au danger sismique.

7.1.2. Enseignements généraux

Le processus de décision formalisé dans un cadre fournit une meilleure vision de la problématique. Il permet la prise de conscience de l'existence d'une situation dangereuse pouvant mettre en péril la pérennité d'une société vivant dans un espace naturel et construit potentiellement soumis à un tremblement de terre. Les situations inacceptables sont identifiées et quantifiées les unes par rapport aux autres. Cela permet de fixer les priorités dans les interventions pour le système étudié. De plus, le cadre de gestion permet l'établissement de solutions qui soient proportionnées tout en intégrant le principe de précaution. La notion d'analyse systémique, partant d'un état des lieux établi grâce aux techniques de modélisation du risque, permet in fine de disposer d'un processus comparatif adapté à la complexité. En extension à cette recherche, la mise en œuvre des mesures sélectionnées et une analyse rétroactive vont permettre un retour sur les objectifs primaires. Ce retour permettra de boucler le processus de gestion qui pourra dès lors entrer dans une phase apprenante d'optimisation.

7.1.3. Enseignements particuliers

Les illustrations par l'utilisation du cadre de gestion formalisé dans ce travail au travers de projets pilotes a permis de le tester dans le contexte particulier de la Suisse. Des enseignements propres à ce contexte ont pu être tirés.

Des enseignements plus généraux ont également été identifiés. Par exemple, certaines typologies de constructions caractéristiques, qu'on retrouve dans de vastes zones géographiques (comme par exemple la maçonnerie tout autour du bassin méditerranéen ou les bâtiments en béton faiblement armé en Suisse), poussent à favoriser l'effort de recherche pour ce genre de bâti. Quelques-uns de ces enseignements sont résumés au tableau 7.1.

	Composante du risque	Éléments nécessitant une meilleure connaissance
Estimation du risque	Aléa	Caractéristiques de l'aléa Effet de site
	Vulnérabilité	Comportement des bâtiments en maçonnerie Comportement des bâtiments en béton faiblement armé
Mesures de gestion	Vulnérabilité	Efficacité des mesures techniques de renforcement

Tableau 7.1 – Domaines de recherches potentiels

Ces différents éléments vont permettre d'améliorer la qualité de la gestion du risque sismique et s'intègrent dans le cadre de gestion ici développé. Certaines recommandations ont pu être formulées pour différents acteurs du contexte helvétique. Adressées aux locataires, aux propriétaires, aux institutions de crédit hypothécaire et enfin aux collectivités publiques, elles sont résumées non exhaustivement au tableau 7.2.

	Acteurs	Type de possession	Recommandations
Privés	Locataires	-	S'enquérir de la sécurité sismique de l'objet loué.
	Propriétaires	Bâtiment existant	Évaluer la vulnérabilité, éventuellement mettre en œuvre une mesure de gestion, par exemple transférer le risque économique sous la forme d'une assurance. En cas de transformation, évaluer l'opportunité de la mise en œuvre d'une mesure technique.
		Nouvelle construction	Exiger que les normes (les règles de l'art de la construction) soient appliquées.
	Instituts de crédit hypothécaire	Crédits existants	Évaluer le risque du portefeuille de crédit, éventuellement mettre en œuvre une mesure de gestion, par exemple transférer le risque économique sous la forme d'une assurance.
		Nouveaux crédits	Exiger que les normes (les règles de l'art de la construction) soient appliquées. Demander une couverture d'assurance au preneur du crédit (comme cela se fait couramment pour le risque d'incendie).
Collectivités	Confédération, Cantons, Communes	En tant que garant de la pérennité de la société, les collectivités doivent intégrer ce risque dans leurs réflexions. La méthode propositionnelle présentée en annexe peut s'avérer intéressante comme méthode de soutien. Pour les événements catastrophiques, la stratégie actuelle par co-assurance est adaptée. Pour des événements plus importants, il faut envisager un transfert du risque économique à l'aide d'autres outils (vers par exemple les marchés financiers).	

Tableau 7.2 – Recommandations aux acteurs

7.2. THÈSE PROPOSÉE

La thèse proposée dans ce travail postule comme idée centrale que la complexité de la problématique de la gestion du risque sismique peut être abordée grâce à une approche systémique. Cette approche permet d'intégrer la multiplicité des critères de décision ainsi que la multiplicité des acteurs impliqués dans le processus décisionnel. Ce travail formalise un cadre de gestion qui permet d'appréhender cette complexité. Les cinq étapes du cadre de gestion traitées dans cette recherche sont rappelées ci-dessous.

1. Définition du problème

Cette première étape établit l'existence ou l'absence d'un danger pour une zone géographique définie. Elle permet par une approche systémique de mettre en contexte la problématique abordée. Ensuite un diagnostic de la situation est effectué passant par une estimation du risque. L'effort à consentir lors de cette phase va en augmentant. Celle-ci se fait en deux temps. Premièrement, une cartographie indicative estime de manière rapide le niveau de risque. Dans le cas où le niveau de risque estimé est considéré comme trop important, une estimation plus poussée sera entreprise. Le niveau de risque est alors calculé dans un deuxième temps à l'aide d'une investigation de détails. S'il s'avère acceptable, la société est prête à vivre avec ce niveau de risque sans mesures particulières, par contre s'il est jugé inacceptable, la mise en œuvre de mesures de gestion doit être envisagée.

2. Détermination des objectifs

La recherche propose une méthode originale de détermination des objectifs de protection pour les bâtiments existants.

3. Elaboration de mesures ou de stratégies de gestion

Cette étape vise à élaborer des mesures pour des bâtiments individuels ou des stratégies pour des portefeuilles de bâtiments. Un catalogue des mesures de gestion à disposition est proposé.

4. Evaluation prospective

Afin de mener une évaluation prospective de mesures et ou de stratégies, des indicateurs sont proposés, aussi bien pour des bâtiments individuels que pour un portefeuille.

5. Choix

Finalement, ces mesures ou stratégies doivent être comparées pour effectuer un choix. Ce travail propose une méthode comparative permettant de soupeser les deux principes souvent contradictoires de précaution et de proportionnalité. Cette méthode tient compte de la multiplicité des acteurs et des critères de comparaison.

Par le biais du cadre de gestion, une meilleure perception de la complexité est fournie aux décideurs. Cela permet de légitimer une prise de décision intégrant les intérêts de chacun.

7.3. CONCLUSION

La recherche présentée dans ce document tente de parcourir le champ très vaste de la gestion du risque sismique. Cette démarche globale permet de mettre en exergue les domaines dans lesquels des progrès sont attendus afin d'améliorer encore la prise en compte de ce danger par la société. De nombreux points ont été abordés, pour certains seulement en surface. C'était le pari difficile de cette recherche, à savoir garder la vision d'ensemble de la problématique.

Les incertitudes ont été considérées dans le modèle d'estimation du risque proposé mais une diminution de celles-ci va avoir une incidence directe sur la pertinence et la justesse des choix futurs de mesures ou de stratégies de gestion. Cela est aussi bien vrai pour des acteurs isolés, comme par exemple le propriétaire d'une maison, que pour la mise en place d'une politique proportionnée et précautionnée pour des acteurs publics.

Cette recherche a mis également à jour la complexité de tels processus de gestion dans des sociétés impliquant de nombreux acteurs ayant des intérêts parfois contradictoires. Elle ouvre cependant des perspectives intéressantes d'applications concrètes intégrant de manière participative ces différents acteurs dans un cadre de gestion formalisé. L'objectif central de clarification de la problématique est donc atteint à l'aide dudit cadre.

NOTATIONS

LETTRES LATINES

A	Avantages (avantages annuels, valeur résiduelle de l'investissement initial)
C	Coût (investissement initial)
CG	Centre de gravité
$C_{sauvetage}$	Coût de sauvetage
$C_{gestion}$	Coût de gestion
e	Excentricité
E	Module d'élasticité
I	Inertie
g	Accélération terrestre
m^3	Mètre cube
n	Nombre d'années de planification
N_h	Indice de vie
p	Facteur de correction des sollicitations sismiques
r	Taux d'actualisation
$R_{EMS=i}$	Risque pour une intensité donnée i
$R_{économique}$	Risque économique
R_{humain}	Risque humain
$ROI_{sismique}$	Retour sur investissement sismique orienté risque sismique
R_{Total}	Risque total
S	Centre de cisaillement
Sd	Spectre de réponse élastique de dimensionnement
V_e	Valeur économique de l'ouvrage
V_h	Indice de valeur humaine de l'ouvrage
V_{hN}	Indice de valeur humaine de l'ouvrage normalisé
V_{em}	Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage
V_{emN}	Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage normalisé
Vul_{total}	Proportion de bâtiments vulnérables
Q_{acc}	Force horizontale de remplacement selon SIA 160
F_d	Force horizontale de remplacement de calcul selon SIA 261

LETTRES GRECQUES

γ_{CO}	Coefficient d'importance
γ_{CI}	Coefficient d'impacts économiques
$\gamma_{durée}$	Coefficient de durée
γ_f	Facteur d'importance
γ_Z	Coefficient de zone

ABRÉVIATIONS TECHNIQUES

CATEX	Catastrophe Risk Exchange
CBOT	Chicago Board of Trade
CO	Classe d'ouvrage
CREALP	Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DG	Damage grade, degré de dommage
DPM	Damage probability matrix, matrice de probabilité de dommage
ECA	Etablissement cantonal vaudois d'assurance
ELECTRE	ELimination Et Choix TRaduisant la REalité
EMS	European Macro-seismic Scale, Echelle macrosismique européenne
Frs.	Francs Suisses
GIS	Geographic information system, système géoréférencé
I _{EMS}	Intensité d'un séisme selon l'Echelle Macroscopique Européenne
MBL	Maçonnerie de briques légères
MSK	Echelle de Medvedev, Sponheuer, et Karnik
OFEG	Office fédéral des eaux et de la géologie
PGA	Pick ground acceleration, pic d'accélération du sol
SED	Service sismologique valaisan
SGEB	Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures
SIA	Société suisse des Ingénieurs et Architectes
SMP	Sinistre maximum potentiel
VAN	Valeur actuelle nette

ABRÉVIATIONS PROPRES AU VOCABULAIRE JURIDIQUE

Al.	Alinéa
Art.	Article
CO	Code des Obligations
CP	Code Pénal
Cst.	Constitution Fédérale
et ss	et suivant(e)s
OPAM	Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs
LCC	Loi cantonale valaisanne sur les constructions
LAT	Loi sur l'aménagement du territoire
RS	Recueil systématique
RSV	Recueil systématique vaudois
RSVs	Recueil systématique valaisan

GLOSSAIRE

Acceptabilité (du risque)	Acceptation de la part de la collectivité ou d'un particulier d'un certain niveau de risque.
(Risque) acceptable	Niveau des pertes humaines et matérielles perçu par un particulier, la communauté ou les autorités comme tolérable.
Aléa	Action naturelle, dont on ne maîtrise pas l'apparition, comme un tremblement de terre. Évaluer l'aléa revient à calculer, en un site donné, la fonction de répartition des paramètres caractéristiques des événements potentiels.
Ampleur	Mesure du degré de nuisance ou de bienfait d'un effet.
Atténuation	Processus qui consiste à réduire l'importance des effets négatifs.
Catastrophe	Grave interruption de fonctionnement d'une société causant des pertes humaines, matérielles ou environnementales que la société affectée ne peut surmonter avec ses seules ressources propres. Les catastrophes sont souvent classées en fonction de leur mode d'occurrence (Brusque ou progressif) ou de leur origine (naturelle ou anthropique).
Cadre décisionnel	Processus par lequel s'organisent les actions et les idées conduisant à une décision selon une marche à suivre formalisée.
Dangers naturels	Ensemble de ce qui constitue une menace d'origine naturelle pour un système étudié.
Domages	Conséquence d'une défaillance, exprimée, par exemple en termes du nombre de morts ou du coût d'une performance inadéquate.
Effet	Réaction d'une composante d'un système, par exemple, environnementale ou sociale, causée par une action.
Estimation	Analyse globale d'une catastrophe réelle ou potentielle permettant de fournir une approximation des dommages effectifs ou attendus.

Évaluation	Détermination de l'importance des effets. L'exercice comporte une appréciation des valeurs touchées, du risque potentiel de l'effet et de son degré d'acceptabilité.
Événement	Ensemble de sinistres ayant une origine aléatoire commune. Dans le cadre du risque sismique, il s'agit d'un tremblement de terre.
Fréquence	Nombre de fois qu'un événement se produit durant un intervalle de temps.
Impact	Effet produit par une action ou l'influence qui en résulte.
LIFELINE	Réseau vital, comprenant notamment l'infrastructure d'urgence et de sauvetage.
Matrice de probabilité de dommage	Matrice liant les dommages potentiels à des niveaux d'intensité donnés.
Méthode expert	Méthode basée sur le jugement de personnes reconnues comme compétentes dans un domaine.
Réassurance	Opération par laquelle un assureur s'assure lui-même auprès d'un tiers (le réassureur) pour une partie ou la totalité des risques qu'il a garanti, moyennant le paiement d'une prime.
Séisme de dimensionnement	Séisme forfaitaire retenu pour dimensionner des structures en application d'une réglementation donnée.
Scénario de risque	Situation (combinaison d'actions) qui pourrait provoquer une situation entraînant certaines conséquences (dommages).
Seuil	Limite de tolérance d'une composante valorisée du système étudié, par rapport à un effet.
SMP	Sinistre maximum possible (exprimé en valeur monétaire ou en pourcentage de la somme assurée).
SRE	Sinistre raisonnablement escomptable.
Titrisation des risques	Transfert des risques sur les marchés financiers.

BIBLIOGRAPHIE

1. RÉFÉRENCES

- Abrams D.P., *Consequence-Based Engineering – Approaches for reducing loss in Mid-America*, University of Notre-Dame, Indiana, Etat-Unis d'Amérique, 2002.
- Abrams D.P., Elnashai A.S., Beavers J.E., *A New Engineering Paradigm: Consequence-Based Management*, Mid-America Earthquake Centre, Urbana-Champaign, Illinois, Etat-Unis d'Amérique, 2003.
- Aquaterra, *Tremblements de terre – Un danger naturel sous-estimé*, OFEG, Bienne, Suisse, 2003.
- Bachmann H., *Principes de base pour la conception parasismique*, ETHZ-IBK, Zürich, Suisse, 2000a.
- Bachmann H., Wenk T., *Softening instead of strengthening for seismic rehabilitation*, IABSE Journal of Structural Engineering, No. 1, Zürich, Suisse, 2000b.
- Bachmann H., *Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités*, OFEG, Bienne, Suisse, 2002a.
- Bachmann H., Dazio A., Bruchez P., Mittaz X., Peruzzi R., Tissières P., *Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung eines Gebäudes mit Stahlbetontragwänden*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2002b.
- Bachmann H., *Neue Tendenzen im Erdbebeningenieurwesen*, Beton- und Stahlbetonbau, Berlin, Allemagne, 2004.
- Badoux H, Chessex R., Jeannet A., Lugeon M., Rivier F., *Extrait Atlas géologique de la Suisse (1 :25'000), feuille 1284 Monthey*, Berne, Suisse, 1960.
- Badoux M., *Seismic retrofitting of reinforced concrete structures with steel bracing systems*, Doctoral thesis, University of Texas, Etat-Unis d'Amérique 1987.
- Badoux M., *Introduction à la problématique de la vulnérabilité sismique du bâti existant – Situation Suisse*, Bulletin 1999 du Pool suisse pour la couverture des dommages sismiques, Berne, Suisse, 1999.

- Badoux M., Peter B.K., *Seismic vulnerability of older Swiss reinforced concrete buildings*, Paper No 566, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nouvelle-Zélande, 2000a.
- Badoux M., Studer J., Göksu E., Lestuzzi P., *Le séisme de Kocaeli en Turquie: mission de reconnaissance*, IAS, Lausanne, Suisse, 2000.
- Badoux M., *Vulnérabilité sismique du bâti existant suisse*, IAS, 222-227, Lausanne, Suisse, 2001.
- Badoux M., Duvernay B., Kölz E., Wenk T., Zwicky P., *Recommandation pour la prise en compte des actions sismiques lors de la vérification de la sécurité structurales des ouvrages existants selon les normes SIA (éd. 2003)*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, 2003.
- Basler & Hofmann, *Einschätzung der Erdbensicherheit wichtiger Gebäude*, Leitfaden im Rahmen eine Risikoanalyse der Kanton Basel-Stadt, Zürich, Suisse, 1992.
- Bay F., *Ground motion scaling in Suisse: Implications for hazard assessment*, Dissertation Nr.14567, ETH, Zürich, Suisse, 2002.
- Ben Mena S., *Méthodes multicritères d'aide à la décision: Synthèse et cas d'application*, Mémoire de DEA, Gembloux, Belgique, 1998.
- Ben Mena S., *Méthodes multicritères d'aide à la décision: agrégation partielle*, Cours Polycopié, Faculté Universitaire de Sciences Agronomiques, Gembloux, Belgique, 2001.
- Beres M., Green A.G., Pugin A., *Diapiric origin of the Chessel-Noville Hills of the Rhone Valley interpreted from georadar mapping*, Environmental & Engineering Geosciences, 141-153, Etat-Unis d'Amérique, 2000.
- Berz G., Smolka A., *Urban earthquake loss potential: Economic and insurance aspects*, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, pages 1127-1134, Rotterdam, Pays-Bas, 1995.
- Borgogno W., *Erdbebenertüchtigung eines Hochhauses*, tech 21, 13-16, Zürich, Suisse, 2001.
- Brennet G., Peter K., Badoux M., *Inventaire sismique et vulnérabilité du bâti traditionnelle de la ville d'Aigle*, ECA, Pully, Suisse, 2001.
- Brühwiler E., *Concept de sécurité dans les normes de construction du Génie Civil*, NDK: Risk & Safety, 6, Lausanne, Suisse, 2002a.
- Brühwiler E., *Aspects juridiques – Sécurité sismique*, NDK: Risk & Safety, Lausanne, Suisse, 2002b.

- Campos Costa A., Sousa M.L., Carvalho A., Bilé Serra J., Carvalho E.C., *Regional seismic risk scenarios based on hazard deaggregation*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres, Royaume-Uni, 2002.
- Carvalho E.C., Coelho E., Campos Costa A., Sousa M.L., Candeias P., *Vulnerability evaluation of residential buildings in Portugal*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, 10, Londres, Royaume-Uni, 2002.
- Cédra, Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs, *Rapport technique 88-17*, Baden, Suisse, 1988.
- Coburn A., Spence R., *Earthquake protection*, Wiley & Sons, Chichester, Royaume-Uni, 2000.
- Conseil Etat VD., *Réponse à la Motion Recordon*, Lausanne, Suisse, 2001.
- CRESTA, *Catalogue des données sismiques*, München, Allemagne, 1998.
- Deb K., *Multi-Objective optimisation using evolutionary algorithms*, Chichester John Wiley & Sons, Etats-Unis d'Amérique, 2001.
- Delacrétaz P., *L'Ouille*, Editions Delplast, Romanel-sur-Lausanne, Suisse, 1982.
- Deodatis G., Tantala M. W., *Earthquake loss estimation study for selected building blocks in the city of Patras, Greece*, Princeton University, Princeton, Etats-Unis d'Amérique, 2001.
- DETEC, *Article constitutionnel pour la protection contre les dangers naturels – Ouverture de la procédure de consultation*, Communiqué de presse du 14 mai du DETEC, Berne, Suisse, 2002
- Duvernay B., Widmer F., Pellissier V., *Mesures in situ des fréquences de bâtiments et de sites "free field"*, 6th Ziegler Symposium, Dübendorf, Suisse, 2003.
- Duvernay B., Lateltin O., *Earthquake vulnerability and loss estimation models for buildings in Suisse – Overview and Comparison*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.
- ECAVD, *Base de données – Informations*, Lausanne, Suisse, 2001.
- ECAVD, *Manifeste pour la prévention des dommages – Eléments naturels*, Etablissements cantonaux d'assurance, Lausanne, Suisse, 2001.
- ECAVD, *Conditions générales d'assurance*, Lausanne, Suisse, 1997.
- Epiney S., *Motion (transformée en postulat en 2000) relative aux tremblements de terre*, 98.3600, Berne, 1998.

- Erbay O.O., Abrams D.P., *Assessing seismic risk across populations of masonry buildings*, North America Masonry Conference, Clemson, Etats-Unis d'Amérique, 2003.
- Eugster S., Ruettenner E., *The Threat of Natural Hazards*, Converium Ltd, Zürich, Suisse, 2001.
- Ewald F. *Le retour du Malin génie*, dans O. Godard, *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, éd. de la maison des sciences de l'homme et éd. de l'INRA, p.99-126, Paris, France, 1997.
- Eyer P., Schmid E., Schaad W., *Earthquake insurance of industrial facilities: a premium rating framework*, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Pays-Bas, 1998.
- Fäh D., Deichmann N., *Le prochain tremblement de terre ne doit pas nous surprendre*, SGEB, Zürich, Suisse, 2001.
- Fäh, D., *Earthquake scenarios from earthquake hazard to loss estimates*, Kursunterlagen zum Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften "Naturgefahren: Erdbebenrisiko", ETH Zürich, Suisse, 2000.
- Fäh D., Kind F., Lang K., Giardini D., *Earthquake scenarios for the city of Basel*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 21 No. 5, pp. 405-413, Zürich, Suisse, 2001.
- Fäh, D., Kind, F., Giardini, D., *A theoretical investigation of average H/V ratios*, Geophys. J. Int., 145, 535-549, 2001.
- Giardini D., *Prenez garde ! Le prochain tremblement de terre est inévitable*, Pool suisse pour la couverture des dommages sismiques, Rapport de gestion 1998, Berne, Suisse, 1999.
- Godard O., *Traité des nouveaux risques*, Edition folio, Paris, France, 2002.
- Gumbel E.J., *Statistics of extremes*, Columbia University Press, USA, 1958.
- Gupta A., *Identifying optimal earthquake risk management techniques using performance based strategy effectiveness charts*, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Pays-Bas, 1998.
- Gutenberg B., Richter C.F., *Frequency of earthquakes in California*, Bull. Seismol. Soc. Amer., Etats-Unis d'Amérique, 1944.
- Holmes W., *Risk assessment and retrofit of existing buildings*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nouvelle-Zélande, 2000.
- Hugger W., *Gesetze - Ihre Vorbereitung, Abfassung und Prüfung*, Baden-Baden, Nomos, Allemagne, 1983.

- Inukai M., *Investigation of building damages by the 1995 Hyogken Nambu Earthquake*, Structural Dynamics – Eurodyn, 1996.
- Jeanneret A., *Microzonage sismique et évaluation de bâtiments à Yverdon*, Projet de diplôme, EPFL-ENAC-IS-IMAC, Lausanne, Suisse, 2004.
- Jimenez M-J., Giardini, D., Grünthal, G., *The ESC-SESAME Unified Hazard Model for the European-Mediterranean region*, csem-emsc Newsletter N° 19, 2003.
- Katanos, *Une étude de la protection civile sur les conséquences de catastrophes*, Office fédéral de la protection civile, Berne, Suisse, 1996.
- Katarisk, *Katastrophen und Notlagen in der Schweiz*, Office fédéral de la protection civile, Berne, Suisse, 2003.
- Kiremidjian A.S., *Development of a GIS-based earthquake damage and loss estimation methodology*, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Oxford, U.K., 1996.
- Koller M., *Retrofitting Measures*, 20th European Regional Earthquake Engineering Seminar, Sion, Suisse 2000.
- Koller M., *Effets de site*, Cours polycopié du cours de génie parasismique, Ecole polytechnique fédérale, Département de Génie Civil, Lausanne, Suisse, 2002.
- Kozák J., Thompson M.-C., *Séismes historiques en Europe*, Compagnie Suisse de Réassurances, Zürich, Suisse, 1991.
- Kunreuther H., *Disaster Insurance Protection. Public Policy Lessons*, John Wiley, New York, Etats-Unis d'Amérique, 1978.
- Kunreuther H., *Comment se protéger contre le coût des catastrophes*, Les Echos, Paris, France, 2001.
- Kunreuther H., Grossi P., Seeber N., Smyth A., *A Framework for Evaluating the Cost-Effectiveness of Mitigation Measures*, Columbia University, Etats-Unis d'Amérique, 2003.
- Lang K., *Seismic Vulnerability of Existing Buildings*, IBK-ETHZ, Zürich, Suisse, 2002.
- Lestuzzi P., *Méthode du quotient de Rayleigh*, Cours de génie parasismique, EPFL-ENAC-IS-IMAC, Lausanne, Suisse, 2002.
- Louafa T, *Management de projet intégré - Support à la créativité et l'innovation*, Thèse de doctorat EPFL, Lausanne, Suisse, 2003.
- Loup B., *Le risque sismique au nombre des dangers naturels*, Colloque fribourgeois sur le génie parasismique, Fribourg, Suisse, 2003.

- Lungu D., Aldea A., Arion C., *GIS mapping of earthquake risk and buildings retrofitting in Bucharest*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres, Royaume-Uni, 2002.
- Maffioletti W., *Courrier du 11.06.2003 relatif à la période transitoire des normes*, Zürich, Suisse, 2003.
- Mayer-Rosa D., Jiménes J.-M., *Seismic Zoning: State-of-the-art and recommendations for Switzerland*, Geologische Berichte Landeshydrologie und -geologie, Nr. 26, Zürich, Suisse, 2000.
- Maystre L.Y., Bollinger D., *Aide à la négociation multicritère: pratique et conseils*, PPUR, Lausanne, Suisse, 1999.
- Maystre L.Y., Pictet J., Simos J., *Méthodes multicritères Electre: Description, conseils pratiques et cas d'application*, PPUR, Lausanne, France, 1994.
- Nakamura Y., *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Society for Earthquake Engineering, Paper No. 2656, Upper Hutt, Nouvelle-Zélande, 2000.
- Nichols J.M., Beavers J.E., *Development and Calibration of a Synthetic Earthquake Fatality Function*, Earthquake Spectra, Oakland, Etats-Unis d'Amérique, 2002.
- Nordenson G.J.P., Deodatis G., Jacob K.H., Tantala M. W., *Earthquake Loss Estimation of the New York City Area*, 12WCEE, Auckland, Nouvelle-Zélande, 2000.
- NRP-20 1997, Programme de recherche national 20, *Deep structure of the Swiss Alps*, Bâle, Suisse, 1997.
- OFEG, *Le risque sismique en Suisse et les mesures prises par la Confédération*, OFEG, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes, Bienne, 2001.
- Paulay T., Priestley N., *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*; John Wiley & Sons, New York, Etats-Unis d'Amérique, 1992.
- Pellissier V., Badoux M., *Decision Framework for Seismic Risk Management*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres, Royaume-Uni, 2002a.
- Pellissier V., *Quantification du risque sismique pour une population de bâtiments*, Travail de mémoire du cours postgrade Risk & Safety, Lausanne, Suisse, 2002b.
- Pellissier V., Badoux M., *Estimation du risque sismique de la ville d'Aigle*, ECA, Pully, Suisse, 2003a.

