



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

**VULNÉRABILITÉ ET RISQUE SISMIQUE
DE LA VILLE D'AIGLE**

**2^{ème} PARTIE
ESTIMATION DU RISQUE SISMIQUE**

Vincent PELLISSIER

Prof. Dr. Marc BADOUX

Mars 2003

INSTITUT DES STRUCTURES
LABORATOIRE DE CONSTRUCTION EN BÉTON

**FACULTÉ ENVIRONNEMENT
NATUREL ARCHITECTURAL ET
CONSTRUIT**



« Séisme de Lausanne », 1er mars 1584 [Delacrétaz 1982]

« Le risque sismique est un problème qui concerne la société plutôt que l'individu. »

Dr. M. Koller, Président de la Société Suisse de Génie Parasismique

Impressum

© Mars 2003

**Ecole Polytechnique
Fédérale, Lausanne**

**Etablissement Cantonal
Vaudois d'Assurance, Pully**

Titre
Estimation du risque sismique

Auteurs
Vincent PELLISSIER
Prof. Dr. Marc BADOUX

Adresse
EPFL – IS.BETON
ENAC
CH-1015 Ecublens
Internet <http://is-beton.epfl.ch>
Téléphone +41 21 693 28 86
Téléfax +41 21 693 58 84

Table des matières

Résumé.....	5
Zusammenfassung	7
Remerciements.....	8
I. Introduction	9
1. Buts et objectifs	9
2. Projet pilote de la ville d'Aigle.....	9
3. Définition du risque sismique.....	10
4. Méthodologie générale	10
II. Informations de base	13
1. Evénements historiques	13
2. Aléa régional.....	13
3. Effets de sites et interactions sols - structure	14
4. Vulnérabilité du bâti	15
4.1. Inventaire sismique d'Aigle.....	15
4.2. Courbes de vulnérabilité du bâti	16
III. Pertes considérées.....	19
1. Pertes directes	19
1.1. Pertes humaines	19
1.2. Pertes immobilières.....	20
1.3. Pertes mobilières.....	21
1.4. Autres pertes directes.....	21
2. Autres pertes	21
IV. Quantification des pertes	23
1. Endommagement du bâti	23
2. Pertes de vies humaines	23
3. Pertes immobilières.....	24
4. Pertes mobilières.....	25
4.1. Mobilier de ménage	25
4.2. Mobilier "agricole"	26
4.3. Mobilier "professionnel et industriel"	26
V. Quantification du risque.....	29
1. Principe de détermination	29
2. Risque humain	29
3. Risque immobilier.....	30
4. Risque mobilier.....	30

VI. Détermination du sinistre maximum possible	33
1. Définition du sinistre maximum possible	33
2. Variation des paramètres du modèle d'estimation	33
3. Pertes maximales	33
VII. Conclusions	35
Glossaire	37
Bibliographie	39
Annexes	41
Annexe 1 : Aigle - Conditions géologique locales	
Annexe 2 : Sismicité	
Annexe 3 : Inventaire sismique	
Annexe 4 : Courbes d'endommagement	
Annexe 5 : Eléments de probabilités	

Résumé

Cette étude aborde le risque sismique d'Aigle, petite ville représentative des Alpes suisses. Le travail présenté dans ce document estime le risque de pertes humaines et financières liées à l'effet des tremblements de terre sur les bâtiments. Un modèle d'estimation a été développé à cette fin avec les informations de bases portant sur les paramètres constitutifs suivants :

- **La vulnérabilité.** On l'évalue à l'aide d'un inventaire sismique de la ville d'Aigle présenté dans un rapport précédent [Brennet 2002].
- **L'aléa local.** On évalue ses caractéristiques (intensités et périodes de retour) sur la base des connaissances sismologiques actuelles. Le manque de précision de l'information disponible relative à l'effet de site pour la région étudiée nous a conduit à effectuer une campagne de mesures des fréquences propres du sol pour déterminer l'influence du site sur les structures.
- **Les valeurs exposées au risque.** Il a été pris en considération les personnes pouvant subir potentiellement un séisme ainsi que les immeubles et le mobilier assurés auprès de l'établissement cantonal vaudois d'assurance, ci-après l'ECA.

Pour estimer les pertes consécutives aux dommages affectant les bâtiments, des courbes « d'endommagement » ont été générées. Elles décrivent la relation entre le degré de dommages des bâtiments et la perte de valeur.

Les pertes potentielles ont ensuite été estimées pour des événements sismiques de différentes intensités MSK. Les principaux résultats sont résumés ci-dessous.

- Des séismes d'intensité $I_{MSK}=VI$ ou plus petits, ne provoquent pas de mort et pas de dommage significatif aux valeurs considérées.
- Le nombre de morts pour un séisme d'intensité $I_{MSK}=VII$, d'un temps de retour moyen de 475 ans, est estimé entre 0 et 9, avec une valeur moyenne de 4. Les pertes immobilières potentielles sont estimées entre 61 et 103 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 82 millions de francs. Les pertes mobilières potentielles, quant à elles, sont estimées entre 17 et 27 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 23 millions de francs. Le nombre de blessés nécessitant une hospitalisation s'élève, pour la valeur moyenne, à 7.
- Pour un séisme d'intensité $I_{MSK}=VIII$, dont le temps de retour moyen est de 2'200 ans, on obtient un nombre estimé se situant entre 12 et 31 morts pour une valeur moyenne de 19 morts. Les pertes immobilières potentielles sont estimées entre 203 et 301 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 252 millions de francs. Les pertes mobilières potentielles quant à elles sont estimées entre 60 et 87 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 74 millions de francs. Le nombre de blessés nécessitant une hospitalisation, s'élève pour la valeur moyenne, à 54.
- Un séisme d'intensité $I_{MSK}=IX$, dont le temps de retour moyen est de 6'000 ans, donc très peu probable pour la région aiglone, fournit une estimation comprise entre 43 et 72 morts pour une valeur moyenne de 57 morts. Les pertes immobilières potentielles sont estimées entre 442 et 606 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 524 millions de francs. Les pertes mobilières potentielles quant à elles sont estimées entre 133 et 183 millions de francs pour une valeur moyenne s'élevant à 157 millions de francs. Le nombre de blessés nécessitant une hospitalisation, s'élève pour la valeur moyenne, à 61.

Différentes constatations ont pu être faites. Elles découlent directement du modèle d'estimation mis en place. Ainsi, les pertes potentielles se concentrent dans les bâtiments en maçonnerie traditionnelle de la zone du centre-ville en habitations contiguës. Pour un scénario d'intensité $I_{MSK}=VII$, environ 65% des morts sont localisés dans cette zone.

Le risque est ensuite estimé en combinant les scénarios avec les périodes de retour. On obtient une estimation de 0.25 mort en terme annualisé pour 100'000 habitants. Soit environ 2 à 3 morts par siècle pour la ville d'Aigle. En ce qui concerne le risque économique, on obtient une estimation de la perte annualisée potentielle moyenne de Frs. 330'000 pour un portefeuille immobilier assuré d'environ 1.7 milliard de francs. Cela représente une perte annualisée de 19 centimes pour 1'000 Frs. de valeurs immobilières assurées. Pour les valeurs mobilières, la perte annualisée s'élève à Frs. 97'000 pour un portefeuille assuré de 695 millions de Frs., soit environ 14 centimes par millier de francs assuré.

Le maximum de perte possible, appelé sinistre maximum possible, correspond au pire scénario envisageable. Pour ce scénario, on chiffre le nombre de morts à environ 220. Les pertes potentielles immobilières s'élèveraient quant à elles à environ 750 millions de francs, soit près de la moitié de la valeur du portefeuille assuré, et les pertes potentielles mobilières à environ 250 millions de francs.

Il existe de grandes incertitudes sur l'estimation faite dans ce travail. Des paramètres importants entrant dans le modèle ne sont qu'imparfaitement connus. On trouve en premier lieu l'aléa sismique. Une autre incertitude importante réside dans l'effet de site possible provoqué par les conditions géologiques locales. Pour diminuer cette incertitude, une connaissance accrue des sols rencontrés est nécessaire. Pour cette raison, une campagne de mesures a été effectuée pour la région d'étude. Une autre incertitude porte sur la vulnérabilité du bâti existant. Cette variable est encore mal connue en Suisse. Des connaissances accrues dans ce domaine apparaissent donc comme essentielles pour une meilleure estimation, principalement pour les bâtiments en maçonnerie traditionnelle. Ces bâtiments sont les plus vulnérables et représentent la plus grande partie du parc de bâtiments helvétiques, et donc du risque sismique total. C'est en outre sur ce paramètre que l'ingénieur, par la mise en place de mesures techniques, a un moyen d'action pour la mitigation du risque.

Zusammenfassung

In dieser Studie wird die Erdbebengefährdung einer Kleinstadt untersucht. Sie kann als repräsentativ für den Schweizer Alpenraum angesehen werden. Mit der hier vorliegenden Arbeit wird das Risiko für menschliche und finanzielle Verluste geschätzt, die sich aufgrund der Auswirkung von Erdbeben auf Bauwerke ergeben. Hierzu wurde ein Abschätzungsmodell entwickelt, welches sich auf folgende grundlegende Parameter stützt:

- **Schadensempfindlichkeit.** Man bewertet sie mit Hilfe einer Erdbebenbestandsaufnahme der Stadt Aigle, wie sie im bereits vorliegenden Bericht durchgeführt wurde [Brennet 2002].
- **Örtliche Gefährdungsbilder.** Diese Eigenschaften (Intensität und Wiederkehrdauer) werden aufgrund der heutigen seismologischen Kenntnisse beurteilt. Der Mangel an präzisen Informationen bezüglich der örtlichen Bedingungen hat zur Anwendung eines einfachen homogenen Modells geführt. Aufgrund des grossen Einflusses dieses Parameters sind ergänzende Untersuchungen durchgeführt worden, um die bestehenden Unsicherheit zu verringern.
- **Dem Risiko ausgesetzte Werte.** Dies sind die Personen, die potentiell Opfer eines Erdbebenereignisses werden können, sowie auch Immobilien und Mobiliar, welches bei der kantonalen Gebäudeversicherung Waadt (ECA) versichert ist.

Um die Folgekosten von Schäden an Gebäuden abzuschätzen, wurden „Schadenskurven“ erstellt. Sie beschreiben die Beziehung zwischen dem Grad der Gebäudebeschädigung und dem Wertverlust.

Daraufhin wurden die potentiellen Verluste für Erdbebenereignisse mit verschiedenen seismischen Intensitäten MSK abgeschätzt. Die wichtigsten Ergebnisse sind folgend dargestellt:

- Erdbeben der Stärke $I_{MSK}=VI$ oder kleiner führen weder zu Todesfällen noch zu massgebenden Schäden an den betrachteten Objekten.
- Die Anzahl der Toten für ein Beben der Stärke $I_{MSK}=VII$, mit einer mittleren Wiederkehrdauer von 475 Jahren, wird zwischen 0 und 9 mit einem Mittelwert von 4 abgeschätzt. Die potentiellen Verluste bei Immobilien werden zwischen 61 und 103 Millionen Franken (Mittelwert 82 Millionen Franken) geschätzt. Die potenziellen Verluste beim Mobiliar werden mit 12 bis 27 Millionen Franken bei einem Mittelwert von 23 Mio. Franken abgeschätzt.
- Für ein Erdbeben der Stärke $I_{MSK}=VIII$, dessen mittlere Wiederkehrdauer 2'200 Jahre beträgt, erhält man eine geschätzte Anzahl von Toten die zwischen 17 und 31 (Mittelwert 19) liegt. Die potenziellen Immobilienschäden werden zwischen 203 und 301 Millionen Franken (Mittelwert 252 Mio.) geschätzt. Die potenziellen Verluste bei Mobiliar liegen schätzungsweise bei 60 bis 87 Millionen Franken, mit einem Mittelwert von 74 Millionen Franken.
- Ein Beben der Intensität $I_{MSK}=IX$, dessen mittlere Wiederkehrdauer bei 6000 Jahren liegt und somit sehr unwahrscheinlich für die Region Aigle ist, führt zu einer Abschätzung von 43 bis 72 Toten mit einem Mittelwert von 57 Toten. Die Verluste bei den Immobilien ergeben eine Abschätzung von 442 bis 606 Millionen Franken (Mittelwert 524 Mio.). Die Verluste beim Mobiliar lassen sich mit 133 bis 183 Millionen Franken abschätzen. Der Mittelwert beträgt hier 157 Millionen Franken.

Verschiedene Schlussfolgerungen sind gezogen werden. Diese leiten sich direkt von dem aufgestellten Modell ab: Die potenziellen Verluste konzentrieren sich auf die Gebäude aus traditionellem Mauerwerk im Bereich der Wohnviertel mit geschlossener Bebauung in der

Stadtmitte. Für ein Szenario der Stärke $I_{MSK}=VII$, ereignen sich 65% der Todesfälle in dieser Zone.

Das Risiko wird durch Kombination der Szenarien mit ihrer Wiederkehrdauer abgeschätzt. Man erhält eine Schätzung von 0.25 Toten pro Jahr für die 100'000 Bewohner. Das sind ungefähr 2 bis 3 Tote pro Jahrhundert für die Stadt. Bezüglich des wirtschaftlichen Risikos erhält man eine Schätzung für die potenziellen jährlichen Verluste von 330'000 Frs, für das versicherte Immobilienportfolio von rund 1.7 Milliarden Franken. Das stellt einen jährlichen Verlust von 19 Rappen pro 1'000 Franken versicherter Immobilienwerte dar. Für die Mobiliarwerte betragen die jährlichen Verluste 97'000 Franken für ein versichertes Portfolio von 695 Millionen Franken. Dies entspricht rund 14 Rappen pro 1'000 Franken Versicherungssumme.

Der maximale Verlust, genannt grösster möglicher Schadensfall, entspricht dem schlimmsten denkbaren Szenario. Für dieses Szenario beziffert man die Zahl der Toten auf 220. Die potentiellen Schäden an Gebäuden betragen 750 Millionen Franken, was fast der Hälfte des versicherten Portfoliowertes entspricht. Die Schäden am Mobiliar betragen ungefähr 250 Millionen Franken.

Es bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der in dieser Arbeit gemachten Schätzungen. Die Eingangsparameter des Modells sind nur unzureichend genau bekannt. Dies ergibt sich in erster Linie aus der Zufälligkeit von Erdbeben. Eine weitere grosse Unsicherheit ergibt sich aus den örtlichen geologischen Bedingungen. Um diese Unsicherheit zu verringern, ist eine genauere Kenntnis der Bodenbeschaffenheit nötig. Deshalb ist eine Messreihe für die Untersuchungsregion durchgeführt worden. Eine weitere Unsicherheit besteht bezüglich der Schadensempfindlichkeit der bestehenden Bauten. Dieser Parameter ist in der Schweiz noch wenig erforscht. Vertieftes Wissen in diesem Bereich erscheint folglich essenziell für eine bessere Abschätzung, insbesondere für die Bauwerke aus traditionellem Mauerwerk. Diese Gebäude sind sehr schadensempfindlich und stellen den grössten Anteil der Schweizer Gebäude und somit des Erdbebenrisikos dar. Es ist insbesondere dieser Parameter, der dem Ingenieur die Möglichkeit gibt, durch technische Massnahmen eine Verringerung des Risikos herbeizuführen.

Remerciements

Cette étude a été soutenue par l'ECA. Pilotée par le *Laboratoire de construction en béton* de l'EPFL, elle a bénéficié de la collaboration du *Service fédéral de l'eau et de la géologie*, en particulier de messieurs Blaise Duvernay et Florian Widmer ainsi que du directeur de la *Centrale pour la mitigation des séismes*, le Dr. Olivier Lateltin. Les auteurs remercient également les personnes sollicitées pour l'obtention des différentes informations utilisées pour la rédaction de ce document. En outre, ils relèvent le travail remarquable, sa lecture critique et les conseils de Monsieur Jean-Marc Lance, de l'ECA. Ils remercient également Messieurs Eckart Hars, Jörg Jungwirth, Sylvain Plumey et Michel Thomann, de l'*Institut des Structures*, ainsi que le Dr. Yannik Zufferey pour leur relecture et leurs corrections.

I. Introduction

1. Buts et objectifs

Ce travail aborde la quantification du risque sismique de la ville pilote d'Aigle, sur la base de l'inventaire sismique réalisé à l'EPFL-IS.BETON [Brennet 2002]. Il vise à fournir des informations utiles pour envisager une politique d'assurance en considérant la vulnérabilité des différentes catégories sismiques du patrimoine existant. Il s'inscrit dans le cadre d'un effort de développement d'un outil de gestion du risque sismique [Pellissier 2002][Pellissier 2004].

2. Projet pilote de la ville d'Aigle

Pour ce projet, la ville d'Aigle, située dans le canton de Vaud, a été choisie (Figure 1 et Annexe 1 : Aigle - Conditions géologiques locales). La Commune d'Aigle s'étend sur une superficie de 1'637 hectares et compte environ 7'500 habitants. Les bâtiments les plus anciens de la ville datent du XI^{ème} siècle. Les bâtiments de l'actuel centre-ville ont été construits entre les XV^{ème} et XIX^{ème} siècles.

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 MSK VII dans les calculs. Cela correspond à une accélération horizontale du sol de 0.10g [SIA 160 1989] (Annexe 2 : Sismicité). On signale ici qu'Aigle passe en zone IIIa, dans la nouvelle norme de la SIA [SWISSCODE 2003] en cours de rédaction. L'accélération horizontale du sol à considérer pour le calcul augmente donc de manière significative.

Sa taille, soit environ 1'500 bâtiments, permet une analyse visuelle de la totalité des bâtiments tout en proposant une grande variété de structures. Ce travail préliminaire est présenté dans un inventaire sismique de la ville [Brennet 2002]. Aigle est représentative par bien des aspects de nombreuses petites villes de Suisse. 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. Ce projet a permis de définir les éléments constitutifs du modèle d'estimation et de les tester par une application concrète.



