



Projet ENAC

VULNERABILITE SISMIQUE A GRANDE ECHELLE DE LA VILLE DE RENENS

Master semestre 2

Responsable : Dr. Pierino Lestuzzi

Assistant : Dr. Clotaire Michel

Le 5 juin 2009

Grégoire Ballif
Michaël Delli Gatti
Julien Demierre
Etienne Dufey

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	3
2. Échelle macrosismique européenne	4
3. Typologie « suisse »	7
3.1. Paramètres structuraux affectant la vulnérabilité	7
3.1.1. Hauteur de la structure	7
3.1.2. Matériau de construction	7
3.1.3. Année de construction	8
3.1.4. Etat d'entretien	8
3.1.5. Régularité	8
3.1.6. Position	8
3.1.7. Toiture	9
3.1.8. Défaut de conception	9
3.1.9. Typologie	9
4. Calcul de l'indice de vulnérabilité	10
4.1. Méthode Vulneralp	10
4.2. Méthode RiskUE	11
4.3. Méthode de l'OFEG	12
5. Résultats	13
5.1. Traitement des données	13
5.2. Evolution du bâti	13
5.2.1. 1800 – 1899 :	13
5.2.2. 1900 – 1944 :	13
5.2.3. 1945 – 1969 :	14
5.2.4. 1970 – 2008 :	14
5.2.5. Concordance des dates de construction	14
5.3. Répartition spatiale des types EMS	14
5.4. Nombre d'étage :	15
5.5. Indices de vulnérabilité	15
5.5.1. RiskUE	15
5.5.2. Vulneralp	16
5.6. Probabilité d'effondrement selon la méthode de l'OFEG	16
5.7. Carte des dommages	17
5.7.1. Séisme d'intensité VII	17
5.7.2. Séisme d'intensité IX	17
5.8. Influence de la position du bâtiment	18
5.9. Comparaison avec les résultats de la ville de Viège selon la méthode RiskUE	19
6. Difficultés rencontrées sur le terrain	20
7. Conclusion	20
8. Bibliographie	21
9. Annexes	22

1. INTRODUCTION

Le but de ce projet est d'évaluer la vulnérabilité sismique à grande échelle de la ville de Renens. Ce travail se déroule en deux phases bien distinctes : une première phase de travail sur le terrain durant laquelle les informations les plus pertinentes concernant les bâtiments composant la ville de Renens sont récoltées, puis une deuxième phase durant laquelle différentes méthodes de calcul sont implémentées et utilisées afin d'estimer le comportement des constructions lors d'un séisme.

Cette récolte d'informations comprend un relevé détaillé des bâtiments. Les matériaux de construction utilisés, le nombre d'étages, l'année de construction, la régularité du bâtiment, le système de contreventement et l'état d'entretien sont tous des éléments que nous avons essayé de caractériser de la manière la plus précise possible. Tous ces paramètres sont autant d'éléments qui influencent la vulnérabilité d'un bâtiment.

La deuxième phase nous permet, après avoir traité, trié et classé nos observations, d'analyser la vulnérabilité des bâtiments de la ville face à un tremblement de terre. Pour ce faire, nous avons utilisé différentes méthodes de calcul (Risk-UE, Vulneralp, ...) qui seront présentées dans ce rapport. Grâce à ces méthodes de calcul, nous avons atteint l'objectif principal de notre travail : estimer la vulnérabilité sismique de la ville de Renens. En effet ces différentes méthodes de calcul ont permis de calculer un indice de vulnérabilité puis de déterminer les dommages qu'un tremblement de terre d'une intensité donnée provoquerait. Le rapport se présente donc sous la forme suivante. Une brève introduction sur le fonctionnement de l'EMS est effectuée, ceci afin de présenter différents paramètres (classification des dégâts, typologie) qui sont réutilisés après. Les relevés sur le terrain sont ensuite approfondis de manière à expliquer quelles étaient les observations pertinentes. Par la suite, les méthodes de calcul utilisées pour la réalisation des cartes de dommages sont développées pour finalement pouvoir étudier plusieurs scénarios possibles, déterminés avec les différentes méthodes, et comparer les résultats obtenus. Ce document se termine par une conclusion englobant l'analyse des résultats ainsi que les problèmes rencontrés sur le terrain.