- Pellissier V., Jaccard P.-A., *Gestion du risque sismique orientée objectifs*, AFPS, Paris, France, 2003b.
- Pellissier V., Delessert F., Mafioletti W., *Prise en compte de l'aléa sismique dans le domaine de la construction – Contexte légal et aspects juridiques*, Sion, Suisse, 2003c.
- Peter B.K., *Erdbeben-Ueberprüfung bestehender Stahlbeton-Gebäude*, Thèse de doctorat EPFL, Lausanne, Suisse, 2000.
- Peter B.K., *Die rechtliche Verankerung der Pflicht, erdbebensicher zu bauen*, Mémoire de fin de cours, Nachdiplomskurs Risiko und Sicherheit, Lausanne, Suisse, 2000.
- Recordon L., *Prévention des risques causés par les tremblements de terre*, Motion, Lausanne, Suisse, 1999.
- Renn O., *Individual and social perception of risk*, Ökologisches Handeln als sozialer Prozess. Themenheft SPP, Basel, Suisse, 1995.
- Rey-Bellet J.-J., *Prévention sismique en Valais: mesures prises à ce jour*, Sion, Suisse, 2001.
- Rey-Bellet J.-J., Rouiller J.-D., *Concept de protection parasismique en Valais*, SIA DO162, Zürich, Suisse, 2000.
- Risk-UE, *An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns – Preliminary results of the seven technical workpackages*, CE, Nice, 2004.
- Rodrigues M.L., *Seismic Evaluation of an Existing Building*, Projet de semestre étendu, EPFL-ENAC-IS-IMAC, Lausanne, Suisse, 2003.
- Rouiller J.-D., *Avis Géologiques de la Commission Cantonale des Constructions – Courrier à l'intention des maîtres d'œuvre*, Sion, Suisse, 2003a.
- Rouiller J.-D., *Règlement communaux de construction – Circulaire à l'intention des communes*, Sion, Suisse, 2003b.
- Roy B., *Classement et choix en présence de points de vue multiples (La méthode ELECTRE)*, Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle, vol. 2. No. 8, p. 55-57, Paris, France, 1968.
- Roy B., *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Economica, Paris, France, 1985.
- Roy B., Bouyssou D., *Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas*, Economica, Paris, France, 1993.

- Ruettener E., *Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland*, Schweizerischer Erdbebendienst, Inst. für Geophysik, ETHZ, Zürich, Suisse, 1995.
- Ruettener E., *Erdbebenrisiko aus der Sicht des Versicherers*, Dokumentation D0162, SIA, Zürich, Suisse, 2000.
- R&S, *Risiko aus Erdbeben im Kanton Nidwalden. Erste Beurteilungsstufe*, Report. Gipf-Oberfrick, Risk & Safety AG, Suisse, 2000.
- Saaty T.L., *How to make a decision. The Analytical Hierarchy Process*, European Journal of Operational Journal, vol. 48, p. 9-26, Etats-Unis d'Amérique, 1990.
- Saeki T., Midorikawa S., *Estimation of Economic loss affecting Residents' ability to rebuild their lives suffering earthquake Damage*, 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, Nouvelle-Zélande, 2000.
- Sägesser R., Mayer-Rosa D., *Erdbebengefährdung in der Schweiz*, Schweizerische Bauzeitung, Zürich, Suisse, 1978.
- Sarlos G., Haldi P.-A., Verstraete P., *Systèmes énergétiques – Offre et demande d'énergie: Méthodes d'analyse*, Traité de génie civil, PPUR, Lausanne, Suisse, 2003.
- Schaad W., *Earthquake Loss Analyses from the Insurer's Standpoint*, SwissRe Publishing, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japon, 1988.
- Schärlig A., *Pratiquer Electre et Prométhée, Un complément à décider sur plusieurs critères*, PPUR, Lausanne, Suisse, 1996.
- Schärlig A., *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision*, PPUR, Lausanne, Suisse, 1985.
- Schmid E., *Aujourd'hui, les couvertures d'assurance sont insuffisantes. Et si la terre tremblait en Suisse ?*, Swiss Re Publishing, Zürich, Suisse, 2000.
- Schneider J., *Acceptation des risques du point de vue technique et sociologique*, CNA et SATW, Lucerne, Suisse, 1994.
- Schneider J., *Verfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude: Risiken abschätzen und Prioritäten setzen*, SIA DO162, Zürich, Suisse, 2000.
- Schumacher R., *Zur rechtlichen Verantwortung für die Erdbebensicherung von Bauwerken*, SIA DO162, Zürich, Suisse, 2000.
- Schwartz J., Raschke M., Maiwald H., *Seismic risk studies for Central Germany on the basis of the European macroseismic scale EMS-98*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres, U.K., 2002.

- Simos J., *L'évaluation environnementale: Un processus cognitif négocié*, PPUR, Thèse de doctorat EPFL, Lausanne, Suisse, 1990a.
- Simos J., *Evaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*, PPUR, Lausanne, Suisse, 1990b.
- UN, *Living with Risk A global review of disaster reduction initiatives*, International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genève, Suisse, 2002.
- Weidmann M., *Erdbeben in der Schweiz*, Schweizerische Pool für Erdbebendeckung, Chur, Suisse, 2002.
- Wenk T., *Naturgefahren: Erdbebenrisiko*, Nachdiplomkurs Naturgefahren, ETH, Zürich, Suisse, 2000.
- Wenk T., Hertelendy P., Zimmerli D., *Das Erdbeben in Italien vom 26. September 1997*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr.44, Zürich, Suisse, 1997.
- Wenk T., Lestuzzi P., *Séisme*, dans SIA D0181, *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses - Actions sur les structures porteuses – Introduction aux normes SIA 260 et 261*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2003.
- Widmer F., *Projet pilote de microzonage sismique dans le secteur d'Yverdon*, OFEG & EPFL/GEOLEP, Bienne, Suisse, 2002.
- Widmer F., Pellissier V., *Campagne de mesures in situ – Projet pilote d'Aigle*, EPFL & OFEG, Lausanne, Suisse, 2003.
- Whitmann R.V., Reed J.W., Hong S.-T., *Earthquake damage probability matrices*, Proceeding of the fifth World Conference on Earthquake Engineering, pp 2531, Roma, Italie, 1974.
- Wüst H., Schweizer M., *Bau- und Immobilienmarkt Schweiz, Monitoring 1995*, Wüst & Partner, Zürich, Suisse, 1994.
- Wurstisen C., *Basler chronik*, Reprint of the editions of Basel 1580, Ed. Slatkine, Genève, Suisse, 1978.

2. RECOMMANDATIONS, NORMES, LOIS ET RÉGLEMENTS CONSULTÉS

- Applied Technology Council, *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, ATC & FEMA, ATC-13, Redwood City, Etats-Unis d'Amérique, 1985.
- Applied Technology Council, *Development of Recommended Guidelines for Seismic Strengthening of Existing Buildings, Phase I: Issues Identification and*

- Resolution*, ATC & FEMA, ATC-28, Redwood City, Etats-Unis d'Amérique, 1992.
- Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC & California Seismic Safety Commission, ATC-40, Redwood City, Etats-Unis d'Amérique, 1996.
- Applied Technology Council, *Database on the Performance of Structures Near Strong-Motion Recordings: 1994 Northridge, California, Earthquake*, Applied Technology Council (ATC-38), Redwood City, Etats-Unis d'Amérique, 2000.
- Canada, *Saines pratiques applicables aux engagements relatifs aux tremblements de terre*, Bureau du surintendant des institutions financières du Canada, Ottawa, Canada, 1998.
- CSSC, *Earthquake Risk Management*, California Seismic Safety Commission, Sacramento, Etats-Unis d'Amérique, 1999.
- EERI, *Financial Management of Earthquake Risk*, Earthquake Engineering Research Institute, Darmstadt, USA, 2000.
- EERI, *What are the Principles of Insuring Natural Disaster ?*, Earthquake Basics Breif, No. 3, Oakland, Etats-Unis d'Amérique, 1997.
- EMS-98, *European Macroseismic Scale 1998*, European Seismological Commission, Luxembourg, Luxembourg, 1998.
- EMS-98, *Echelle Macrosismique Européenne*, European Seismological Commission, Luxembourg, Luxembourg, 2001.
- Eurocode 8, *Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes*, Collection bâtiments, Zürich, Suisse, 1997.
- FEMA, *Establishing Programs and Priorities for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Supporting Report, FEMA-173, Whashington D.C., Etats-Unis d'Amérique, 1989.
- FEMA, *Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Volume 1 – Summary, FEMA-156, Washington, Etats-Unis d'Amérique, 1994.
- FEMA, *Seismic Rehabilitation of Federal Buildings: A Benefit/Cost Model*, Volume 2 – Supporting documentation, FEMA-256, Washington D.C., Etats-Unis d'Amérique, 1994.
- FEMA, *Seismic Rehabilitation of Federal Buildings : A Benefit/Cost Model*, Volume 1 – A User's manual, FEMA-255, Washington D.C., Etats-Unis d'Amérique, 1994.

- FEMA , *Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Volume 2 – Supporting documentation, Washington D.C., Etats-Unis d’Amérique, 09, 1995.
- FEMA, *National Mitigation Strategy*, Government Printing Office, Washington D.C., Etats-Unis d’Amérique, 1996.
- FEMA, *Report on Costs and Benefits of Natural Hazards Mitigation*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., Etats-Unis d’Amérique, 1997.
- FEMA, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazard – A Handbook*, Washington D.C., Federal Emergency Management Agency, Etats-Unis d’Amérique, 1998a.
- FEMA, *Second Report on Costs and Benefits of Natural Hazards Mitigation*, Federal Emergency Management Agency, Protecting Business Operation, Washington D.C., Etats-Unis d’Amérique, 1998b.
- FEMA, *Hazus[®]99 SR2 – Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., Etats-Unis d’Amérique, 1999.
- ISO, *Bases for design of structures – Assessment of existing structures*, International Standard, final draft, 2000.
- Knapp B., *La responsabilité de l'Etat en cas de catastrophes naturelles*, Revue de droit suisse, 1986/1, 589-617, Berne, Suisse, 1986.
- Lanz-Stauffer H., *L'assurance contre les dommages causés par les forces de la nature en Suisse*, Revue pour l'étude des calamités, II/5, 67-83, Lausanne, Suisse, 1939.
- Lanz-Stauffer H., Rommel C., *Elementarschäden und Versicherung*, Union de réassurance des assurances cantonales, Berne, Suisse, 1936.
- OFEG, *Evaluation de la sécurité parasismique des constructions existantes*, Cours 1, Bienne, Suisse, 2002.
- OFEG, Directives provisoires, *Principe pour l'établissement et l'utilisation des études de microzonage en Suisse*, Bienne, Suisse, 2003.
- OADE, RS 961.27, *Ordonnance du 18 novembre 1992 sur l'assurance des dommages dus à des événements naturels*, Berne, Suisse, 1992.
- OPAM, RS 814.012, *Ordonnance du 27 février 1991 sur la protection contre les accidents majeurs*, Berne, Suisse, 1991.
- LAT, RO 1979 1573, *Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire*, Berne, Suisse, 1979.

- RSV, *Loi cantonale vaudoise concernant l'assurance des bâtiments contre l'incendie et les éléments naturels*, Lausanne, Suisse, 1952.
- RSV, *Règlement d'application de la loi concernant l'assurance des bâtiments et du mobilier contre l'incendie et les éléments naturels*, Lausanne, Suisse, 1981.
- RSV, *Loi cantonale vaudoise du 4 décembre 1985 sur l'aménagement du territoire et les constructions*, Lausanne, Suisse, 1985.
- RSV, *Règlement d'application du 19 septembre 1986 d'application de la loi du 4 décembre 1985 sur l'aménagement du territoire et les constructions*, Lausanne, Suisse, 1986.
- RSVs, *Loi cantonale valaisanne sur les constructions du 8 février 1996*, Sion, Suisse, 1996.
- RSVs, *Ordonnance d'application du 2 octobre 1996 de la loi cantonale valaisanne sur les constructions du 8 février 1996*, Sion, Suisse, 1996b.
- SIA 160, *Action sur les structures porteuses*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 1970.
- SIA 160, *Action les structures porteuses*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 1989.
- SIA 260 et ss, *Collection de normes pour la conception des ouvrages*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2003.
- SIA 416, *Surfaces et volumes des bâtiments*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2003.
- SIA 462, *Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 1994.
- SIA-Vs, *Cours de formation continue pour ingénieurs et architectes, Dimensionnement sous les actions sismiques selon les nouvelles normes de la SIA*, CREALP, Sion, Suisse, 2003.
- SIA D0162, *Erdbevorsorge in der Schweiz*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2000.
- SIA D0181, *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses – Actions sur les structures porteuses - Introduction aux normes SIA 260 et 261*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2003.
- SIA D0191, *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses - Actions sur les structures porteuses – Exemples de dimensionnement selon les normes SIA 260 et 261*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2004.

SIA 2018, *Überprüfung bestehender Gebäude, bezüglich Erdbeben*, Merkblatt, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich, Suisse, 2004.

3. SITES INTERNET

Centrale nationale d'alarme, <http://www.naz.ch>

Centre de compétence Dangers naturels, <http://www.cenat.ch>

Communauté d'intérêts pour la prise en charge des dommages dus aux tremblements de terre, <http://www.svv.ch>

Corps suisse d'aide humanitaire, <http://www.skh.ch>

Centre de recherche sur l'environnement alpin, <http://www.crealp.ch>

Cours de formation continue de la Faculté de Droit de l'Université de Genève, <http://webdroit.unige.ch>

Etablissement cantonal d'assurance vaudois, <http://www.eca-vaud.ch>

Federal Emergency Management Agency, <http://www.fema.org>

Office fédéral de l'eau et de la géologie, <http://www.bwg.admin.ch>

Plate-forme nationale dangers naturels, <http://www.planat.ch>

Pool suisse pour la couverture des dommages, <http://www.irv.ch/http/pool>

Service sismologique Suisse, <http://www.seismo.ethz.ch>

Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures, <http://www.sgeb.ch/>

Swiss Reinsurance Company, <http://www.swissre.com>

Tremblement de terre en Suisse, Livre M. Weidman, <http://www.suissetremble.ch>

4. RESSOURCES PHOTOGRAPHIQUES

Les photographies reproduites dans ce document font partie des collections d'images de l'auteur et du Dr Marc Badoux ainsi que de la collection du laboratoire de construction en béton (IS-BETON) de l'EPFL.

ANNEXE A - BÂTIMENTS INDIVIDUELS

A1. BÂTIMENT D'HABITATION COLLECTIVE À SION

A1.1. Description et caractéristiques

Aux paragraphes suivants l'évaluation d'un bâtiment existant typique de 6 étages en Valais soumis à l'action de sollicitations sismiques est présentée [Rodrigues 2003]. Des propositions de renforcement sont ensuite exposées pour garantir la sécurité structurale de ce bâtiment pour différents objectifs cibles de protection. Les plans du bâtiment sont présentés à la page suivante.

A1.2. Caractéristiques du bâtiment

Caractéristiques sismiques

Le bâtiment analysé possède 5 étages sur rez-de-chaussée et a été construit en 1974. Il est localisé dans la ville de Sion en Valais qui est située dans la zone sismique 3b, soit la plus contraignante de Suisse selon les normes sismiques actuelles. Dans l'ancienne norme SIA 160 [SIA 160 1989]. Cette région appartenait à la zone sismique 3a. Le changement de zone et de génération de normes conduit à une forte augmentation des actions de dimensionnement.

Génération de normes	CO ⁽¹⁾	Zone ⁽²⁾	Sol	F _{rempl.} ⁽³⁾ [MN]	Variation [%]
SIA 160 [SIA160 1989]	I	3a	Semi compact	Sens X: Q _{acc} = 2.01 ⁽⁴⁾	100
				Sens Y: Q _{acc} = 1.93 ⁽⁴⁾	100
SIA 261 [SIA261 2003]	I	3b	Classe D	Sens X: F _{dx} = 4.93 ⁽⁴⁾	245
				Sens Y: F _{dy} = 4.04 ⁽⁴⁾	201
				Sens X: F _{dy} = 6.58 ⁽⁵⁾	341
				Sens : F _{dy} = 5.37 ⁽⁵⁾	278

⁽¹⁾ Classe d'ouvrage

⁽²⁾ Zone de risque sismique selon l'annexe A3, carte 3 [SIA160 1989] et l'annexe F [SIA261 2003]

⁽³⁾ Force de remplacement dans les deux directions principales

⁽⁴⁾ Méthode des spectres de réponse

⁽⁵⁾ Méthode des forces de remplacement

Tableau A1 – Actions sismiques selon les générations de normes

Les porteurs verticaux ont été réalisés à l'aide d'un système mixte de murs en béton faiblement armé et en maçonnerie. Le bâtiment a été dimensionné uniquement pour reprendre les efforts gravitaires, exception faite des sollicitations dues au vent. La note de calcul du bâtiment, le rapport géologique ainsi que le dimensionnement des pieux de fondation ont pu être consultés. La direction X est constituée principalement d'éléments de structure en béton armé alors que la direction Y est constituée quant à elle de murs en maçonnerie.

BÂTIMENT D'HABITATION

Localisé à Sion
Classe d'ouvrage COI
Classe de sol D

VUE EN PLAN D'UN ETAGE

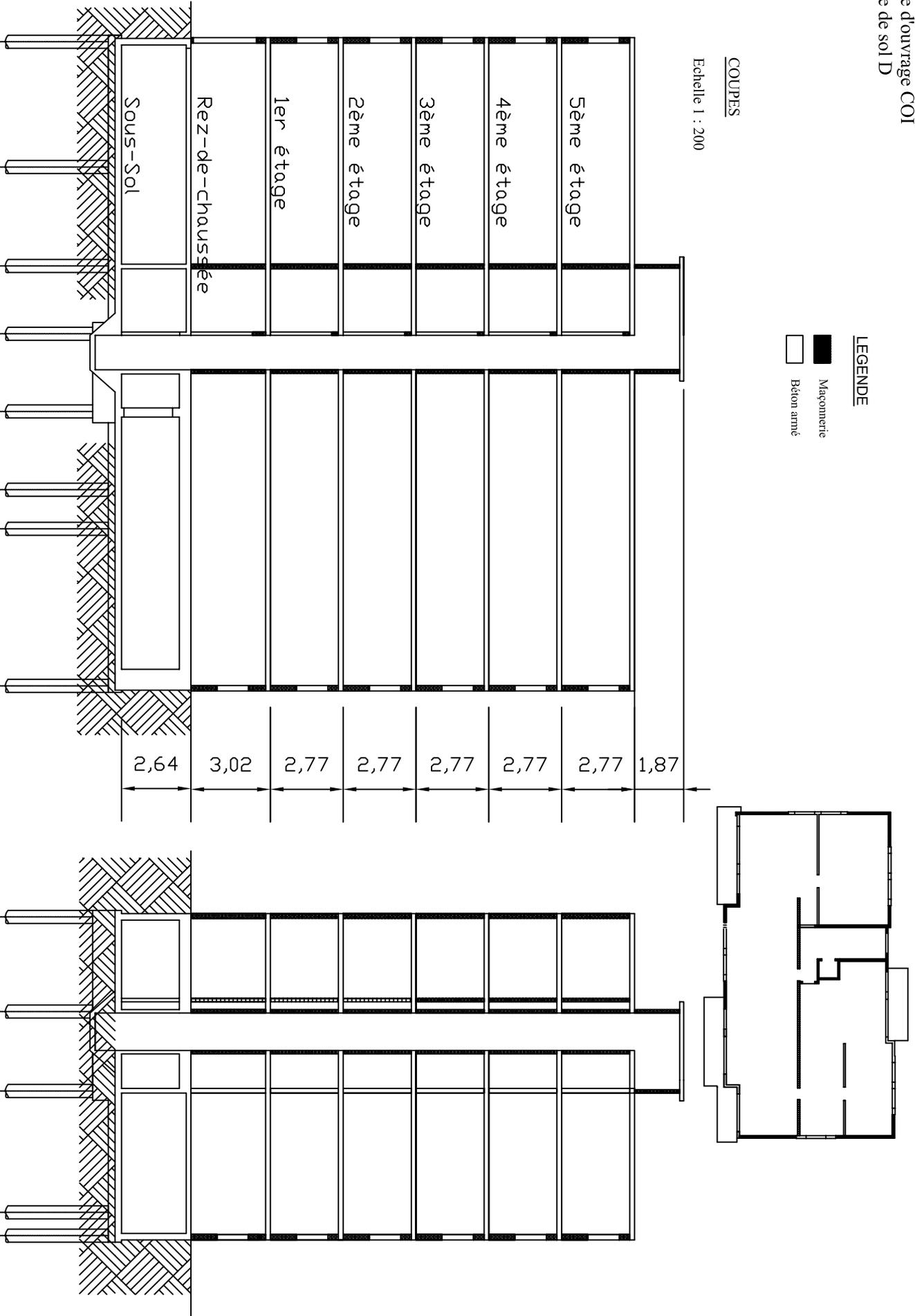
Echelle 1 : 400

LEGENDE

- Maçonnerie
- Béton armé

COUPES

Echelle 1 : 200



La contribution de la maçonnerie dans la direction X est négligeable. La contribution de l'inertie des éléments en béton armé dans l'autre direction l'est également. Les efforts dus à la torsion sont relativement faibles du fait de la presque superposition des centres de masse et de cisaillement. Pour vérifier la sécurité de l'ouvrage, en sus de l'excentricité effective, une excentricité accidentelle a été prise en compte comme proposé par l'art. 16.5.3.4. de la norme SIA 261 [SIA261 2003].

Centre de cisaillement	Centre de gravité	Excentricité effective
$x_s = 12.68$ m	$x_{CG} = 12.70$ m	$e_x = 0.02$ m
$y_s = 4.88$ m	$y_{CG} = 5.18$ m	$e_y = 0.30$ m

Tableau A2 – Détermination des centres de cisaillement et de gravité

Le poids propre est constitué du poids des éléments structuraux (maçonnerie et béton armé) et des dalles pour chaque étage ainsi que d'éléments non porteurs (chapes, isolation, galandages). Le tableau A3 récapitule les éléments porteurs et non porteurs utilisés pour le calcul des masses. La charge de service, envisagée comme accidentelle, est prise à 30% de la charge préconisée pour un dimensionnement.

Description des éléments porteurs et non porteurs	g [kN/m ²]	γ_g	$\gamma_g \times g$ [kN/m ²]
Poids propre des dalles (épaisseur 20 cm)	5.0	1.0	5.0
Poids propre toiture	1.0	1.0	1.0
Isolation + chapes ép. 10 cm	2.0	1.0	2.0
Murs intérieurs porteurs et non porteurs (galandages) + façades	3.0	1.0	3.0
Charges utiles selon SIA 261	q_r [kN/m ²]	Ψ_{2i}	$\Psi_{2i} \times q_r$ [kN/m ²]
Locaux d'habitation	2.0	0.3	0.6
Balcons	3.0	0.3	0.9
Locaux de vente	5.0	0.6	3.0
Bureau	3.0	0.3	0.9

Tableau A3 – Masses considérées

La masse moyenne par étage est d'approximativement 320 tonnes, y compris la charge accidentelle de service. La masse totale du bâtiment s'élève à 2'147 tonnes. La norme SIA 261 [SIA261 2003] ne spécifie pas le niveau d'encastrement. Le bâtiment comporte un sous-sol formant un caisson rigide, le niveau d'encastrement est donc admis au rez-de-chaussée. La masse du rez-de-chaussée n'est par conséquent pas pris en compte dans le calcul de la force de remplacement. D'autres hypothèses d'encastrement ont été envisagées mais finalement écartées.

Rigidités

Sous sollicitations sismiques, il est important d'estimer la rigidité réelle puisqu'elle joue un rôle direct sur la fréquence propre du bâtiment. En fait, cette rigidité varie tout au long de l'événement sismique dès l'apparition de fissures. On considérera pour le calcul, une valeur moyenne de cette rigidité, fonction principalement de l'effort normal qui limite l'apparition de fissures [Paulay 1992].

	SIA 160		SIA 261	
	E_{béton armé}	E_{maçonnerie}	E_{béton armé}	E_{maçonnerie}
Module	$E_C = 34 \text{ GPa}$	$E_m = 8 \text{ GPa}$	$E_{cm} = 34 \text{ GPa}$	$E_{xk} = 7 \text{ GPa}$
	$EI_{eff} = 40\% EI_o$	$EI_{eff} = 100\% EI_o$	$EI_{eff} = 25\% EI_o$	$EI_{eff} = 100\% EI_o$
Ductilité	$C_k = C_k/K = 0.65/2.0$	$C_k = C_k/K = 0.65/1.2$	$q = 2$	$q = 1.5$

Tableau A4 – Valeurs de calcul

Détermination de la période de vibration fondamentale du bâtiment

Les méthodes simplifiées proposées par les normes SIA 160 [SIA160 1989] et SIA 261 [SIA261 2003] ont été utilisées dans un premier temps pour déterminer les périodes de vibration fondamentales du bâtiment dans les deux directions. Ensuite, ces périodes ont été déterminées à l'aide de la méthode du quotient de Raleigh [Lestuzzi 2002]. La matrice de flexibilité a été calculée pour un niveau d'encastrement situé au rez-de-chaussée reprenant l'hypothèse posée précédemment du comportement en caisson rigide du sous-sol. Afin de valider le modèle théorique, une campagne de mesure in situ a été réalisée [Duvernay 2003]. Elle donne les résultats présentés aux figures A1 et A2 ci-dessous.