Figure 1 Vue générale de la ville d'Aigle

3. Définition du risque sismique

La gestion du risque requiert en premier lieu sa quantification. Le **Risque** sismique **R** peut être défini comme une mesure probabilisée des impacts sur un système. Pour un site ou une région donnée, il représente l'espérance mathématique des pertes au cours d'une période de référence. Il peut se décomposer en trois paramètres :

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \times \mathbf{Vu} \times \mathbf{Va}$$

- **A** représente l'**Aléa** et est défini comme la probabilité d'occurrence d'un événement destructeur sur le site étudié. Évaluer l'aléa revient donc à calculer, en un site donné, la fonction de répartition des paramètres caractéristiques de l'événement [Rüttener 1995] [Sägesser 1978].
- **Vu** est la **Vulnérabilité** du système considéré. Elle décrit le degré d'endommagement pour les événements considérés. Dans ce projet, le système est le portefeuille des bâtiments de la Commune d'Aigle assurés auprès de l'ECA [ECA 2001], qui représente la quasi-totalité du parc immobilier de la ville. Cette vulnérabilité dépend des caractéristiques physiques et géométriques des bâtiments.
- **Va** est la **Valeur** exposée du système au risque considéré. Elle est de nature socio-économique. Dans cette étude, les valeurs sont les valeurs immobilières et mobilières assurées auprès de l'ECA, exprimées en pourcents de la valeur de remplacement, ainsi que la vie des occupants des bâtiments.

Le risque total est calculé par intégration comme la somme des risques des événements provoquant une perte de valeur.

4. Méthodologie générale

La démarche de travail, présentée schématiquement à la Figure 2, comprend les étapes suivantes :

1. Détermination de la sismicité régionale par identification des caractéristiques (intensité et période de retour) des séismes susceptibles de causer des dommages à Aigle.
2. A partir d'un modèle géotechnique sommaire, détermination d'un micro zonage rapide et validation par interviews. Une estimation de l'effet de site basée sur des mesures in situ a complété cette étape préliminaire. L'interaction entre le sol et les structures a aussi été considérée.
3. Evaluation de la vulnérabilité du bâti et des dommages prévisibles sur l'ensemble de la ville. Un inventaire par catégorisation des bâtiments en classes de vulnérabilité ainsi que leur répartition afin de les cartographier par zone sur l'ensemble de la ville a été effectué [Brennet 2002]. Une courbe de vulnérabilité a été affectée à chaque catégorie de bâtiments (taux de dommages en fonction de l'intensité des séismes).
4. Calcul des pertes potentielles 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 dans l'étape 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).

5. Estimation quantitative du risque à l'aide d'une approche partiellement probabiliste.

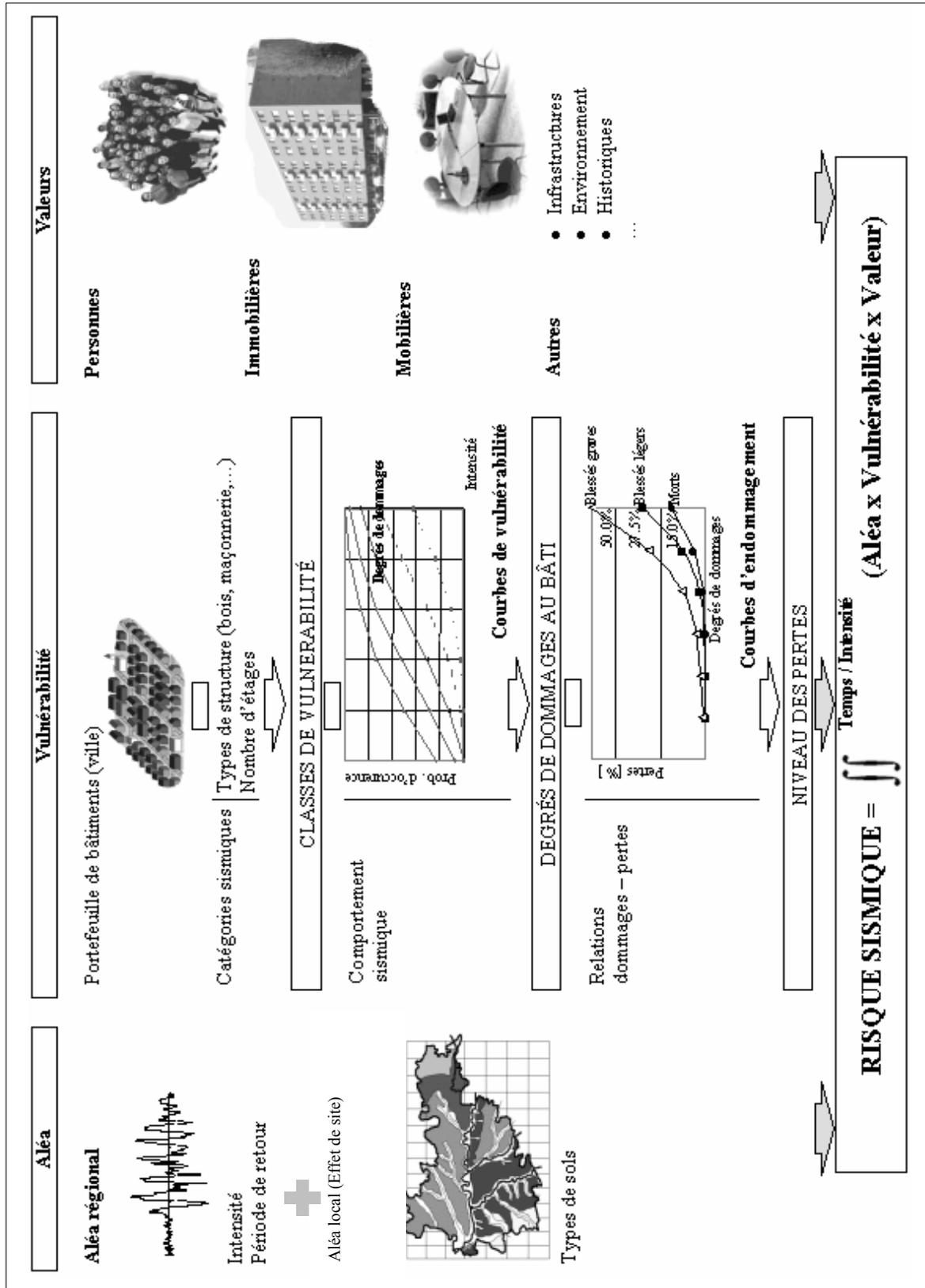


Figure 2 Résumé méthodologique

II. Informations de base

1. Evénements historiques

De par les mouvements tectoniques, la plaque Africaine et plus particulièrement la plaque Adriatique pousse en direction du Nord contre la plaque Eurasienne. Cette collision provoque des mouvements brusques le long des anciennes cassures de la croûte terrestre (failles). Ces mouvements provoquent la majorité des tremblements de terre que nous rencontrons dans notre pays. Le Tableau 1 présente les principaux événements historiques de Suisse. Il donne une estimation des pertes immobilières provoquées par ces séismes historiques s'ils avaient lieu aujourd'hui. Ces valeurs sont tirées d'une étude pour le pool suisse des assurances pour la couverture contre les tremblements de terre datant de 1988 [Schaad 1988].

L'étude précitée ne prend en compte que les dommages immobiliers et le nombre de morts. D'autres dommages (contenu des immeubles, pertes de production, dommages environnementaux,...) ne sont pas considérés. On évalue actuellement ces dommages, sur la base de l'expérience d'autres séismes importants récents, à l'aide d'un facteur multiplicateur pouvant atteindre plusieurs fois les dommages immobiliers. Les conséquences sociales, survenant à la suite d'un événement catastrophique, ne sont pas prises en compte.

Siècle	Date	Lieu	Dommages immobiliers [mia de Frs]	Morts
20 ^{ième}	1971	Glaris	0.03 – 0.16	-
	1946	Rawyl	Eboulements, dommages au barrage 0.43 – 1.90	20 – 40
19 ^{ième}	1881	Berne	0.25 – 1.25	30 – 50
	1855	Vallée de la Viège	0.58 – 8.72	200 – 400
18 ^{ième}	4 séismes d'ampleur semblable à celui de Viège (1855) : Buchs 1796, Altdorf 1774, Brig 1755 et Bregenz 1720.			
16 ^{ième}	1584 [Delacrétaz 1982]	Lausanne	Dommages légers	aucun
14 ^{ième}	1356	Bâle	13.39 – 47.13	1000 – 2000
6 ^{ième}	563 [Beres 2002]	Chablais valaisan	Villages détruits, éboulements, nombreux morts	

Tableau 1 Estimation des pertes de séismes historiques

A titre comparatif, 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 aiglonne. Le séisme d'Ombrie a eu lieu dans une région urbanisée comparable à celles rencontrées 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 à 90'000 bâtiments, principalement aux vieux édifices. Des bâtiments historiques importants ont été irrémédiablement endommagés, comme la basilique d'Assise. Les infrastructures ont été également touchées, comme le réseau électrique, routier ou ferroviaire. On estime à plus de deux milliards de francs le total des pertes économiques consécutives. De cette somme, seuls environ 5% étaient couverts par une assurance [Wenk 1997].

2. Aléa régional

On passe dans ce paragraphe en revue les principales sources actuelles ayant trait à l'aléa sismique en Suisse. Il est explicité plus en détail à l'annexe 2 : Sismicité. Une étude datant de

1978 [Sägesser 1978] donne des valeurs indicatives pour le séisme en Suisse. Les données historiques nous apprennent qu'un séisme d'intensité MSK VII a lieu statistiquement tous les cent ans dans notre pays. Qui plus est, le tremblement de terre de Bâle de 1356, d'intensité IX, est le plus important connu à ce jour pour la région et sa répétition est possible à tout moment [Giardini 2001].

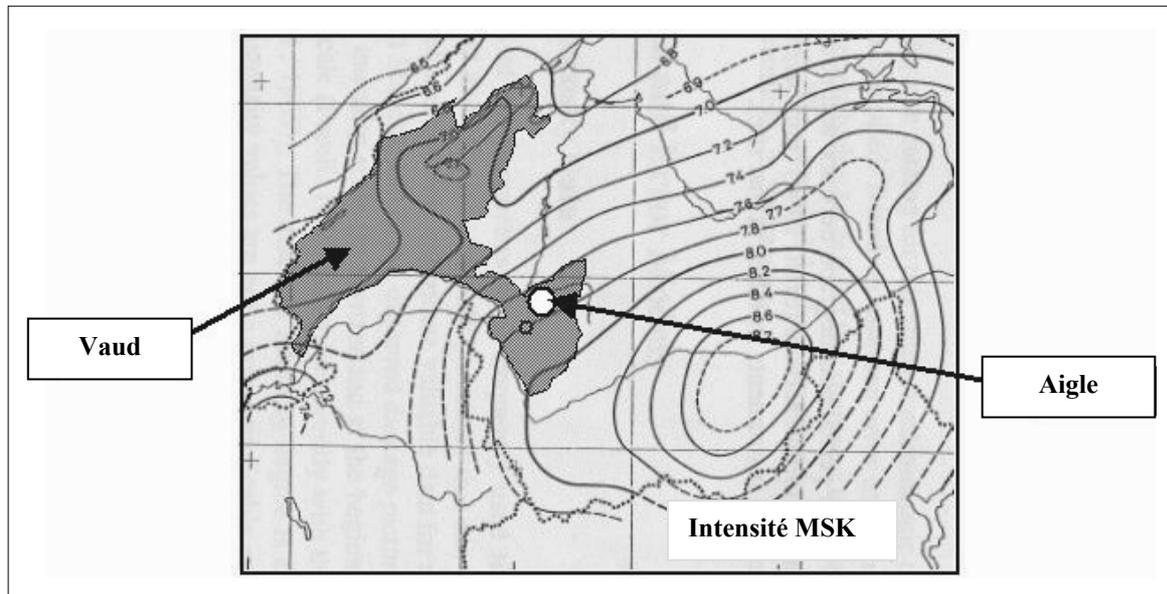


Figure 3 Sismicité pour un temps de retour de 1'000 ans [Sägesser 1978]

Une étude 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.

La sismicité moyenne appliquée pour la région d'Aigle est donnée au Tableau 2. Elle découle directement des études précitées. Pour la détermination du risque, l'étude [Rüttener 1995] a été privilégiée en considérant l'incertitude.

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

Tableau 2 Intensités vs Périodes de retour [Rüttener 1995]

3. Effets de sites et interactions sols - structure

Dans un premier temps, en l'absence d'une étude de micro zonage locale existante permettant d'évaluer plus précisément les effets de sites, on s'est basé sur les informations présentées à l'annexe 1 : Aigle - Conditions locales. Ces informations reposent sur les 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.

Pour la région étudiée, on rencontre les deux types de sols classés par L'Eurocode 8 [Eurocode 8 1997] comme suit :

- A : rocher + moraine consolidée
- B : cône alluvionnaire + sol de plaine

Cette approche préliminaire a donné à penser 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. De plus, l'effet 2D provoqué par la géométrie de la vallée du Rhône pourrait piéger les ondes sismiques et amplifier encore l'effet de site. Sur la base de l'expérience de tremblements de terre récents, on peut raisonnablement s'attendre à une augmentation de l'intensité MSK [Koller 2002] pour cette zone. Non seulement les amplitudes sont plus grandes, mais on a aussi plus de cycles. L'expérience montre que l'effet de site est plus important pour des séismes d'intensité faible à moyenne, ce qui est significatif pour Aigle puisque l'aléa est dominé par des séismes d'intensité VII et VIII. Pour notre étude, la quasi-totalité des bâtiments se trouve sur des sols mous.

Afin de confirmer cette hypothèse, une investigation complémentaire a été entreprise à l'aide de mesures in situ de fréquences propres [Duvernay 2003]. Elle a permis de valider en partie nos premières hypothèses. Deux zones ont été définies avec, pour une d'entre elle, une amplification homogène de 0.5 degré d'intensité MSK et aucune amplification pour l'autre lors du calcul du SRE. De plus, grâce aux mesures de fréquences propres des bâtiments et des différents sites de la ville, on a pu prendre en considération les catégories de bâtiments pouvant entrer en résonance. On a pu ainsi considérer chaque bâtiment individuellement, en couplant les informations sur l'amplification liée à l'effet de site et l'interaction sol – structure. On explicite plus en détail la démarche adoptée à l'Annexe 1 : Aigle – Conditions géologiques locales.

4. Vulnérabilité du bâti

4.1. Inventaire sismique d'Aigle

L'annexe 3 : Inventaire sismique montre la répartition des bâtiments définie dans l'inventaire sismique [Brennet 2002]. Cette inventaire repose sur l'approche développée dans l'EMS-98 [EMS 1998], et en particulier sur la répartition des bâtiments en 6 classes de vulnérabilité, allant de A à F, A étant la classe la plus vulnérable et F la moins vulnérable. L'allocation des bâtiments dans les différentes classes de vulnérabilité est fonction du type de structure et du nombre d'étages du bâtiment considéré. Certaines conclusions concernant le bâti de la ville d'Aigle sont :

- La majorité des bâtiments des classes les plus vulnérables (A et B) sont des bâtiments résidentiels.
- La grande majorité des bâtiments des catégories A (99%) et B (84%) sont des bâtiments en maçonnerie traditionnelle de moellons.
- Environ 70% des bâtiments en béton armé (murs et cadres) appartiennent aux classes de vulnérabilité C et D.

Une partie importante des bâtiments est susceptible de subir des dommages de degré 4 ou 5 et donc de s'effondrer pour des séismes d'intensité VIII ou plus grand. Il est aussi utile de connaître la distribution des classes de vulnérabilité pour chaque zone cadastrale. La Figure 4, ci-dessous, montre deux exemples de la variabilité de la vulnérabilité d'une zone à l'autre. La comparaison des 6 zones montre que la vulnérabilité sismique du bâti d'Aigle est principalement concentrée dans le centre-ville, i.e. les bâtiments contigus et non contigus du centre ville. Le centre-ville comprend le plus grand nombre de bâtiments et ceux ayant la plus grande vulnérabilité. Ceci implique que la majorité des dommages directement liés au bâti sera concentrée dans le centre-ville.

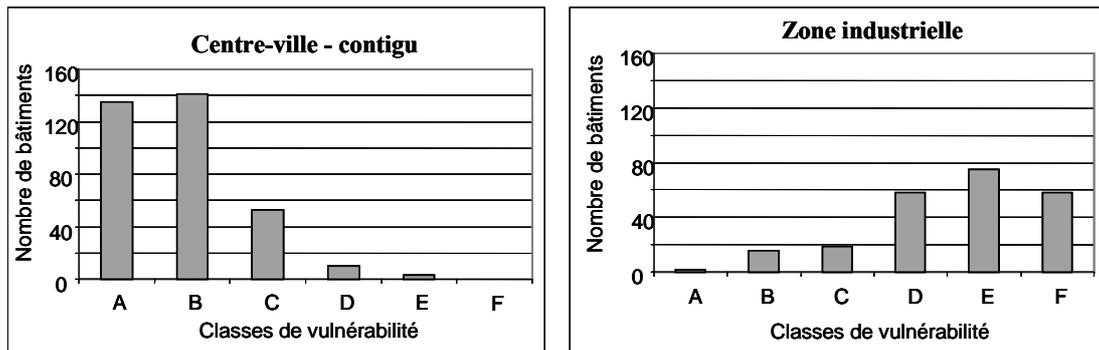


Figure 4 Répartition des bâtiments dans les différentes classes de vulnérabilité pour le centre-ville et la zone industrielle [Brennet 2002]

4.2. Courbes de vulnérabilité 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 2002], il est possible de développer une estimation d'ensemble des dommages pour le bâti de la ville pour différents événements sismiques. Cette courbe est montrée pour une vulnérabilité moyenne à la Figure 5, ci-après.