2. ÉCHELLE MACROSISMIQUE EUROPÉENNE

Durant tout le 20^{ème} siècle, une grande diversité d'échelles macrosismiques ont vu le jour. Ces échelles visaient à établir, au travers d'une classification des dégâts observés en un lieu donné, le degré de sévérité de la secousse sismique. La première échelle à apporter des précisions sur les ouvrages fut l'échelle MSK publiée en 1964 par Medvedev, Sponheuer et Karnik. Cette partie se focalise sur l'échelle macrosismique européenne dans sa version de 1998. Celle-ci s'intéresse aussi bien au site, aux fondations, à la forme du bâtiment, au système porteur ainsi qu'aux éléments non porteurs et non structuraux. Elle prend également en compte les répercussions de la dégradation d'une partie du bâtiment sur le comportement global de celui-ci. De plus, c'est la première échelle d'intensité à être illustrée, permettant ainsi d'améliorer le degré de normalisation entre les différents utilisateurs.

Pour analyser le risque sismique à l'échelle d'une ville comme Renens, il est nécessaire de regrouper les bâtiments selon une typologie, qui se doit d'être un compromis entre une description précise du bâti et une classification fondée uniquement sur le matériau de construction utilisé pour les éléments de stabilisation. La typologie utilisée dans l'EMS-98 est l'une des plus simples applicables en Europe. Elle est principalement basée sur le matériau de construction et éventuellement sur le matériau des planchers et le niveau de conception parasismique. Les principales catégories qui en font partie et qui peuvent être trouvées dans une ville comme Renens sont : maçonnerie en pierre brute (M3), maçonnerie en briques avec planchers bois (M5), maçonnerie en briques avec plancher béton (M6), béton armé (RC) et structures métalliques (S). Les diverses autres classes sont présentées sur la figure 1.

L'échelle macrosismique européenne regroupe tout d'abord les différentes structures selon leur type (typologie). Elle attribue, ensuite, pour chaque type de structures, une classe de vulnérabilité la plus probable. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 1, une première distinction est effectuée en fonction du type de matériau utilisé pour la réalisation de l'ouvrage : maçonnerie ou béton armé. Dans un deuxième temps, il faut déterminer le type d'éléments utilisés pour les constructions en maçonnerie de même que le niveau de conception parasismique lorsque l'on a à faire à une structure en béton armé. L'utilisation de classes n'a pour but que de représenter de manière rudimentaire différents niveaux de vulnérabilité. Une même secousse détruira fortement un bâtiment en brique crue alors qu'elle aura beaucoup moins d'effet sur une construction en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique. Bien entendu, d'autres facteurs tels que l'état du bâtiment et sa régularité ont aussi une influence sur la vulnérabilité, comme il sera présenté par la suite.

Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○	—			
	Pierre brute	—	○			
	Pierre massive		—	○	—	
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués		—	○	—	
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé			—	○	—
	Renforcée ou chaînée				—	○
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)		—	○	—	
	Ossature avec un niveau moyen de CPS			—	○	—
	Ossature avec un bon niveau de CPS				—	○
	Murs sans CPS		—	○	—	
	Murs avec un niveau moyen de CPS			—	○	—
	Murs avec un bon niveau de CPS				—	○
ACIER				—	○	—
BOIS			—	○	—	

Figure 1: Différenciation des structures en classe de vulnérabilité¹

Le concept de vulnérabilité est quelque chose de fondamental pour la construction des échelles d'intensité. Il permet, en effet, d'exprimer les différences de réaction des divers bâtiments face aux secousses sismiques. Ainsi, si deux groupes de bâtiments sont soumis exactement à la même secousse sismique, on dira que les bâtiments qui ont été le moins endommagés avaient une vulnérabilité plus faible. Six classes de vulnérabilité ont été proposées (figure 1). Les trois premières classes représentent la résistance d'une maison « typique » en briques crues, d'un bâtiment de briques et d'une structure en béton armé. Les trois classes suivantes (D-F) sont prévues pour représenter la décroissance de la vulnérabilité en fonction du niveau de conception parasismique.