Méthode de détermination	Périodes de vibration fondamentales	
	Sens X [Hz]/[s]	Sens Y [Hz]/[s]
SIA 160 [SIA160 1989]	2.71/0.51	1.95/0.51
SIA 261 [SIA261 2003]	2.16/0.46	2.16/0.46
Quotient de Rayleigh	1.76/0.57	1.26/0.79

Tableau A5 – Périodes de vibration fondamentales

Sens X : Bruit ambiant (64 mesures de 20 secondes – Pic basses fréquences filtrées)

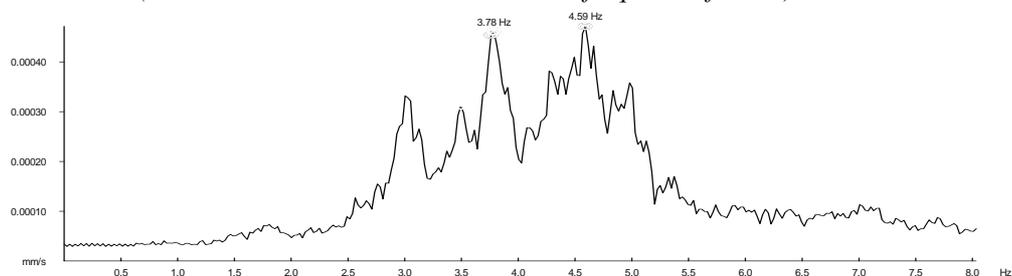


Figure A1 – Bruit ambiant – Sens X

Sens Y : Bruit ambiant (64 mesures de 20 secondes – Pic basses fréquences filtrées)

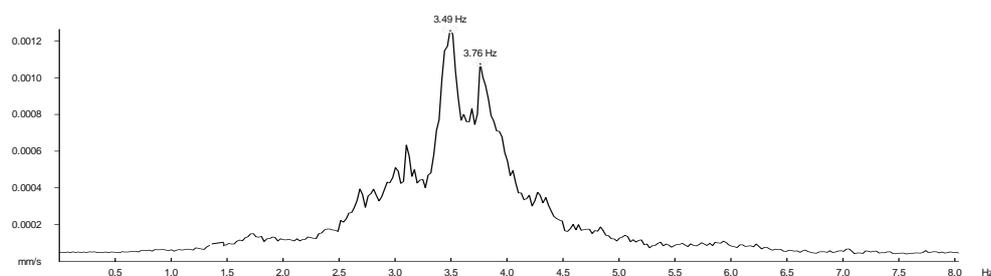


Figure A2 – Bruit ambiant – Sens Y

Des pics clairs sont difficiles à établir, dans la direction X en particulier. De plus, on obtient des résultats sur une structure non fissurée, sans pouvoir tenir compte de l'effet d'une fissuration sur la rigidité. La méthode de Rayleigh donne une bonne approximation de la période.

Vérification de la sécurité structurale du bâtiment

La vérification par le calcul aboutit à la conclusion que le bâtiment étudié n'est pas conforme aux exigences fixées par la nouvelle collection de normes, ni de l'ancienne d'ailleurs. Dans la direction X, l'objectif de protection de l'ancienne norme (SIA 160) est atteint. Par contre, ce n'est pas le cas pour la direction Y. Les modes de rupture auxquels il faut s'attendre en cas de séisme sont du glissement de la maçonnerie aux étages supérieurs et une rupture du matériau de refends en maçonnerie au rez-de-chaussée. Les pourcentages des exigences normatives actuelles des actions pouvant être repris par le bâtiment sont présentés au tableau A6. La plus faible des valeurs correspond à l'indice de vulnérabilité.

Génération de normes	Niveau de résistance ⁽¹⁾	
	Sens X [%]	Sens Y [%]
SIA 160 [SIA160 1989]	> 100	76
SIA 261 [SIA261 2003]	> 100	31 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Le pourcentage des actions que peut reprendre le bâtiment sans ruine

⁽²⁾ Correspond à l'indice de vulnérabilité

Tableau A6 – Niveau de résistance du bâtiment

Ces valeurs sont obtenues à l'aide d'une méthode de calcul basée sur forces. Bien qu'une méthode basée sur les déplacements [Lang 2002] donne des résultats plus favorables (indice de vulnérabilité de 38), la valeur la plus basse a été retenue.

Indices de valeur de l'ouvrage

Selon [Badoux 2003] les actions sismiques déterminées par la norme SIA 261 [SIA261 2003] pour garantir la sécurité structurale peuvent être multipliées par un facteur de correction **p** qui varie en fonction des paramètres résumés au tableau A8 et présentés en détails au chapitre 4.

Dans cet exemple d'application une rénovation importante est envisagée. Cette rénovation porterait la durée de vie restante de l'ouvrage à 30 ans. Dans le cas où une reconstruction serait envisagée, une durée de vie de 50 ans est prise en compte, soit plus élevée que la période de planification générationnelle. Ainsi, aucune réduction liée à la durée de vie restante n'est prise en considération pour cette mesure. Le montant des travaux de rénovation est estimé à Frs. 420'000.

			Après rénovation
Durée de vie restante	Durée restante	[années]	30
	Coefficient de durée $\gamma_{durée}$		0.90
Volume SIA	Nombre de m ³	[m ³]	5'030
Nombre moyen d'habitants			50
Taux d'occupation (habitation)			0.65
Indice de vie	N_h		32.50
Indice de valeur humaine de l'ouvrage	V_h		29.25
Indice de valeur humaine normalisé	V_{hN}		58.2
Valeur économique de l'ouvrage	Prix unitaire par m ³	[Frs./m ³]	520 Frs./m ³
	Valeur économique V_e		2'615'000
Importance de l'ouvrage	Classe d'ouvrage	[CO]	I
	Coefficient d'importance γ_{CO}		0.40
Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage V_{em}			941'600
Indice de valeur économique mixte normalisé V_{emN}			187.2

Tableau A8 – Paramètres d'adaptation des sollicitations

A1.2. Mesures de gestion du risque sismique

Mesures techniques de renforcement

On envisage ici trois types d'intervention de renforcement. La première intervention est réalisée à l'aide de renforcement par bandes de carbone collées sur l'extérieur des refends en maçonnerie. Les fondations actuelles suffisent à reprendre les actions horizontales. La deuxième intervention vise un objectif de protection de 70% des exigences requises par la norme SIA 261 [SIA261 2003]. Pour ce faire, on ajoute deux murs de refends en béton armé dans chaque direction principale. Les efforts sont transmis au sol par des micro-pieux. Cette intervention impose des modifications architecturales importantes ainsi qu'un soin particulier aux détails constructifs pour garantir le comportement souhaité. Enfin, la troisième mesure technique proposée est la démolition et la reconstruction d'un bâtiment dimensionné en capacité.

Mesures techniques	Objectif de protection [%] ⁽¹⁾	Coût estimé [Frs]	Remarques
Rajout de bandes de carbone	40	250'000	- intervention sans entrave à l'intérieur - difficultés (incertitudes) de réalisation
Rajout de refends en béton armé	70 ⁽²⁾	500'000	- difficultés (incertitudes) de réalisation
Remplacement	100	2'800'000	- prix de la démolition compris - cessation de l'activité locative pendant la durée de la reconstruction

⁽¹⁾ Par rapport aux exigences de la norme SIA 261 [SIA261 2003] dans la direction la plus défavorable

⁽²⁾ En grisé la mesure retenue qui fournit le facteur de correction p

Tableau A9 – Mesures techniques de renforcement

Mesure de transfert de risque par le biais d'une assurance

Un transfert par couverture assurancielle est une autre alternative envisagée pour la mitigation du risque sismique. Elle n'a pas d'impact sur le niveau de risque humain, mais par contre

influence directement le risque économique. La variante comparée propose une couverture de la valeur de remplacement de l'objet, avec une franchise de 10% du montant du sinistre.

Valeur assurée [Frs]	2'615'000	1'000
Franchise [%]	10%	10%
Prime annuelle ⁽¹⁾	2'092.00	0.80

⁽¹⁾ Offre moyenne obtenue auprès des deux compagnies d'assurances

Tableau A10 – Conditions de la police d'assurance

A1.3. Critères de comparaison retenus

Dimension humaine

Les critères de comparaison permettent de prendre en compte deux dimensions; humaine et économique. Ces critères sont expliqués en détails au chapitre 6.

- Risque humain

Le risque humain est calculé pour la situation initiale. Il correspond également au risque humain pour la mesure par transfert du risque économique auprès d'une compagnie d'assurance. Il est ensuite calculé pour toutes les mesures techniques de mitigation proposées plus haut.

- Coût de sauvetage

Le coût de sauvetage représente l'investissement pour chaque vie sauvée sur la période de planification. Il se détermine à l'aide de l'équation A1.

$$C_{sauvetage} = \frac{\text{Investissement [Frs]}}{\text{Vie(s) humaine(s) sauvée(s)}} \quad (\text{A1})$$

- Indice de vulnérabilité

La sécurité d'un ouvrage est exprimée par son indice de vulnérabilité. Il se quantifie comme le pourcentage de la résistance des exigences normatives actuelles. Il permet d'introduire la notion de précaution en fixant un seuil plancher en dessous duquel l'ouvrage est considéré comme dangereux en mettant par trop fortement en péril la sécurité des habitants.

Ces critères représentent trois indicateurs relatifs à la dimension humaine, à savoir le niveau absolu du risque (risque humain), un indicateur d'efficacité de l'investissement (coût de sauvetage) et enfin un indicateur de sécurité (indice de vulnérabilité). Les estimations pour les trois mesures sont récapitulées au tableau A11.

	Mesures	Risque humain ⁽¹⁾	Coût de sauvetage [Frs]	Indice ⁽²⁾ de vulnérabilité
Statu quo	Situation initiale	10.90	∞	31
Techniques	Rajout de bandes de carbone	9.56	51'153'846	40
	Rajout de refends en béton armé	1.36	5'795'699	70
	Remplacement	0.23	8'656'164	100
Transfert du risque	Assurance	10.90	∞	31

⁽¹⁾ Exprimé en mort annuel pour 100'000 personnes exposées

⁽²⁾ En % des exigences requises par la norme SIA 261 [SIA261 2003] dans la direction la plus défavorable

Tableau A11 – Impacts des mesures sur la vie humaine

Dimension économique

▪ Risque économique

Seul la valeur immobilière est ici prise en compte. Le risque économique est calculé pour la situation initiale puis pour les différentes mesures de gestion proposées plus haut.

▪ Retour sur investissement orienté risque sismique

Le retour sur l'investissement (ROI) consenti, destiné à l'amélioration du comportement sismique du bâtiment, se détermine à l'aide de l'équation A2.

$$ROI_{sismique} = \frac{\text{Somme économisée [Frs]}}{\text{Investissement [Frs]}} \quad (\text{A2})$$

▪ Valeur actuelle nette du projet d'investissement

Les avantages et les coûts économiques surviennent pendant toute la durée du projet. C'est le taux d'actualisation qui les rend commensurables et qui permet de déterminer la rentabilité du projet. On obtient la valeur actuelle nette (VAN) à l'année 0, soit au moment de l'investissement, à l'aide de l'équation A3.

$$VAN = \sum_{n=0}^{\text{durée de vie}} \frac{A_n}{(1+r)^n} - \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (\text{A3})$$

Avec	A	avantages (avantages annuels, valeur résiduelle de l'investissement initial)
	C	coût (investissement initial)
	r	taux d'actualisation (ici de 6%)
	n	année

Le projet est rentable économiquement si la valeur actuelle nette (VAN) est positive. Une variation du taux d'actualisation fait varier la VAN. Une augmentation du taux fait diminuer l'importance des avantages et des coûts qui surviennent dans le futur.

Trois indicateurs relatifs à la dimension économique, sont ainsi déterminés pour chaque mesure à savoir le risque économique (risque économique), un indicateur d'efficacité de l'investissement (retour sur investissement orienté risque sismique) et un dernier indicateur donnant la rentabilité (valeur actuelle nette) de l'investissement.

	Mesures	Risque ⁽¹⁾	ROI _{sismique} ⁽²⁾	VAN
Statu quo	Situation initiale	47.84	0.000	3080.83
Techniques	Rajout de bandes de carbone	47.51	0.001	3054.28
	Rajouts de refends en béton armé	12.85	0.058	3031.88
	Remplacement	0.50	0.014	175.03
Transfert du risque	Assurance	8.91	0.038	3007.74

⁽¹⁾ Exprimé en perte annuelle en centimes pour 1'000 Frs exposés au risque

⁽²⁾ Retour sur investissement (uniquement pour l'aspect sismique)

Tableau A11 – Impacts des mesures sur la valeur économique

A1.2. Optima

Les mesures de statu quo et d'assurance ont un impact identique sur le risque humain et sur l'indice de vulnérabilité, c'est-à-dire sur l'objectif cible de protection. Une limite inférieure des conséquences ($y = 0.5$) est apparue à une mortalité annuelle de 0.5 mort pour 100'000 personnes exposées. Cette valeur fait office de seuil inférieur selon le principe de précaution. Une limite inférieure existe également pour des raisons techniques liées aux contraintes constructives.

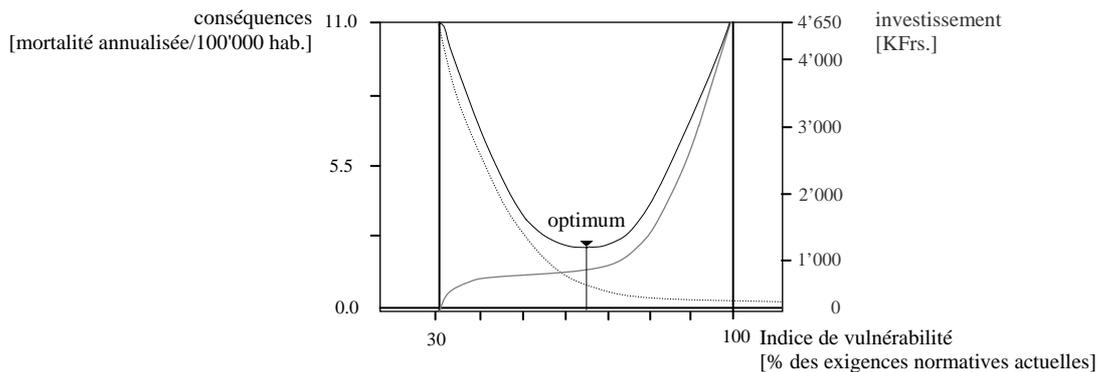


Figure A3 – Détermination de l'optimum humain de l'investissement

Deux asymptotes verticales expriment, pour la valeur inférieure ($x = 31$) la situation initiale, et pour la valeur supérieure ($x = 100$) l'objectif de protection usuel des normes actuelles. La détermination de l'optimum en terme de risque humain est la détermination du minimum de la fonction cumulée. La mesure se rapprochant le plus de l'optimum humain est l'ajout de murs de refend en béton armé.

De la même manière, on détermine l'optimum en terme de risque économique comme montré à la figure A4. La mesure se rapprochant le plus de l'optimum économique est ici un transfert du risque par le biais d'une assurance.

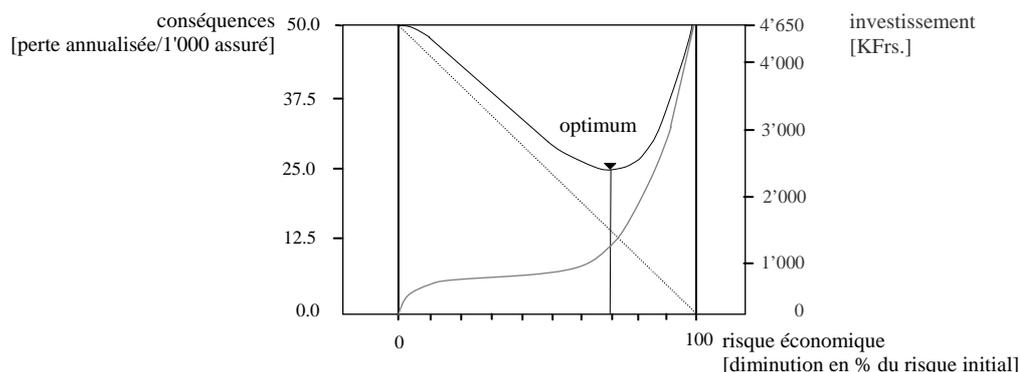


Figure A4 – Détermination de l'optimum économique de l'investissement

On se rend bien compte de la difficulté de choisir la meilleure solution, selon que l'on se positionne d'un point de vue purement économique, qui donne comme meilleure variante le transfert du risque vers une assurance alors que si on considère l'aspect humain, c'est la variante du renforcement par l'ajout de murs de refends en béton armé qui s'avère être la meilleure !

A1.3. Approche multicritère par surclassement

Pondération des critères

Les pondérations sont obtenues en classant par ordre d'importance, pour chacun des acteurs, les différents critères, en acceptant les ex æquo, puis en moyennant les deux points de vue [Simos 1991]. Un intervalle acceptable (ici fixé à 10%) pour les pondérations permet de mener une étude de robustesse sur les mesures comparées.

Critères	Collectivité	Propriétaire	Moyenne	Rapport max/min	Intervalle
Risque humain	10	1	5.5	1.5	[1.35 ; 1.65]
Coût de sauvetage	9	5	7.0	2.0	[1.80 ; 2.20]
Indice de vulnérabilité	7	6	5.5	1.5	[1.35 ; 1.65]
Risque économique	5	6	5.5	1.5	[1.35 ; 1.65]
ROI sismique	7	3	5.0	1.0	[0.90 ; 1.10]
Valeur actuelle nette	4	10	6.0	1.0	[0.90 ; 1.10]

Tableau A12 – Pondération des critères

Acteurs et objectifs

Dans notre cas, uniquement deux acteurs principaux ont été intégrés à la démarche participative. Le premier acteur est le propriétaire de l'immeuble. Le deuxième, la collectivité, est représentée par l'administration publique en charge du contrôle des constructions. Pour un tel objet, la pratique veut que la commission cantonale de construction se saisisse du dossier. Les locataires sont ici valablement représentés par la collectivité. Le principe de précaution sur la sécurité de l'ouvrage fixe pour les bâtiments étudiés une valeur plancher de l'indice de

vulnérabilité à environ 30. Les différents paramètres sur les critères utilisés sont résumés au tableau A13.

Seuils

Les seuils sont également fixés lors du processus d'évaluation auprès des acteurs en présence et récapitulés au tableau A13.

Critères	Sens optimal	Seuil d'indifférence	Seuil de préférence	Seuil de veto
Risque humain	minimiser	2	5	20
Coût de sauvetage	minimiser	1'000'000	5'000'000	50'000'000
Indice de vulnérabilité	maximiser	10	25	35
Risque économique	minimiser	4	10	40
ROI sismique	maximiser	0.010	0.020	0.05
Valeur actuelle nette	maximiser	500	1'000	3'000

Tableau A13 – Seuils d'indifférence, de préférence et de veto

Classement à l'aide de la méthode ELECTRE III

La méthode utilisée est présentée brièvement à l'annexe C [Méthodes d'analyse multicritère]. Elle permet de trouver la meilleure variante en considérant les points de vues différenciés des acteurs sur la base de critères multiples. Pour notre cas de figure, la meilleure solution est une solution technique par rajout de murs de refend en béton armé.

	Statu quo	Refends	Bandes	Remplacement	Assurance
Statu quo	1.00	1.00	0.00	0.00	0.88
Refends	1.00	1.00	0.00	0.00	0.88
Bandes	0.00	0.96	1.00	1.00	0.00
Remplacement	0.00	0.00	0.85	1.00	0.00
Assurance	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00

Figure A5 – Matrice des indices de crédibilité

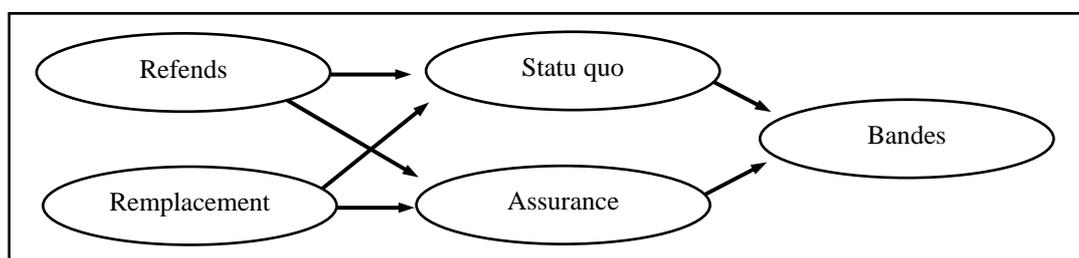


Figure A6 – Graphe de surclassement final

Une analyse de robustesse est ensuite réalisée sur les intervalles des pondérations pour 10 tirages aléatoires. La figure A7 montre clairement que la variante de l'ajout de murs de refends en béton armé s'avère être toujours la meilleure. La variante de remplacement par un nouvel ouvrage se classe à trois reprises ex æquo à la première place.

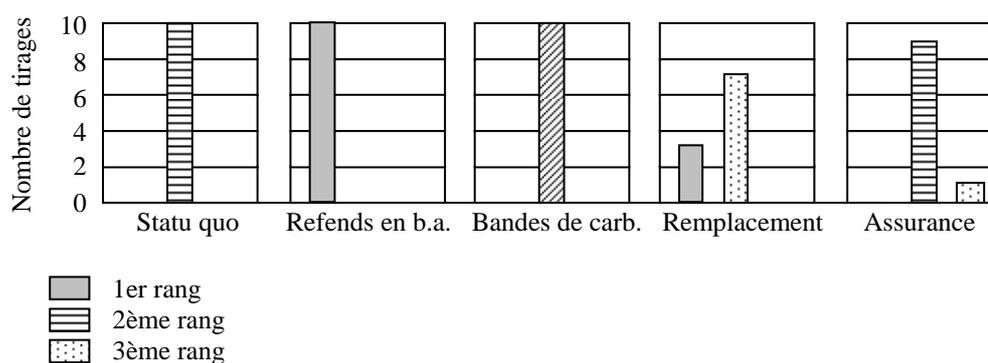


Figure A7 – Analyse de robustesse pour 10 tirages aléatoires

La mesure de renforcement par ajout de refend en béton armé se classe toujours première avec une grande stabilité.

Discussion des résultats

La mesure de renforcement par ajout de murs de refends en béton armé est la meilleure en tenant compte des points de vue des deux parties en présence. Si on prend chacun de ces points de vue indépendamment, la mesure de transfert par le biais d'une assurance est la plus proche de l'optimal du propriétaire alors que pour la collectivité, c'est la mesure de refend qui sera privilégiée. L'aléa sismique, exprimée ici par la zone de danger sismique a une forte influence sur l'analyse multicritère présentée dans cette annexe. La probabilité de survenance baissant, une tendance nette à la non intervention par des mesures techniques accompagnée de mesure d'assurance apparaît. On appliquera donc pour ce bâtiment un facteur de correction des sollicitations sismiques $p = 0.70$, qui est le niveau des exigences normatives garanti par l'ajout de murs en béton armé. Ce point, de même que les valeurs calculées des indices de valeur, sont récapitulés au tableau A23 puis reportés sur la figure A10.

A2. BÂTIMENT D'HABITATION COLLECTIVE À YVERDON

A2.1. Description

Le plan type d'étage du bâtiment d'habitation maintenant étudié est présenté à la page A14. Il est construit en maçonnerie traditionnelle de briques de terre cuite (SIA 266 [SIA266 2003] type MBL) (comportement non ductile, $q = 1.5$) avec des dalles en béton armé [Jeanneret 2004]. Les murs intérieurs ne participent pas à la reprise des efforts horizontaux. Une rénovation importante du bâtiment est planifiée pour un montant d'environ Frs. 500'000.

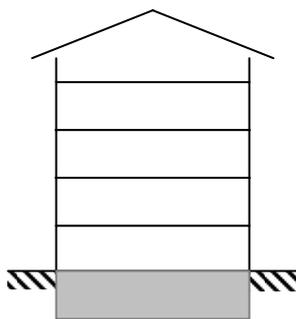
Modèle sismique

Les fréquences ont été déterminées à l'aide de la méthode du quotient de Rayleigh. De plus, comme pour le bâtiment précédent, des mesures in situ ont permis de valider les valeurs obtenues par calcul.

Classe d'ouvrage: CO I

Zone Sismique: Z1

Classe de sol: E



Fréquence dans le sens X	f_x	= 1.88 Hz / 0.53 s
Fréquence dans le sens Y	f_y	= 2.16 Hz / 0.46 s
Spectre de dimensionnement selon SIA 261	S_{d-x}	= 0.134
	S_{d-y}	= 0.143
Force de remplacement	F_x	= 1'352 kN
	F_y	= 1'445 kN

Figure A8 – Modèle statique⁽¹⁾

⁽¹⁾ Le sous-sol, en béton armé, fait office de caisson rigide. On a par conséquent considéré dans l'évaluation sismique le niveau d'encastrement au pied du rez-de-chaussée. Les sollicitations les plus importantes se trouvent au niveau du rez-de-chaussée.

Répartition par étage

La méthode des forces de remplacement a été utilisée pour allouer la répartition des efforts sismiques à chaque étage.

Etage	Z_i [m]	$(G_k + \Sigma \Psi_2 \cdot Q_k)i$ [kN]	$(G_k + \Sigma \Psi_2 \cdot Q_k)i \cdot Z_i$ [kNm]	$F_{di,x}$ [kN]	$F_{di,y}$ [kN]
4 4 ^{ème} étage	10.80	2'387.00	25'779.60	550.81	588.61
3 3 ^{ème} étage	8.10	2'316.00	18'759.60	400.82	428.32
2 2 ^{ème} étage	5.40	2'316.00	12'506.40	267.21	285.55
1 1 ^{er} étage	2.70	2'316.00	6'253.20	133.61	142.77
Σ	27.00	9'335.00	63'298.80	1'352.44	1'445.25

Tableau A14 – Répartition des sollicitations par étage

Prise en compte de la torsion

La torsion provoquée par la non superposition des centres de masses et de rigidité induit des efforts importants à prendre en considération.