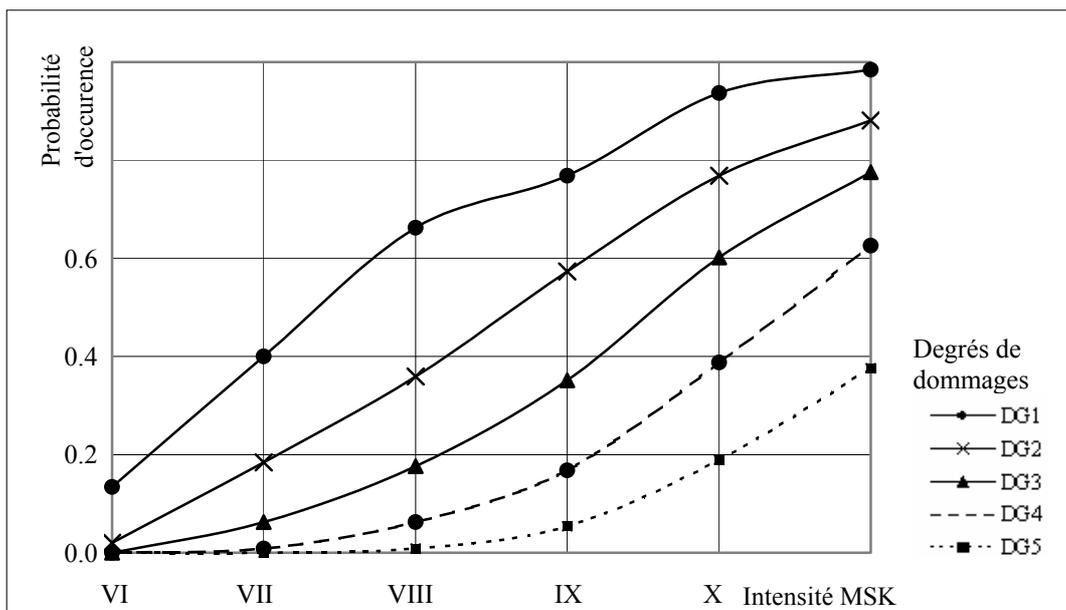


Figure 5 Vulnérabilité moyenne d'ensemble pour la population de bâtiments de la ville d'Aigle

Elle quantifie 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), développée dans l'EMS-98 [EMS 1998]. 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 MSK, la répartition des bâtiments du portefeuille considéré dans chaque niveau de degrés de dommage.

On construit deux autres courbes de vulnérabilité du bâti afin de considérer les incertitudes sur le comportement physique des bâtiments lors de sollicitations sismiques. On détermine une courbe correspondant à un comportement optimiste et une autre correspondant à un comportement pessimiste. Le détail est donné à l'annexe 3 : Inventaire sismique.

III. 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 de l'ECA ainsi que sur les pertes humaines potentielles. Une publication récente [Weidman 2002] passe en revue les différents secteurs pouvant être touchés à la suite d'un tremblement de terre en Suisse.

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.

1.1. Pertes humaines

Préambule

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, allant des blessures légères ne nécessitant pas d'hospitalisation jusqu'à la mort. Par échantillonnage statistique on détermine la capacité totale du portefeuille de bâtiments de la ville, c'est à dire le nombre de personnes qu'ils peuvent contenir. Elle se monte à environ 9'800 personnes pour les bâtiments d'habitation, 1'700 pour les bâtiments scolaires et 6'200 pour les autres bâtiments non résidentiels. Le détail est donné à l'annexe 4 : Courbes d'endommagement.

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 affectent donc directement le nombre de personnes touchées comme le montre la Figure 6 [Coburn 2002].

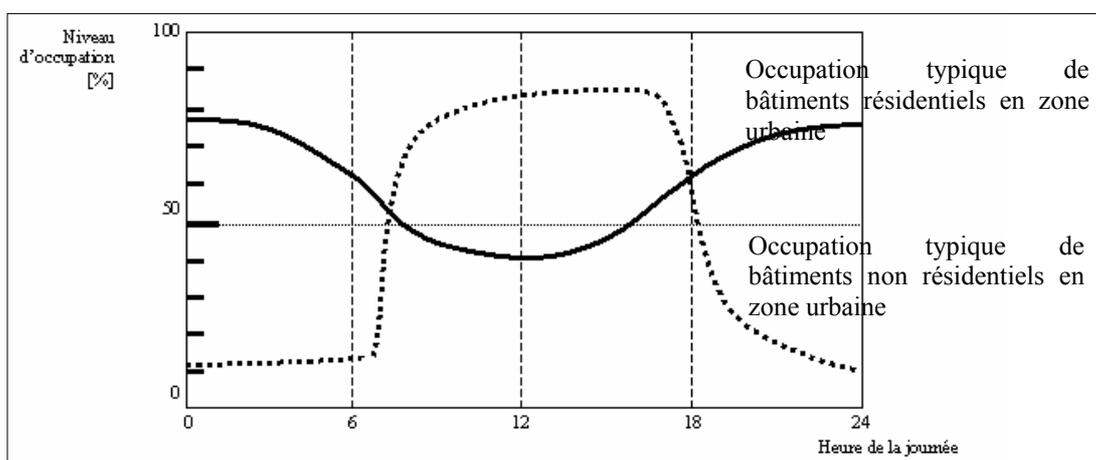


Figure 6 Occupation des bâtiments

Si on applique ces courbes à la capacité déterminée pour la ville, on obtient, à minuit, 7'370 habitants, soit approximativement le nombre d'habitants réel.

Courbe de vulnérabilité humaine

Seule une partie des occupants sont blessés ou tués lors de l'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 MSK mais en fonction du degré de dommages EMS-98 [EMS 1998]. La gravité des dommages, allant des blessures légères ne nécessitant pas d'hospitalisation jusqu'à la mort, 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 [Coburn 2002], bien qu'on devrait considérer également ceux qui seront effectifs quelques heures ou jours plus tard. 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 des moyens des secours mis à disposition en cas de catastrophe, comme les pompiers, l'armée, l'organisation d'une cellule de crise ou encore le fonctionnement des hôpitaux. Dans notre étude cette problématique est négligée du fait du haut niveau de préparation des secours, de la qualité des soins hospitaliers et de la capacité hospitalière importante du Chablais.

De la même manière que pour les courbes de vulnérabilité trois courbes d'endommagement ont été développées (Annexe 5 : Eléments de probabilités). On décrit en annexe 4 : Courbes d'endommagement, la construction des courbes utilisées dans notre estimation, reposant sur une approche de type experts étayée par les informations statistiques à disposition [Swiss Re 2002] et calée avec une approche similaire développée aux USA [Nichols 2002].

1.2. Pertes immobilières

Les pertes immobilières sont calculées à l'aide des courbes d'endommagement (Figure 7) construites à l'aide d'une approche de type expert étayée par les informations statistiques à disposition [Swiss Re 2002]. Elles donnent la relation entre le degré d'endommagement décrit par l'EMS-98 [EMS 1998] et le pourcentage de la valeur de remplacement assurée. Cette courbe a été validée par interviews de professionnels de l'estimation du domaine des assurances. Pour chaque degré de dommage, on présente trois niveaux de pertes, pessimiste, moyen et optimiste. On décrit en annexe 4 : Courbes d'endommagement, la méthode de construction des courbes utilisées dans ce travail.

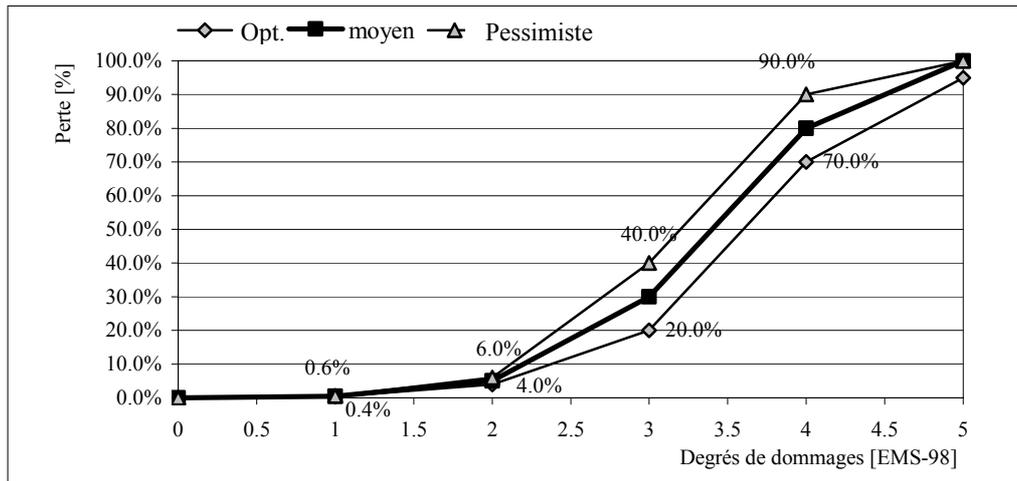


Figure 7 Courbes d'endommagement immobilières

1.3. Pertes mobilières

Les pertes mobilières sont calculées à l'aide de la courbe d'endommagement présentée à l'annexe 4 : Courbes d'endommagement et construites selon la même méthode que les courbes d'endommagement immobilières.

Elles donnent la relation entre le degré d'endommagement décrit par l'EMS-98 [EMS 1998] et le pourcentage de la valeur de remplacement du mobilier perdue lors d'un événement sismique. Ces courbes ont 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. On décrit en annexe 4 : Courbes d'endommagement, la construction des courbes utilisées dans ce travail.

1.4. Autres pertes directes

Les pertes liées à l'endommagement des infrastructures (réseau de distribution d'eau, d'alimentation électrique, de communication, de transports...) ne sont pas prises en considération dans ce travail. Elles pourraient cependant être importantes. Leur vulnérabilité est mal connue pour la Suisse. Les informations récentes d'autres séismes permettent d'estimer ces pertes à partir des pertes immobilières. Une étude récente pour la région de Bâle [Swiss Re 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 Italie en 1997, donne un facteur multiplicateur plus bas, d'environ 0.4 [Wenk 1997], plus proche de ce qu'on peut attendre à Aigle.

2. Autres pertes

Des nombreuses autres pertes découlent 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 reconstruction 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.

IV. Quantification des pertes

1. Endommagement du bâti

L'endommagement du bâti est décrit ci-dessous pour les événements sismiques d'intensité MSK VII, VIII et IX. Les valeurs sont tirées de [Brennet 2002] et présentées à l'annexe 3 : Inventaire sismique. Le tableau 6 ci-après donne un récapitulatif des dommages pour trois événements sismiques. Les valeurs expriment les incertitudes liées à la vulnérabilité (Annexe 3 : Inventaires sismique).

Intensité <i>Période de retour [années]</i>	I_{MSK} = VII			I_{MSK} = VIII			I_{MSK} = 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 6 Pourcentage des bâtiments subissant un certain niveau de dommages

2. Pertes de vies humaines

La quantification donne les résultats résumés dans le tableau 7. Les trois valeurs représentent les incertitudes liées à la vulnérabilité (Annexe 3 : Inventaires sismique) et celles liées à l'établissement de la courbe de vulnérabilité humaine (Annexe 4 : Courbes d'endommagement).

Intensité <i>Période de retour [années]</i>	I_{MSK} = VII			I_{MSK} = VIII			I_{MSK} = 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 7 Résultats de la quantification

Si on observe la répartition des morts et des blessés en fonction des zones cadastrales pour les trois événements sismiques retenus, les morts se répartissent, pour une intensité $I_{MSK}=VII$, pour près de 68% dans la zone du centre-ville en habitat contigu. Pour une intensité de $I_{MSK}=IX$, on ne retrouve "plus que" 62% des morts dans cette zone. La redistribution se fait au détriment de la zone d'habitat résidentiel collectif, dont la sensibilité à un grand séisme est plus importante. La zone du centre-ville en habitat contigu, de par la prédominance de

bâtiments en maçonnerie vulnérables, est primordiale puisqu'elle se révèle particulièrement sensible aux petits événements sismiques qui nous intéressent en premier lieu dans un pays à faible sismicité comme la Suisse.

Si on observe la répartition par type de construction provoquant les pertes humaines potentielles les plus grandes, on voit à la figure 9 que la majorité des décès auront lieu dans les bâtiments en maçonnerie. Cela est marqué de manière plus claire pour les séismes moyens VII et VIII.

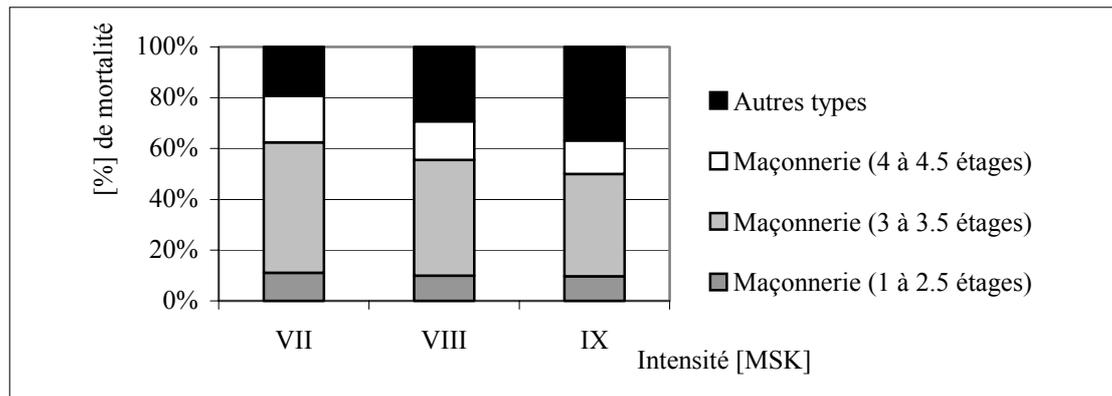


Figure 9 Répartition moyenne des morts par types de construction pour 3 séismes d'intensités différentes

3. Pertes immobilières

La répartition des valeurs immobilières dans les différentes zones cadastrales est basée sur la base de donnée fournie par l'ECA [ECA 2001]. On fait le travail d'estimation des pertes par zone. On obtient les principales informations énoncées dans le tableau 8. On donne ici les valeurs moyenne (2), optimiste (1) et pessimiste (3) (Annexe 5 : Eléments de probabilités). La valeur assurée immobilière totale s'élève à environ 1.7 milliard de francs.

Intensité MSK = VII			
	Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
Industriel	170	227	285
Agricole	239	321	403
Collectif	1'379	1'792	2'206
Individuel	568	761	954
Contigu	50'573	67'917	85'261
Non contigu	8'296	11'143	13'990
	SKFr. 61'228	SKFr. 82'164	SKFr. 103'100

Intensité MSK = VIII			
	Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
Industriel	736	929	1'123
Agricole	859	1'079	1'298
Collectif	8'7470	11'805	14'863
Individuel	2'031	2'552	3'072
Contigu	162'749	200'841	238'932
Non contigu	28'023	34'965	41'906
	SKFr. 203'148	SKFr. 252'172	SKFr. 301'196

	Intensité MSK = IX		
	Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
Industriel	2'470	3'129	3'788
Agricole	2'154	2'617	3'079
Collectif	36'988	48'441	59'894
Individuel	5'057	6'147	7'237
Contigu	332'769	389'695	446'621
Non contigu	62'396	74'118	85'841
	SKFr. 441'836	SKFr. 524'150	SKFr. 606'464

- (1) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement optimistes*
(2) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement moyennes*
(3) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement pessimistes*

Tableau 8 Pertes immobilières potentielles

La répartition par zone cadastrale, pour la vulnérabilité moyenne et la valeur moyenne de la courbe d'endommagement, est représentée graphiquement à la Figure 10. On constate une forte concentration des pertes dans la zone d'habitation contiguë. Cela est dû aux mêmes causes que pour les pertes humaines, principalement la vulnérabilité du bâti de la zone et la concentration des valeurs dans la zone.

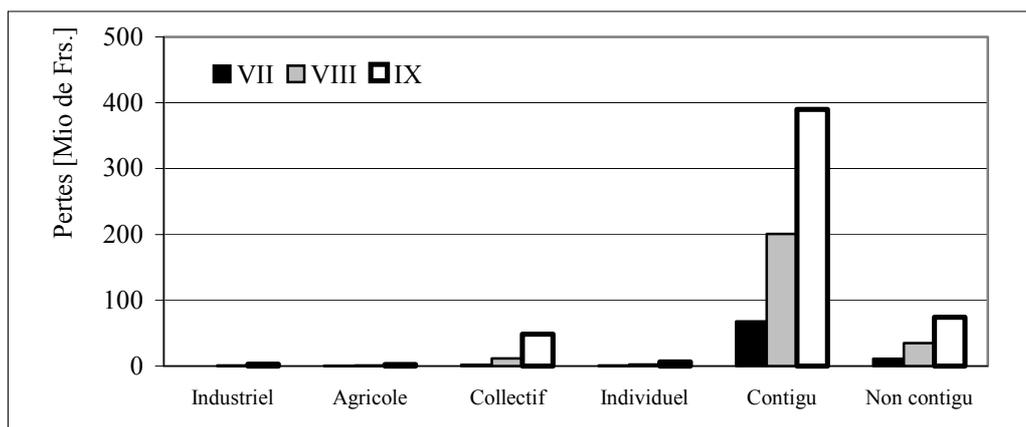


Figure 10 Répartition des pertes immobilières moyennes par zone cadastrale

4. Pertes mobilières

L'ECA assure trois types de mobilier, selon la nature de leur utilisation ; le mobilier de ménage, le mobilier agricole et le mobilier professionnel et industriel. On fait l'hypothèse que la courbe d'endommagement décrit en annexe 4 : Courbes d'endommagement, est applicable de la même manière aux trois types de mobilier. La valeur totale assurée se monte à environ 695 millions de francs.