Dans un deuxième temps, cinq degrés de dégâts allant de négligeables à destruction totale sont illustrés pour les bâtiments en béton armé et en maçonnerie. En effet, les types de dégâts constatés sur les bâtiments sont différents qu'il s'agisse d'un ouvrage en maçonnerie ou en béton armé. Pour chaque degré de dégâts et pour des bâtiments en maçonnerie et en béton armé, un petit texte explicatif ainsi qu'une représentation des dégâts est donnée, permettant ainsi une bonne qualification de l'intensité du séisme.

Finalement l'EMS-98 classe l'amplitude des vibrations du sol en douze degrés d'intensité différents allant de secousse imperceptible jusqu'à catastrophe généralisée. Ces différents degrés sont définis par leurs effets sur les humains, sur les objets de la vie courante ainsi que principalement par leurs dégâts sur les bâtiments.

Dans l'échelle macrosismique européenne 98, l'intensité d'un séisme est considérée comme une classification de la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans

¹Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, L'Echelle Macrosismique Européenne, G.Grünthal

une zone limitée. Cette intensité permet de regrouper tous les effets d'un tremblement de terre sous la forme d'un symbole unique. Les échelles d'intensité sont généralement constituées de toute une série de descriptions des effets des différents degrés de secousses sismiques sur un certain nombre d'éléments que l'on retrouve dans le quotidien. On considère ces différents éléments comme des indicateurs. Le grand avantage de ceux-ci est qu'il ne s'agit pas d'équipements spéciaux, ils font partie de l'environnement normal. Les indicateurs généralement utilisés peuvent être scindés en quatre groupes :

- Etres vivants : personnes et animaux. La part de la population qui a ressenti la secousse est évaluée. Le comportement des animaux peut aussi servir d'indicateur.
- Objets ordinaires : plus la secousse est importante, plus le nombre d'objets de la vie quotidienne (vaisselle, livres) vont tomber, voire se casser.
- Bâtiments : plus la secousse est importante, plus le nombre de bâtiments endommagés est important avec de gros dégâts
- Environnement naturel : des particularités telles que des fissures dans des digues ou des chutes de rochers peuvent être observées.

Comme nous l'avons vu plus haut, l'échelle macrosismique européenne (EMS-98) travaille principalement avec les trois premiers types d'indicateurs. Le quatrième groupe, l'environnement naturel, est considéré comme beaucoup moins fiable.

Une fois que toutes les données descriptives disponibles pour un lieu donné et une secousse donnée ont été réunies, il faut faire un choix concernant l'intensité qui correspond le mieux aux dégâts observés. Malgré le caractère scientifique de cette méthode, elle n'est donc pas univoque.

3. TYPOLOGIE « SUISSE »

Au fil du temps, différents auteurs des échelles et scientifiques se sont rendu compte que la simple utilisation du type de bâtiment considéré comme analogue à la vulnérabilité était insuffisante. En effet, les variations de résistance à l'intérieur d'un même type de bâtiment étaient souvent aussi importantes que les variations entre différents types de bâtiments.

Nous allons donc dans la suite de ce travail, traiter les différents éléments influençant la vulnérabilité afin de définir une typologie du bâti plus précise que celle de l'EMS, typologie que nous utiliserons afin de calculer des cartes de dommages. Cette partie du travail donne donc un aperçu des différents éléments qui ont été relevés sur le terrain et traite également les différents problèmes que nous avons pu rencontrer lors de cette évaluation. Ceci montre qu'il n'est pas forcément aisé de déterminer avec certitude les éléments influençant la vulnérabilité.

3.1. Paramètres structuraux affectant la vulnérabilité

En dehors du type de construction, différents paramètres influent sur le niveau global de vulnérabilité d'une structure. Les trois paramètres les plus importants sont la hauteur de la structure, le matériau des éléments horizontaux, le matériau des éléments verticaux ainsi que la période de construction. D'autres paramètres tels que l'état d'entretien, la régularité ainsi que la position influencent également la vulnérabilité des bâtiments. Le niveau de conception parasismique, qui est présent dans bon nombre de typologies, est moins important dans le cas de la Suisse car on considère que seuls les bâtiments construits récemment bénéficient de la prise en compte du séisme dans leur dimensionnement.