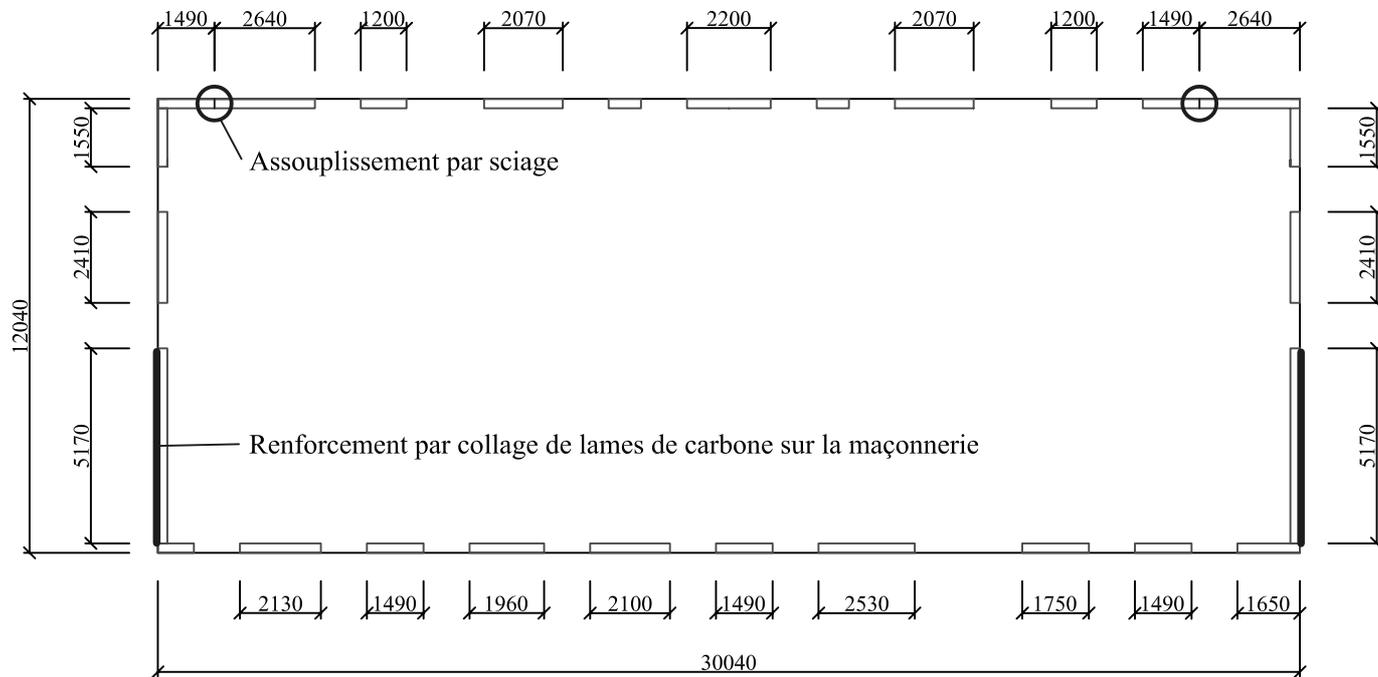
Centre de cisaillement	Centre de gravité	Excentricité effective
$x_s = 15.02$ m	$x_{CG} = 15.02$ m	$e_x = 0.00$ m
$y_s = 8.76$ m	$y_{CG} = 6.02$ m	$e_y = 2.74$ m

Tableau A15 – Détermination des centres de cisaillement et de gravité

Pour prendre en compte l'effort induit par la torsion, on considère une excentricité de dimensionnement entre le centre de masse M et le centre de rigidité S selon SIA 261 (art. 16.5.2.7.) [SIA261 2003].

Variante d'intervention: sciage + ajout de bandes de carbone

Objectif de protection: 42% des actions sismiques de dimensionnement actualisées

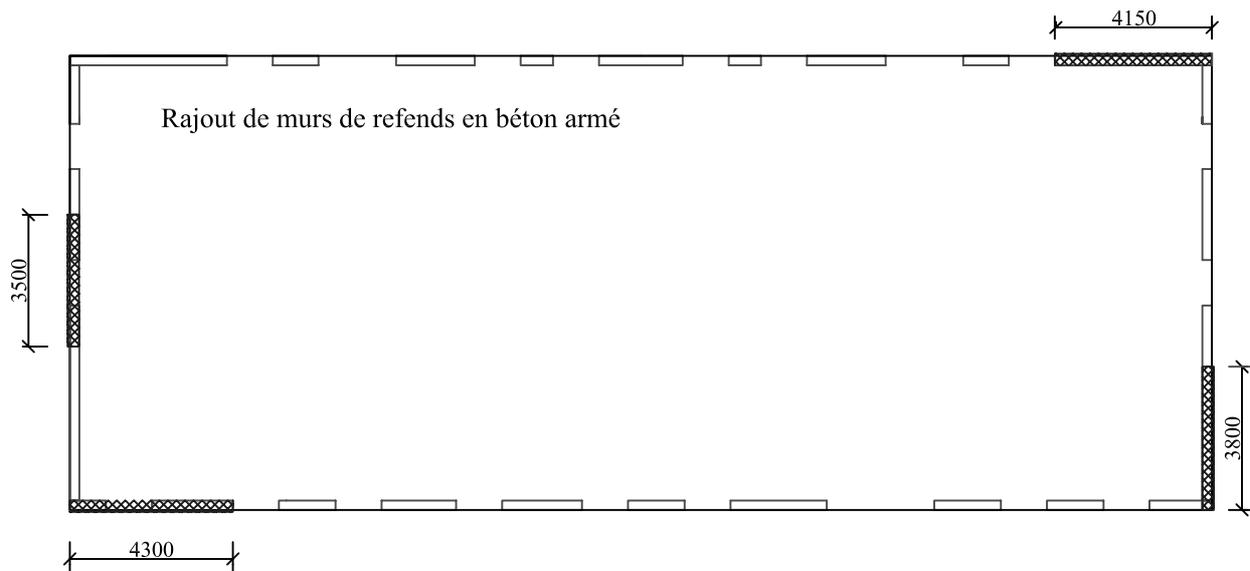


Murs continus sur toute la hauteur du bâtiment

Situation initiale Intervention

Variante d'intervention: rajout de murs de refend en béton armé

Objectif de protection: 65% des actions sismiques de dimensionnement actualisées



Murs continus sur toute la hauteur du bâtiment

Situation initiale Intervention

Classe d'ouvrage CO I

Quatre étages sur rez

Un sous-sol, considéré comme un caisson rigide

Classe de sol E

S = 1.40

T_C = 0.50 [s]

T_B = 0.15 [s]

T_D = 2.00 [s] [SIA261 2003]

Adaptation des actions sismiques

Les actions sismiques déterminées par la norme actuelle pour garantir la sécurité structurale peuvent être multipliées par un facteur de correction des sollicitations sismiques p [Badoux 2003]. La valeur de p varie en fonction des éléments présentés au tableau A16.

			Après rénovation
Durée de vie restante	Durée restante	[années]	30
	Coefficient de durée $\gamma_{durée}$		0.90
Volume SIA	Nombre de m ³	[m ³]	5'015
Nombre moyen d'habitants			40
Taux d'occupation (habitation)			0.65
Indice de vie		N_h	26.00
Indice de valeur humaine de l'ouvrage		V_h	23.40
Indice de valeur humaine normalisé		V_{hN}	46.6
Valeur économique de l'ouvrage	Prix unitaire par m ³	[Frs. /m ³]	480 Frs./m ³
	Valeur économique V_e		1'935'000
Importance de l'ouvrage	Classe d'ouvrage	[CO]	I
	Coefficient d'importance γ_{CO}		0.40
Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage			V_{em} 619'300
Indice de valeur économique mixte normalisé			V_{emN} 123.5

Tableau A16 – Paramètres d'adaptation des actions

Vérification de la sécurité structurale

Les deux exigences suivantes doivent être vérifiées pour garantir la sécurité structurale d'un mur en maçonnerie: la rupture du matériau et le glissement. Après vérification par le calcul, on obtient un indice de vulnérabilité très faible, inférieur au minimum admis par précaution. Les refends de tous les étages supérieurs ont une sécurité insuffisante au glissement. De plus, les refends du rez-de-chaussée ont une sécurité insuffisante à la rupture du matériau. Il faut donc s'attendre à une ruine en cas de survenance du séisme de dimensionnement. Cependant, les déformations de ce bâtiment sont relativement faibles. Une investigation plus détaillée à l'aide d'une méthode d'évaluation basée sur les déplacements donnerait certainement de meilleurs résultats, mais dépasse le cadre de cette illustration.

A2.2. Mesures de gestion du risque sismique

Pour mettre en conformité le bâtiment à un objectif de protection adapté, des mesures techniques sont envisageables. Elles sont schématisées à la page précédente pour deux d'entre elles:

- Adoucissement par sciage de deux murs pour ramener le centre de cisaillement sur le centre de masse afin de diminuer les efforts induits par la torsion et ajout de bandes de carbone collées dans une direction.
- Ajout de murs de refend en béton armé à l'extérieur du bâtiment.
- Démolition et reconstruction d'un bâtiment dimensionné en capacité.

Mesures	Objectif de protection [%] ⁽¹⁾	Coûts estimés [Frs]	Remarques
Rajout de bandes de carbone	42	310'000	- difficultés (incertitudes) de réalisation
Rajout de refends en béton armé	60 ⁽²⁾	450'000	- difficultés (incertitudes) de réalisation - difficultés pour les fondations - ruine possible de porteurs intérieurs en briques de 15cm
Remplacement	100	2'400'000	- prix de la démolition compris - cessation de l'activité pendant la durée de la reconstruction

⁽¹⁾ Par rapport aux exigences de la norme SIA 261 [SIA261 2003]

⁽²⁾ En grisé la mesure retenue qui fournit le facteur de correction p

Tableau A17 – Mesures techniques de renforcement

Mesure de transfert de risque par le biais d'une assurance

Un transfert par couverture assurancielle est une autre alternative envisagée pour la mitigation du risque sismique.

Valeur assurée [Frs]	2'400'000	1'000
Franchise [%]	10%	10%
Prime annuelle ⁽¹⁾	1'600.00	0.70

⁽¹⁾ Offre moyenne obtenues auprès des deux compagnies d'assurance

Tableau A18 – Conditions de la police d'assurance

A2.3. Critères de comparaison retenus

De manière identique au bâtiment présenté plus haut, on obtient les valeurs présentées pour la dimension humaine dans le tableau A19 et pour la dimension économique dans le tableau A20.

	Mesures	Risque humain ⁽¹⁾	Coût de sauvetage [Frs]	Indice ⁽²⁾ de vulnérabilité
Statu quo	Situation initiale	1.27	∞	24
Techniques	Rajout de bandes de carbone	1.11	716'153'846	42
	Rajout de refends en béton armé	0.16	84'785'534	60
	Remplacement	0.03	127'129'742	100
Transfert du risque	Assurance	1.27	∞	24

⁽¹⁾ Exprimé en mort annuel pour 100'000 personnes exposées

⁽²⁾ En % des exigences requises par la norme SIA 261 [SIA261 2003]

Tableau A19 – Impacts des mesures sur la vie humaine

	Mesures	Risque ⁽¹⁾	ROI _{sismique} ⁽²⁾	VAN
Statu quo	Situation initiale	5.23	0.000	1012.21
Techniques	Rajout de bandes de carbone	5.19	0.001	954.10
	Rajouts de refends en béton armé	2.05	0.005	1128.89
	Remplacement	0.06	0.004	420.01
Transfert du risque	Assurance	1.05	0.018	1640.08

⁽¹⁾ Exprimé en perte annuelle en centimes pour 1'000 Frs exposés au risque

⁽²⁾ Retour sur investissement (uniquement pour l'aspect sismique)

Tableau A20 – Impacts des mesures sur la valeur économique

A2.4. Analyse multicritère par surclassement

Après avoir mené un processus comparatif similaire à celui présenté pour le bâtiment précédent, le rajout de murs en béton armé apparaît comme la meilleure solution pour ce cas d'étude. On appliquera donc pour ce bâtiment un facteur de correction des sollicitations sismiques $p = 0.60$. Ce choix permet de viser un objectif de protection correspondant à un indice de vulnérabilité de 60. Ce point, de même que les valeurs calculées des indices de valeur, sont récapitulés au tableau A23 puis reportés sur la figure A10.

A3. BÂTIMENT D'HABITATION À SAXON

A3.1. Description

Comme pour les deux bâtiments présentés plus haut dans cet annexe, une évaluation détaillée est effectuée pour un bâtiment d'habitation collective, à Saxon, dont les porteurs gravitaires sont en maçonnerie de moellon traditionnel et en briques de terre cuite. Différentes mesures de gestion du risque ont été ensuite élaborées, puis comparées selon un processus similaire à celui exposé plus haut. **Finalement, la mesure de renforcement préconisée pour ce bâtiment a ensuite été dimensionnée et mise en œuvre.**

Etage	Z_i [m]	$(G_k + \Sigma \Psi_2 \cdot Q_k)i$ [kN]	$(G_k + \Sigma \Psi_2 \cdot Q_k)i \cdot Z_i$ [kNm]	$F_{di,x}$ [kN]	$F_{di,y}$ [kN]
3 Toiture	11.25	1546.13	17 393.91	486.80	901.61
2 2 ^{ème} étage	5.50	1464.75	8 056.13	225.47	417.59
2 1 ^{er} étage	2.75	1464.75	4 028.06	112.73	208.80
1 Rez	0.00	406.88	0.00	0.00	0.00
Σ	19.50	4 882.50	29 478.09	825.00	1 528.00

Tableau A21 – Répartition des sollicitations par étage

Les paramètres entrant dans le processus de comparaison sont résumés au tableau A23 ci-après. La page A18 présente schématiquement les plans dudit bâtiment.

Les mesures comparées sont présentées au tableau A22 ci-dessous.

Mesures	Indice ⁽¹⁾ de vulnérabilité
Statu quo	44
Rajout de bandes de carbone	54
Rajout de deux refends en béton armé	85 ⁽²⁾
Remplacement	100
Assurance	44

⁽¹⁾ En % des exigences requises par la norme SIA 261 [SIA261 2003]

⁽²⁾ En grisé la mesure retenue qui fournit le facteur de correction p

Tableau A22 – Mesures de gestion proposées

A3.2. Résultat de l'analyse comparative

La démarche comparative a abouti au choix du rajout de deux murs en béton armé à l'extérieur du bâtiment, liés aux dalles existantes, dans la direction la plus faible du bâtiment. Grâce à cette mesure, relativement simple et bon marché, un niveau cible de protection atteignant 85% des exigences normatives actuelles (soit un indice de vulnérabilité de 82) peut être atteint.

			Après rénovation
Durée de vie restante	Durée restante	[années]	30
	Coefficient de durée	$\gamma_{durée}$	0.90
Volume SIA	Nombre de m ³	[m ³]	755
Nombre moyen d'habitants			14
Taux d'occupation (habitation)			9.10
Indice de vie		N_h	0.65
Indice de valeur humaine de l'ouvrage		V_h	8.19
Indice de valeur humaine normalisé		V_{hN}	108.5
Valeur économique de l'ouvrage	Prix unitaire par m ³	[Frs. /m ³]	400 Frs./m ³
	Valeur économique	V_e	302'000
Importance de l'ouvrage	Classe d'ouvrage	[CO]	I
	Coefficient d'importance	γ_{CO}	0.40
Indice de valeur économique mixte de l'ouvrage		V_{em}	108'720
Indice de valeur économique mixte normalisé		V_{emN}	144.0

Tableau A22 – Paramètres d'adaptation des actions

Ce point, de même que les valeurs calculées des indices de valeur, sont récapitulés au tableau A23 puis reportés sur la figure A10.

A3.2. Mise en oeuvre

La mesure préconisée a été réalisée. Ci-après, une image des travaux de renforcement qui montre l'exécution de l'ajout à l'extérieur du bâtiment des murs de refends en béton armé.



Figure A9 - Murs de refend en béton armé

A4. LES AUTRES BATIMENTS

A4.1. Description succincte et résultats des analyses comparatives

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats des études portant sur différents bâtiments individuels effectuées dans le cadre de cette recherche. Les enseignements généraux découlant de ces études sont repris dans le chapitre 4.

Bâtiments	Indice de valeur humaine	Indice de valeur écon. mixte	Facteur de correction p
Bâtiment Sion	58.2	187.2	0.70
Bâtiment Yverdon	46.6	123.5	0.60
Bâtiment Saxon	108.5	144.0	0.85
Bâtiment au Châble	54.3	95.5	0.50
Garage des ambulances	24.2	686.8	> 1.00

Tableau A23 – Principaux résultats des analyses détaillées

Il est intéressant de relever qu'un indice de valeur économique très important est obtenu pour le garage des ambulances, principalement du fait de son facteur d'importance, puisque le bâtiment est en classe d'ouvrage II. Cela se traduit par des exigences pouvant excéder les prescriptions normatives, soit un facteur p plus grand que 1.

A4.2. Détermination des droites d'isovaleur

Les résultats obtenus sont ensuite positionnés sur le plan formé par les deux axes indiciaires de valeur comme l'illustre la figure A10. Les droites d'isovaleur du facteur de corrections, donnant une indication sur la valeur du facteur de correction p , sont ensuite construites par régression linéaire simple.

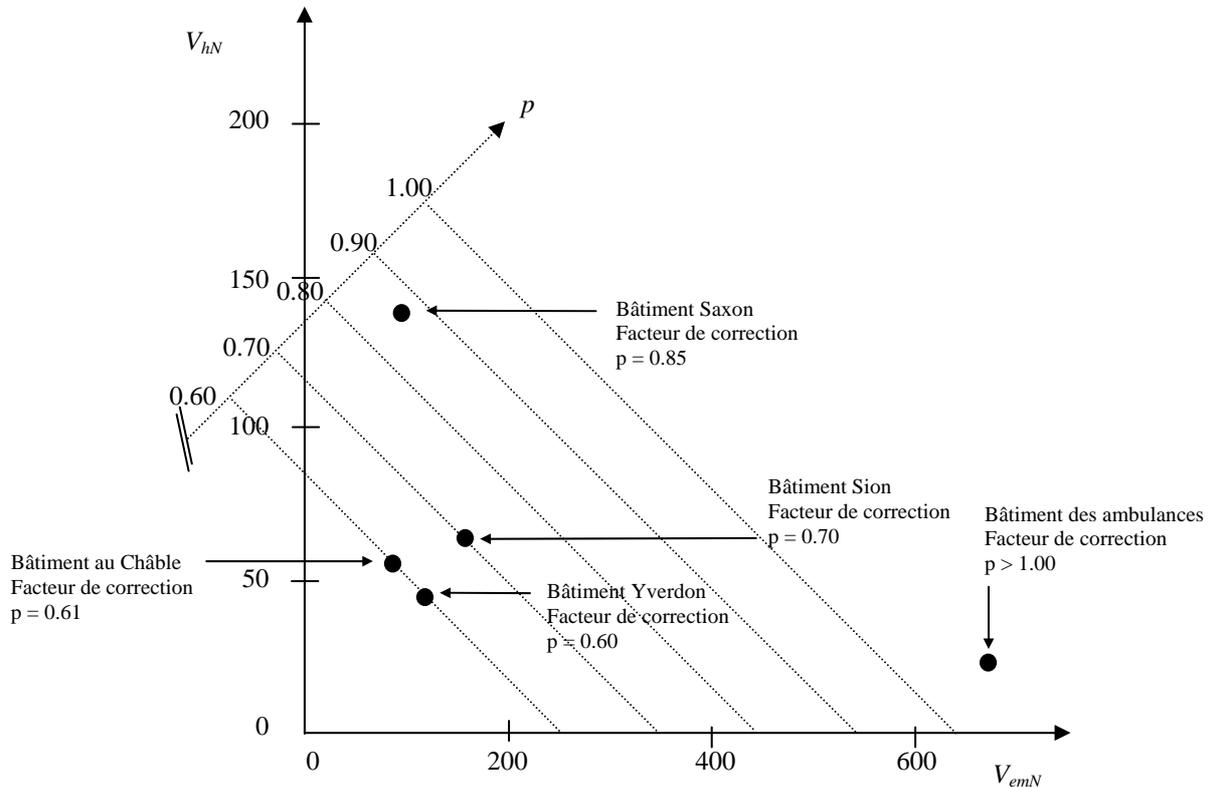


Figure A10 – Position des bâtiments étudiés dans le plan indiciaire des valeurs

A l'aide d'une étude de sensibilité sur les paramètres constitutifs, des tendances générales peuvent être renseignées. L'ingénieur dispose grâce à ce graphique d'un outil rapide permettant d'estimer, lors de l'évaluation d'un bâtiment existant, le niveau de protection cible d'un ouvrage.

A5. NOUVEAU BÂTIMENT D'HABITATION À MARTIGNY

Le bâtiment présenté plus bas est actuellement en cours de construction. En zone sismique 3b [SIA261 2003], il a été dimensionné en capacité [Bachmann 2002b] [D0191 2003]. Ce mode de dimensionnement permet de dissiper l'énergie d'un séisme de manière plastique dans la structure. Cela permet aussi de soulager les fondations en cas de séisme. Il est ainsi possible de concevoir des ouvrages économiques capables de résister à des sollicitations sismiques importantes.



Fig. A11 – Armature des murs de refends parasismiques

Le mode de dimensionnement en capacité est connu et bien documenté dans la littérature et des exemples adaptés à la nouvelle collection de normes sont disponibles [SIA-Vs 2003] [D0191 2003].

A6. SYNTHÈSE

Les différents bâtiments présentés ici illustrent la méthode de choix d'une mesure de gestion du risque sismique développée comme élément de la thèse centrale. Ils permettent de tirer des enseignements généraux sur le facteur de corrections p des sollicitations sismiques à appliquer lors de l'évaluation de bâtiments existants tout en tenant compte de la multiplicité des acteurs et des critères de comparaison. Le processus de choix permet également de soupeser les principes souvent contradictoires de précaution et de proportionnalité.

ANNEXE B – POPULATION DE BÂTIMENTS – VILLE D’AIGLE

B1. INTRODUCTION

Projet pilote de la ville d’Aigle

Pour illustrer les concepts développés dans le corps de la thèse, une application concrète à un projet pilote a été faite. Le portefeuille des bâtiments de la commune d’Aigle assurés auprès de l’Etablissement Cantonal Vaudois d’Assurance, ci-après l’ECA [ECA 2001b] est abordé. Ce portefeuille représente la quasi-totalité du parc immobilier de la ville, à l’exception de quelques bâtiments, propriétés de la Confédération, comme par exemple la gare ferroviaire.

La ville d’Aigle, située dans le canton de Vaud, au cœur des Alpes, a été choisies pour de nombreuses raisons explicitées plus bas. La Commune d’Aigle s’étend sur une superficie d’un peu plus de 1’600 hectares et compte environ 7’500 habitants. Les bâtiments les plus anciens de la ville datent du X^{ème} siècle. La plupart des bâtiments de l’actuel centre-ville ont été construits entre les XV^{ème} et XIX^{ème} siècles. La ville contemporaine s’est par la suite étendue au Sud, en direction du lit du Rhône, où de nombreux bâtiments résidentiels ont été construits depuis les années 1950.

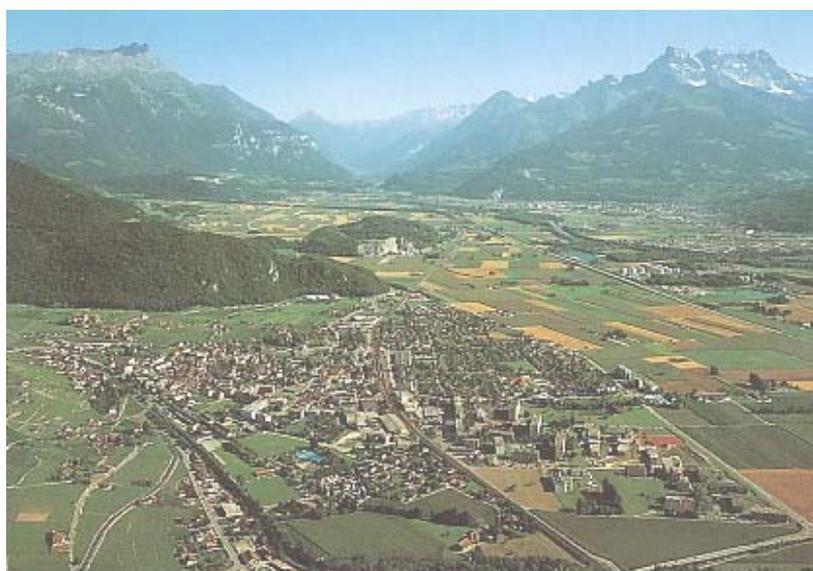


Figure B1 – Vue aérienne de la ville d’Aigle

La commune d’Aigle est située dans une zone de sismicité moyenne. Cela signifie que lors du dimensionnement de nouveaux bâtiments ou lors de renforcement de bâtiments existants, il doit être tenu compte d’un séisme d’une intensité EMS VII dans les calculs. Cela correspond à une accélération horizontale du sol de 0.13g. On signale ici qu’Aigle a changé de zone dans la dernière édition des normes suisses, pour être classée aujourd’hui en zone 3a, [SIA261 2003]. L’accélération horizontale du sol à considérer pour le calcul a donc considérablement

augmenté depuis cette modification. Cela signifie que les bâtiments dimensionnés avant la mise en application des normes actuelles, soit le 1^{er} janvier 2003, l'ont été avec des sollicitations de dimensionnement plus faibles que celles que requièrent les règles de l'art en la matière. De plus, de nombreux bâtiments n'ont simplement pas été dimensionnés pour des sollicitations sismiques, puisque construits avant l'introduction de normes les considérant. Cette catégorie représente la majorité des bâtiments de la ville.