4.1. Mobilier de ménage

Les pertes potentielles sont présentées au tableau 9 pour le mobilier de ménage. La valeur totale assurée s'élève à 378.5 millions de francs.

Intensité MSK = VII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
7'943	10'166	12'389
Intensité MSK = VIII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
27'766	33'889	SKFr. 40'012
Intensité MSK = IX		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
62'890	74'959	87'028

- (1) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement optimistes*
(2) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement moyennes*
(3) *Vulnérabilité et courbes d'endommagement pessimistes*

Tableau 9 Pertes potentielles pour le mobilier de ménage assuré

4.2. Mobilier "agricole"

Les pertes potentielles sont présentées au tableau 10 pour le mobilier agricole. La valeur totale assurée s'élève à 12.3 millions de francs.

Intensité MSK = VII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
185	236	288
Intensité MSK = VIII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
649	793	936
Intensité MSK = IX		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
1'484	1'772	2'059

- (1) (2) (3) *idem tableau 9*

Tableau 10 Pertes potentielles pour le mobilier agricole assuré

4.3. Mobilier "professionnel et industriel"

Les pertes potentielles sont présentées au tableau 11 pour le mobilier professionnel et industriel. La valeur totale assurée s'élève à 304.3 millions de francs.

Intensité MSK = VII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
9'411	12'033	14'654
Intensité MSK = VIII		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
32'022	38'910	45'798
Intensité MSK = IX		
Pertes (1) [KFr.]	Perte Moyenne (2) [KFr.]	Perte (3) [KFr.]
68'479	81'088	93'697

- (1) (2) (3) *idem tableau 9*

Tableau 11 Pertes potentielles pour le mobilier professionnel et industriel assuré

Les valeurs mobilières professionnelles assurées sont concentrées pour une part importante dans la zone industrielle (22%). La zone d'habitation contiguë, quant à elle, concentre près de 32% de la valeur totale assurée. Les pertes potentielles se localisent principalement dans cette zone, du fait de sa plus grande vulnérabilité, de par la présence importante de bâtiments en maçonnerie traditionnelle. Il est intéressant de relever l'importance de ce type de mobilier pour l'activité économique de la région. La perte d'activité provoquée par un événement sismique est également liée à l'endommagement de l'outil de production. Ainsi, on trouve pour les événements retenus, le niveau du mobilier professionnel et industriel inutilisable résumé dans le tableau 12 en pourcentage.

Intensité [MSK]	Perte moyenne [KFr.]	% du portefeuille assuré
VII	12'033	3.95%
VIII	38'910	12.79%
IX	81'088	26.65%

Tableau 12 Pourcentage sinistré du mobilier professionnel et industriel assuré

V. Quantification du risque

1. Principe de détermination

On calcule pour chaque niveau d'intensité MSK le risque (humain, immobilier et mobilier) à l'aide des équations (1) et (2). On considère le calcul intégral pour deux écarts-types.

$$R_{MSK=VII} = \iint_{2\sigma} H(x) \cdot C(y) \cdot dx dy \quad (1)$$

Où :

$R_{MSK=VII}$	Risque pour une intensité donnée, ici $I_{MSK}=VII$
$H(x)$	Hazard Function (Pour une intensité donnée): Combinaison de l'aléa régional et des conditions locales
$C(y)$	Consequences Function (Pour une intensité donnée): Combinaison de la vulnérabilité physique du bâti et des valeurs exposées

On fait ensuite la somme de toutes les intensités pour obtenir le risque total à l'aide de l'équation (2).

$$R_{Total} = \sum_{i=I}^{XII} R_i \quad (2)$$

Où :

R_{Total}	Risque total
-------------	---------------------

On remarque qu'une petite intensité ($I_{MSK}=VI$ ou plus petit) aura de faibles conséquences. Sa fréquence sera quant à elle assez grande. Le risque, calculé comme la combinaison de ces deux éléments, sera par conséquent également faible. De la même façon, une grande intensité ($I_{MSK}=X$ ou plus grand) aura des conséquences importantes, par contre sa probabilité d'occurrence sera faible et donc le risque également.

2. Risque humain

On exploite dans ce paragraphe les informations récoltées pour faire un calcul du risque sismique. On le détermine pour la population d'Aigle, soit environ 7'500 personnes, comme la somme des risques individuels pour la région considérée. On détermine les périodes de retour probables pour les événements sismiques retenus sur la base de la connaissance de la sismicité (Annexe 2 - Sismicité). On considère la valeur moyenne pour l'occupation des bâtiments.

On quantifie ensuite le risque moyen de décès exprimé en [1/100'000 personnes] et par année :

0.25 morts/année pour 100'000 personnes

La probabilité annuelle moyenne de décès s'élève à $2.5 \cdot 10^{-6}$ [décès/(habitant*an)]. Cela correspond pour la ville d'Aigle à environ 2 à 3 morts par siècle.

Les risques de ce niveau n'inquiètent en principe 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 1995]. On compare ce risque à d'autres risques au tableau 13 [Haldi 1998].

Types de risque	Pour [1/100'000 personnes]
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 à Aigle	0.25
Foudroiement	0.10

Tableau 13 Risques annualisés comparés

Dans ce contexte, il est intéressant de comparer cette valeur avec celle liée aux séismes en Californie, déterminée sur la base de statistiques des tremblements de terre historiques, qui se monte à environ 0.50 morts/année pour 100'000 personnes. Ce chiffre n'inclut cependant pas des événements possibles très importants qui ne sont pas produits dans la très courte période d'observation. Le risque effectif en Californie est donc beaucoup plus important.

3. Risque immobilier

On peut sur la base des pertes immobilières présentées plus avant dans ce travail faire une estimation du risque. Celui-ci correspond au niveau de prime de risque permettant de couvrir le portefeuille assuré, soit 1'789 millions de francs. Pour cela, on utilise la même démarche que présentée dans le paragraphe précédent et en particulier les équations (1) et (2). La perte potentielle s'élève à environ 330'000.00 francs en terme annualisé. Cela correspond à **19 centimes par millier de francs assuré**. Cette somme peut fortement être réduite par l'utilisation d'une franchise, par exemple de 10% ou 50'000 Frs. On calcule également les valeurs correspondant aux "Worst" et "Best Cases". Ces deux valeurs ont de très faibles probabilités de dépassement.

Perte annualisée [Frs. / 1'000 Frs. assuré]		
0.10	0.19	0.30
Best case		Worst Case

Tableau 14 Pertes annualisées immobilières pour Frs. 1'000 assuré

4. Risque mobilier

On utilise la même démarche que présentée dans le paragraphe précédent et en particulier les équations (1) et (2) pour estimer le niveau de pertes annualisées pour les risques mobiliers. Elle s'élève à environ **14 centimes par millier de francs assuré**. Les pertes potentielles moyennes, pessimistes et optimistes sont présentées au tableau 15 pour les mobiliers de « ménage », « agricole » et « professionnel et industriel ».

Type de mobilier	Valeur assurée [mio Frs.]	Pertes annualisées pour 1'000 Frs. assuré [Frs.]		
		(1)	(2)	(3)
Ménage	378.5	0.07	0.12	0.19
Agricole	12.3	0.04	0.08	0.13
Professionnel et industriel	304.3	0.09	0.16	0.20

(1) Vulnérabilité et courbes d'endommagement optimistes, Aléa -1 écart-type

(2) Calcul par intégration des variables (équations 1 et 2)

(3) Vulnérabilité et courbes d'endommagement pessimistes, Aléa +1 écart-type

Tableau 15 Pertes potentielles annualisées du mobilier assuré

VI. Détermination du sinistre maximum possible

1. Définition du 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 possibles et aux pertes de valeurs assurées. Elle donne une indication importante pour la gestion du risque. On détermine les pertes potentielles maximales appelées aussi *Sinistre maximum possible (SMP)*. Pratiquement, il s'agit de considérer tous les paramètres du modèle d'estimation comme agissant simultanément de manière pessimiste.

2. Variation des paramètres du modèle d'estimation

Les incertitudes du modèle d'estimation sont de plusieurs natures. Les variations faites sur ces paramètres sont présentées au tableau 16. Pour l'occupation des bâtiments, le pire des cas, c'est-à-dire à 18 heures, est envisagé pour la détermination du SMP.

Hasard	Aléa sismique	IX	
	Effet de site [Intensité MSK]	+ 0.5 degré	+ 1 degré
		En fonction de la zone	
Conséquences	Vulnérabilité	Pessimiste	
	Endommagement	Vie humaine	Pessimiste
		Immobilière	Pessimiste
		Mobilière	Pessimiste
	Valeurs exposées	Vie humaine	Occupation max. (1)
		Immobilière	Déterministe (2)
Mobilière		Déterministe (2)	

(1) Le pire moment dans la journée en terme d'occupation des bâtiments

(2) On considère les valeurs tirées de [ECA 2001] comme certaines

Tableau 16 Incertitudes sur les paramètres

La première incertitude, la vulnérabilité, est liée au caractère aléatoire du comportement physique des bâtiments à une sollicitation sismique. Cette distribution ne peut être quantifiée que par l'examen de données d'expériences ou d'essais. La deuxième incertitude réside dans la nature du sol et donc dans l'influence de l'effet de site. Pour tenir compte des conditions géologiques rencontrées dans notre étude pour un événement sur rocher d'intensité IX, on considérera une intensité de $IX+\alpha$, avec α , l'augmentation d'intensité provoquée par l'effet de site. Pour un événement IX. On prend ici $\alpha_1 = 0.5$ MSK et $\alpha_2 = 1$ MSK (en fonction de la zone considérée). Cette intensité est le maximum physiquement envisageable pour la région. Les incertitudes sur la vulnérabilité et sur les courbes d'endommagement sont traitées dans les annexes 3 et 4. On obtient ainsi un scénario ayant une très faible probabilité de dépassement.

3. Pertes maximales

Pour déterminer les pertes maximales, on considère les incertitudes sur les paramètres explicités dans le paragraphe précédent. Elles s'élèvent à **221 morts**. De la même manière, on estime les pertes maximales potentielles.

Pertes maximums [KFr.]		
Morts	Immobilier	Mobilier
221	752'601	247'916

Tableau 17. Estimation des pertes immobilières et mobilières maximums

On trouve 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 36 % du total assuré.

VII. Conclusions

Le risque sismique pour la ville d'Aigle a été estimé dans ce travail. Il ressort de cette étude que le risque sismique pour la vie humaine est relativement faible. Il représente environ 2 à 3 morts par siècle pour la ville. De plus, le pire scénario envisageable tuerait environ 3% de la population résidente. Par contre, des pertes économiques très importantes seraient engendrées par les dommages occasionnés aux valeurs immobilières et mobilières. Il ressort principalement les informations chiffrées suivantes :

- Le risque moyen se monte à 0.25 (morts/année) pour 100'000 habitants. Ce qui est comparable à d'autres risques naturels.
- Le risque pour les valeurs immobilières s'élève à environ 19 centimes pour 1'000 Frs assuré et à 14 centimes pour 1'000 Frs assuré pour le mobilier. Ce niveau est comparable aux valeurs obtenues lors d'autres études [Swiss Re 2000].
- Le sinistre maximum potentiel pouvant survenir, tenant compte des incertitudes sur les paramètres, donne des chiffres d'environ 220 morts, 750 millions de francs de dommages immobiliers et 250 millions de francs de dommages mobiliers.

Afin d'augmenter dans le futur la qualité de l'estimation du risque sismique, il est essentiel de diminuer les incertitudes rencontrées. Un besoin de recherches complémentaires est apparu principalement sur les différents éléments suivants :

- L'aléa sismique régional et les effets de site,
- L'interaction sol structure, notamment le phénomène de résonance,
- Une meilleure connaissance de la vulnérabilité du bâti existant des bâtiments, et particulièrement des bâtiments en maçonnerie qui concentrent le risque,
- Le calage des courbes d'endommagement sur des données statistiques.

Une meilleure connaissance de ces paramètres va permettre une meilleure quantification du risque et donc à une meilleure gestion de celui-ci.

Partant de ces constatations, une réflexion sur les moyens de gestion du risque sismique, en particulier l'aspect économique, doit être conduite. Les décideurs doivent prendre des décisions rationnelles. La systématisation d'un cadre permettant d'évaluer des stratégies de gestion du risque sismique est en cours à l'EPFL [Pellissier 2004]. Elle vise à fournir les bases rationnelles menant à la sélection de stratégies de gestion. Une « stratégie de gestion du risque sismique » est un ensemble de mesures cohérentes qui ont un impact sur le profil de risque du système étudié. Les décideurs disposent d'un éventail de stratégies qu'ils peuvent mettre en oeuvre. Elles vont du statu quo jusqu'à des mesures visant l'ensemble du parc immobilier. Des mesures techniques, comme par exemple, le renforcement ciblé de certaines constructions, comme les hôpitaux ou des ponts. Une autre stratégie de gestion à disposition des décideurs consiste en un transfert du risque économique au moyen d'assurances.

Ce rapport donne les éléments de base permettant de déterminer une estimation du niveau de prime adaptée aux réalités physiques du système étudié.

Glossaire

- Risque** Le risque décrit les pertes probables pour un système donné sur une période de temps donnée. Il peut être quantifié en combinant la probabilité d'occurrence d'un séisme, la valeur en danger et la vulnérabilité de cette valeur en danger, pour tous les événements possibles.
- Vulnérabilité** La vulnérabilité représente le pourcentage de la valeur en danger, qui est effectivement perdu après un événement d'une intensité donnée. On peut par exemple déterminer la vulnérabilité comme la proportion des coûts de réparation par rapport à la valeur de remplacement pour un événement d'une intensité donnée.
- Valeurs en danger** Le risque qui nous intéresse dans cette étude est le risque lié à l'endommagement des bâtiments. La valeur en danger est donc ce qui est affecté par "le bâtiment". Il existe plusieurs valeurs en danger lors de l'endommagement de bâtiments. Par exemple, le bâtiment est considéré par un investisseur ou une assurance comme une valeur économique. Le contenu du bâtiment, par exemple les habitants ou les meubles, est une autre valeur en danger.
- Le dommage** Le dommage est défini ici comme l'endommagement d'une structure, et en particulier d'un bâtiment, exprimé avec une dimension mécanique. Cela signifie par exemple l'apparition de fissures ou l'effondrement partiel ou total d'éléments structuraux ou non structuraux.
- La perte** La perte découle des dommages aux structures et affecte des éléments différents, tels économiques, environnementaux et sociétaux et est donc utilisée dans cette étude dans un contexte plus large que le terme "dégât".
- SRE** Le *Sinistre raisonnablement escomptable*, ou SRE, est défini comme le risque moyen annuel pour une unité de valeur en danger. Il n'est pas lié à un scénario particulier et représente un comportement moyen.
- SMP** Le *Sinistre maximum possible*, ou SMP, est le sinistre maximum en considérant, pour tous les paramètres du modèle, la valeur pessimiste. Ce sinistre a cependant une très faible probabilité de dépassement.

Bibliographie

- [Beres 2000] **Beres M., Green A.G., Pugin A.**, *Diapiric Origin of the Chessel-Noville Hills of the Rhone Valley Interpreted From Georadar Mapping*, Environmental & Engineering Geoscience, 141-153, USA, 05, **2000**.
- [Brennet 2002] **Brennet G., Peter B. K., Badoux M.**, *Inventaire sismique de la ville d'Aigle*, IS.BETON, Lausanne, Suisse, **2002**.
- [Coburn 2002] **Coburn A., Spence R.**, *Earthquake Protection*, Chichester, United Kingdom, **2002**.
- [Delacrétaz 1982] **Delacrétaz P.**, *L'Ouille*, Editions Delplast, Romanel-sur-Lausanne, Suisse, **1982**.
- [Duvernay 2003] **Duvernay B., Widmer F., Pellissier V.**, *Mesures in situ des fréquences propres de bâtiments et de sites free field*, OFEG & EPFL, 6th Ziegler Symposium, Dübendorf, Switzerland, 2003.
- [ECA 2001] **ECA VD**, *Base de données - Informations*, Lausanne, Switzerland, Etat, Octobre **2001**.
- [EMS 1998] **EMS-98**, *Echelle macroscopique européenne*, Centre européen de Géodynamique et de séismologie, Luxembourg, **2001**.
- [Eurocode 8 1997] **Eurocode 8**, *Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes*, Collection bâtiments, 123, Zürich, Switzerland, **1997**.
- [Giardini 2001] **Meghraoui, M., Delouis, B., Ferry, M., Giardini, D., Huggenberger, P., Spotke, I., Granet, M.**, *Active normal faulting in the Rhine Graben and paleoseismic identification of the 1356, Io=IX-X, Basel earthquake (Central Europe)*, *Science*, 293, 2070-2073, **2001**.
- [Lang 2002] **Lang K.**, *Seismic Vulnerability of Existing Buildings*, IBK-ETHZ, 188, Zürich, Switzerland, 02, **2002**.
- [Haldi 1998] **Haldi P.-A., Vuillet, L.**, *Fiabilité et sécurité des structures civiles*, Notes de cours, Ecole polytechnique fédérale, Département de Génie Civil, Lausanne, **1998**.
- [Koller 2002] **Koller. M.**, *Effets de site*, Cours photocopié, Génie parasismique, Ecole polytechnique fédérale, Département de Génie Civil, Lausanne, **2002**.
- [Nichols 2002] **Nichols J.M., Beaver J.E.**, *Development and Calibration of a synthetic Earthquake Fatality Function*, Earthquake Spectra, Submitted Paper, USA, **2002**.
- [Pellissier 2002] **Pellissier V. , Badoux M., Jaccard P.A.**, *Decision Framework for Seismic Risk Management*, 12th European Earthquake Conference, London, UK, **2002**.
- [Pellissier 2004] **Pellissier V., Badoux M.**, *Evaluation de stratégies pour la gestion du risque sismique*, Mandat ECA, en cours, Pully, Switzerland, publication prévue, printemps **2004**.
- [Rüttener 1995] **Rüttener E.**, *Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland*, Schweizerischer Erdbebendienst, Inst. für Geophysik - ETHZ, 29, 106, Zürich, Switzerland, 08, **1995**.
- [Saeki 2000] **Saeki T., Midorikawa S.**, *Estimation of Economic Loss Affecting Residents' Ability to Rebuild Their Lives Suffering Earthquake Damage*, 12^h World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, NZ, **2000**.