Lors de l'évaluation des différents bâtiments de la ville de Renens, nous nous sommes donc attelés à déterminer du mieux possible, les différents éléments présentés ici.

3.1.1. Hauteur de la structure

La hauteur de la structure, mais surtout le nombre d'étages de la structure, est un paramètre primordial. On considère en effet que seuls les bâtiments compris entre 3 et 8 étages sont problématiques d'un point de vue sismique dans un pays à sismicité modérée tel que la Suisse. Les bâtiments plus petits ne subissent que des déformations limitées dues à leur fréquence de résonance élevée. Les grands bâtiments, quand à eux, subissent des déplacements importants mais ont l'avantage d'avoir été dimensionnés pour une action de vent qui est souvent prépondérante sur l'action sismique.

En ce qui concerne les bâtiments en béton, le nombre d'étages est facile à déterminer car il suffit de déterminer le nombre de planchers. Pour les bâtiments en maçonnerie, la difficulté provient du fait que les planchers ne constituent pas forcément des diaphragmes et que les combles, selon leur masse, peuvent également être comptabilisés en tant qu'étage.

La présence d'un rez surélevé ainsi que des fondations est également notée.

3.1.2. Matériau de construction

Le deuxième paramètre important concerne le matériau utilisé pour la construction des contreventements (éléments verticaux). Une première distinction est effectuée entre les bâtiments en maçonnerie et les bâtiments en béton armé. Pour les premiers, il faut dans un

deuxième temps déterminer le type d'éléments utilisés (brique ou pierre naturelle). Cette distinction n'est pas toujours évidente puisque la maçonnerie est pratiquement toujours recouverte d'une couche de crépi assez épaisse. De plus, il faut également déterminer si le bâtiment est stabilisé par des refends verticaux ou par un système de cadre.

Le matériau constituant les planchers (éléments horizontaux) est également déterminé. La distinction est faite entre les planchers en bois et ceux en béton armé. Le type de matériau utilisé pour les éléments horizontaux influence le comportement dynamique du bâtiment.

3.1.3. Année de construction

Afin de quantifier l'indice de vulnérabilité à l'aide des différentes méthodes qui seront présentées ultérieurement, il est nécessaire de déterminer la période de construction des bâtiments. Les différentes périodes sont les suivantes : <1900, 1900 - 1944, 1945 - 1969, 1970 - 2004, >2004.

Cette opération s'est révélée assez aléatoire, puisque nous ne disposons d'aucune indication précise si ce n'est l'architecture du bâtiment, et comme nous le verrons plus tard, son aspect esthétique peut induire en erreur l'observateur sur la détermination de son année de construction.

3.1.4. Etat d'entretien

L'état d'entretien des bâtiments influence également l'indice de vulnérabilité. En effet, un bâtiment qui a fait l'objet d'un entretien régulier se comportera conformément à la résistance attendue. A contrario, la résistance d'un bâtiment qu'on a laissé se dégrader pourrait être fortement réduite.

La difficulté principale dans la détermination du niveau d'entretien provient du fait qu'un bâtiment peut apparaître bien entretenu car une attention toute particulière a été portée à l'aspect extérieur alors que le système structural du bâtiment n'a lui fait l'objet d'aucune attention particulière.

3.1.5. Régularité

Comme nous l'avons vu dans le cours de génie parasismique, le bâtiment idéal, d'un point de vue sismique serait un cube dans lequel aucun saut de rigidité n'est présent et où les éléments internes de rigidité (cage d'escalier, cage d'ascenseur) sont disposés de manière symétrique. Cependant, de tels bâtiments seraient incommodes d'un point de vue fonctionnel. Nous avons donc affaire, dans la quasi-totalité des bâtiments observés, à des variations plus ou moins importantes de ce plan idéal. Plus on s'en éloigne, plus la vulnérabilité du bâtiment sera grande. Il était donc important de déterminer la régularité en plan et en élévation des différents bâtiments évalués.