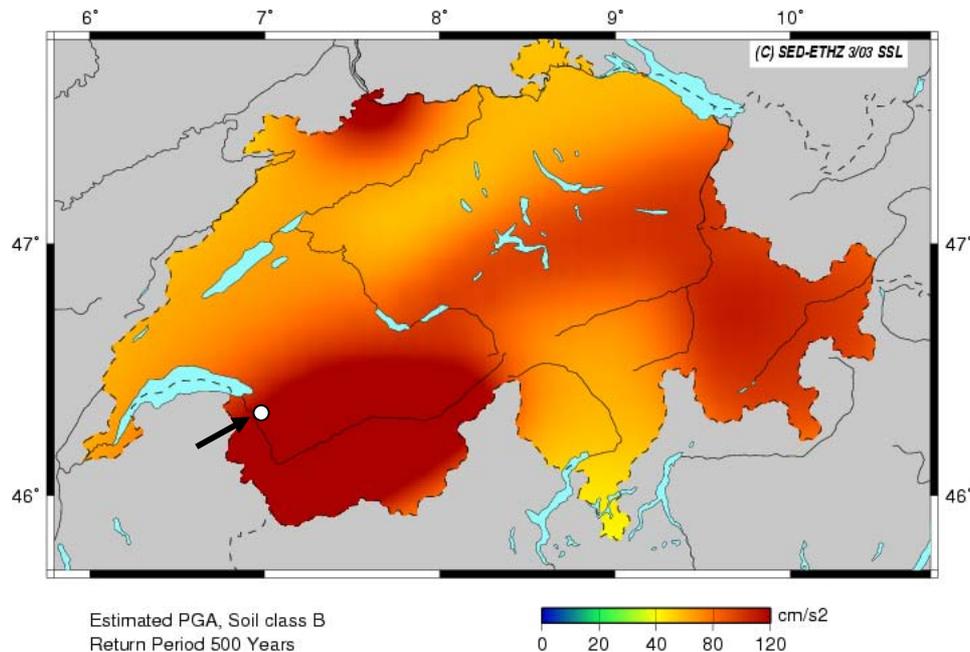


Fig. B2 – La commune d'Aigle, figurée ici par un point, est située en zone 3a, sur la carte d'aléa sismique [<http://www.seismo.ethz.ch>]

La taille moyenne de la ville et le nombre de bâtiments, qui s'élève à environ 1'500 et propose une grande variété de structures, a permis d'envisager une analyse visuelle de la totalité des ceux-ci. Le travail d'inventorisation [Brennet 2001] a été effectué à l'aide d'une approche permettant la gestion du risque sismique. Cette étape préliminaire indispensable a fourni les informations sur la vulnérabilité et sur les valeurs exposées au risque qui ont été utilisées pour la suite de l'étude. Pour des portefeuilles plus importants, des méthodes simplifiées doivent être mises en place afin de faciliter le recueil de ces informations. Il s'agit de trouver des moyens simples pour le gestionnaire du patrimoine, ici l'ECA, de récolter ces informations et de les mettre en forme de manière à pouvoir être exploitées facilement. Par exemple, un travail d'adaptation des questionnaires à l'attention des assurés ouvre des perspectives intéressantes et peu onéreuses de récoltes d'informations manquantes actuellement (comme par exemple le type de matériau de construction ou encore de certains éléments géométriques (i.e. nombre d'étage du bâtiment, géométrie en plan et en élévation, présence d'un étage mou)).

La commune d'Aigle et son portefeuille de bâtiments sont représentatifs à bien des égards des petites villes des Alpes. Cela aussi bien d'un point de vue de la constitution du bâti, puisqu'on y trouve la plupart des catégories sismiques importantes, que de l'activité socio-économique.

B2. DÉTERMINATION DU RISQUE SISMIQUE

Afin d'estimer le risque sismique pour l'ensemble du portefeuille de bâtiments les différents éléments présentés en détail au chapitre 3 vont alimenter le modèle d'estimation. Les hypothèses faites et les principaux résultats obtenus lors de l'application de ce modèle au projet-pilote de la ville d'Aigle sont rassemblés dans les paragraphes suivants.

Aléa sismique

Aléa régional

Pour déterminer les caractéristiques de l'aléa régional, les principales sources actuelles disponibles ont été consultées. Une étude datant de 1978 [Sägesser 1978] donne des valeurs indicatives pour le séisme en Suisse. Une étude plus récente [Rüttener 1995] aborde l'évaluation de l'aléa sismique, en tenant compte des incertitudes sur les données. L'auteur utilise une technique d'estimation bayésienne dans laquelle les estimations « a priori » des paramètres de l'aléa sont corrigées à l'aide des données observées. Il est important de préciser que la période d'observation, d'au maximum 700 ans pour les séismes d'intensité IX, est très courte à l'échelle géologique terrestre, ce qui explique un haut niveau d'incertitude.

Intensité [MSK]	VII	VIII	IX
Période de retour [Années]	475	2'200	6'000

Tableau B1 – Intensités moyenne vs Périodes de retour [Rüttener 1995]

La sismicité moyenne appliquée pour la région d'Aigle découle directement des études précitées. Pour la détermination du risque, l'étude [Rüttener 1995] a été privilégiée puisqu'elle fournit des indications sur l'incertitude permettant d'appliquer le calcul probabiliste.

Aléa local

L'aléa local a été évalué en deux temps. Dans un premier temps, en l'absence d'une étude de microzonage locale existante permettant d'évaluer plus précisément les effets de sites, les informations préliminaires ont été tirées des deux sources énoncées ci-après:

- Etude des bases géologiques existantes (cartes géologiques nationales – Atlas Géologique de la Suisse 1:25'000),
- Confirmation des conditions rencontrées sur le terrain par interview de deux géologues actifs dans la région.

Il ressort de cette première étape que la région étudiée rencontre la présence des deux types de sols, classés par l'Eurocode 8 [Eurocode8 1997] comme suit:

A: rocher et moraine consolidée

B: cône alluvionnaire et sol de plaine

Cette étape préliminaire repose sur l'hypothèse que l'on trouve un dépôt alluvionnaire mou dans la plaine, avec un fort contraste de dureté comparativement au rocher. Un effet de site

est donc probable. A cela s'ajoute l'effet deux dimensions (2D) provoqué par la géométrie de la vallée du Rhône où les ondes sismiques pourraient être piégées. Cet effet 2D laisse présager d'une amplification supplémentaire de l'effet de site. Sur la base de l'expérience de tremblements de terre récents, l'hypothèse (raisonnable) d'une augmentation de l'intensité pour cette zone a été formulée. Non seulement les amplitudes sont plus grandes, mais le nombre de cycles sismiques va également augmenter. Les enseignements des séismes passés montrent que l'effet de site est plus important pour de faibles à moyennes intensités. Cela est particulièrement significatif pour Aigle puisque le risque est dominé par des séismes d'intensité VII et VIII. Dans le projet-pilote présenté ici, la quasi-totalité des bâtiments se trouve sur des sols mous.

Dans un deuxième temps, une investigation complémentaire a été entreprise à l'aide de mesures in situ de fréquences propres [Duvernay 2003]. Elle a permis de valider dans leurs grandes lignes les hypothèses préliminaires exposées ci-dessus. Deux zones ont finalement été définies avec, pour une la plus défavorable, une amplification homogène d'un demi-degré d'intensité et aucune amplification pour la deuxième.

Huit points de mesure ont été choisis de manière à rendre compte de la variation de la fréquence propre des sols pour la ville d'Aigle. Le traitement du signal, réalisé au Service sismologique suisse, a permis d'obtenir le graphique H/V en fonction de la fréquence. La fréquence propre correspond alors à l'amplitude du pic le plus élevé du spectre H/V [Fäh 2001]. Les résultats de la campagne de mesure sont rassemblés dans le Tableau B2 ci-dessous.

n°	Fréquence de résonance f_0	$f_{0 \text{ min}}$	$f_{0 \text{ max}}$	$\log_{10}(H/V)$	$\log_{10}(H/V)_{\text{ min}}$	$\log_{10}(H/V)_{\text{ max}}$	Coordonnées absolues
1	0.28	0.262	0.323	0.797	0.713	0.698	N 46°18.483 E 006°56.151
2	0.33	0.235	0.403	0.562	0.615	0.698	N 46°18.510 E 006°56.544
3	0.60	0.498	0.696	0.448	0.425	0.417	N 46°19.052 E 006°57.225
4	0.98	0.807	1.282	0.691	0.653	0.607	N 46°19.068 E 006°57.439
5	1.26	0.978	1.547	0.592	0.615	0.531	N 46°19.015 E 006°58.139
6	Pas de résultat interprétable (du fait de la trop faible profondeur de sédiments)						N 46°19.149 E 006°58.086
7	1.66	1.453	2.079	0.729	0.729	0.683	N 46°18.383 E 006°58.004
8	0.99	0.826	1.191	0.569	0.584	0.546	N 46°18.463 E 006°57.408

Tableau B2 – Résultats des mesures in situ de fréquences propres

Classes de sol de fondation

Depuis, il est possible d'obtenir des cartes indicatives des classes de sol de fondations conformes à la classification de la norme SIA 260 [SIA261 2003] directement sur l'Internet au travers de la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEG. Ces informations peuvent être intégrées à un outil informatique géoréférencé. Ces cartes fournissent rapidement une indication sur l'influence des conditions locales de sol sur les sollicitations sismiques.

Vulnérabilité du portefeuille

La vulnérabilité du portefeuille de bâtiments de la ville d'Aigle a été estimée lors d'un inventaire complet [Brennet 2001] reprenant le mode opératoire développé au chapitre 3. quelques données statistiques générales et les principaux résultats de cet inventaire sont rappelés dans les paragraphes ci-dessous. La figure ci-dessous récapitule la répartition des bâtiments selon leur affectation et leur type de construction. On observe que la grande majorité des bâtiments sont des bâtiments d'habitation (63%).

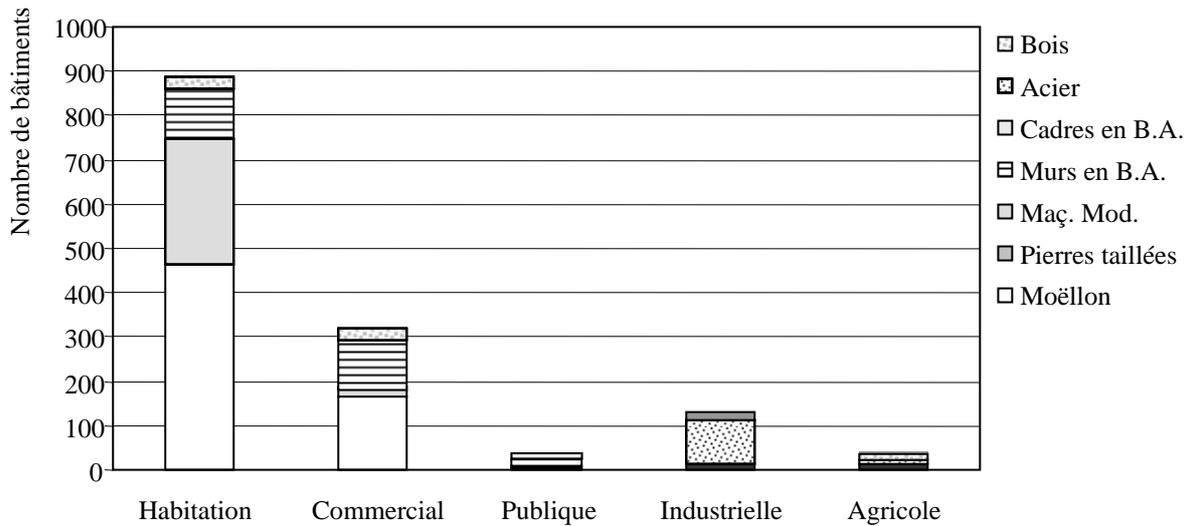


Figure B3 – Répartition des bâtiments selon leur affectation

Le mode opératoire de l'inventaire permettant d'évaluer la vulnérabilité de l'ensemble d'un portefeuille de bâtiments est présenté en détails au chapitre 3 ainsi que dans [Brennet 2001]. Le graphique suivant résume la répartition des bâtiments de la commune d'Aigle dans les six classes de vulnérabilité (de A à F) définies dans [EMS98 1998].

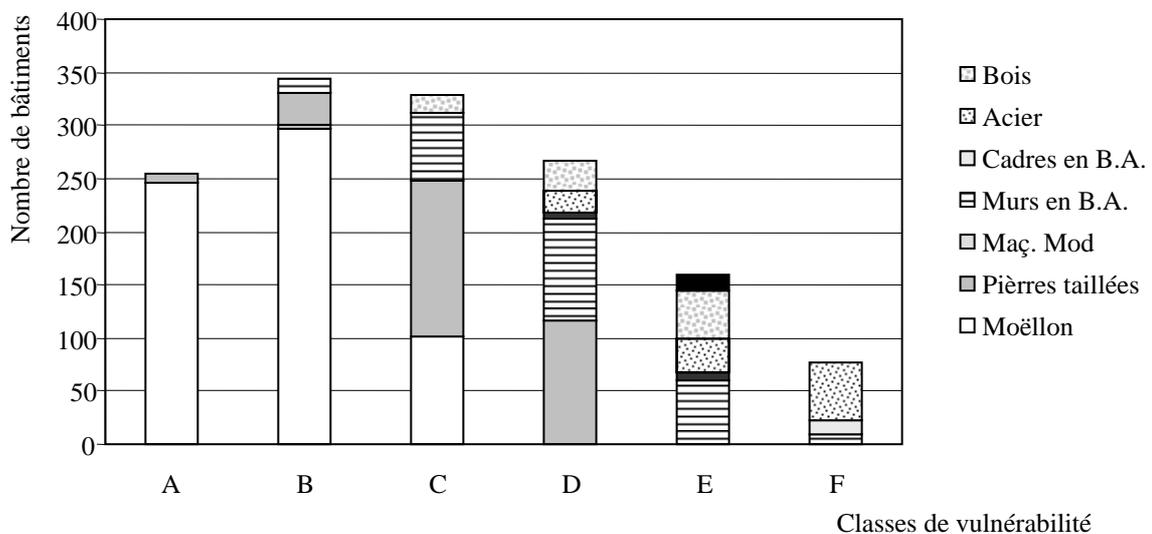


Figure B4 – Répartition des bâtiments dans les classes de vulnérabilité et types de structures

Courbe de vulnérabilité de l'ensemble du bâti

Le modèle d'estimation permet de construire les courbes de vulnérabilité, c'est-à-dire les dommages par degré en fonction de l'intensité, de l'ensemble du bâti d'Aigle. Ces courbes ont été estimées pour trois niveaux de vulnérabilité représentant la valeur moyenne (vulnérabilité moyenne) et plus ou moins un écart-type (vulnérabilité optimiste et vulnérabilité pessimiste) d'une distribution gaussienne. Ces trois courbes de vulnérabilité du bâti permettent de considérer les incertitudes sur le comportement physique des bâtiments lors de sollicitations sismiques. La figure B5 ci-dessous représente graphiquement ces courbes pour la vulnérabilité pessimiste.

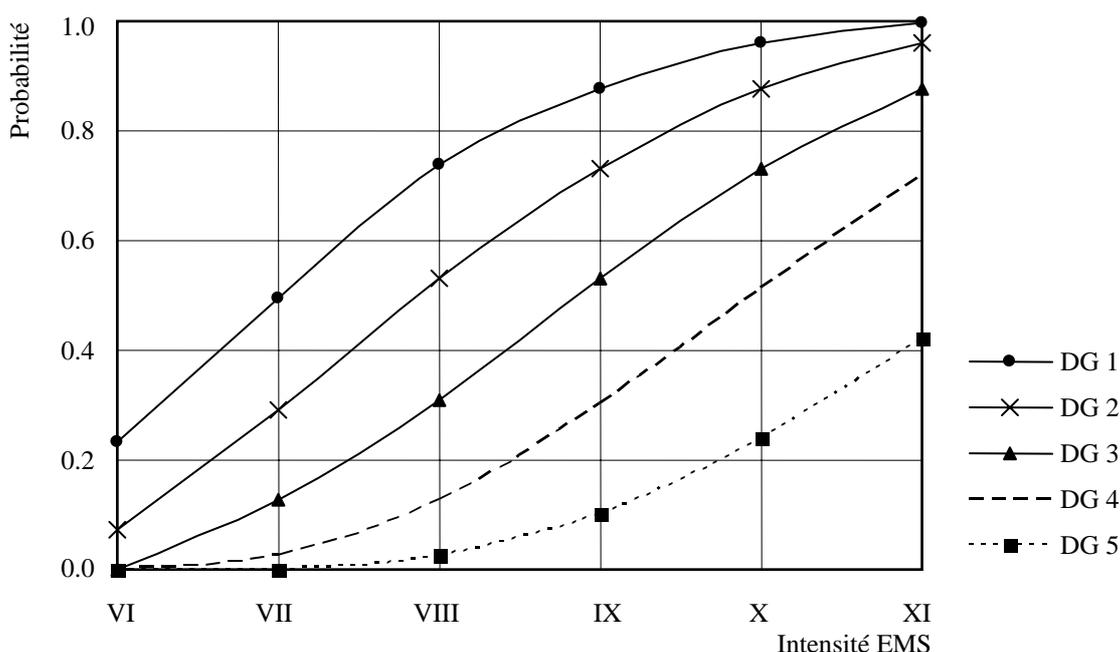


Figure B5 – Courbe de vulnérabilité pessimiste de la ville d'Aigle

Ces courbes estiment quantitativement la vulnérabilité de la population des bâtiments d'Aigle. L'endommagement des bâtiments est exprimé à l'aide de la notion de degré de dommage (abrégé par DG). Cette classification va du degré de dommage 5, signifiant l'écroulement du bâtiment, jusqu'au degré de dommage 0, qui correspond à aucun dommage. On observe, pour chaque intensité EMS, la répartition des bâtiments du portefeuille considéré dans chaque niveau de degrés de dommages.

Estimation des pertes

L'endommagement se détermine dès lors identiquement pour n'importe quelle intensité de différents événements sismiques. Pour les événements sismiques d'intensité EMS VII, VIII et IX les résultats sont résumés dans le tableau A3 ci-après.

Intensité	I _{EMS} = VII			I _{EMS} = VIII			I _{EMS} = IX		
	475			2'200			6'000		
Vulnérabilité	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Degré de dommages 5 [%]	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	3.0	3.4	5.4	10.0
Degré de dommages 4 [%]	0.5	0.7	3.0	3.4	5.4	10.0	7.1	11.4	20.0
Degré de dommages 3 [%]	3.6	5.4	10.0	7.6	11.4	18.0	15.2	18.3	23.0
Degré de dommages 2 [%]	12.2	12.2	16.0	21.1	18.3	22.0	28.6	22.2	20.0
Degré de dommages 1 [%]	22.6	21.5	21.0	33.3	30.3	21.0	28.9	26.4	14.0
Aucun dommage [%]	61.1	60.0	50.0	34.1	33.8	26.0	16.8	16.3	13.0

⁽¹⁾ Vulnérabilité optimiste

⁽²⁾ Vulnérabilité moyenne

⁽³⁾ Vulnérabilité pessimiste

Tableau B3 – Pourcentage des bâtiments subissant un certain niveau de dommages

L'estimation des pertes humaines, immobilières et mobilières a ensuite été effectuée, toujours suivant le mode opératoire présenté au chapitre 3, en ayant recours aux courbes d'endommagement spécifiques à chaque valeur exposée au risque [Pellissier 2003a]. A titre de rappel, les résultats pour les pertes humaines sont résumés dans le tableau B4. Les trois valeurs représentent les incertitudes liées à la vulnérabilité ainsi que celles liées à l'établissement de la courbe d'endommagement humain.

Intensité	I _{EMS} = VII			I _{EMS} = VIII			I _{EMS} = IX		
	475			2'200			6'000		
Vulnérabilité et endommagement	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Morts	0	4	9	12	19	31	43	57	72
Blessés graves	4	7	17	15	54	71	32	61	96
Blessés légers	22	54	72	53	114	131	102	183	238

⁽¹⁾ Vulnérabilité et courbes d'endommagement optimistes

⁽²⁾ Vulnérabilité et courbes d'endommagement moyennes

⁽³⁾ Vulnérabilité et courbes d'endommagement pessimistes

Tableau B4 – Résultats de la quantification des pertes humaine

De nombreuses informations ont pu à ce niveau être renseignées comme par exemple la répartition par zone cadastrale des dommages aux immeubles, montrée à la figure B6 ci-dessous. D'autres informations se trouvent dans [Brennet 2001] et [Pellissier 2003a].

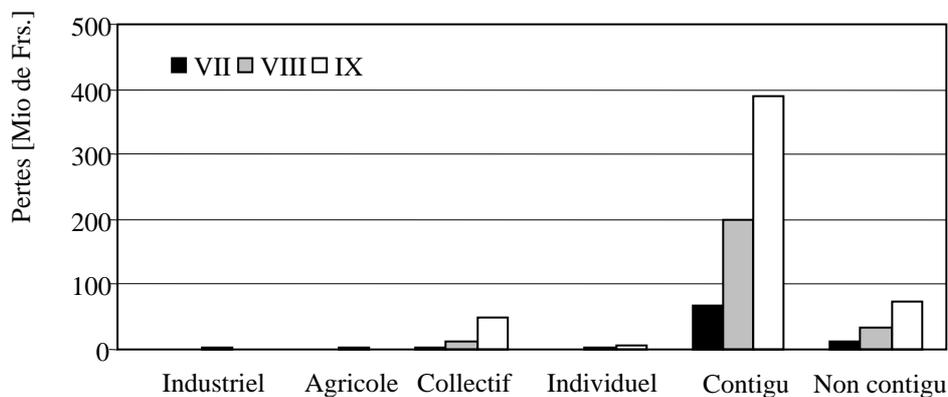


Figure B6 – Répartition des pertes immobilières par zone cadastrale

Estimation du risque

Le risque se détermine à l'aide de son équation classique exposée au chapitre 3. Différents risques (humain, immobilier et mobilier) ont été estimés pour la commune d'Aigle. Les autres valeurs exposées, comme par exemple les valeurs historiques ou environnementales, n'ont pas été abordées.

Risque humain

Les informations récoltées lors de l'inventaire sismique préliminaire sont ici exploitées pour faire un calcul du risque sismique. Il se détermine pour la population d'Aigle, soit environ 7'500 personnes, comme la somme des risques individuels. Le risque humain s'exprime en nombre de décès annuel pour 100'000 personnes exposées. Le détail se trouve dans [Pellissier 2003a]. L'estimation fournit une valeur de **0.29 mort annuel pour 100'000 personnes exposées**.

La probabilité annuelle moyenne de décès s'élève donc à **$2.55 \cdot 10^{-6}$ décès annuel par habitant**. Ce qui correspond, pour la ville d'Aigle, à environ 2 à 3 morts par siècle.

Risque immobilier et mobilier

De la même manière que pour le risque humain, il est possible d'estimer la perte annuelle immobilière et mobilière pour 1'000 francs exposés au risque. Cette valeur correspond au niveau de prime de risque permettant de couvrir le portefeuille assuré (qui s'élève pour Aigle à 1'789 millions de francs en 2000).

En ce qui concerne les valeurs immobilières, la perte potentielle s'élève à environ 330'000 francs par année. Cette somme représente environ **28 centimes par millier de francs assurés**. Cette somme peut fortement être réduite par l'utilisation d'une franchise, par exemple de 10% ou de 50'000 Francs. Pour le risque mobilier, l'estimation de la perte annuelle s'élève à environ **16 centimes par millier de francs assurés**.

Sinistre maximum possible

Les assureurs et réassureurs ont l'habitude de faire une estimation du pire scénario envisageable. Cette valeur permet de donner une borne supérieure au nombre de morts et aux pertes de valeurs assurées. Elle donne une indication importante pour la gestion du risque puisqu'elle fixe le montant de la réassurance. Les pertes potentielles maximales sont issues du scénario appelé *Sinistre Maximum Possible* (SMP) [Glossaire]. Pratiquement, il s'agit de considérer tous les paramètres du modèle d'estimation comme agissant simultanément de manière pessimiste.

Pertes maximums		
Morts	Immobilier [mio de Frs.]	Mobilier
221	753	248

Tableau B5 – Estimation des pertes lors du sinistre maximum potentiel

On constate ainsi pour la ville d'Aigle une perte immobilière potentielle maximum d'environ **750 millions de francs**. Cette somme représente environ 40% de la somme totale assurée.

Pour les valeurs mobilières, la perte mobilière potentielle maximum est d'environ **250** millions de francs. Cette somme représente environ un tiers de la valeur totale assurée.

B3. ETUDES DE DÉTAILS DE BÂTIMENTS

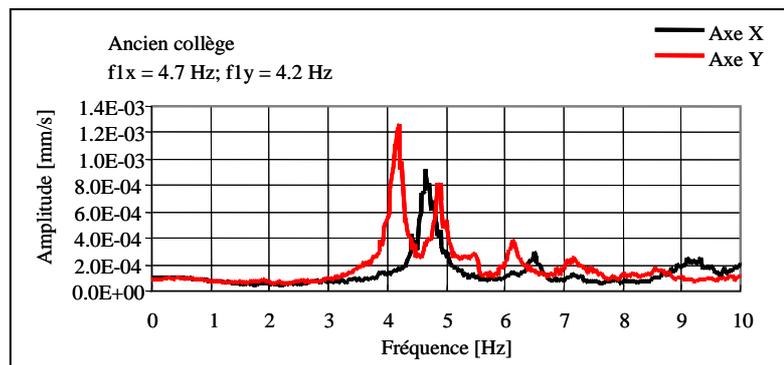
Des mesures in situ de fréquences propres de bâtiments ont été conduites à différents endroits de la ville. Cela a permis d'observer si certaines catégories de bâtiments peuvent entrer en résonance lors de sollicitations dynamiques. Les résultats des investigations sont donnés dans [Duvernay 2003] et [Brennet 2001]. A titre d'illustration, les mesures du bruit de fonds permettant de déterminer la période de vibration fondamentale de certains bâtiments sont données plus bas.