- [Sägesser 1978] **Sägesser R., Mayer-Rosa D.**, *Erdbebengefährdung in der Schweiz*, Schweizerische Bauzeitung, Zürich, Suisse, **1978**.
- [Schaad 1988] **Schaad W.**, *Erdbebenszenarien Schweiz*, Schweizerische Pool für Erdbebendeckung, Bern, Suisse, **1988**.
- [Schneider 1995] **Schneider T., Weber K., Locher R.**, *Acceptation des risques du point de vue technique et sociologique*, SUVA Lucerne, Suisse, **1996**.
- [SIA 160 1989] **SIA 160**, *Actions sur les structures porteuses: SIA 160*, Normes Suisses, 160, Switzerland, **1989**.
- [SWISSCODE 2003] **SWISSCODE**, *Collection de Normes de Structures 260 et ss*, SIA, Zürich, Switzerland, **2003**.
- [Swiss Re 2000] **Schmid E.**, *Aujourd'hui, les couvertures d'assurance sont insuffisantes. Et si la terre tremblait en Suisse ?*, Swiss Re Publishing, 8, Zürich, Switzerland, **2000**.
- [Swiss Re 2002] **Bertogg M., Hitz L., Schmid E.**, *Vulnerability derived from loss data for insurance risk modelling: Findings from recent earthquakes*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, U.K., **2002**.
- [Weidmann 2002] **Weidmann M.**, *Erdbeben in der Schweiz*, Schweizerischen Erdbebendienst, Zürich, Switzerland, **2002**.
- [Wenk 1997] **Wenk T., Hertelendy P., Zimmerli D.**, *Das Erdbeben in Italien vom 26. September 1997*, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr.44, Zürich, Switzerland, 10, **1997**.
- [Whitman 1973] **Whitman & al.**, *Earthquake Probability Matrices*, Proceeding of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, col.1., p. 2531, UK, **1973**.

Annexes

A.1. Aigle - Conditions géologiques locales

A.2. Sismicité

A.3. Inventaire sismique

A.4. Courbes d'endommagement

A.5. Eléments de probabilités

Annexe 1

Aigle - Conditions géologiques locales

I. Introduction

Cette annexe donne les informations relatives aux conditions géographiques et géologiques du système étudié, à savoir la commune d'Aigle. Elle sépare la dimension politique, en fixant les éléments frontières, ainsi que les informations cadastrales, qui seront utilisées pour la quantification par zone, des éléments de géographie physique, principalement les conditions géologiques locales.

II. Conditions locales

1. Zonification cadastrale

Les zones retenues pour la quantification des risques sont celles établies par le cadastre communal. On donne ci-dessous ces zones avec la répartition du nombre de bâtiments dans chacune d'elle.

Zones cadastrales	Nombre de bâtiments [%]
Industrielle	13.0 %
Agricole	8.0 %
Résidentielle collectif	7.0 %
Résidentielle individuel	31.5 %
Centre-ville contigu	24.5 %
Centre-ville non-contigu	16.0 %

Tableau A.1.1. Zones cadastrales

2. Système étudié

On prend en compte les bâtiments situés dans la région délimitée par les frontières communales. On donne à la figure A.1.1. un extrait de la carte nationale. On localise sur cette carte les 8 points où les mesures de fréquences propres du sol ont été effectuées [Duvernay 2003].

Un modèle géologique sommaire, schématisé dans la figure ci-dessous, a ainsi pu être développé. De nombreuses incertitudes sont apparues lors de l'établissement de ce modèle. Ce modèle est inspiré des connaissances à disposition [NRP-20 1997]

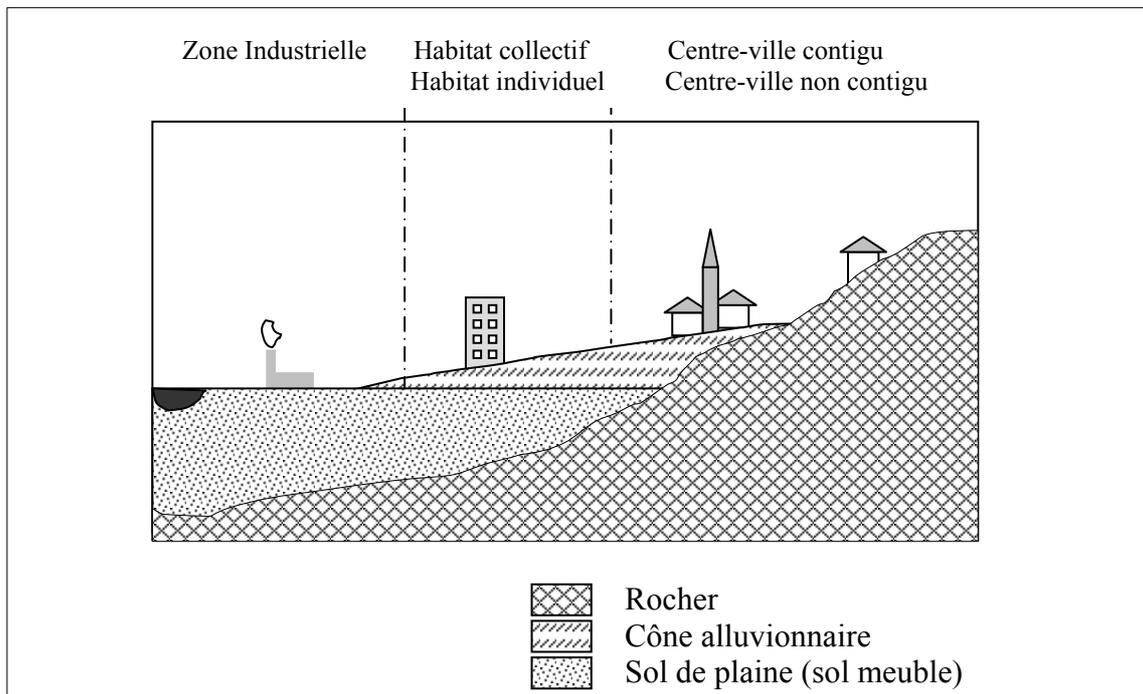


Figure A.1.3. Schéma simplifié du modèle géologique sommaire

III. Micro-zonage

Les informations existantes sur les conditions géologiques locales ont mis en avant plusieurs incertitudes quant à la nature des sols possibles, notamment la présence suspectée de sols tourbeux. Une étude de l'effet de site de la région aiglonne a été conduite à l'aide notamment d'une méthode de détermination expérimentale des fréquences propres in situ [Nakamura 2000]. Le micro-zonage sismique a pour but la quantification locale des effets de site. Il a été réalisé en quatre étapes.

1. Première étape : Zonage indicatif

Un microzonage indicatif de la commune d'Aigle a été 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 [SWISSCODE 2003]. Cette carte indicative permet de mettre en évidence les zones au comportement défavorable en cas de séisme (effets de site). On distingue principalement deux zones avec deux classes de sols de fondation proposées par la norme SIA 261 [SWISSCODE 2003], et prises en considération dans la conception de la carte indicative de micro-zonage de la feuille d'Aigle au 1:25'000. $V_{s,30}$ désigne la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres. On distingue deux catégories de sols pour la zone d'étude :

- la zone industrielle, la zone agricole et la moitié Sud de la zone d'habitat collectif en classe C, voir D,
- le reste de la surface d'étude, et en particulier le centre ville, en classe C.

Classe de sol de fondation	Description	V _{s,30} [m/s]
C	Dépôts de graviers et sables normalement consolidés et non cimentés et/ou matériau morainique, d'une épaisseur de plus de 30 m.	200-400
D	Dépôts de sables fins, silts ou argiles non consolidés, d'une épaisseur de plus de 30 m.	< 200

Tableau A.1.2. Extrait des classes de sols de fondation proposées par la norme SIA 261 [SWISSCODE 2003]

2. Seconde étape : Détermination du spectre H/V avec la méthode Nakamura

On détermine le spectre H/V par la méthode de Nakamura. Celle-ci, basée sur l'étude du rapport de la composante horizontale sur la composante verticale du mouvement du sol engendré par le bruit de fond sismique (« rapport H/V »), a été utilisée afin d'évaluer les fréquences propres de 8 points d'acquisition (comprises entre 0,29 et 1.66 Hz). L'efficacité de la méthode a été reconnue par de nombreuses études précédentes, mais son aptitude à déterminer le facteur d'amplification du sol reste encore à démontrer.

Les 8 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, permet d'obtenir le graphique H/V en fonction de la fréquence (Figure A.3.4.). La fréquence propre correspond alors à l'amplitude du pic le plus élevé du spectre H/V [Fäh 2001]. On donne les résultats de la campagne de mesure dans le Tableau A.1.3. ci-dessous.

n°	Fréquence de résonance f_0	$f_{0 \min}$	$f_{0 \max}$	$\log_{10}(H/V)$	$\log_{10}(H/V)_{\min}$	$\log_{10}(H/V)_{\max}$	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 A.1.3. Résultats des mesures des fréquences propres des sites

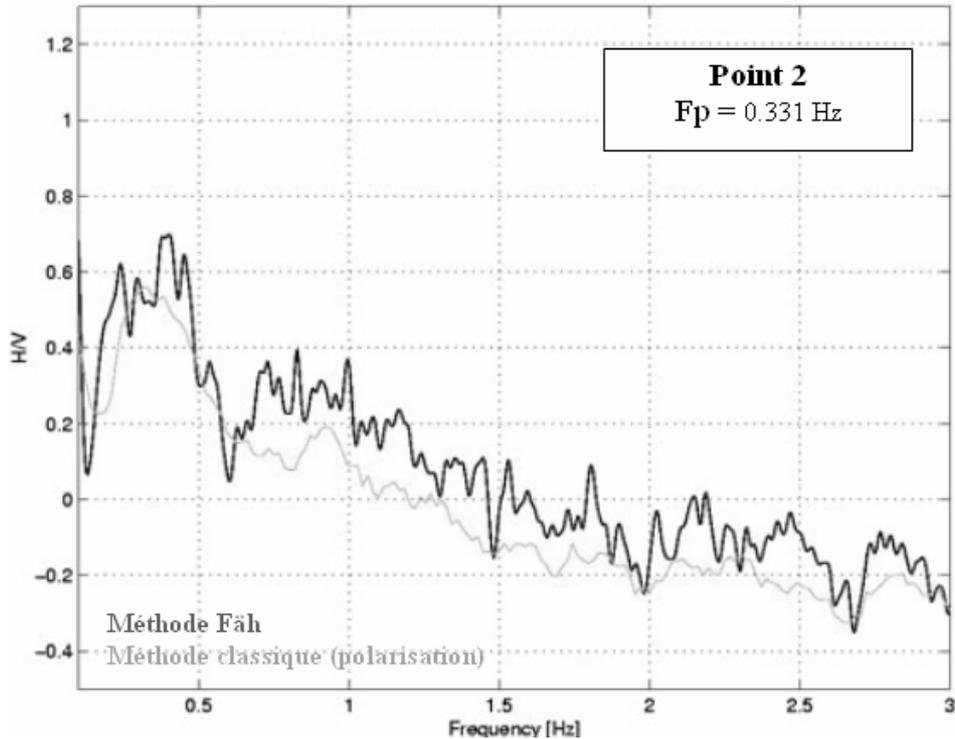


Figure A.1.4. Exemple graphique du point 2

3. Troisième étape : Approximation de l'amplification du signal sismique

Les résultats de cette étape permettent notamment une bonne approximation de l'amplification de l'accélération horizontale maximale du sol, et fournissent un spectre de réponse élastique propre au site étudié qui peut par la suite être comparé aux spectres de réponse recommandés par les normes SIA 160 [SIA 160 1989] et SIA 261 [SWISSCODE 2003] dans les conditions rencontrées. En procédant au rapport du spectre de réponse calculé en surface à Aigle sur le spectre calculé sur rocher, d'après les enregistrements des séismes de référence, on estime ainsi la fonction d'amplification spécifique du site. Cette étape n'a pas été réalisée dans notre cas.

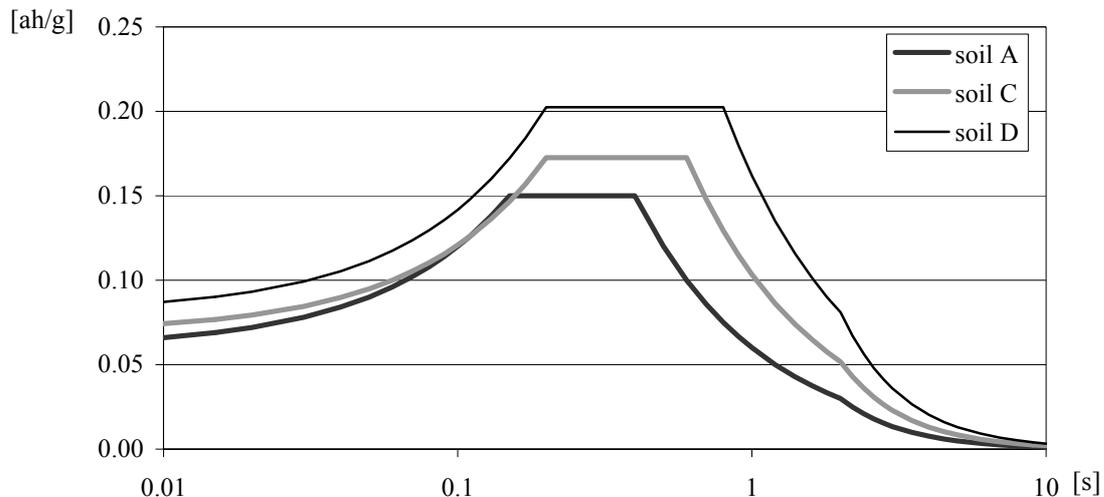


Figure A.1.5. Spectres de réponses en fonctions des sols selon la norme SIA 261 [SWISSCODE 2003]

4. Quatrième étape : Interprétation en terme d'augmentation d'intensité MSK

Une interprétation permettant d'exprimer en terme d'augmentation d'intensité a été réalisée sur la base d'une méthode expert (Annexe 5 : Eléments de probabilités). 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 spécificités comparables et sur les connaissances hydrogéologiques [Cédra 1988] [Badoux 1960] et [NRP-20 1997].

En terme d'augmentation de l'intensité liée à l'effet de site, on obtient les résultats, par zone cadastrale, exprimés dans le tableau A.1.4..

Zones cadastrales	Augmentation d'intensité [MSK]	
	Séismes d'intensité [MSK]	
	SRE	SMP
Industrielle	+ ½	+ 1
Agricole	+ ½	+ 1
50 % Résidentielle collectif (Partie Sud)	+ ½	+ 1
50 % Résidentielle collectif	Pas d'augmentation	+ ½
Résidentielle individuel	Pas d'augmentation	+ ½
Centre-ville contigu	Pas d'augmentation	+ ½
Centre-ville non-contigu	Pas d'augmentation	+ ½

Tableau A.1.4. Augmentation de l'intensité MSK due à l'effet de site

5. Interaction sol – structure

En outre, afin de déterminer les effets potentiels d'interactions sol – structure, des mesures de fréquences propres ont été réalisées sur 8 bâtiments représentatifs des principales catégories sismiques rencontrées dans des zones représentatives de la ville. La comparaison des fréquences propres des différentes catégories de bâtiments avec les fréquences propres des sols nous donne une indication sur le risque de résonance.

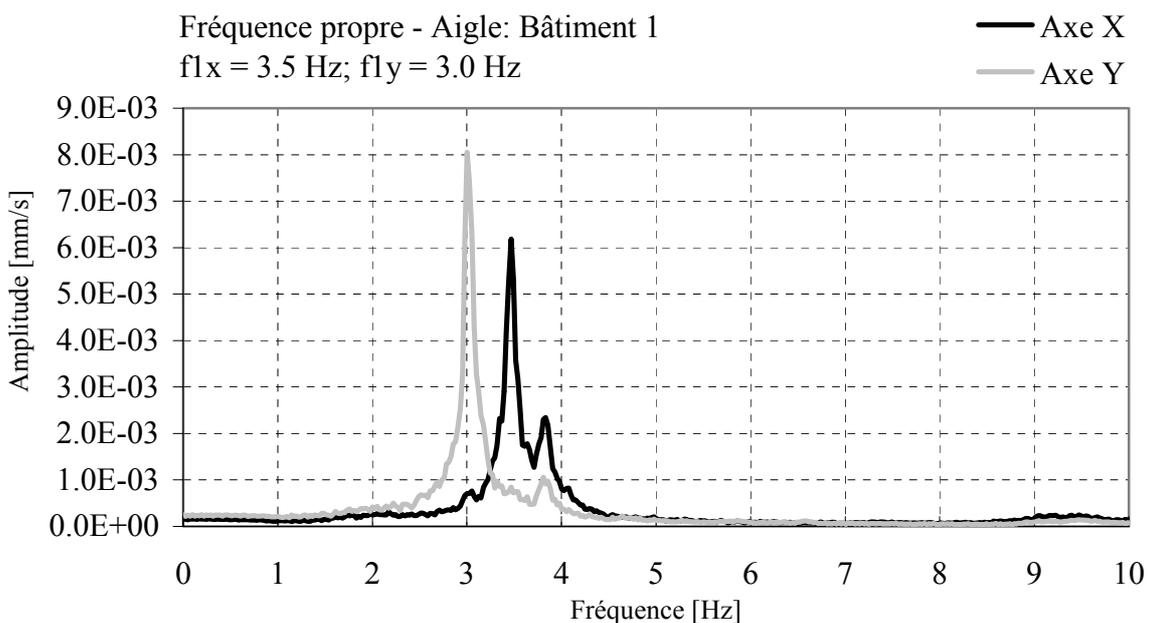


Fig. A.1.6. Exemple de bâtiment mesuré – Hôtel de ville [Duvernay 2003]

D'un point de vue strictement théorique, la fréquence propre d'un ouvrage doit différer de la fréquence propre du sol de fondation, afin d'éviter le phénomène de résonance. Les fréquences propres des bâtiments mesurés varient de 2.4 à 7.1 Hz, alors que celles des sols varient de 0.3 à 1.7 Hz. On sait que la fréquence des bâtiments diminue lors d'un tremblement de terre du fait notamment de l'apparition de fissures, mais les bâtiments à hautes fréquences ne semblent pas menacés par le phénomène de résonance. Cette information a été utilisée directement, et de manière individuelle pour chaque bâtiment, en fonction de sa catégorie.