3.1.6. Position

La position du bâtiment par rapport aux autres revêt également une certaine importance. En effet, si deux bâtiments accolés l'un à l'autre n'ont pas la même hauteur d'étage et oscillent à des fréquences différentes des problèmes de martèlement peuvent apparaître et causer des dégâts importants.

Il est également important de relever la position relative des bâtiments lorsque ceux-ci sont accolés. En effet, les bâtiments situés dans un angle ou en bout de bloc sont plus vulnérables, car leurs déplacements sont moins entravés.

3.1.7. Toiture

La toiture n'est pas un élément du bâtiment qui participe directement à sa résistance, mais son type de construction peut avoir un effet favorable ou défavorable. Si la charpente de la toiture est bien réalisée, elle peut jouer le rôle de diaphragme et donc limiter les ruptures hors-plan. Si au contraire, la toiture repose uniquement sur les murs, elle ne fera qu'accentuer l'effort horizontal sur les murs. Les toitures à quatre pans assez plats sont assez favorables au contraire des toitures à deux pans assez raide. Concernant les toitures, nous avons encore déterminé la position et le nombre de cheminées. Celles-ci ne jouent en effet aucun rôle sur la résistance du bâtiment, elles peuvent par contre être très dangereuses pour la sécurité des personnes.

3.1.8. Défaut de conception

Enfin nous avons également relevé si des défauts flagrants de conception parasismique tel que la présence de colonnes courtes ou d'étages souples étaient présents sur les bâtiments évalués.

3.1.9. Typologie

Après avoir observé et noté les différents paramètres, nous avons regroupé les bâtiments dans une typologie plus précise que celle de l'EMS. Ce classement tient compte, en plus du matériau de construction, de celui utilisé pour la réalisation du plancher (bois ou béton) ainsi que de l'année de construction du bâtiment. Une distinction est effectuée entre les bâtiments urbains, les bâtiments collectifs, les maisons d'habitation pour plusieurs familles ainsi que les maisons individuelles.

4. CALCUL DE L'INDICE DE VULNERABILITE

Les premières méthodes calculant un indice de vulnérabilité à grande échelle ont naturellement été développées dans les pays à fort aléa sismique tels que les USA, le Japon, la Turquie, et plus près de chez nous, l'Italie. La plupart de ces méthodes se basent sur des observations de dégâts post-sismiques.

C'est seulement récemment que les pays à risque sismique modéré se sont intéressés à l'étude de vulnérabilité du bâti. En effet, dans ces régions où le risque sismique n'est que peu pris en compte dans le dimensionnement des bâtiments, un séisme d'intensité « moyenne » peut engendrer des dégâts importants.

La manière la plus simple de mener une analyse de risque serait d'appliquer directement les méthodes développées précédemment dans les régions à fort aléa sismique. Cependant, le haut degré de danger sismique de ces pays a imposé la mise en place d'études et de méthodes très coûteuses qui ne se justifient pas dans le cas de zones à risque modéré. De plus, la variabilité du bâti d'une région à l'autre rend difficile l'application de méthodes existantes. C'est pour ces raisons qu'il a fallu adapter ces méthodes, afin de les rendre exploitables ailleurs.

Dans le cadre de ce projet, nous avons calculé l'indice de vulnérabilité des bâtiments étudiés selon trois méthodes : Vulneralp, RiskUE et une troisième méthode proposée par l'Office fédéral de l'environnement. La partie suivante présente ces méthodes de calcul, leurs hypothèses et leur méthodologie.

4.1. Méthode Vulneralp

La méthode Vulneralp a été développée et testée à Grenoble. Cette méthode se base sur la méthode italienne GDNT, qui date de 1993. Ce sont les similitudes entre les bâtis français et italiens qui ont poussé les initiateurs à se baser sur cette méthode italienne.

Le but de Vulneralp est de caractériser la vulnérabilité d'un bâtiment selon ses paramètres structuraux principaux. Ceux-ci ont été choisis en fonction de leur importance vis-à-vis de la vulnérabilité sismique, ainsi que de la facilité avec laquelle ils sont repérables sur le bâtiment.