Ancien collège

Type de construction	Murs en boules et maçonnerie
Adresse	Rue du Collège
Construction	1869
Nombre d'étages	3.5
Zone cadastrale	Centre-ville non contigu



Figure B7 – Ancien Collège

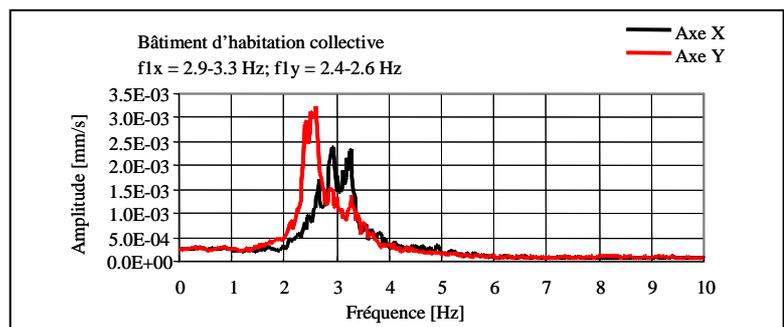


Bâtiment d'habitation collective

Type de construction	Béton armé /maçonnerie
Adresse	Chemin de la Planchette
Construction	Env. 1970
Nombre d'étages	10
Zone cadastrale	Résidentiel collectif



Figure B8 – Bâtiment d'habitation collective



Bâtiment d'habitation du centre-ville contigu

Type de construction

Pierres taillées/hourdis

Adresse

Rue de Jerusalem 13

Construction

XIV^{ème}

Nombre d'étages

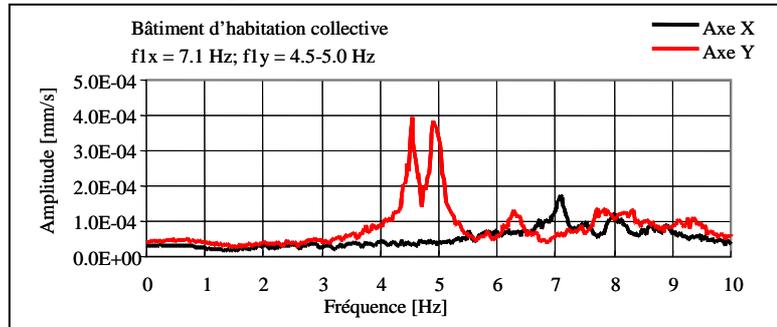
4

Zone cadastrale

Centre-ville contigu



Figure B9 – Bâtiment d'habitation collective

***Ancien Hôtel de ville***

Type de construction

Moellons traditionnels

Adresse

Place du Marché

Construction

XVII^{ème}

Nombre d'étages

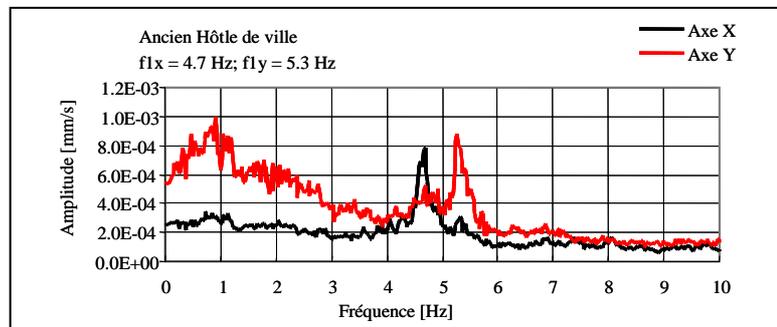
3.5

Zone cadastrale

Centre-ville contigu



Figure B10 – Ancien Hôtel de ville

***Bâtiment d'habitation collective***

Type de construction

Murs maçonnerie, dalles en béton armé

Adresse

Chemin des Lieugex

Construction

Env. 1950

Nombre d'étages

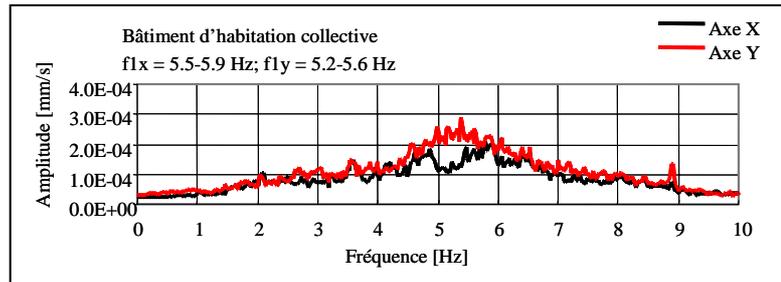
4.5

Zone cadastrale

Résidentiel collectif



Figure B11 – Bâtiment d'habitation collective



Bâtiment d'habitation collective

Type de construction

Murs maçonnerie et béton armé, dalles en béton armé

Adresse

Chemin des Lieugex

Construction

Env. 1970-80

Nombre d'étages

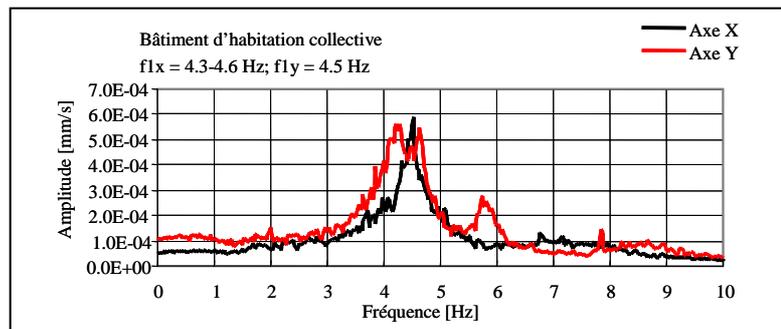
6

Zone cadastrale

Résidentiel collectif



Figure B12 – Bâtiment d'habitation collective



Hôtel de ville

Type de construction

Béton armé et colonnes en acier

Adresse

Place du marché 1

Construction

1961-1962

Nombre d'étages

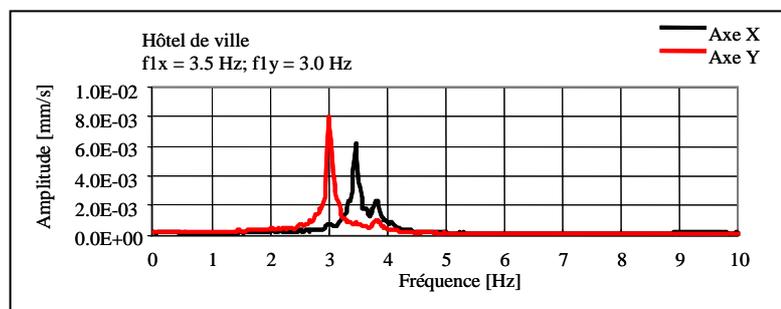
5

Zone cadastrale

Centre-ville non contigu



Figure B13 – Bâtiment d'habitation collective



B4. STRATÉGIES DE GESTION DU RISQUE SISMIQUE

Elaboration des stratégies

A ce stade, des stratégies de gestion du risque sont envisagées pour l'ensemble du portefeuille de la commune. Une stratégie est un ensemble de mesures, permettant d'atteindre un objectif. Afin de générer ces stratégies, deux dimensions ont été privilégiées, à savoir la dimension humaine, dans le cadre d'une stratégie qui vise à préserver au mieux la vie humaine, et la dimension économique, au travers d'une stratégie qui cherche avant tout à préserver le patrimoine économique. Ces deux stratégies alternatives et une troisième, correspondant à la situation actuelle, sont comparées. Les principales caractéristiques de ces trois stratégies sont rappelées au tableau B6.

	Stratégie actuelle	Stratégie orientée valeur	Stratégie orientée vie
Nouveaux ouvrages	Pas de contrôle de conformité (auto-contrôle de la profession)	Contrôle de conformité pour les bâtiments à haut potentiel de dommages économiques	Contrôle de conformité pour les bâtiments à haut potentiel de dommages humains
Ouvrages existants	Aucune mesure particulière	- Campagne de renforcement technique ciblée des bâtiments à plus haut potentiel de dommages économiques	- Campagne de renforcement technique ciblée, de 5% bâtiments (soit environ 75 bâtiments) à plus haut potentiel de dommages humains - Mise en conformité de bâtiments LIFELINE
Mesures de réparation	Co-assurance (Pool Suisse pour la couverture des dommages sismiques)	Assurance ciblée, par exemple de 5% de la valeur, des bâtiments (soit 10 bâtiments) à plus haut potentiel de dommages économiques	Aucune mesure particulière

Tableau B.6 – Les stratégies comparées

Pour chaque stratégie, les différents critères retenus sont évalués en faisant varier les éléments constitutifs du risque sur lesquels elles agissent. Par exemple, le renforcement (pour un coût d'intervention moyen d'environ 10% de la valeur de l'ouvrage) de 75 bâtiments dans le cadre de la stratégie orientée vie modifie fortement les courbes de vulnérabilité de l'ensemble du bâti (voire chapitre 3). Cette modification a un impact sur le risque humain, qui diminue, sur la proportion de bâtiments vulnérable, qui diminue ainsi que sur le risque économique. En contre-partie, ces renforcements nécessitent un investissement financier important. L'horizon de planification a été fixé à 50 ans. Pour la contribution de l'ECA au Pool suisse pour la couverture des dommages, la prime annuelle est divisée par le nombre de vaudois pour être représentative. Les résultats de l'analyse prospective sont rassemblés au tableau B7.

	Risque humain [mort annuel / 100'000 hab.]	Proportion de bâtiments vulnérables [%]	Risque économique [Frs. annuel / 1'000 Frs.]	Coût de gestion [Frs. annuel / habitant]
Stratégie actuelle	0.29	8.00	0.18	15.00
Stratégie orientée valeur	0.25	7.00	0.17	27.00
Stratégie orientée vie	0.16	5.50	0.25	71.35

Tableau B7 – Critère de comparaison des stratégies

Comparaison des stratégies

Comme présenté au chapitre 6, une comparaison multicritère est menée pour les trois stratégies. Le processus décisionnel se construit de manière identique que pour les bâtiments individuels. Cette démarche est détaillée à l'annexe A [Bâtiments individuels].

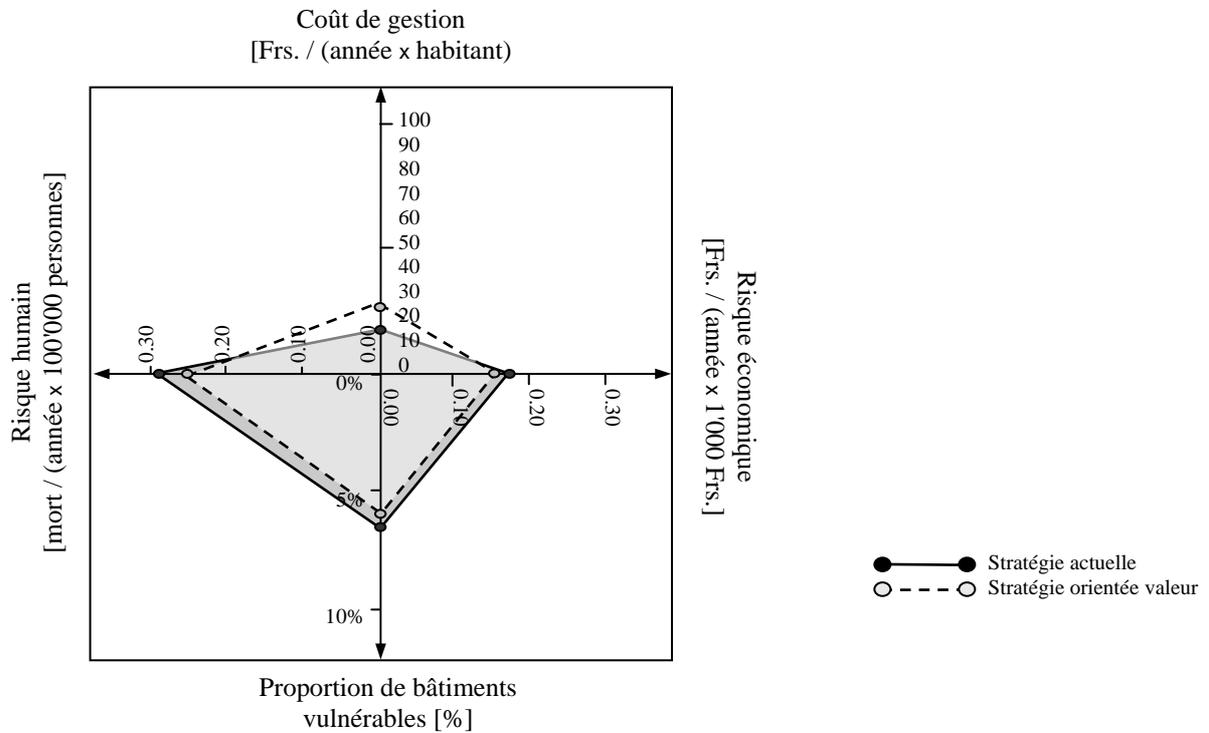


Figure B14 – Diagramme en étoile – Stratégie actuelle vs Stratégie orientée valeur

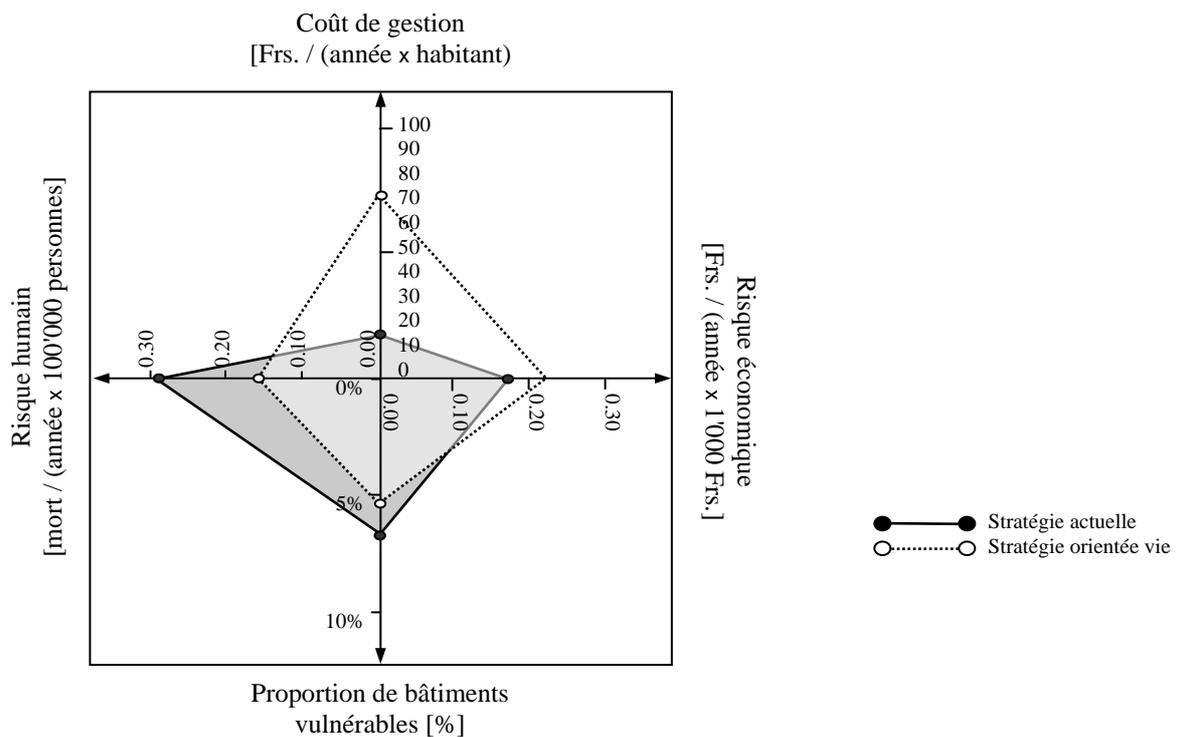


Figure B15 – Diagramme en étoile – Stratégie actuelle vs Stratégie orientée vie

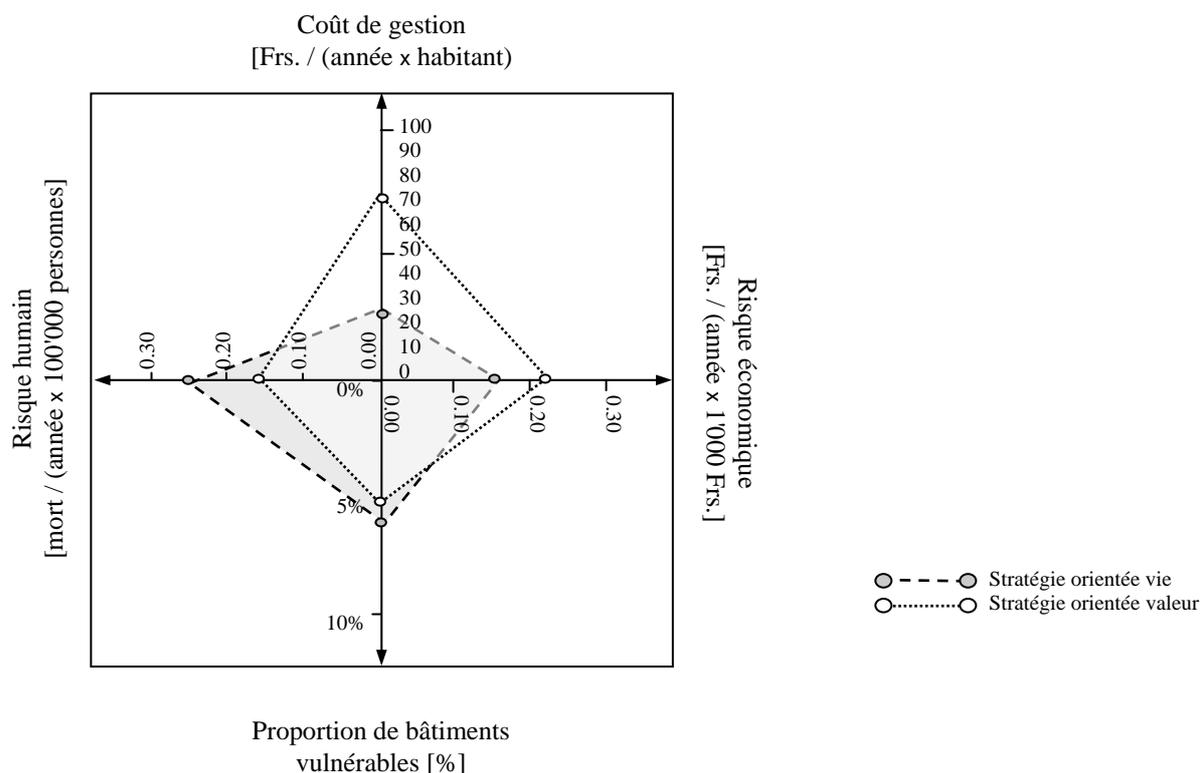


Figure B16 – Diagramme en étoile – Stratégie orientée vie vs Stratégie orientée valeur

L'analyse comparative a été menée et arrive à la conclusion que la stratégie actuelle est la meilleure pour les objectifs des acteurs et les critères retenus. Cette stratégie intègre le recours au Pool suisse en cas de dommages sismiques, efficace pour des événements catastrophiques mais qui sera insuffisant pour un cataclysme.

B5. SYNTHÈSE

Cette partie de la recherche a permis de définir les éléments constitutifs du modèle d'estimation et de les tester par une application concrète sur l'ensemble d'une ville. Des stratégies ont ensuite été élaborées et comparées sur la base de critères objectifs. Ce processus peut maintenant être effectué à une échelle plus large, par exemple celle d'un canton, pour aboutir à des recommandations exploitables par les autorités.

ANNEXE C – MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRE

C1. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MÉTHODES ACTUELLES

Introduction

Les problèmes de décision sont fréquemment abordés par l'optimisation d'une fonction économique. Cette démarche n'est pas toujours fidèlement représentative de la réalité pour les trois principales raisons énoncées ci-dessous [Ben Mena 2000]:

- Il est difficile de comparer plusieurs actions sur le seul critère économique,
- il est difficile de modéliser par une fonction les préférences sur un seul critère,
- il est impossible d'atteindre plusieurs objectifs simultanément.

Ainsi toutes les décisions de gestion qu'on ne peut isoler de leur contexte sortent du domaine d'applicabilité de la recherche opérationnelle. On en attendait, et on en attend encore [Deb 2001], certainement trop: distinguer en toutes circonstances la meilleure solution, l'optimum. Cette optimisation se base sur des conditions d'utilisation extrêmement difficiles à garantir, à savoir:

- Hypothèse de globalité: on peut désigner une action parmi toutes les autres comme étant la meilleure;
- hypothèse de stabilité: l'ensemble des actions n'est jamais remis en cause au cours de l'évolution temporelle (caractère statique de l'approche habituelle, alors qu'une modification des paramètres de l'environnement doit être intégrée, afin de tenir compte au mieux de l'aspect évolutif au cours du temps);
- hypothèse de parfaite comparabilité transitive: qui souffre des trois critiques principales suivantes [Ben Mena 1998]:
 - Situation d'incomparabilité; quand une personne se trouve face à des alternatives sans qu'elle puisse dire laquelle elle préfère;
 - intransitivité de l'indifférence; être indifférent entre deux actions a et b et entre deux actions b et c, ne veut pas forcément dire que l'on est indifférent entre les actions a et c. Ainsi l'indifférence n'est pas analogue à l'égalité mathématique. Elle recouvre une situation de préférence faible, c'est à dire qui n'est pas humainement ressentie et exprimée;
 - hypothèse de transitivité de la préférence; pour illustrer cette hypothèse, nous nous basons sur un exemple.

Un propriétaire d'un immeuble résidentiel ayant, une résistance avérée insuffisante au tremblement de terre, désire le rénover et l'adapter. Il a le choix entre trois actions distinctes, qu'on appelle des mesures:

A: rénovation parasismique

B: statu quo

C: démolition et reconstruction

Il est aisément concevable d'attribuer séparément, selon leurs impacts, une évaluation à chaque mesure. On adopte trois critères de comparaison simples: le niveau de sécurité face à un tremblement de terre, le coût de l'intervention et la rentabilité future de l'exploitation de l'immeuble. Chaque mesure est évaluée sur une échelle allant de 1 (mauvais) à 9 (excellent). On établit ensuite la matrice des performances au tableau C1.

		Critères		
		Sécurité	Coût	Rendement
Mesures	A: Rénovation	6	7	5
	B: Statu quo	2	9	4
	C: Démolition	8	1	8

Tableau C1 – Matrice des performances

Le décideur établit les règles suivantes de comparaison:

- Entre deux mesures, comparer la valeur des évaluations des critères aux trois valeurs des deux autres mesures,
- comptabiliser le nombre total de fois que les critères d'une des deux mesures comparées soit, de par leurs évaluations, supérieures aux critères de l'autre mesure,
- une mesure l'emporte si elle est plus de 4 fois sur 9 supérieure à l'autre.

Dans notre exemple, on obtient que A est supérieure à B (5 victoires) ainsi que B est supérieure à C (5 victoires). Une conclusion hâtive consisterait à dire que la stratégie A l'emporte sur la stratégie C, alors qu'il en est tout autrement puisque C est supérieure à A pour les critères étudiés.

Quelles alternatives ?

L'optimisation est donc relativement mal adaptée, particulièrement quand plusieurs points de vue avec des profils de risque différents jugent des conséquences de plusieurs mesures. On risque de trouver des actions optimales différentes pour chaque point de vue car toute réalité humaine est à points de vue multiples, multicritère.

La multiplicité des critères et la multiplicité des intervenants multiplient la complexité de la problématique, ce qui justifie la recherche de nouvelles méthodes d'aide à la décision.

Deux aspects essentiels pour une meilleure perception de la réalité peuvent encore être relevés. Premièrement le fait que certains critères ne sont que difficilement quantifiables en unité monétaire, ce qui amène à utiliser des méthodes permettant de gérer plusieurs échelles

d'évaluation plus adaptées aux critères spécifiques. Deuxièmement, le fait que certains critères puissent être contradictoires, ce qui ne doit pas gêner la réflexion menant à la décision. Les méthodes ELECTRE [Roy 1968] proposent des réponses intéressantes à ces aspects.

C2. MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRES

Concepts fondamentaux

Il s'agit d'explorer les méthodes existantes pour proposer une démarche d'utilisation conçue de manière globale et cohérente. La démarche de choix développée exploite les connaissances structurelles, économiques, sociétales ou encore environnementales pour contribuer à la description, puis à l'évaluation de plusieurs mesures de gestion du risque.

Les problèmes de décision multicritères sont habituellement décomposés en 4 étapes, présentées plus bas qu'on retrouve détaillée dans la littérature spécialisée [Maystre 1994].

Liste des actions potentielles

L'action est définie comme suit: « une action *a* est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale, susceptible, eu égard à l'état d'avancement du processus de décision, d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision » [Roy 1985]. On les appelle dans ce travail des mesures pour des bâtiments individuels et des stratégies, ensemble de mesures, pour une population de bâtiments.

Liste des critères et pondération

Les systèmes de valeurs des acteurs du processus de prise de décision doivent être établis. Plusieurs situations fondamentales qui représentent les préférences d'un acteur par rapport à deux actions et doivent être étudiées [Schärli 1996]: l'indifférence, la préférence ou encore l'incomparabilité.

Matrice des performances

Une matrice constituée, en lignes, des actions et, en colonnes, des critères est ensuite constituée. Dans chaque colonne les informations complémentaires, comme les fonctions-seuils définies plus loin, sont également introduites.

Agrégation des performances

A ce stade, il faut définir un modèle de préférence qui soit une représentation formalisée des préférences relativement à un ensemble d'actions que le spécialiste trouve appropriées au problème spécifique d'aide à la décision.

Méthodes d'agrégation

Agrégation complète

On tente d'introduire toutes les performances dans une fonction d'agrégation ou d'utilité, en leur attribuant d'éventuels poids. Cela suppose la commensurabilité de tous les critères. On cède donc sur une des exigences initiales [Schärting 1985]. Comme exemple courant, on peut citer la moyenne pondérée. Elle présente des défauts, graves ou non selon les situations, comme la compensation possible entre critères et une forte sensibilité aux changements d'échelle.

Agrégation partielle

Cette technique, qui comprend les méthodes de surclassement, permet de respecter l'incomparabilité, mais au prix de la clarté des résultats. Cette approche consiste à comparer les actions deux à deux et à vérifier si, selon certaines conditions préétablies, l'une des deux actions surclasse l'autre ou pas et ce, de façon claire et nette. A partir des comparaisons faites, on va tenter de faire une synthèse. Les méthodes d'agrégation partielles se distinguent par leur façon de faire cette synthèse. On considère généralement que face à deux actions *a* et *b*, on se base sur l'hypothèse que *a* surclasse *b* quand *a* est au moins aussi bonne que *b* sur une majorité de critères sans être trop nettement plus mauvais relativement aux autres critères.

Agrégation locale

Les deux premières méthodes d'agrégation supposent un nombre petit (raisonnable) d'actions. Or, il est possible qu'il y ait une quantité très importante d'actions, voire infinie. La technique consiste alors de partir d'une solution de départ (supposée aussi bonne que possible) et de voir « dans les alentours » s'il n'y en a pas une meilleure. On pratique donc une exploration locale et répétitive qu'on appelle technique d'agrégation locale itérative.

C3. ELECTRE III

Choix de la méthode ELECTRE III

La procédure d'agrégation multicritère utilisée dans cette recherche est une méthode de surclassement (ELECTRE III) [Roy 1985]. Cette démarche distingue clairement les opérations d'analyse et de traitements de données, des interventions subjectives du décideur (choix des critères, pondérations, choix du panel de variantes, choix des méthodes d'évaluation, ou d'agrégation...). L'utilisateur peut, par la suite, par l'informatisation de ce modèle, tester différentes hypothèses et revenir sur ses choix. L'observation des conséquences de ses choix sur le résultat final lui permet de comprendre le fonctionnement du système étudié. ELECTRE III est une méthode d'agrégation partielle qui se base sur la notion de relation de surclassement entre deux actions. Elle vise à résoudre un objectif de classement des actions en trouvant la meilleure. Elle possède les principales caractéristiques suivantes tirées de [Maystre 1999]:

- Elle permet de considérer aussi bien des critères qualitatifs que quantitatifs,
- on peut prendre en considération l'imprécision de l'évaluation de critères grâce aux notions de seuils d'indifférence et de préférence,
- elle permet de mettre en évidence des différences inacceptables entre deux actions sur un critère par la notion de seuil de veto,
- elle ne permet pas une compensation entre les critères,
- elle permet de mettre en évidence des actions incomparables,
- elle permet de fixer une pondération par acteur entrant dans le processus décisionnel.