6. Enseignements du microzonage sismique

La carte indicative représente une étape préliminaire au travail de microzonage sismique essentielle, puisqu'elle permet de mettre clairement en évidence les zones défavorables en cas de séisme, c'est-à-dire les zones pouvant être soumis aux effets de site. En revanche, elle est aussi tributaire des incertitudes liées aux limites indiquées sur la carte géologique, et aux descriptions forcément simplificatrices de la norme concernant les formations en présence.

C'est la raison pour laquelle des investigations de terrain sont nécessaires. Elles ont été menées pour Aigle. La technique de Nakamura a ainsi fourni en 8 points les valeurs ponctuelles de la fréquence propre des terrains, à partir de l'enregistrement des mouvements du sol issus du bruit de fond sismique. La grande majorité de ces mesures ont apporté des résultats ayant une précision satisfaisante, confirmant ainsi un contraste d'impédance marqué entre les dépôts sédimentaires et le bedrock molassique, et confirmant aussi une géométrie de bassin relativement simple, sans trop d'effet de réflexions latérales. Les valeurs ont été comprises entre 0,29 Hz (à proximité du centre de la Plaine du Rhône) et 1.66 Hz (à proximité du bord de la vallée du Rhône). La fréquence propre est une donnée importante dans le domaine du génie parasismique, la fréquence propre des bâtiments devant théoriquement s'écarter de la fréquence du sous-sol, cela afin d'éviter le phénomène physique de résonance. Pour le dimensionnement des structures, il est cependant nécessaire de connaître en plus la fonction d'amplification du sol. Ceci peut être fait de manière pertinente en appliquant les spectres de réponses pertinents aux sols rencontrés selon la norme SIA 261 [SWISSCODE 2003]. Une approche plus détaillée consisterait à faire des simulations selon la géologie locale pour déterminer les fonctions d'amplification. Cette procédure permettrait certainement d'être moins conservateur que l'application des spectres selon la norme, mais demande un effort important, qui sort du cadre fixé, à savoir obtenir une estimation rapide du risque.

On montre dans ce cadre d'estimation du risque sismique l'intérêt de la détermination rapide de l'effet approximatif du site en terme d'augmentation d'intensité pour une région, et ce avec des moyens simples et bon marché.

Bibliographie

- [Badoux 1960] **Badoux H, Chessex R., Jeannet A., Lugeon M., Rivier F.,** *Extrait Atlas géologique de la Suisse 1 :25'000, feuille 1284 Monthey*, Berne, Switzerland, **1960**.
- [Cédra 1988] **Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs,** *Rapport technique 88-17*, Baden, Switzerland, **1988**.
- [Duvernay 2003] **Duvernay B., Widmer F., Pellissier V.,** Mesures in situ des fréquences propres de bâtiments – Projet pilote d'Aigle, EPFL & OFEG, Lausanne, Switzerland, **2003**.

- [Nakamura 2000] **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, New Zealand, **2000**.
- [Eurocode 8 1997] **Eurocode 8**, *Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes*, Collection bâtiments, 123, Zürich, Switzerland, **1997**.
- [Fäh 2001] **Fäh, D., Kind, F., and Giardini, D.**, *A theoretical investigation of average H/V ratios*, Geophys. J. Int., Vol. 145, 535-549, **2001**.
- [NRP-20 1997] **Programme de recherche national 20**, *Deep structure of the Swiss Alps*, Basel, **1997**.
- [Pellissier 2004] **Pellissier V., Badoux M.**, *Evaluation de stratégies pour la gestion du risque sismique*, Mandat ECA, en cours, Pully, Switzerland, publication prévue, printemps **2004**.
- [SIA 160 1989] **SIA 160**, *Actions sur les structures porteuses: SIA 160*, Normes Suisses, 160, Switzerland, **1989**.
- [SWISSCODE 2003] **SWISSCODE**, *Collection de Normes de Structures 260 et ss*, SIA, Zürich, Switzerland, **2003**.
- [Widmer 2002] **Widmer F.**, *Projet pilote de microzonage sismique dans le secteur d'Yverdon*, OFEG & EPFL/GEOLEP, Bienne. Switzerland, **2002**.
- [Widmer 2003] **Widmer F.**, *Microzonage rapide – Mesures in situ – Projet pilote d'Aigle*, EPFL & OFEG, Lausanne, Switzerland, **2003**.

Annexe 2

Sismicité

I. Introduction

Cette annexe donne les informations relatives à la sismicité utilisée dans le cadre de ce travail de quantification du risque. Historiquement, la Suisse a subi 10'000 séismes ces 100 dernières années. Cela signifie qu'environ 100 séismes se produisent annuellement sur le territoire. Un peu moins de 100 séismes de magnitude 4 se sont produits en 100 ans, ce qui signifie qu'un événement sismique provoquant des dégâts légers a eu lieu en moyenne chaque année. 10 séismes de magnitude 5 se sont produits durant la même période, ce qui signifie qu'un événement sismique provoquant des dégâts moyens a eu lieu en moyenne tous les 10 ans. De plus, un événement sismique de magnitude 6, ou d'intensité MSK maximale VII, a eu lieu, soit un séisme provoquant des dégâts importants par siècle. (Source - Schweizerischer Erdbebendienst) [Weidmann 2002]. On estime habituellement le séisme maximum physiquement possible en Suisse a une intensité MSK de IX. Pour mémoire, un séisme d'une telle intensité est survenu en 1356 à Bâle et peu donc très bien se reproduire. Sur la base des connaissances historiques, on peut déterminer une probabilité d'occurrence des intensités de tremblement de terre. La période d'observation, de quelques siècles, est cependant faible d'un point de vue géologique, particulièrement pour les séismes importants.

II. Sismicité

On détermine la sismicité d'Aigle en se basant sur ce qui est communément admis pour la ville de Bâle qui a une sismicité historique comparable à la zone.

Intensité [MSK]	Période de retour [années]		
	Intervalles symétriques 75-25% [Rüttener 1995]	Moyenne (années) [Sägesser 1978]	Périodes de retour retenues
VII	[180 – 650]	475	475
VIII	[650 – 3'600]	1'600	2'200
IX	[1'200 – 24'000]	22'000	6'000

Tableau A.2.1. Périodes de retour retenues

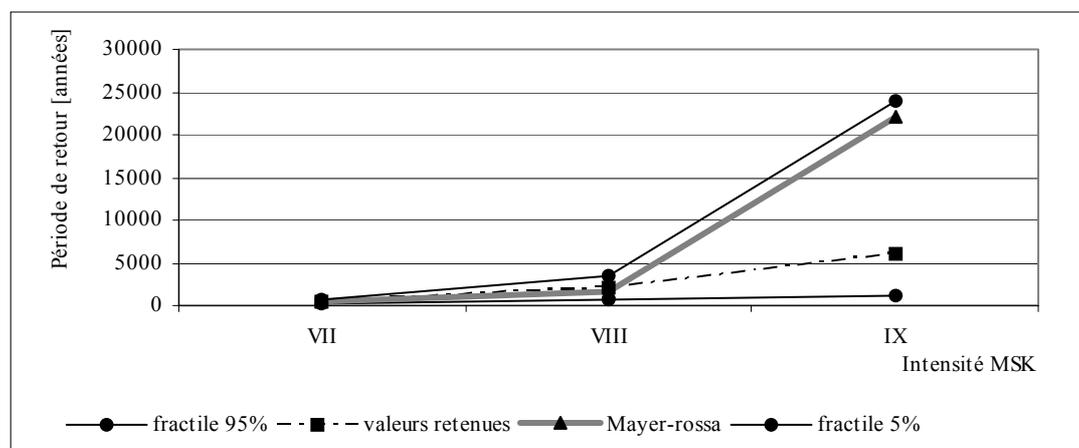


Figure A.2.1. Sismicité retenue

La figure A.2.1. montre la représentation de la sismicité retenue pour la ville d'Aigle dans ce travail. Elle est fondée sur les études Rüttener [Rüttener 1995] (Fig. A.2.2.), Mayer-Rosa [Sägesser 1978] et la documentation SIA – D045 [SIA 045 1989], repris dans un recueil des règles de l'art [Mayer 2000].

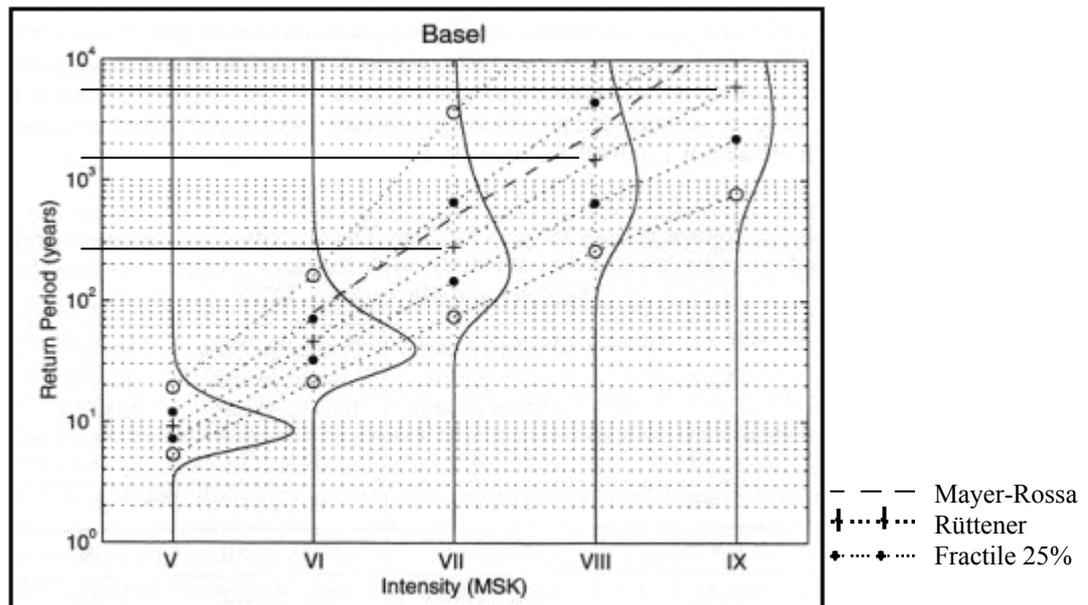


Figure A.2.2. Sismicité pour Bâle [Rüttener 1995]

La figure A.2.3. montre nouvelle zonification de la Suisse selon [SWISSCODE 2003].



Figure A.2.3. Nouvelle zonification sismique [SWISSCODE 2003]

Bibliographie

- [SIA 045 1989] **D045-SIA**, *Les prescriptions parasismiques de la norme SIA 160*, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, **1989**.
- [Mayer 2000] **Mayer-Rosa D., Jiménez J.-M.**, *Seismic Zoning : State-of-the-art and recommendations for Switzerland*, Geologische Berichte Landeshydrologie und -geologie, Nr. 26, Zürich, Switzerland, **2000**.
- [Rüttener 1995] **Rüttener E.**, *Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland*, Schweizerischer Erdbebendienst, Inst. für Geophysik - ETHZ, 29, 106, Zürich, Switzerland, 08, **1995**.
- [Sägesser 1978] **Sägesser R., Mayer-Rosa D.**, *Erdbebengefährdung in der Schweiz*, Schweizerische Bauzeitung, Zürich, Suisse, **1978**.
- [SWISSCODE 2003] **SWISSCODE**, *Collection de Normes de Structures 260 et ss*, SIA, Zürich, Switzerland, **2003**.
- [Weidmann 2002] **Weidmann M.**, *Erdbeben in der Schweiz*, Schweizerischen Erdbebendienst, Zürich, Switzerland, **2002**.

Annexe 3

Inventaire sismique

I. Introduction

Cette annexe donne des informations générales sur l'inventaire sismique de la population de bâtiments d'Aigle. Les valeurs retenues pour la vulnérabilité dudit bâti sont expliquées. L'inventaire est une étape préliminaire essentielle à la bonne réalisation d'une quantification du risque.

II. Inventaire

On donne dans ce paragraphe quelques données statistiques générales tirées de l'inventaire sismique réalisé à l'institut de béton de l'EPFL [Brennet 2002], comme par exemple, la répartition des bâtiments selon leur affectation et leur type de construction, montrée à la Figure A.3.1. ci-dessous. On observe que la grande majorité des bâtiments sont des bâtiments d'habitation (63%).

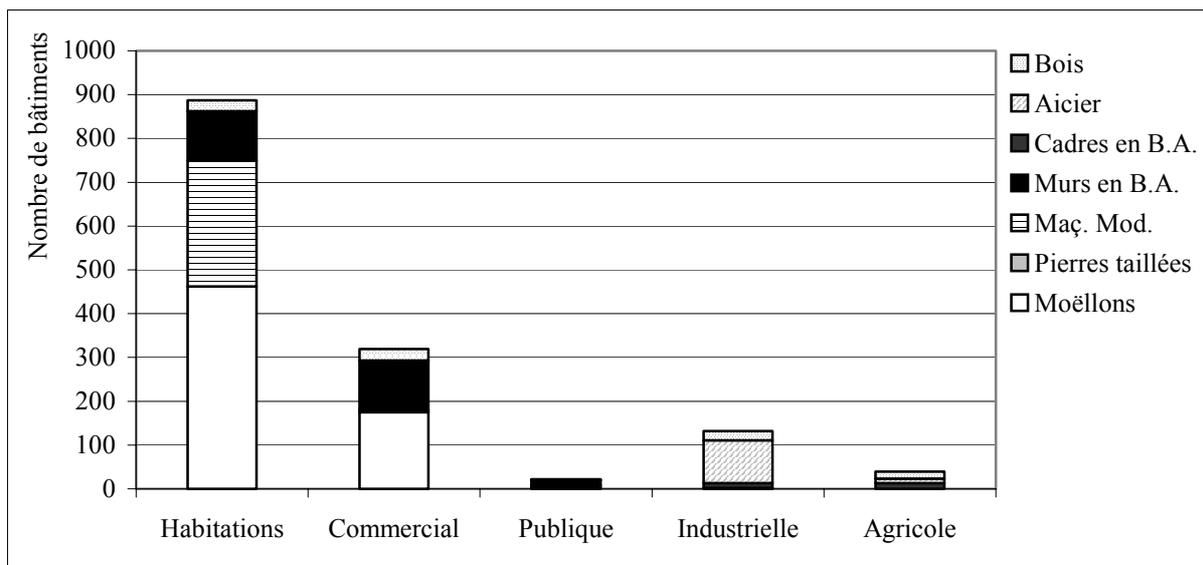


Figure A.3.1. Répartition des bâtiments selon leur affectation

III. Classes de vulnérabilité

On détermine ensuite l'importance des différentes classes de vulnérabilité en répartissant dans les classes définies par l'Echelle Macrosismique Européenne [EMS 1998], ci-après EMS-98, les bâtiments selon le tableau A.3.1. ci-après, en fonction du type de structures rencontrées et du nombre d'étages, allant de A, la plus vulnérable, à F, la moins vulnérable.

Catégories sismiques	Nombre d'étages	Classes de vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
Moellons	1 - 2.5	30	50	20			
	3 - 3.5	50	40	10			
	4 - 4.5	60	40				
	5 - 5.5	70	30				
	6 - 6.5						
	7 et +						
Maç. Moderne	1 - 2.5		10	50	40		
	3 - 3.5		20	70	10		
	4 - 4.5	10	50	40			
	5 - 5.5	20	70	10			
	6 - 6.5	20	70	10			
	7 et +	20	70	10			
Murs en B.A.	1 - 2.5				40	50	10
	3 - 3.5			10	70	20	
	4 - 4.5			40	50	10	
	5 - 5.5		10	70	20		
	6 - 6.5		10	70	20		
	7 et +		10	70	20		
Cadres B.A.	1 - 2.5				20	30	50
	3 - 3.5			10	20	50	20
	4 - 4.5		10	10	40	30	10
	5 - 5.5		10	20	50	20	
	6 - 6.5		10	20	50	20	
	7 et +		10	20	50	20	
Bois	1 - 2.5			20	30	50	
	3 - 3.5		10	20	50	20	
	4 - 4.5	10	10	40	30	10	
	5 - 5.5	10	20	50	20		
	6 - 6.5	10	20	50	20		
	7 et +	10	20	50	20		
Acier	1 - 2.5				20	30	50
	3 - 3.5			10	20	50	20
	4 - 4.5		10	10	40	30	10
	5 - 5.5		10	20	50	20	
	6 - 6.5		10	20	50	20	
	7 et +		10	20	50	20	
Pierres taillées	1 - 2.5		10	50	40		
	3 - 3.5		20	70	10		
	4 - 4.5	10	50	40			
	5 - 5.5	20	70	10			
	6 - 6.5	20	70	10			
	7 et +	20	70	10			
	Eglises	20	70	10			

Tableau A.3.1. Allocation aux classes de vulnérabilité

On obtient pour Aigle la répartition par classes de vulnérabilité présentée à la figure A.3.2..