Il faut savoir que la méthode Vulneralp propose deux niveaux principaux d'analyse. Le niveau 1 consiste à rechercher des informations générales facilement identifiables sur la structure, tandis que le niveau 2 entre déjà dans une analyse plus détaillée et nécessite donc des ressources plus importantes au niveau du recueil des données. Dans la suite du document, seul le niveau 1 est discuté, car c'est celui qui a été utilisé dans ce travail.

Le calcul se base sur le relevé de 7 paramètres structuraux, qui sont le matériau de construction, la régularité en plan, la régularité en élévation, l'année de construction, la forme du toit, la position de la structure par rapport aux bâtiments avoisinants et la nature du sol de fondation.

Un score de vulnérabilité IV_i est attribué pour chacun de ces paramètres. Ces scores sont repris de la méthode GDNT et proviennent d'un traitement statistique des données collectées dans des régions ayant subi des dommages sismiques. Cependant, tous les paramètres n'ont pas la même importance. Le matériau de construction étant, par exemple, le paramètre le plus déterminant pour le calcul de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment selon cette méthode. Pour traiter ce problème, les scores attribués pour chacun des paramètres sont pondérés par un poids (w_i) suivant l'importance de celui-ci. Ces pondérations sont également reprises de la méthode italienne. Etant donné que le calcul de l'indice vulnérabilité est basé sur une analyse statistique, celui-ci est toujours donné sous trois formes : la valeur moyenne et les deux valeurs extrêmes (IV^- , IV^* et IV^+).

Finalement, l'indice de vulnérabilité est donné par la somme des scores de vulnérabilité pondérés :

$$IV = \sum IV_i \cdot w_i$$

A partir de cet indice de vulnérabilité, il est intéressant de pouvoir, pour un séisme d'intensité donné, estimer le dommage que va subir le bâtiment. A nouveau, à partir des observations post-sismiques, la méthode GDNT propose une relation entre le dommage, l'indice de vulnérabilité sismique et l'intensité selon l'échelle MSK. Le dommage est estimé selon la formule suivante :

$$d = 0.5 + 0.45 \cdot \arctan(0.55 \cdot (I - 10.2 + 0.05 \cdot IV))$$

avec $d > 0$

I : Intensité selon MSK

IV : Indice de vulnérabilité sismique du bâtiment

Ce calcul permettra, dans la suite du travail, de produire des cartes de dommage pour un séisme d'intensité donné. Il est à noter que c'est la valeur moyenne de la vulnérabilité qui est utilisée dans l'analyse des résultats.

4.2. Méthode RiskUE

La méthode RiskUE est un projet européen développé au début des années 2000. Cette méthode classe les bâtiments selon une typologie propre à la méthode. Dans le cadre de notre projet, nous en avons utilisé une adaptée au bâti suisse, telle que présentée dans le paragraphe 3 de ce document.

Ensuite, pour chaque classe, un score de vulnérabilité est attribué. Etant donné que certains facteurs, n'entrant pas en compte dans la typologie, ont tout de même un effet sur la vulnérabilité d'un bâtiment, ce score est corrigé pour en tenir compte. Ces corrections sont également pondérées suivant l'importance du paramètre considéré.

Finalement, le système est proche de la méthode Vulneralp. La seule différence est qu'au lieu d'attribuer un score de vulnérabilité à chaque paramètre pris en compte, on donne une note à la classe du bâtiment et on la corrige pour tenir compte des autres facteurs.

Pour le calcul du dommage, la méthodologie est semblable, et la relation obtenue par les observations post-sismiques italiennes est la suivante :

$$d = 2.5 \cdot (1 + \tanh((I + 6.25 \cdot IV - 13.1) / 2.3))$$

Avec : $d > 0$

I : Intensité MSK

IV : Indice de vulnérabilité du bâtiment

Cette méthode est donc proche de Vulneralp dans la façon de procéder. Cependant, l'analyse selon RiskUE est plus précise, mais nécessite un diagnostic visuel également plus précis.

4.3. Méthode de l'OFEG

La méthode proposée par l'Office fédéral de l'environnement a un but quelque peu différent des autres procédés expliqués précédemment. En fait, à la base de cette méthode, on retrouve une volonté d'adapter aux normes tous les bâtiments existants de classe d'ouvrage COII et COIII appartenant à la Confédération. Cette analyse a pour but de donner un ordre de priorité aux interventions, ce qui permet d'étendre l'investissement nécessaire à la réalisation de ces travaux sur plusieurs décennies.