Trois types de relation entre deux mesures sont distingués: l'indifférence (incapacité de distinguer), la préférence ou l'incomparabilité.

Aspects pratiques

Détermination des pondérations

On demande à un groupe de représentatif des différentes catégories d'acteurs de hiérarchiser un ensemble de critère pré-définis. La pondération des critères a été effectuée dans ce travail à l'aide d'une approche reposant sur le classement des critères par les acteurs selon leur ordre d'importance [Simos 1991]. Chacun des acteurs classe sur une échelle graduée de 1 (le moins important) à 10 (le plus important) les critères selon son point de vue. Il peut laisser des échelons vides sur l'échelle et classer des critères ex æquo. Ensuite ces évaluations sont moyennées pour déterminer les pondérations utilisées. Une mise en situation des différents stakeholders ou de leurs représentants permet de simuler divers scénarios envisagés. Cette étape est utile pour impliquer ces acteurs dans l'évaluation et également pour tester les interactions entre des positions qui peuvent diverger ou être contradictoires. La qualité de l'observation dépend du choix de ces représentants et de leur capacité à représenter leurs intérêts respectifs dans les rôles qui leur sont dévolus.

<u>Rang</u>	<u>Propriétaire</u>	<u>Collectivité</u>
10	Valeur actuelle nette	Risque humain
9	-	Coût de sauvetage
8	-	-
7	-	Indice d'effondrement / ROI sismique
6	Risque éco. / Indice d'effondrement	-
5	Coût de sauvetage	Risque économique
4	-	Valeur actuelle nette
3	ROI sismique	-
2	-	-
1	Risque humain	-

Figure C1 – Détermination des pondérations

Ces pondérations sont données avec un intervalle acceptable sur lequel va être menée une analyse de robustesse [Louafa 2003].

Indice de crédibilité

La concordance et la discordance s'expriment à l'aide de la matrice des indices de crédibilité [Louafa 2003]. Un haut indice de crédibilité signifie qu'une majorité des critères confirme l'hypothèse de surclassement sans forte minorité s'y opposant, alors qu'un bas degré de crédibilité indique que seul une minorité des critères confirment cette même hypothèse.

Seuils d'indifférence

Le seuil d'indifférence indique l'écart dans lequel aucune préférence ne peut être établie sur un critère. Ces seuils permettent de tenir compte de l'imprécision et des incertitudes sur les évaluations ou sur les données.

Seuils de préférence

Le seuil de préférence indique l'écart à partir duquel une préférence nette peut être établie entre deux évaluations. L'écart entre le seuil d'indifférence et le seuil de préférence indique une préférence faible entre deux évaluations.

Seuils de veto

Le seuil de veto permet de fixer une notion supplémentaire. Si ce seuil est dépassé sur un critère, alors l'action ne peut être prise en considération. Il définit donc une situation intolérable pour un des décideurs. Il s'exprime par l'écart maximum acceptable autour de la valeur de l'évaluation.

Classement

La méthode propose de classer les mesures selon un algorithme décrit dans [Simo 1999] et [Roy 1993]. Les mesures sont comparées entre elles par paire selon tous les critères. Deux préordres sont construits, appelés distillation où les ex æquo sont acceptés mais pas les incomparabilités. Le principe d'établissement de ces deux distillations est le suivant:

- La distillation ascendante range les mesures en partant de la meilleure jusqu'à la « moins meilleure », se basant sur les meilleurs scores des mesures comparées deux à deux,
- la distillation descendante range les mesures en partant de la pire à la « moins pire », se basant sur les moins bons scores des mesures comparées deux à deux.

Un algorithme [Louafa 2003] permet enfin par comparaison entre les deux préordres de définir un graph de surclassement illustrant le préordre final partiel acceptant les ex æquo et les incomparabilités. C'est ce classement qui définit la meilleure action.

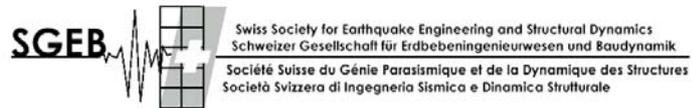
C4. SYNTHÈSE

Les méthodes de comparaison multicritère dites de surclassement sont abondamment étudiées et présentent une bonne alternative dans le domaine de gestion de ce type de risque. Ce travail a fait le choix d'ELECTRE III [Roy 1985] pour illustrer la démarche. D'autres méthodes peuvent naturellement être envisagées.

ANNEXE D – RECOMMANDATION SGEB

RECOMMANDATION POUR LA PRISE EN COMPTE DES ACTIONS SISMQUES LORS DE LA VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ STRUCTURALE DES OUVRAGES EXISTANTS SELON LES NORMES SIA (ED. 2003)

Document de travail de la SGEB



Groupe d'experts : Prof Dr M. Badoux
B. Duvernay
E. Kölz
Dr T. Wenk
P. Zwicky

Septembre 2003, 4^{ième} version

Rédaction : M. Badoux/P. Zwicky

Février 2004

Version française : V. Pellissier/B. Duvernay/Dr P. Tissières

fachgesellschaft des **s i a** schweizerischen ingenieur-und architektenvereins
groupe spécialisé de la **s i a** société suisse des ingénieurs et architectes

Recommandation

0. Champ d'application

0 01 Cette recommandation porte sur la sécurité structurale des ouvrages existants soumis aux actions sismiques. Elle se base sur les normes et recommandations suivantes:

- Normes SIA 260 à 266 (2003) pour le dimensionnement des structures porteuses.
- Directives SIA 462 (1994) «Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants».

1. Principes

1 01 Lors de l'évaluation de la sécurité sismique des ouvrages existants les actions pour la vérification de la sécurité structurale peuvent être réduites. La justification de cette adaptation des actions sismiques est présentée au paragraphe 2.

2. Adaptation des actions sismiques

2 01 Les actions sismiques déterminées par la norme SIA 261 (éd. 2003) pour garantir la sécurité structurale peuvent être multipliées par un facteur p .

2 02 La valeur de p varie entre 0.5 et 0.7 en fonction des éléments suivants:

- du coût d'une intervention technique de mise en conformité sismique par rapport au nombre de vies humaines menacées;
- de la valeur économique de l'ouvrage.

2 02 Si malgré cette adaptation des actions sismiques, une intervention technique s'avère nécessaire, les mesures engagées doivent viser un objectif de protection conforme aux exigences fixées par la norme SIA 261 (éd. 2003).

Explications

Les explications suivantes précisent les fondements, objectifs, développements et justifications de la présente recommandation.

1. La recommandation fait suite à l'introduction de la nouvelle collection de normes de construction SIA 260 et suivantes (2003). Dans plusieurs cas de figure, ces normes provoquent une augmentation significative des actions sismiques sur les structures porteuses. Ces normes ne sont cependant pas expressément destinées aux évaluations d'ouvrages existants. Il n'existe d'ailleurs pas d'indication particulière à cet effet. Ces normes servent donc de base de jugement pour fixer un objectif de protection.

2. La recommandation est considérée comme une solution transitoire pour les deux raisons évoquées ci-après:
 - un groupe de travail de la commission pour la norme SIA 261 (AG 261-1) planche actuellement sur une directive pour l'évaluation de la sécurité structurale aux tremblements de terre des ouvrages existants. Les résultats de ce groupe sont attendus pour le milieu de l'année 2004. La présente recommandation est soumise au groupe de travail mandaté comme «document de travail»;
 - la recommandation vise en principe une adaptation progressive de la sécurité parasismique du portefeuille de bâtiments existants. La mise à niveau immédiate à l'objectif de protection fixé par la collection de normes SIA 260 et ss. (éd. 2003) est impossible à atteindre pour des raisons économiques. C'est pourquoi, dans une phase transitoire, une réalisation partielle de l'objectif de protection est acceptable.
3. La recommandation est limitée dans son contenu. Elle ne se réfère qu'à des dispositions sur les actions sismiques dans le cadre de la sécurité structurale des ouvrages existants. Elle se réfère à un objectif de protection de la vie humaine, en aucun cas à la préservation de la valeur économique des choses.
4. La recommandation est applicable aux ouvrages qui ont été construits avant le retrait des anciennes normes de construction ou durant la phase transitoire.
5. La recommandation doit être appliquée par un ingénieur qualifié et expérimenté qui soit en mesure de considérer l'importance spécifique du cas étudié.
6. La recommandation propose une réduction des actions sismiques lors du contrôle de la sécurité structurale. Cette réduction admet ainsi une probabilité de ruine accrue pour des ouvrages existants. Le groupe d'experts juge que le niveau de l'objectif de protection de la vie humaine est néanmoins suffisant. Il estime cependant que le risque de mortalité individuelle, après cette réduction des actions sismiques, ne doit pas dépasser 1/100'000 mort par an. Cette valeur est communément admise en Suisse.
7. Une approche «risque» est donc le corollaire à la présente recommandation. L'acceptation d'une plus grande probabilité de disfonctionnement pour des ouvrages existants se base sur l'expérience que le coût d'une l'intervention technique de mise en conformité par rapport à la valeur d'un ouvrage existant est en général clairement plus important que la plus-value due à l'exécution en conformité d'une nouvelle construction. Inversement exprimé, l'efficacité de l'investissement consenti pour des mesures de protection contre les actions sismiques est beaucoup plus basse pour des bâtiments existants que pour des nouvelles constructions.
8. La recommandation permet d'utiliser un facteur multiplicatif pour actualiser les actions sismiques qui ne peut être plus petit que 0.5. L'ingénieur qualifié doit fixer la valeur de p compte tenu des spécificités de l'ouvrage étudié en fonction des points suivants:
 - il doit tenir compte des conséquences possibles d'une perte de fonction de l'ouvrage. Pour ce faire, il s'appuiera sur la classe d'ouvrage, déjà considérée dans

- l'estimation des actions sismiques dans la norme SIA 261 (éd. 2003) par l'utilisation du facteur d'importance γ_f ;
- il doit prendre en considération le coût de la mesure technique de mise en conformité et son efficacité par rapport au nombre de vies humaines sauvées (coût de sauvetage). Les deux principes juridiques en partie opposés de précaution et de proportionnalité doivent donc être pesés.
9. Dans le cadre d'une évaluation de la sécurité parasismique d'un ouvrage existant, il est souvent opportun d'approfondir le calcul de manière plus détaillée que lors d'un dimensionnement d'un nouvel ouvrage. Dans le but de diminuer les actions sismiques, des approfondissements sur les points suivants peuvent être envisagés:
- prise en compte des conditions géologiques locales et de l'influence spécifique du site (effet de site);
 - détermination des fréquences propres du bâtiment par mesures in situ des oscillations ou par un calcul détaillé;
 - prise en compte des masses modales effectives.
10. Le groupe d'experts n'a pas mené d'analyse approfondie des directives étrangères relatives à l'application des nouvelles normes pour les bâtiments existants. Il y a cependant trouvé des indications quant à l'ordre de grandeur proposé pour l'adaptation des actions sismiques. La directive US FEMA-310 «Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings», appliquée également en Suisse par l'Office fédéral des Eaux et de la Géologie, propose des «actions équivalentes» diminuées d'un facteur 1.5 à 2 en dessous du niveau des normes de construction actuelles aux USA, et/ou en Suisse.

ANNEXE E – CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

E1. CADRE LÉGAL ET ASPECTS JURIDIQUES

Contexte

Bien que les conséquences d'un tremblement de terre en Suisse puissent être dévastatrices, le risque sismique est généralement sous-estimé de la population et peu traité par les autorités. Les outils légaux ainsi que les procédures d'identification et de prise en compte de la plupart des dangers naturels dits classiques, comme les avalanches, les crues ou encore les mouvements de terrains, sont bien fixés dans les directives et recommandations fédérales et cantonales en la matière. Par contre, dans le cadre du danger sismique, plusieurs raisons font que cette même clarté fait défaut [Loup 2003].

- La taille de l'espace affecté par le phénomène provoque un éclatement des responsabilités. Les événements catastrophiques peuvent en effet toucher plusieurs communes voir même être supra-cantonaux. Un séisme d'une magnitude 5 à 6 peut produire des dégâts dans un rayon de 25 kilomètres; pour un séisme de magnitude 6 à 7, le rayon dépasse les 60 kilomètres. Cela rend difficile une identification des acteurs, de leurs compétences et de leurs moyens d'actions respectifs. Les dangers naturels classiques ont une limitation spatiale nette et se gèrent avec des outils d'aménagement du territoire bien connus, comme par exemple le recours aux cartes de dangers. La nature ubiquiste du tremblement de terre et son impossibilité d'en anticiper le lieu de survenance font que des outils spécifiques de gestion doivent être développés.
- La complexité du système fédéraliste helvétique, dont découle un cadre législatif éparpillé rend difficile des actions organisées ou concertées.

Dans un premier temps, le contexte réglementaire propre à la situation helvétique est passé en revue. Cet annexe traite également des bases législatives qui règlent les aspects de responsabilités et de mise en application des normes de constructions parasismiques existantes ou en projet [Pellissier 2003].

Des notions juridiques, comme les principes de proportionnalité ou de précaution sont ensuite abordés. Ces notions permettent de traiter brièvement, dans la seconde partie de ce document, les ouvrages existants qui ne peuvent en effet être appréhendés de la même manière que les nouvelles constructions [Schneider 2000].

Enfin, un paragraphe se consacre au rôle que peuvent occuper les institutions étatiques dans la gestion d'une telle problématique.

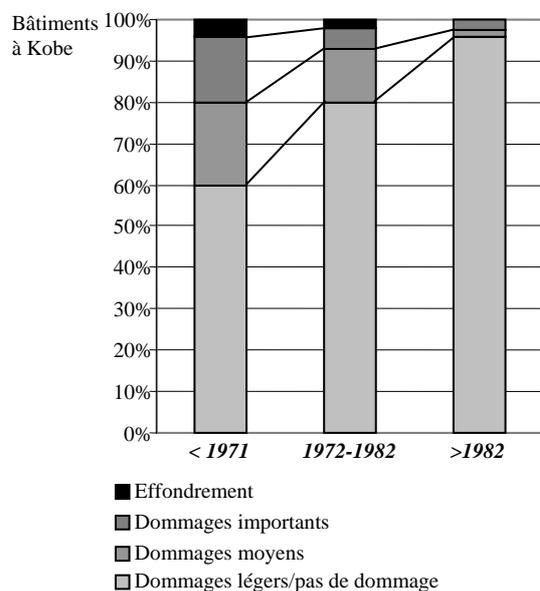
Pourquoi une nouvelle génération de normes de construction ?

Les normes de la SIA

La société suisse des ingénieurs et architectes, ci-après la SIA, en tant qu'association professionnelle faîtière, met à jour régulièrement ses recommandations techniques, qui sont l'expression de l'évolution des connaissances et de l'acquis technique reconnu dans le domaine de la construction. Dans la mesure où elles ont été élaborées par des experts et font l'objet d'une large procédure de consultation, elles font clairement office de **règles de l'art** dans le domaine, ce que confirme la pratique juridique usuelle. La plupart d'entre elles contiennent toutefois une clause admettant des «déroptions», pour autant que la solution choisie soit prouvée comme étant équivalente aux prescriptions fixées par la norme.

Evolution des prescriptions sismiques dans les normes helvétiques

L'aléa sismique, comme action sur les structures porteuses, a été introduit dans les normes suisses dès 1970 [SIA160 1970]. La mise à disposition de normes modernes pour effectuer un dimensionnement efficace au tremblement de terre a réellement eu lieu en 1989 [SIA160 1989], lorsque ce chapitre a été entièrement réécrit sous l'impulsion du Prof. Dr Hugo Bachmann, de Zürich. Enfin, une mise à jour importante, tant sur les zones que sur les spectres a été mise en application en janvier 2003 [SIA261 2003]. Les classes de sols sont également mieux prises en compte dans cette nouvelle génération de normes.



L'état des règles de l'art que reflètent les normes en vigueur actuellement, permet de dimensionner des constructions capables de résister à des séismes importants. Cependant, leur seule existence ne suffit pas, encore faut-il qu'elles soient correctement appliquées !

Figure E1 – Influence des normes de construction parasismique sur la tenue sismique d'un échantillon de bâtiments du centre de la ville de Kobe durant le tremblement de terre de 1995 (premières normes introduites en 1972, puis norme parasismique moderne dès 1982) [Inukai 1996]

En effet, l'expérience nous montre que l'amélioration des normes a un impact marqué sur le comportement des ouvrages lors de tremblements de terre. La figure E1 montre la proportion des atteintes aux bâtiments lors du séisme de Kobe, au Japon, en 1995, en fonction de la date de construction des ouvrages, et donc des normes en application à ce moment [Badoux 2000a]. La mise en place de prescriptions modernes a prouvé son efficacité en cas de tremblement de terre majeur. Pourtant, bien que possédant des normes de construction sévères et bien adaptées, la Turquie a vu s'écrouler lors du tremblement de terre de 1999 de nombreux bâtiments récents du fait du non respect de ces prescriptions [Badoux 2002b].



Figure E2 – Bâtiments modernes écroulés après le séisme de 1999 à Izmit, Turquie

Période transitoire de mise en application de la nouvelle collection de norme SIA 260 et suivantes

Les normes applicables sont celles qui sont en vigueur au moment des études de dimensionnement sauf si cela est explicitement invoqué dans le contrat. De plus, une période de transition court sur 18 mois à compter de la mise en application de la nouvelle collection de normes, soit le 1^{er} janvier 2003. Cela est différent si des projets se prolongent au-delà de la période de transition, et doivent être réglés au cas par cas. Les standards de sécurité garantis par la norme SIA 261 [SIA261 2003] sont fréquemment plus élevés que ceux de la norme SIA160 [SIA160 1989]. Pour cette raison il est tout à fait compréhensible que le maître d'ouvrage désire s'assurer ces standards, mais il demeure aussi clair que ce sera à lui de couvrir les frais supplémentaires, et non à l'ingénieur qui a opéré en harmonie avec les dispositions en vigueur au moment de l'exécution de son mandat [Maffioletti 2003]. Cela est vrai aussi bien pour les frais liés à la construction que pour le surcoût des honoraires de l'ingénieur mandaté.

Éléments de droit privé

Quelle est la nature du dommage ?

Le dommage peut être de plusieurs natures. Un dommage existe aussi bien en cas de survenance d'un événement sismique avec des dégâts économiques ou des atteintes à l'intégrité corporelle que lors de la non survenance si une moins-value économique apparaît [Schumacher 2000]. Par exemple, à la suite d'un tremblement de terre, en cas de lésion corporelle, la partie qui en est victime a droit au remboursement des frais et aux dommages-intérêts qui en résultent (Art. 45 et 46 CO).

En cas de dommages économiques, comme par exemple une moins-value sur l'objet immobilier, la partie qui en est victime pourrait également avoir droit à des dommages-intérêts.

La responsabilité du propriétaire d'ouvrage

Cette responsabilité est un exemple de responsabilité causale (Art. 58 CO). Le propriétaire d'un bâtiment ou de tout autre ouvrage est responsable du dommage qui résulte d'un vice de construction ou du défaut d'entretien. Pourtant, il lui reste un recours contre celui qui est responsable envers lui de ce chef. Ainsi, par exemple, un bâtiment construit durant l'année 2003, et dont les règles de l'art de la construction applicables au moment de sa conception sont la collection de normes SIA 260 et ss, doit respecter ces prescriptions. Le propriétaire, qui est responsable, peut exercer un recours contre celui qui a construit de manière défectueuse, en réparation du dommage causé. Il est d'ailleurs vrai que la norme prévoit une période transitoire, mais cette période transitoire ne lie pas les tribunaux, qui dans le cadre de leur pouvoir d'appréciation restent libres de considérer les dispositions de la nouvelle norme comme règles de l'art à partir du moment de sa mise en vigueur.

Responsabilité spéciale des architectes et des ingénieurs

En ce qui concerne les défauts et malfaçons de l'ouvrage, l'architecte et l'ingénieur peuvent être tenus responsables à l'égard du mandant de tous les vices visibles ou cachés dont l'objet peut être entaché, ceci dans la mesure tolérée par la loi. Cependant, toute clause qui supprime ou restreint la garantie est nulle si le mandataire a frauduleusement dissimulé au mandant les défauts de la chose, comme par exemple la non conformité aux règles de l'art.

A côté de ces dispositions de droit civil, les architectes et ingénieurs sont en outre pénalement responsables en cas de violation des règles de l'art de construire. Le Code pénal suisse dispose notamment (Art. 229 CP) : « *Celui qui, intentionnellement, aura enfreint les règles de l'art en dirigeant ou exécutant une construction ou une démolition et aura par là sciemment mis en danger la vie ou l'intégrité corporelle des personnes sera puni de l'emprisonnement ou de l'amende.* »

La responsabilité de droit civil comme celle de droit pénal pour des vices de construction se prescrit par cinq ans (Art. 371 CO). Notons que par jurisprudence la prescription serait de dix ans en cas de défauts intentionnellement cachés.

Responsabilité pour une bonne et fidèle exécution (Art. 398 CO)

Le mandataire est tenu de réaliser l'ouvrage conformément aux attentes du mandant. La réalisation selon les règles de l'art, et donc bien souvent en conformité aux prescriptions en vigueur de la SIA, fait partie intégrante des attentes du mandant. «² *Le mandataire est responsable envers le mandant de la bonne et fidèle exécution du mandat.* »

Comment fixe-t-on le montant des dommages et intérêts ?

En ce qui concerne l'évaluation des dommages causés à un bien matériel comme un immeuble on s'en tient souvent à la valeur de remplacement: l'estimation du dommage est fondée sur le prix qu'il faudrait payer pour acquérir un objet absolument pareil à celui qui a été détruit ou sur le prix qu'il faudrait payer pour remettre en état l'objet ayant une moins-value. C'est par exemple le prix de l'intervention sur la structure, comme un renforcement, pour une mise à niveau de celle-ci.

Éléments de droit public

Une prise de conscience récente au niveau de la confédération

Plusieurs interventions [Epiney 1998/2000] par devant les chambres fédérales étayées par différentes études scientifiques ont provoqué la prise de conscience de l'importance de ce danger. En réponse à cette menace, le Conseil fédéral a doté le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) d'une Centrale de coordination pour la mitigation des séismes et lancé dans son domaine de compétence un programme de mesures en sept points pour la période 2001–2004. La réponse du Conseil Fédéral dit clairement que du point de vue du droit public la Confédération doit agir dans des domaines qui lui sont expressément réservés par la Constitution fédérale. Cela signifie que la responsabilité en matière de prévention des sinistres non liés à la confrontation politico-militaire, comme c'est le cas pour les tremblements de terre, ainsi que la mise en oeuvre de mesures de précaution nécessaires à cet effet, de gestion des catastrophes et d'autres situations d'urgence sont du ressort essentiellement des cantons et des communes.

Article constitutionnel pour la protection contre les dangers

Le DETEC a envoyé en consultation un nouvel article constitutionnel sur les dangers naturels rédigé comme suit : „*La législation sur la protection contre les dangers naturels est une tâche de la Confédération*“. L'organisation en été 2002 d'une procédure de consultation en vue de compléter la Constitution représente un pas essentiel pour remédier aux lacunes identifiées. Le projet porte sur la modification de l'article 74a, qui vise à donner à l'avenir à la Confédération un devoir de direction et de coordination à l'égard de tous les dangers naturels, y compris les tremblements de terre. Une entrée en matière sur cette modification a été repoussée en commission à l'automne 2003.

La prévoyance parasismique n'est ainsi toujours pas ancrée au niveau constitutionnel, ce qui est par contre le cas pour d'autres dangers naturels comme les avalanches ou les crues. Comme déjà largement discuté, la conscience de ce risque est sous-estimée malgré son immense potentiel destructif. Une adaptation de la Constitution découlant sur une loi fédérale sur la protection parasismique revêt donc un certain sens. Conçue comme une loi-cadre, à l'image de la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau, elle donnerait à la Confédération la conduite stratégique alors que la conduite opérationnelle incomberait aux cantons. De surcroît, la loi pourrait contenir également des prescriptions en matière d'obligation d'assurance [DETEC 2002].

Les mesures prises pour les nouvelles constructions fédérales

Deux axes pour les actions au niveau fédéral sont privilégiés. Le premier porte sur les infrastructures et bâtiments existants, alors que le deuxième traite, par les mesures 1 et 5 présentées plus bas, des nouvelles constructions [OFEG 2001].

- **Mesure 1: Construire en respectant les normes parasismiques**

Jusqu'à présent, lorsque l'on construisait un bâtiment ou une installation dans le domaine de compétence de la Confédération, on ne contrôlait pas systématiquement si les normes visant à garantir sa tenue au séisme étaient respectées. La Confédération a convenu que ces normes devaient être appliquées désormais avec plus de rigueur pour toutes les constructions et installations fédérales, ainsi que pour certains ouvrages spéciaux qui doivent lui être soumis pour approbation ou pour bénéficier de subventions: ouvrages

d'intérêt public, centrales nucléaires, barrages, aéroports, voies de chemin de fer, funiculaires, routes nationales, canalisations, installations électriques, moyens de télécommunication, etc. Depuis le 1^{er} janvier 2001, les départements concernés n'approuvent et ne subventionnent plus que les constructions et installations respectant de manière conséquente les normes parasismiques les plus récentes, SIA 160 [SIA160 1989] et, dès le 1^{er} janvier 2003, SIA 261. Les contrôles sont assurés par les services compétents.

▪ **Mesure 5: Améliorer les bases légales**

La Confédération dispose depuis 1874 de bases légales lui permettant de prendre les mesures de protection qui s'imposent face aux dangers naturels les plus courants, tels qu'avalanche, lave torrentielle ou inondation. En revanche, elle n'a pas de mandat constitutionnel en ce qui concerne les tremblements de terre. Comme déjà discuté, des propositions pour améliorer les bases légales ont été élaborées à partir d'interventions parlementaires. Cet effort va dans le sens d'une clarification des bases légales pour améliorer la prévention sismique en Suisse, de même que [Peter 2000] et [Schumacher 2000].