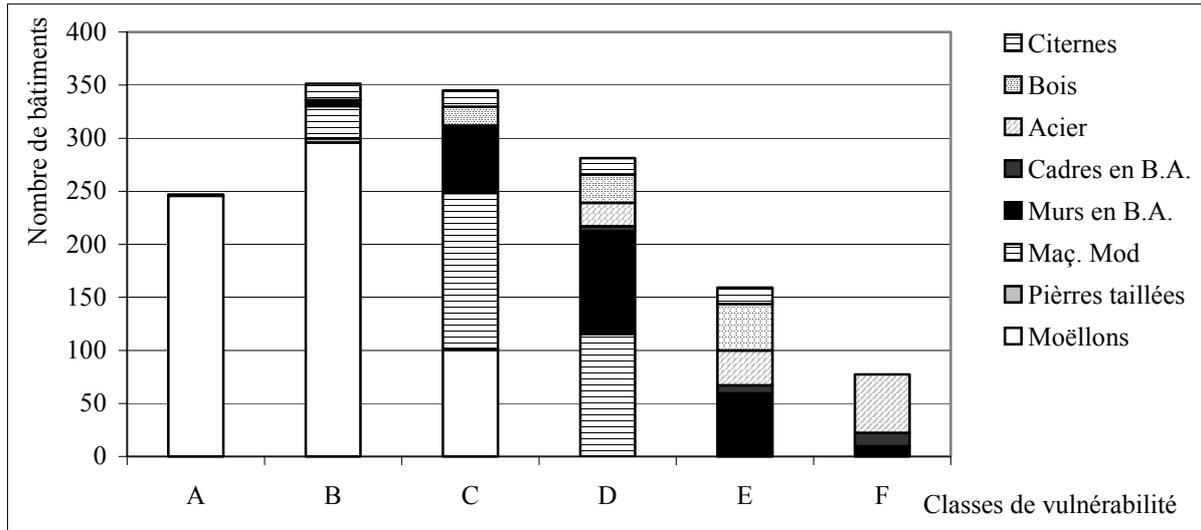


Figure A.3.2. Répartition des bâtiments dans les classes de vulnérabilité et types de structures

IV. Degrés de dommages (DG) EMS-98

On détermine la distribution des dommages EMS-98 avec trois niveaux de vulnérabilité du bâti. La première qui a été utilisée dans d'autres études similaires pour la ville de Bâle [Fäh 2001] est appelée vulnérabilité moyenne. La deuxième qui a été appliquée pour l'inventaire sismique [Brenet 2002] est appelée vulnérabilité pessimiste. La troisième enfin moins conservatrice, est appelée vulnérabilité optimiste. Ces trois vulnérabilités ont été considérées comme les caractéristiques d'une répartition des bâtiments suivant une loi normale (Annexe 5 : Eléments de probabilités), à savoir la moyenne pour la vulnérabilité moyenne, et plus ou moins un écart-type pour les deux autres vulnérabilités.

Comme indiqué dans son annexe B.3, l'EMS-98 propose une corrélation entre l'intensité sismique et l'endommagement des bâtiments. Elle utilise pour ce faire des indications du type « few » (quelques), « many » (beaucoup) et « most » (la plupart). Une valeur quantitative pour ces termes est reproduite à la Figure A.3.3. ci-après.

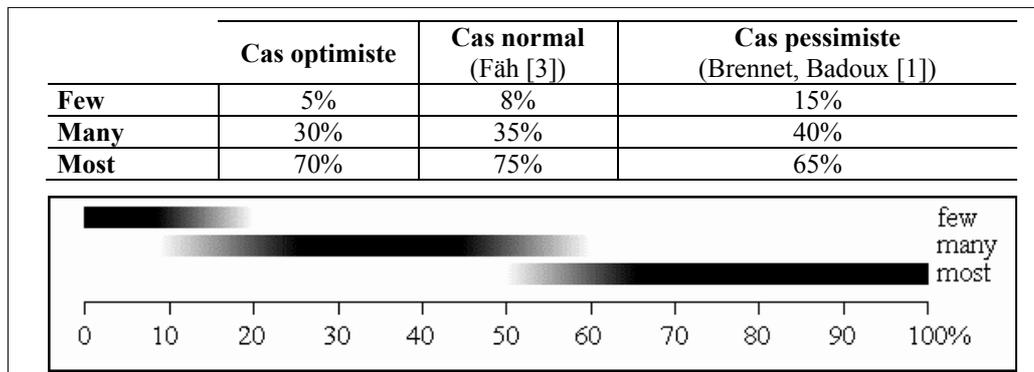


Figure A.3.3. Description quantitative du nombre de bâtiments, tiré de [2]

On ne mentionne dans l'EMS-98 que les deux degrés de dégâts les plus élevés pour une classe de vulnérabilité particulière; on suppose qu'un nombre proportionnel de bâtiments subiront

des dégâts de degré plus faible. Pour l'inventaire sismique de la ville d'Aigle ces termes ont généralement été quantifiés sur la base du tableau A.3.2..

DG	0			1			2			3			4			5		
Classes	VII	VIII	IX															
A										Ma			Mo	Ma		-	Mo	F
B							Ma			Mo	Ma		-	Mo		-	-	Ma
C							Mo			-	Mo		-	-	Mo	-	-	-
D				Mo			-	Ma		-	-	Mo	-	-	-	-	-	-
E				-	Ma		-	Mo		-	-	-	-	-	-	-	-	-
F				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

F=Few / Ma=Many / Mo=Most

Tableau A.3.2. Allocation quantitative

On alloue finalement à chaque classe de vulnérabilité une répartition dans les degrés de dommage de l'EMS-98. Cela est fait à l'aide d'une matrice. On présente à titre d'exemple, dans le tableau A.3.3., cette matrice pour une intensité MSK de VII pour les trois types de vulnérabilités retenues; optimiste, moyenne et pessimiste.

		MSK Intensité - VII								
		(1)	(2)	(3)				(1)	(2)	(3)
A	DG5	0	0	0	B	DG5	0	0	0	
	DG4	3	5	15		DG4	0	0	0	
	DG3	22	25	40		DG3	3	5	15	
	DG2	32	30	25		DG2	22	25	35	
	DG1	32	30	20		DG1	44	40	30	
	Rien	11	10	0		Rien	31	30	20	
C	DG5	0	0	0	D	DG5	0	0	0	
	DG4	0	0	0		DG4	0	0	0	
	DG3	0	0	0		DG3	0	0	0	
	DG2	3	5	15		DG2	0	0	0	
	DG1	22	25	30		DG1	0	5	15	
	Rien	75	70	55		Rien	100	95	85	
E	DG5	0	0	0	F	DG5	0	0	0	
	DG4	0	0	0		DG4	0	0	0	
	DG3	0	0	0		DG3	0	0	0	
	DG2	0	0	0		DG2	0	0	0	
	DG1	0	0	0		DG1	0	0	0	
	Rien	100	100	100		Rien	100	100	100	

- (1) Vulnérabilité optimiste
 (2) Vulnérabilité moyenne
 (3) Vulnérabilité pessimiste

Tableau A.3.3. Détermination des degrés de dommages EMS-98

V. Courbes de vulnérabilité

On peut dès lors établir les courbes de vulnérabilité, soit les dommages par degré de l'ensemble du bâti d'Aigle, et cela pour les trois niveaux de vulnérabilité. La figure A.3.4. donne graphiquement cette courbe pour la vulnérabilité pessimiste.

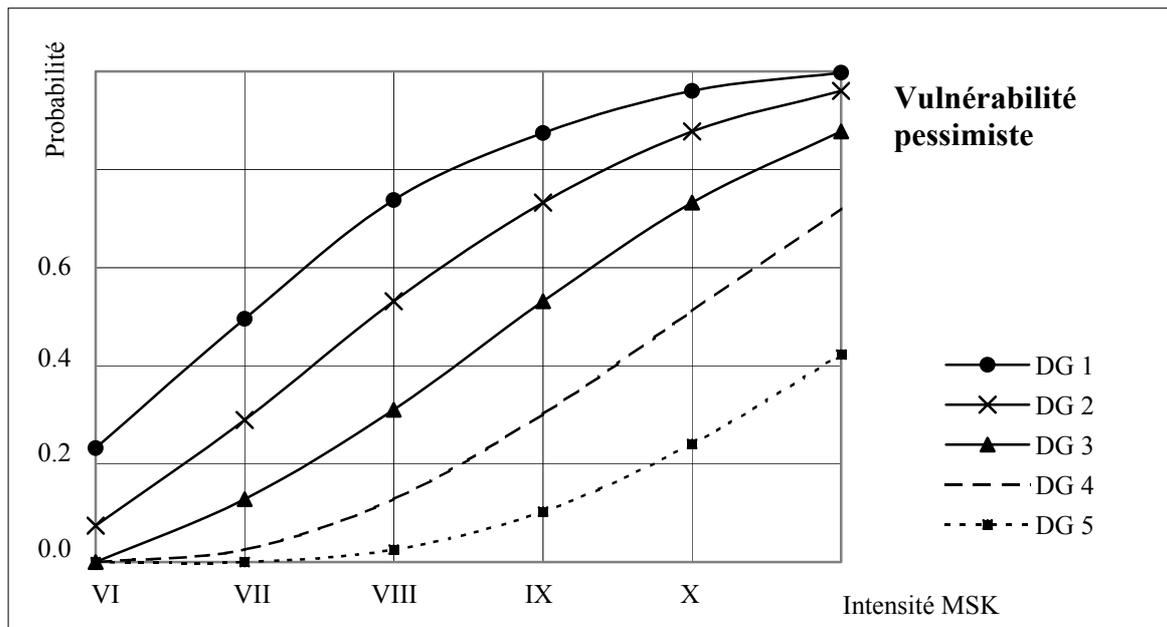


Figure A.3.4. Courbes de vulnérabilité du bâti d'Aigle

Bibliographie

- [Brennet 2002] **Brennet G., Peter B. K., Badoux M.**, *Inventaire sismique de la ville d'Aigle*, EPFL-IS.BETON, Lausanne, Suisse, **2002**.
- [EMS 1998] **EMS-98**, *Echelle macroscopique européenne*, Centre européen de Géodynamique et de sismologie, Luxembourg, **2001**.
- [Fäh 2001] **Fäh D., Kind F, Lang K, D. Giardini**, *Earthquake scenarios for the city of Basel*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 405-413, Zürich, Switzerland, **2001**.

Annexe 4

Courbes d'endommagement

I. Buts et objectifs

Cette annexe présente la méthode de construction des courbes d'endommagement. Elles fournissent le rapport entre le degré de dommage selon l'EMS-98 [EMS 1998] et le nombre de personnes atteintes dans leur intégrité physique par la construction des courbes de vulnérabilité humaine. Elle donne également le pourcentage des pertes attendues pour les valeurs mobilières et immobilières en fonction de degré de dommage EMS-98.

II. Courbes de vulnérabilité humaine

1. Nombre de personnes par bâtiment

Le nombre moyen de personnes par bâtiment a été obtenu par échantillonnage (visite sur place) de 3 à 5 bâtiments par catégorie retenue. Ce nombre représente la capacité moyenne des bâtiments. On donne les résultats dans le tableau A.4.1. ci-dessous. Deux critères principaux ont été pris en compte pour déterminer ces catégories. Tout d'abord le type de matériau de construction, puis pour les deux types principaux, c'est-à-dire les bâtiments en béton armé et en maçonnerie, le nombre d'étages.

Matériaux	Nombre moyen de personnes	Nombre d'étages
Béton armé & Maçonnerie	2.20	1 - 2.5
	8.40	3 - 3.5
	17.00	4 - 4.5
	37.60	5 - 5.5
	61.00	6 - 6.5
	89.30	7 - 7.5
	108.00	8 - 8.5
	111.00	9 - 9.5
Acier	5.20	
Bois	2.60	
Autres	2.60	

Tableau A.4.1. : Nombre moyen (capacité) de personnes par bâtiment

On montre à la Figure A.4.1. le nombre moyen de personne pouvant être contenues dans les bâtiments en fonction de leur nombre d'étages. On fait cela uniquement pour les bâtiments en béton armé et en maçonnerie.

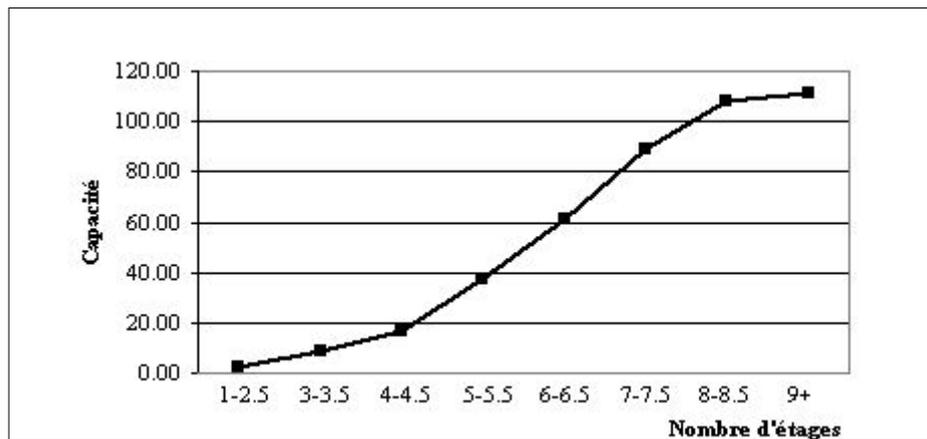


Figure A.4.1. : Nombre moyen (capacité) de personnes par bâtiment vs Nombre d'étages

2. Occupation des bâtiments en fonction du temps

On fait ici une séparation de tous les bâtiments de la commune d'Aigle en fonction de leur utilisation en deux catégories, bâtiments résidentiels et non résidentiels.

Catégories	Utilisation	Nombre [Bâtiments]
Résidentiels	Habitation	887
	Total [Bâtiments]	887
Non résidentiels	Agricole	39
	Industriel	132
	Public	22
	Commercial	319
	Total [Bâtiments]	512

Tableau A.4.2. Catégories de bâtiments pour Aigle

On détermine l'occupation moyenne des deux catégories retenues sur la base des pourcentages moyens d'occupation usuels [Coburn 2002].

Valeur moyenne d'occupation pour les bâtiments résidentiels en zone urbaine. **65 %**

Valeur moyenne d'occupation pour les bâtiments non résidentiels en zone urbaine. **40 %**

Dans cette étude, chaque bâtiment est considéré individuellement en lui allouant, selon son utilisation, le taux moyen d'occupation correspondant.

3. Impacts

On détermine le nombre de personnes captives lors de l'écroulement de tout ou partie d'un bâtiment. Les personnes captives sont celles qui ne peuvent sortir de l'immeuble et qui sont prises sous les décombres. Ce pourcentage varie évidemment en fonction du niveau des dommages des bâtiments, exprimé en degrés de dommage. Ce pourcentage est ensuite réparti selon la gravité des atteintes, allant du décès aux blessures légères (Tableau A.4.3.). Pour ce faire, on se base principalement sur les statistiques disponibles, compilées dans [Coburn 2002] et [Nichols 2003]. On détermine trois cas de figure, un optimiste, un moyen, et un pessimiste. Ces trois cas de figure ont été considérés, par hypothèse, comme les

caractéristiques d'une fonction de répartition suivant une loi normale (Annexe 5 : Eléments de probabilités), à savoir la moyenne pour le cas moyen, et plus ou moins un écart-type pour les deux autres cas.

Degrés EMS-98	0	1	2	3	4	5
Personnes captives [en % des personnes à l'intérieur au moment du séisme]						
Optimiste	0.0%	0.5%	2.0%	4.0%	15.0%	35.0%
Moyen	0.0%	1.0%	3.0%	7.0%	20.0%	40.0%
Pessimiste	1.0%	2.0%	4.0%	10.0%	25.0%	50.0%
Gravité [en % des personnes captives]						
Morts	0.0%	0.0%	5.0%	10.0%	20.0%	30.0%
Blessés graves	0.0%	5.0%	15.0%	20.0%	20.0%	25.0%
Blessés légers	100.0%	95.0%	80.0%	70.0%	60.0%	45.0%

Tableau A.4.3. Personnes touchées

En combinant les pourcents de personnes captives et les degrés d'atteintes, on obtient le Tableau A.4.4..

Degrés EMS-98	0	1	2	3	4	5
Optimiste						
Atteintes [% des personnes à l'intérieur au moment du séisme]						
Morts	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	3.0%	10.5%
Blessés graves	0.0%	0.0%	0.3%	0.8%	3.0%	8.8%
Blessés légers	0.0%	0.5%	1.6%	2.8%	9.0%	15.8%
Moyen						
Atteintes [% des personnes à l'intérieur au moment du séisme]						
Morts	0.0%	0.0%	0.2%	0.7%	4.0%	12.0%
Blessés graves	0.0%	0.1%	0.5%	1.4%	4.0%	10.0%
Blessés légers	0.0%	1.0%	2.4%	4.9%	12.0%	18.0%
Pessimiste						
Atteintes [% des personnes à l'intérieur au moment du séisme]						
Morts	0.0%	0.0%	0.2%	1.0%	5.0%	15.0%
Blessés graves	0.0%	0.1%	0.6%	2.0%	5.0%	12.5%
Blessés légers	1.0%	1.9%	3.2%	7.0%	15.0%	22.5%

Tableau A.4.4. Vulnérabilité humaine (pourcentages et gravité)

3. Courbes

On alloue donc le pourcentage ci-dessus de personnes impliquées dans l'événement sismique. On en déduit les courbes de vulnérabilité humaine présentées à la Figure A.4.2. pour les trois cas envisagés.

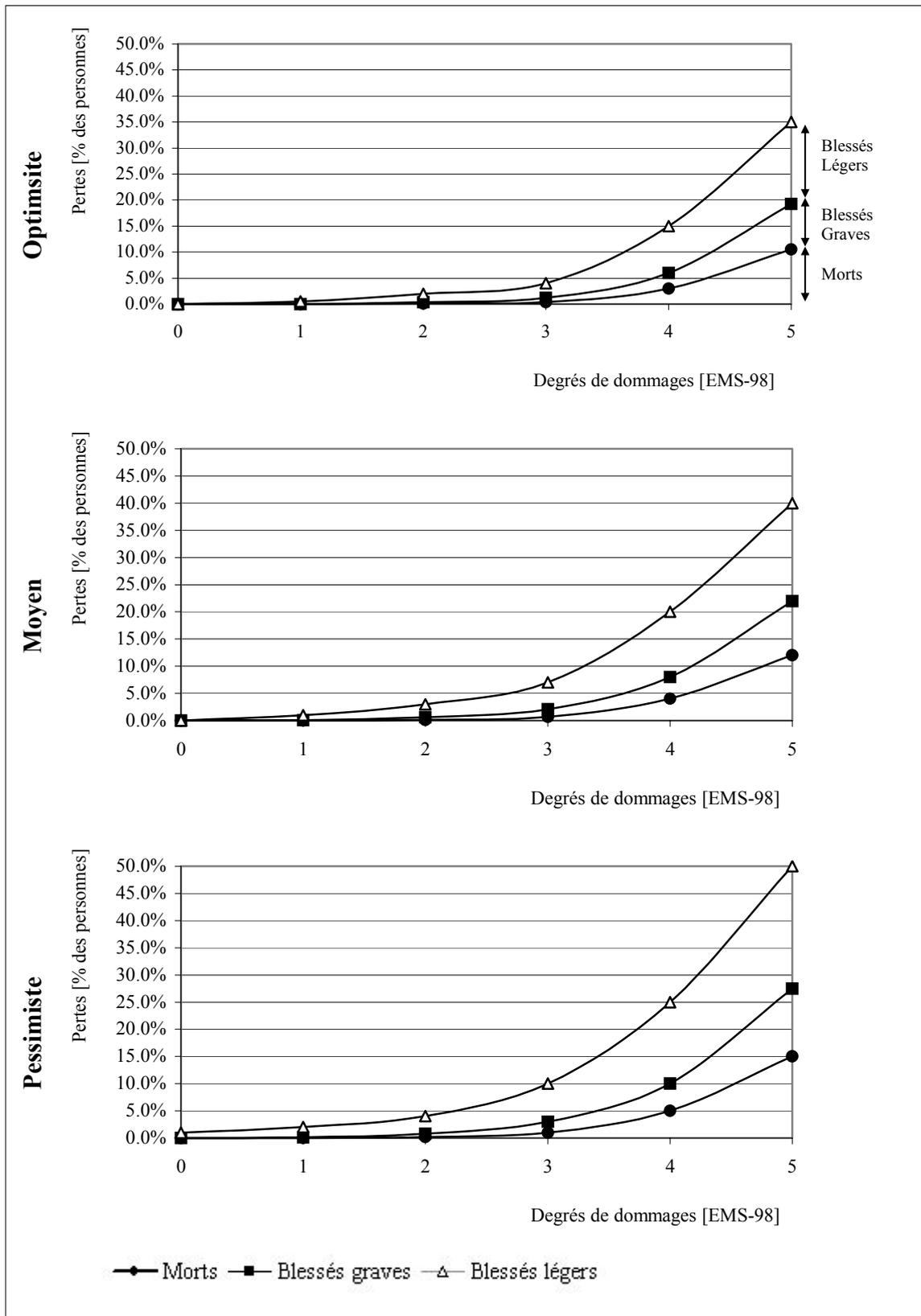


Figure A.4.2. Vulnérabilité humaine

III. Courbes d'endommagement des valeurs assurées

On détermine trois cas de figure, un optimiste, un moyen et un pessimiste. Ces trois cas de figure ont été considérés, par hypothèse, comme les caractéristiques d'une répartition de la diminution de valeur suivant une loi normale (Annexe 5 : Eléments de probabilités), à savoir la moyenne pour le cas moyen, et plus ou moins un écart-type pour les deux autres cas.

1. Valeurs immobilières

On détermine dans ce paragraphe la relation entre les degrés de dommage selon l'EMS-98 et le niveau, en pourcentage des valeurs de remplacement assurées, de la perte potentielle attendue.

Degrés EMS	0	1	2	3	4	5
Pertes immobilières [en % de la valeur assurée]						
Optimiste	0.0%	0.4%	4.0%	20.0%	70.0%	95.0%
moyenne	0.0%	0.5%	5.0%	30.0%	80.0%	100.0%
Pessimiste	0.0%	0.6%	6.0%	40.0%	90.0%	100.0%

Tableau A.4.5. Endommagement immobilier

Une courbe initiale a été construite sur la base d'un travail systématique de recueil statistique [Swiss Re 2002]. On cale la courbe ainsi obtenue aux spécificités helvétiques. Pour cela, une méthode dite d'experts (Annexe 5 : Eléments de probabilités) a été utilisée. Ces experts ont estimés, sur la base de leur expérience, des pourcentages de la valeur de remplacement en fonction du degré d'endommagement constaté. Le tableau A.4.5. et la Figure A.4.3. donnent les résultats de cette démarche.

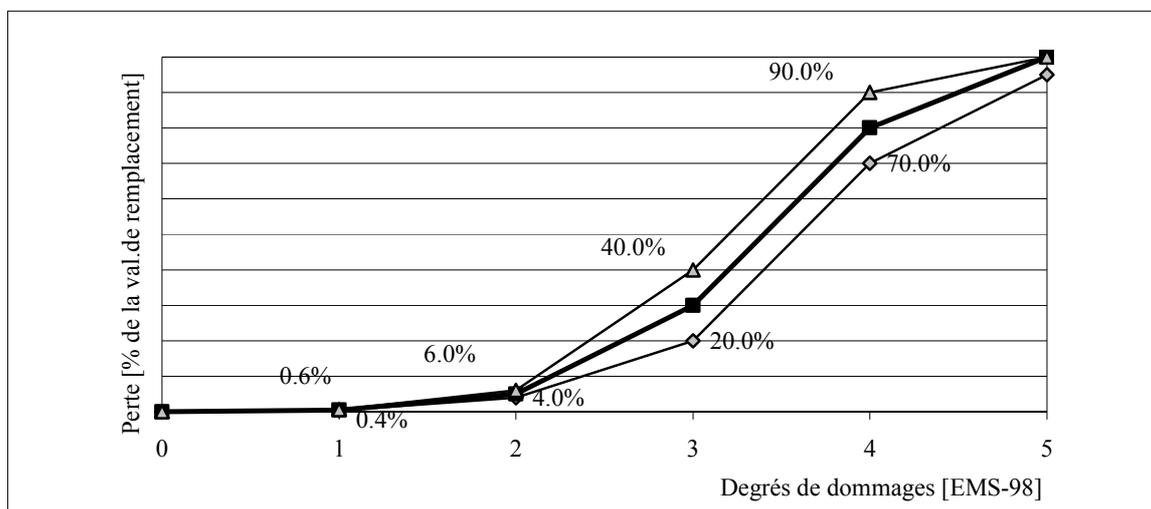


Figure A.4.3. Courbe d'endommagement immobilier

2. Valeurs mobilières

On procède de la même manière qu'au paragraphe précédent pour déterminer la relation entre les degrés de dommage selon l'EMS-98 et le niveau, en pourcentage, de la valeur assurée mobilière potentielle attendue. Les résultats obtenus avec ces courbes sont ensuite comparés au modèle proposé dans [Saeki 2000] et montrent une bonne corrélation.

Degrés EMS	0	1	2	3	4	5
Pertes immobilières [en % de la valeur assurée]						
Optimiste	0.0%	0.4%	3.0%	15.0%	60.0%	80.0%
moyenne	0.0%	0.5%	4.0%	20.0%	70.0%	90.0%
Pessimiste	0.0%	0.6%	5.0%	25.0%	80.0%	100.0%

Tableau A.4.6. Endommagement mobilier

La courbe ainsi construite souffre du manque d'information statistique pour des événements sismiques affectant un portefeuille mobilier assuré comparable à celui couvert par l'ECA. Elle se base sur l'expérience des estimateurs interviewés. Un calage de ladite courbe avec un prochain séisme afin de l'estimer de manière plus exacte sera essentiel.

Bibliographie

- [Coburn 2002] **Coburn A., Spence R.**, *Earthquake Protection*, Chichester, United Kingdom, **1992, 2002**.
- [EMS 1998] **EMS-98**, *Echelle macroscopique européenne*, Centre européen de Géodynamique et de séismologie, Luxembourg, **2001**.
- [Nichols 2003] **Nichols J.M., Beavers J.E.**, *Development and Calibration of a Synthetic Earthquake Fatality Function*, Earthquake Spectra, Submitted Paper, Oakland, USA, **2003**.
- [Saeki 2000] **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, NZ, **2000**.
- [Swiss Re 2002] **Bertogg M., Hitz L., Schmid E.**, *Earthquake Vulnerability Function derived from Loss Data*, 12th European Conference in Earthquake Engineering, London, U.K., **2002**.
- [Whitman 1973] **Whitman & al.**, *Earthquake Probability Matrices*, Proceeding of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, col.1., p. 2531, UK, **1973**.

Annexe 5

Eléments de probabilités

I. Buts et objectifs

Cette annexe précise les bases probabilistes utilisées dans cette étude. L'approche probabiliste appliquée pour notre étude de risque est envisageable du fait du nombre important de bâtiments du portfolio considéré, appelé population. Elle est pertinente aux vues des importantes incertitudes qui caractérisent plusieurs paramètres constitutifs du risque estimé. On passe également en revue les différents facteurs d'incertitudes.

II. Rappels de probabilités

1. Distribution gaussienne ou loi normale

La courbe de la loi normale avec moyenne et écart-type est choisie et va servir de modèle de la distribution tant pour la vulnérabilité, chaque bâtiment étant une unité statistique, que pour l'endommagement [Kahn 1988].

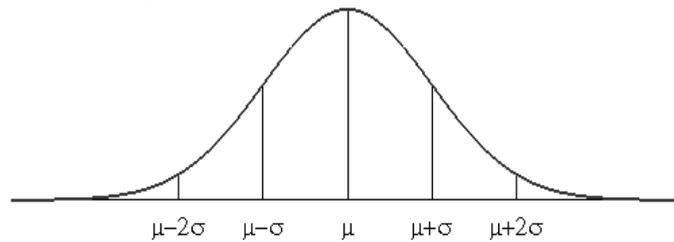


Figure A.5.1. Représentation d'une courbe de Gauss

Les deux caractéristiques principales sont la moyenne μ , qui peut être interprétée physiquement comme le centre de gravité, et les écarts-types σ , qui donnent une indication de la variabilité de la fonction de répartition.

On veut estimer la moyenne et la variance pour un échantillon quelconque. Soit (x_1, \dots, x_n) un n -échantillon d'une loi normale (ou gaussienne) $N(m, s^2)$. Pour estimer la moyenne et l'écart-type on prend les deux estimateurs naturels m et s^2 définis par les équations classiques (1) et (2) :

$$m = (x_1 + \dots + x_n)/n \quad (1)$$

et

$$s^2 = [(x_1 - m)^2 + \dots + (x_n - m)^2]/(n-1) \quad (2)$$

Environ 2/3 (0.688) des éléments d'une liste se trouvent à une distance de la moyenne inférieure d'un écart-type. Environ 95% (0,954) se trouvent à moins de deux écarts-types de la moyenne [Morgenthaler 2001].

2. Variabilité

Les données sont presque toujours influencées par différentes sources d'erreurs aléatoires, comme par exemple :

- imprécision des observations,
- influence de facteurs inconnus,
- influence de facteurs connus, mais hors de notre contrôle,
- faute de transmission des données, etc,...

La variabilité de la moyenne et de l'écart-type de n observations décroît comme la racine carrée de la taille n de l'échantillon. Avec une population de bâtiments suffisamment grande, comme c'est le cas dans notre étude, la variabilité est suffisamment petite pour être négligée.

3. Multiplication de probabilités

Les probabilités de deux événements se multiplient si ces deux événements sont indépendants. C'est-à-dire si la connaissance préalable que le premier arrivera ne change pas la probabilité de l'autre. Dans notre cas, les événements peuvent être considérés comme indépendants.

III. Incertitudes

L'estimation du risque présentée dans ce rapport est partiellement probabiliste. On a tenu compte d'une incertitude sur les paramètres les plus difficiles à quantifier. Pour les autres, comme par exemple la valeur assurée, on a admis la valeur moyenne comme déterministe. L'objectif est de pouvoir estimer, en plus du risque moyen, un « Best Case » et un « Worst Case ». Dans la mesure du possible, on a associé à ces deux cas une déviation d'un écart-type de la moyenne.

1. Aléa sismique

L'incertitude sur l'aléa sismique a été considérée comme présentée dans l'étude de [Rüttner 1995]. Elle est décrite à l'annexe 2 : Sismicité. L'aléa est le paramètre le plus incertain du modèle constitutif de quantification du risque sismique.

2. Effet de site

L'incertitude sur l'effet de site n'a pas été considérée pour la détermination du SRE. Ce paramètre a été déterminé à l'aide d'une campagne de mesures in situ [Duvernay 2003] et d'une approche expert. Par simplification, on a considéré ce paramètre comme déterministe (Annexe 1 : Aigle – Conditions géologiques locales).

3. Vulnérabilité

L'incertitude sur le comportement physique des bâtiments a été considérée en utilisant une distribution normale (Annexe 4 : Courbes d'endommagement). De nombreux éléments interviennent dans le comportement des bâtiments lors de sollicitations sismiques, comme par exemple la géométrie, la qualité des matériaux ou encore le rôle d'éléments non porteurs [Porter 2002].

IV. Méthode expert

Globalement, cette méthode consiste en une enquête comportant plusieurs étapes; elle est menée auprès d'expert/es. L'idée de base est d'utiliser les opinions qu'ont ces derniers/ères pour quantifier un paramètre. Une condition importante pour l'application de la méthode est la composition judicieuse du groupe d'experts. Les personnes sollicitées doivent être représentatives du groupe professionnel et du domaine à examiner; elles doivent par ailleurs se sentir personnellement concernées par le thème abordé. Il est important dans ce contexte de faire appel à des experts des divers secteurs du domaine en question [DELPHI 1998].

Principalement, cette étude a eu recours à l'avis d'experts pour construire les courbes d'endommagement. Il a été demandé à chaque expert de donner son opinion pour chaque variable. Les informations récoltées portent sur la moyenne et les deux premiers écarts-types. Si l'une ou l'autre des valeurs a fait l'objet d'estimations divergentes, les résultats de l'enquête ont à nouveau été soumis aux experts. Ces derniers ont ainsi la possibilité de comparer leur estimation avec celles des autres experts. Ils sont ensuite priés de remettre une nouvelle fois leur commentaire et de préciser leurs attentes [DELPHI 1998]. Ces valeurs moyennées donnent la valeur de l'estimateur pour une distribution suivant une loi de Gauss, comme montré à la figure A.5.2.. Pour validation, elles ont été ensuite confrontées aux informations statistiques disponibles ou aux autres modèles existants.

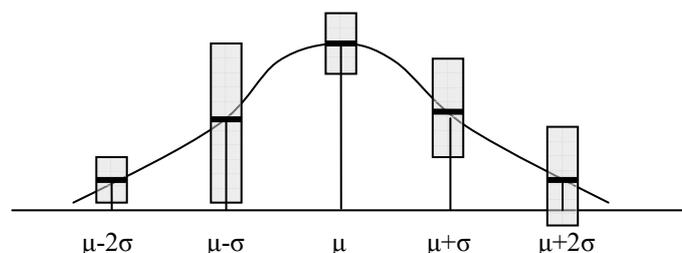


Figure A.5.3. Représentation de la méthode Expert

Bibliographie

- [DELPHI 1998] **ITA Institut für Technikfolgen-Abschätzung**, *Technologie Delphi I. Konzept und Überblick*, in: Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr, Delphi Report Austria, Wien, 1998.
- [Duvernay 2003] **Duvernay B., Widmer F., Pellissier V.**, Mesures in situ des fréquences propres de bâtiments – Projet pilote d’Aigle, EPFL & OFEG, Lausanne, Switzerland, 2003.
- [Kahn 1988] **Kahn M.**, *Statistiques et probabilités*, Collection de mathématiques du C.N.E.D., Paris, France, 1988.
- [Morgenthaler 2001] **Morgenthaler S.**, *Introduction à la statistique*, Collection Méthodes mathématiques pour l’ingénieur, PPUR, Lausanne, Suisse, 2001.
- [Porter 2002] **Porter K.A., Beck J.L., Shushkewich K. W.**, *Sensitivity of Building Loss Estimates to Major Uncertain Variable*, Earthquake Spectra, vol. 18, 719-744, Oakland (CA), U.S.A., 2002.
- [Rüttener 1995] **Rüttener E.**, *Earthquake Hazard Evaluation for Switzerland*, Schweizerischer Erdbebendienst, Inst. für Geophysik - ETHZ, 29, 106, Zürich, Switzerland, 08, 1995.