Mesures d'aménagement du territoire

On entend par gestion territoriale les outils qui influencent l'utilisation du territoire. Ces outils découlent pour la plupart de la législation existante. Il n'existe en Suisse pas de base légale aboutissant à une interdiction de construire dans des zones potentiellement dangereuses. Les espaces très larges qui peuvent être potentiellement exposés à un événement sismique d'importance limitent l'utilisation à ce genre d'outils traditionnels. Par contre, le micro-zonage des classes de sol de fondation et le micro-zonage spectral ont un impact direct sur les plans de zones et sur les règlements de construction. L'aspect sismique peut être considéré comme une facette de la loi sur l'aménagement du territoire [LAT 1979].

LAT Art. 6c Les cantons désignent les parties du territoire qui sont gravement menacées par des forces naturelles (...).

Cette législation s'inscrit dans la Constitution fédérale consacrée à l'aménagement du territoire.

Cst. Art. 75 La Confédération fixe les principes applicables à l'aménagement du territoire. Celui-ci incombe aux Cantons et est une utilisation judicieuse et mesurée du sol et une occupation rationnelle du territoire.

Les cantons sont tenus, sur la base des articles précédents, de fournir un plan directeur cantonal. Ce plan est un outil au service de l'organisation du territoire, de la coordination et de la prévention. Il fixe aux autorités chargées de l'aménagement les contraintes légales dans l'exercice de leur pouvoir d'appréciation. On rappelle ci-après les éléments principaux réunis dans la directive de l'OFEG [OFEG 2004].

- Un niveau du plan directeur cantonal, la carte de micro-zonage des classes de sol de fondation ou encore de micro-zonage sismique spectral si elle existe, font partie des études de base et permettent de détecter à l'avance les conflits potentiels entre l'affectation du sol et les effets de site liés à l'aléa sismique. Elles sont la vue

d'ensemble qui permet d'élaborer les principes à appliquer par le canton. Elles fixent aussi les exigences à mettre en place dans le cadre du plan d'affectation communal.

- Au niveau des plans d'affectation communaux, les zones à effet de site proposées par la carte de micro-zonage des classes de sol de fondation, peuvent être reprises de manière contraignante pour les autorités et les particuliers. Des prescriptions parasismiques particulières en fonction des zones déterminées sont ensuite fixées dans le règlement de construction communal. On passe donc ici à une mesure de type constructive qui sera présentée plus loin dans ce chapitre.

Mesures et actions aux niveaux cantonaux

Actuellement, la législation des différents cantons suisses n'intègre pas directement la problématique sismique. De plus, plusieurs systèmes de couverture pour les dommages contre les dangers naturels cohabitent sur le territoire helvétique. On distingue principalement les deux systèmes suivants; le premier, qui a cours dans 19 cantons, voit l'existence d'établissements cantonaux d'assurance. Ces établissements possèdent un monopole sur l'activité d'assurance contre les dangers naturels. Le deuxième système, ayant cours dans les autres cantons, ne rencontre pas d'obligation d'assurance et le marché est ouvert aux entreprises d'assurance privées. Le corpus législatif est cependant assez similaire pour tous les cantons. Deux exemples sont ici donnés pour chacun des systèmes rencontrés.

▪ Etat de Vaud

Le canton de Vaud, bien qu'en moyenne moins exposé au risque sismique que d'autres régions de Suisse, a par endroits un niveau de risque élevé. On pense en particulier au Chablais ou encore à la région d'Yverdon. Le Canton possède un établissement cantonal d'assurance. La législation relative se trouve dans la loi [RSV 1985] et l'ordonnance cantonale [RSV 1986] relatives aux constructions ainsi que celles réglant l'assurance contre l'incendie et les éléments naturels [RSV 1952] et [RSV 1981].

La loi cantonale sur les constructions [RSV 1985] règle à l'art 89, alinéa 2, la réalisation des plans de construction par un ingénieur: *«Les plans de constructions nécessitant des calculs de résistance doivent être établis par un ingénieur; il en est de même des plans de fondations et de toute autre partie de la construction lorsque celle-ci présente des dangers spéciaux.»* ainsi que l'obligation du respect des règles de l'art en usage à l'art. 90. L'art. 20 du règlement d'application [RSV 1986] donne de manière explicite la source normative, en l'occurrence les normes de la SIA: *«A défaut de prescriptions contraires édictées par le Conseil d'Etat, les éléments d'ouvrage sont conçus et dimensionnés selon les normes de résistance de la Société suisse des ingénieurs et architectes, au besoin selon les directives d'autres associations professionnelles.»* L'art. 79 du même règlement, lettre c: *« Les permis d'habiter ou d'utiliser ne peut être délivré que: c) si les travaux extérieurs et intérieurs sont suffisamment achevés pour assurer la sécurité et la santé des habitants ou des utilisateurs.»* permet de refuser un permis d'habiter si la sécurité des habitants ou des utilisateurs n'est pas assurée. Cette assurance de sécurité ne peut être garantie en cas de non respect des normes de la SIA.

Le corpus législatif vaudois traite donc de manière satisfaisante la problématique du risque sismique. On y fixe en particulier la notion d'*ingénieur* devant établir les plans de constructions nécessitant des calculs de résistance. La pratique usuelle entend par ingénieur une personne ayant un diplôme reconnu des hautes écoles suisses (HES ou EPF)

ou un titre jugé équivalent. La base normative explicitement inscrite dans la législation est une deuxième particularité vaudoise qui ouvre la possibilité de modifier la procédure de mise à l'enquête publique afin de permettre le contrôle de la conformité aux dites normes.

Bien que ne faisant pas partie directement de ses tâches, l'ECA poursuit une politique active dans le domaine sismique [Conseil d'Etat VD 2001] [ECA 2001b] en réponse à une motion adressée au Grand Conseil Vaudois [Recordon 1999].

▪ République et Canton du Valais

Les spécificités du Canton du Valais, particulièrement exposé à l'aléa sismique, sont données ci-après. Les valeurs exposées à cet aléa sont importantes. En effet, la plaine du Rhône, plus sensible aux effets de site, concentre environ 225'000 personnes les jours ouvrables et la quasi-totalité des activités industrielles du canton [Rey-Bellet 2000]. Les principales dispositions se trouvent dans la Loi sur les constructions du 8 février 1996 [RSVs 1996], ci-après la LCC, et son ordonnance d'application du 2 octobre 1996 [RSVs 1996b]. Dans le cadre d'une révision partielle en cours le Canton veut clarifier les bases légales destinées à prendre en compte le risque sismique pour l'ensemble des ouvrages soumis à autorisation de construire. Cette révision partielle, acceptée en deuxième lecture au Parlement valaisan va déboucher sur la mise en œuvre rapide d'un règlement d'application. Comme pour l'Etat de Vaud, cette révision fixe la notion d'ingénieur qualifié et inscrit de manière explicite la base normative dans le texte de loi. Les mesures engagées par le canton sont présentées dans [Rey-Bellet 2001].

Jusqu'à aujourd'hui, le Canton pouvait intervenir au niveau de l'attribution du permis de construire et du permis d'habiter en se fondant sur les articles présentés aux paragraphes suivants.

Le but de la législation cantonale est donné à l'article premier où il est fait explicitement référence à la sécurité publique: « *La présente loi règle de manière uniforme la réalisation, la transformation, la démolition, la reconstruction ainsi que l'entretien des constructions et installations et veille notamment à ce que ces dernières respectent les exigences relatives à la santé publique, à la sécurité publique, à la protection de l'environnement et garantissent la qualité du milieu bâti et de son environnement.* ». L'article 27 de cette même loi traite de la sécurité des ouvrages: « ¹ *Les constructions et installations doivent être exécutées selon les règles reconnues de l'architecture. Elles doivent être conformes aux exigences en matière de police du feu, de la santé et du commerce.* ² *Les constructions et installations ne doivent pas porter atteinte à la sécurité et à la santé des personnes ou à la propriété de tiers.* ³ *Les maîtres de l'ouvrage ou leurs mandataires sont responsables du respect des prescriptions et des règles en matière de construction.* » La loi fixe également la procédure d'attribution d'autorisation de construire et les peines encourues par les contrevenants. Elle autorise l'autorité compétente à prendre les dispositions nécessaires pour une mise en conformité de l'ouvrage (Art. 51 LCC). L'octroi du permis d'habiter est réglé à l'article 59 de l'Ordonnance sur les constructions et stipule qu'il peut être refusé en cas de danger pour la sécurité publique: « ¹ *Les constructions reconnues conformes à l'autorisation de construire et aux conditions et charges liées à cette autorisation, ne peuvent être occupées ou exploitées avant l'établissement d'un permis d'habiter ou d'exploiter.* » [Rouiller 2003b].

Règlements communaux de construction

Aucune implication directe n'est actuellement parvenue jusqu'au niveau communal vaudois. Par contre, dans une note circulaire adressée aux communes en début d'année 2003, le Géologue cantonal demande dorénavant de tenir compte du risque sismique par le biais d'un article type destiné à réglementer la construction dans les périmètres exposés aux dangers géologiques et hydrologiques. En particulier un paragraphe est consacré au danger sismique [Rouiller 2003a]. «*La carte d'aléa sismique de la Suisse indique que l'ensemble du canton est exposé à un danger sismique moyen ou élevé. La présence de terrains meubles peut encore augmenter le degré de danger. Partout où elle existe, la carte de microzonage sismique régit le mode de construction parasismique. Pour toute nouvelle construction - ou transformation visant à agrandir la surface habitable d'un bâtiment existant - les normes SIA 260 et suivantes sont applicables. Pour les bâtiments d'une hauteur égale ou supérieure à deux niveaux sur rez (habitat, bureaux, halles de travail industriel, etc.), le dimensionnement et les plans de l'ouvrage seront établis ou contrôlés par un ingénieur qualifié et transmis à l'autorité compétente en matière d'autorisation d'habiter. Pour les bâtiments LIFELINE (hôpitaux, centres névralgiques, locaux de pompiers / ambulances / hélicoptères) et ceux à vocation publique (écoles, piscines, stades, salles de spectacles, surfaces commerciales, installations soumises à l'OPAM) un microzonage sismique fixera le spectre d'accélération adéquat. Le dimensionnement et les plans de l'ouvrage à protéger seront soumis à l'approbation de l'autorité cantonale compétente.* ». La nouvelle législation en définissant la notion d'ingénieur qualifié va permettre de garantir, par un contrôle de l'autorité cantonale compétente, la bonne exécution des ouvrages concentrant les risques.

Qu'en est-il des bâtiments existants ?

Les bâtiments existants sont soumis aux mêmes contraintes législatives lors de modification ou de la transformation de leur structure porteuse ou la modification de leur surface habitable. On ne peut cependant traiter cette problématique de la même manière car la mise à niveau aux exigences des nouvelles normes de bâtiments anciens peut s'avérer très onéreuse et par conséquent non proportionnée [Badoux 2003]. C'est ainsi que c'est développé le concept de gestion orientée objectifs [Pellissier 2003], appelé encore «Consequence-Based Management» [Abrams 2002] [Abrams 2003], qui postule d'intervenir en considérant les objectifs, parfois contradictoires, de chacun des acteurs entrant dans le processus décisionnel.

Approche orientée risque et détermination des priorités

Seul une réflexion orientée risque permet d'appréhender la bonne allocation des ressources financières à disposition pour la gestion du parc immobilier existant. Il s'agit maintenant de déterminer quel est le niveau acceptable pour la société et de prendre des mesures proportionnées pour l'abaisser le cas échéant. Par mesures on entend aussi bien des mesures techniques de renforcement que des mesures non techniques, comme par exemple une assurance ou encore un changement d'affectation d'un ouvrage. La figure E3. représente une matrice de risque classique, couplant en abscisse la gravité et en ordonnée la fréquence, d'un bâtiment pour lequel on propose une mesure d'assurance.

Cette figure montre les effets sur le profil de risque d'une mesure d'assurance avec une franchise de 10%. Partant d'une situation initiale de risque inacceptable pour les événements rares provoquant de grandes pertes de valeurs économiques on peut, grâce au remboursement de l'assurance, diminuer les conséquences économiques et passer dans le domaine acceptable.

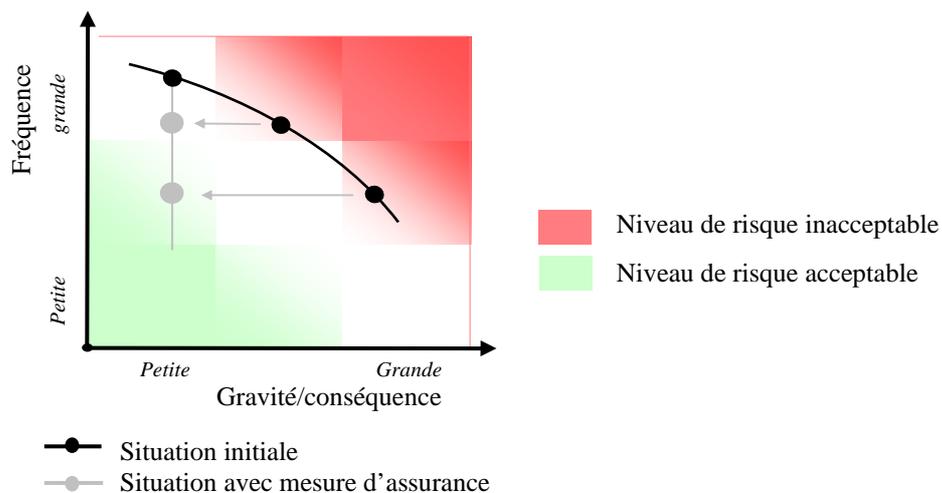


Fig. E3 – Matrice de risque pour la valeur économique avec l'effet d'une mesure de transfert du risque économique sur le profil de risque initial d'un bâtiment

On remarque, pour les événements ayant une fréquence plus grande mais dont les conséquences sont plus petites, que l'effet de la franchise ne permet pas de modifier la situation initiale. Ce type de mesure d'assurance n'a cependant aucune incidence sur la valeur humaine.

Les mesures prises pour les constructions existantes par la Confédération

Comme discuté plus haut, la Confédération a pris des mesures également pour les bâtiments existants. Elles sont ici brièvement énoncées [OFEG 2001]:

- Mesure 2: Contrôler soigneusement les projets d'assainissement parasismique
- Mesure 3: Dresser l'inventaire des constructions existantes
- Mesure 4: Etablir le danger affectant les biens culturels

Une précaution proportionnée

Le processus de gestion du risque sismique implique de nombreux acteurs aux attentes, attitudes et intérêts divers. La complexité est ici augmentée du fait du caractère collectif que ce risque fait encourir à toute une population. On doit également tenir compte de ce qu'on appelle le tiers absent, c'est-à-dire les générations futures. Il faut donc appliquer le principe dit de précaution dans le mode de processus décisionnel. La gravité, voire l'irréversibilité, par exemple pour la vie humaine, des pertes et dommages attendus justifie l'engagement précoce d'actions de prévention, alors même que le risque envisagé n'est que potentiel ou même hypothétique.

Le principe de précaution se fonde toujours sur les deux principes contradictoires suivants: la prise en charge par anticipation de risques potentiels et la proportionnalité des mesures de précaution à mettre en œuvre. Ainsi pour justifier un investissement lourd de renforcement d'un immeuble existant, il faut qu'il se dégage clairement un intérêt public prépondérant. Cela peut être le fait de cas rares, comme par exemple pour des hôpitaux ou une centrale

d'intervention de secours. La proportionnalité quant à elle se traite au cas par cas à l'aide du cadre systématique formalisé dans cette recherche.

E2. LE RÔLE DE L'ÉTAT

Afin d'examiner les instruments de politique publique à disposition des différents niveaux constitutionnels, Confédération, cantons et communes, une méthode dite propositionnelle est proposée. Cette méthode [Hugger 1983] établit les causes exhaustives du comportement inadéquat telles que les objectifs soient atteints. Ces causes sont ensuite niées afin de chercher des solutions. Cette méthode permet de mettre en évidence rapidement les limites de l'intervention publique.

Cette méthode a été appliquée à la problématique de la gestion du risque sismique en distinguant dans un premier temps les aspects concernant les nouvelles constructions, puis les constructions existantes. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau E1 pour les nouvelles constructions, respectivement dans le tableau E2 pour les constructions existantes. Ces deux tableaux tentent également d'identifier les acteurs concernés par les solutions envisageables.

	Proposition	Négation	Solution
Aléa	On ne connaît pas bien l'aléa régional	On connaît bien l'aléa régional	-Recherche complémentaires, par exemple au Service SED ^{(1) (2c)}
	On ne connaît pas bien l'aléa local (amplification liée à l'effet de site)	On connaît bien l'aléa local	-Fourniture de cartes indicatives de micro-zonage au 1 : 25'000 ^{(1) (2c)} -micro-zonage spectral ^{(1) (2c) (3)}
Vulnérabilité	Les normes de construction ne sont pas appliquées	Les normes de construction sont appliquées	-Imposer l'application par contrôle ^(2a)
	Construire parasismique coûte plus cher	Construire parasismique ne coûte pas plus cher	-Former les professionnels de la profession ^{(1) (2c) (3)} -Subventionner le surcoût ^(2b)
	La maçonnerie n'a pas un comportement ductile	La maçonnerie a un comportement ductile	-Information auprès des fabricants ^{(1) (2c) (3)} -Utilisation de la maçonnerie armée ^{(1) (2c) (3)}
	Le béton armé n'a pas un comportement suffisamment ductile	Le béton armé a un comportement suffisamment ductile	-Mise à disposition des entrepreneurs d'acier de classe de ductilité C ^{(1) (2c) (3)} -Subventionnement de la plus-value ^{(1) (2c) (3)}

	Proposition	Négation	Solution
Valeur	La valeur économique de la construction n'est pas connue	La valeur économique de la construction est connue	-Expertise ⁽¹⁾
	La valeur humaine de la construction n'est pas connue	La valeur humaine de la construction est connue	-Expertise ⁽¹⁾
	Les autres valeurs (environnementale, historique,...) ne sont pas bien connues	Les autres valeurs (environnementale, historique,...) sont bien connues	-Expertise ⁽¹⁾
	Les effets indirects en cas de ruine ne sont pas connus	Les effets indirects en cas de ruine sont connus	-Expertise ⁽¹⁾
	La fonction (utilisation) n'est pas clairement identifiée	La fonction (utilisation) est clairement identifiée	-Expertise ⁽¹⁾
Contexte	Les normes de construction ne sont pas appliquées	Les normes de construction sont appliquées	-Contrôle de conformité ^{(2a) (3)} -Base légale suffisante ^{(1) (2a)} -Formation des professionnels ^{(1) (2c)}
	Le contexte légal est peu clair	Le contexte légal est clair	-Effort de clarification ⁽¹⁾
	Les constructions ne sont pas assurées systématiquement	Les constructions sont assurées systématiquement	-Mise en place d'un système d'assurances obligatoires ^(2a) -Mise en place d'un système d'assurances mutualisé ^(2a)
	Le séisme est du ressort de la Confédération	Le séisme est du ressort des cantons	-Modification de la Constitution fédérale ^{(1) (2a)}

⁽¹⁾ du ressort des spécialistes (ingénieurs, sismologues, architectes, juristes,...)

⁽²⁾ du ressort de l'état

^(2a) de type procédurier ou légaliste

^(2b) par subventionnement direct ou indirect

^(2c) par encouragement

⁽³⁾ du ressort des propriétaires

⁽⁴⁾ du ressort de l'industrie

Tableau E1 – Méthode propositionnelle appliquée aux nouvelles constructions

	Proposition	Négation	Solution
Aléa	On ne connaît pas bien l'aléa régional	On connaît bien l'aléa régional	-Recherche complémentaires, par exemple au Service SED ^{(1) (2c)}
	On ne connaît pas bien l'aléa local (amplification liée à l'effet de site)	On connaît bien l'aléa local	-Informations indicatives quant à l'effet de site ^{(1) (2c)} -micro-zonage spectral ^{(1) (2c) (3)}
Vulnérabilité	On n'arrive pas à déterminer précisément les modes de vibrations propres des constructions	On arrive à déterminer précisément les modes de vibrations propres des constructions	-Méthodes de calcul avancées (p.ex. formule du quotient de Rayleigh) ⁽¹⁾ -Mesures in situ ⁽¹⁾
	On n'arrive pas à déterminer précisément les sollicitations sismiques sur les constructions	On arrive à déterminer précisément les sollicitations sismiques sur les constructions	-Méthodes de calcul avancées (p. ex. méthode du spectre de réponse) ⁽¹⁾
	On ne connaît pas précisément la résistance des constructions	On connaît précisément la résistance des constructions	-Méthodes de calcul avancées (p. ex. méthodes basées sur les déformations) ⁽¹⁾

	Proposition	Négation	Solution
Valeur	La valeur économique de la construction n'est pas connue	La valeur économique de la construction est connue	-Expertise ⁽¹⁾
	La valeur humaine de la construction n'est pas connue	La valeur humaine de la construction est connue	-Expertise ⁽¹⁾
	Les autres valeurs (environnementale, historique,...) ne sont pas bien connues	Les autres valeurs (environnementale, historique,...) sont bien connues	-Expertise ⁽¹⁾
	Les effets indirects en cas de ruine ne sont pas connus	Les effets indirects en cas de ruine sont connus	-Expertise ⁽¹⁾
	La fonction (utilisation) n'est pas clairement identifiée	La fonction (utilisation) est clairement identifiée	-Expertise ⁽¹⁾
Contexte	Les normes de construction ne sont pas appliquées	Les normes de construction sont appliquées	-Contrôle de conformité ^{(2a) (3)} -Base légale suffisante ^{(1) (2a)} -Formation des professionnels ^{(1) (2c)}
	Le contexte légal est peu clair	Le contexte légal est clair	-Effort de clarification ⁽¹⁾
	Les constructions ne sont pas assurées systématiquement	Les constructions sont assurées systématiquement	-Mise en place d'un système d'assurances obligatoires ^(2a) -Mise en place d'un système d'assurances mutualisé
	Le séisme est du ressort de la Confédération	Le séisme est du ressort des cantons	-Modification de la Constitution fédérale ^{(1) (2a)}
	Le niveau de sécurité exigé par les normes n'est pas garantie	Le niveau de sécurité exigé par les normes est garantie	-Mise en conformité technique (retrofitting) ^{(1) (2b) (3)}
	Le niveau de risque acceptable n'est pas bien connu	Le niveau de risque acceptable est bien connu	-Expertise ⁽¹⁾ -Mise à disposition de recommandations pour une évaluation rapide ^{(1) (2c)}
	La détermination de la proportionnalité n'est pas claire en cas de non-conformité aux exigences normatives	La détermination de la proportionnalité est claire en cas de non-conformité aux exigences normatives	-Mise à disposition de recommandations ad hoc ^{(1) (2c)}

⁽ⁱ⁾ *idem* tableau E1

Tableau E2 – Méthode propositionnelle appliquée aux constructions existantes

Ces différents instruments de politique publique sont ensuite évalués en respectant les principes légistiques usuelles [<http://webdroit.unige.ch>] brièvement rappelés ci-après:

- Principe de subsidiarité: Ce principe veut que si plusieurs moyens d'atteindre un objectif existent, il faut choisir le moins contraignant. Il vise à l'optimisation des moyens par rapport aux objectifs ainsi qu'à une minimisation des nuisances.
- Principe d'adéquation: Selon le principe de l'interdiction de l'arbitraire voulue par la Constitution Fédérale (art. 5. Cst), une adéquation entre les moyens et les objectifs doit être assurée. Il est néanmoins dans notre cas difficile de posséder des informations suffisantes pour apprécier cette adéquation a priori.
- Principe de synergie: Le recours à plusieurs mesures de politique publique doit s'attacher à ce qu'elles ne se contrecarrent pas. En plus de la garantie de cette non contradiction, l'optimisation de la combinaison des mesures doit être un soucis constant. Pour ce faire, une connaissance détaillée des différentes mesures à disposition est nécessaire, ainsi que l'efficacité de leur conjonction.

Le cadre de gestion développé dans cette recherche permet au législateur de fonder ses choix de manière objective et représente donc un support d'aide intéressant. Evidemment cette procédure est reproductible pour d'autres situations et d'autres contextes.

E3. SYNTHÈSE

Les bases légales, bien que dispersées, sont suffisantes pour faire appliquer les nouvelles prescriptions en matière sismique pour les nouvelles constructions. Pour les bâtiments existants, les mesures à prendre dépendent du risque effectif de l'objet étudié et de la proportionnalité des mesures à mettre en œuvre. Un travail de clarification est actuellement en cours, tant au niveau fédéral qu'aux niveaux cantonaux. Deux situations cantonales sont brièvement présentées: l'Etat de Vaud et La République et Canton du Valais.

Les responsabilités sont également clairement définies après un tremblement de terre en cas d'atteintes au patrimoine ou à l'intégrité humaine. Cela est identique même si aucun tremblement de terre ne survient et qu'un dommage existe alors que les règles de l'art en la matière n'ont pas été respectées.

Finalement une démarche permettant aux acteurs étatiques d'établir leurs positions dans le contexte réglementaire présenté initialement est présentée.

CURRICULUM VITAE

VINCENT PELLISSIER

Adresse 20, Avenue du Petit-Chasseur
1950 Sion, Suisse
Date de naissance 22 janvier 1974
Etat civil marié, trois enfants
Coordonnées tél. +41 (0)27 321 22 19,
mobile. +41 (0)76 488 20 36
email. vincent.pellissier@epfl.ch

FORMATION

Certificat ou diplôme	Ecole ou institution	Durée
<i>Maturité Type E Socio-économique</i>	Lycée-Collège des Creusets, Sion	5 ans
<i>Diplôme d'ingénieur en génie civil</i>	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	4.5 ans
<i>Diplôme postgradué de spécialiste en gestion des risques d'origine technique</i>	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Université de Saint-Gall Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	18 mois
<i>Ingénieur de sécurité</i>	Conformément à l'art. 11a de l'Ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles	2 mois

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

Poste	Employeur	Date
<i>Associate Researcher</i>	Mid-America Earthquake Center, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA	2002
<i>Assistant doctorant</i>	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Laboratoire de construction en béton (IS-BETON)	2001-2003
<i>Chef de projet: Risk Management</i>	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Chaire de logistique, économie et management (LEM)	Depuis 2004
<i>Ingénieur associé</i>	Bureau d'Ingénieurs Pellissier & de Torrenté, Sion	Depuis 2001
<i>Secrétaire de groupe de sécurité</i>	m2 – Réalisation du métro Nord lausannois	Depuis 2004