En fait, le but de la méthode est d'estimer le risque sismique des bâtiments qui est donné par le produit entre la probabilité d'effondrement et les dommages potentiels. Dans ce travail, nous nous intéressons uniquement à la probabilité d'effondrement, nous ne traitons pas des dommages qui pourraient être dus à une ruine partielle ou complète des bâtiments analysés. Nous n'appliquons donc pas la méthode dans son entier.

A nouveau, le calcul de cette probabilité se base sur une série de paramètres structuraux relevés visuellement. Les paramètres pris en compte dans cette méthode sont la date de construction, l'aléa sismique de la zone, la qualité du terrain de fondation, la qualité des contreventements en plan et en élévation, la nature du contreventement (parois, cadres,...), le matériau de construction et le type de fondation. Le relevé de ces paramètres devrait se faire, selon la méthodologie officielle proposée, à l'aide des plans d'architecte. Cependant, dans le cadre de ce travail, l'analyse s'est faite uniquement à l'aide d'un relevé visuel extérieur et les résultats obtenus par cette méthode seront donc à prendre avec un certain recul, et donnent simplement un point de comparaison entre les différents bâtiments analysés.

A nouveau, un système de pondération est mis en place, permettant de calculer un facteur W_z appelé probabilité d'effondrement. Il faut être prudent avec ce terme de probabilité, car les valeurs obtenues sont supérieures à 1 et ne représentent donc pas physiquement une probabilité d'effondrement. Elles donnent simplement, de la même manière que les indices de vulnérabilité, une idée de la qualité du bâtiment vis-à-vis du risque sismique.

Cette méthode ne permet pas de produire des cartes de dommages. En effet, cela n'est pas son but, et il n'existe aucune relation permettant d'estimer les dommages d'un bâtiment en fonction de sa probabilité d'effondrement et de l'intensité du séisme.

5. RÉSULTATS

5.1. Traitement des données

L'introduction des divers éléments relevés sur le terrain ainsi que leur traitement en vue d'obtenir les indices de vulnérabilité et les dommages ont constitué une part importante de ce travail. Il ne paraît cependant pas primordial de détailler dans le présent document les diverses opérations qui ont été effectuées ; on se contentera donc de donner la démarche générale.

Les éléments relevés en ville de Renens sont stockés dans une base de données hébergée sur un serveur de l'IMAC sur lequel avait précédemment été installé PostgreSQL. Les données relatives aux bâtiments observés ainsi que les autres éléments nécessaires au calcul des différents indices recherchés, présentés dans le chapitre précédent, sont introduits dans la base grâce au logiciel pgAdmin3. Celui-ci permet de créer, grâce au langage SQL, des tables contenant les divers indices ainsi que des éléments appelés « views », qui permettront la visualisation des résultats.

Ces vues sont lues par un logiciel de SIG, par exemple Quantum GIS, ce dernier permettant l'appel de couches postGIS. Ce programme permet, d'un clic sur un bâtiment, d'afficher tous les éléments relevés sur le terrain, y compris un lien html vers la ou les photos prises lors des relevés. Il est donc possible pour tous les bâtiments traités d'obtenir de manière intuitive le matériau, le nombre d'étage, ... Dans un second temps, les couches relatives aux divers indices cherchés peuvent être appelées, permettant de la même manière de connaître les valeurs pour chaque bâtiment, mais aussi et surtout de les classer sur une échelle de couleurs définie par l'utilisateur. Une telle représentation visuelle permet une compréhension rapide et claire des résultats sur l'ensemble de la zone étudiée.

5.2. Evolution du bâti

La date de construction d'un bâtiment est une donnée importante dans l'étude de sa vulnérabilité sismique. Les différentes périodes de développement de la construction sont caractérisées par l'utilisation de différents types de matériaux ainsi qu'une évolution dans la conception parasismique. La connaissance de la date de construction permet donc de se faire une rapide idée de la vulnérabilité du bâtiment, et cette dernière entre en compte lors du calcul des indices de vulnérabilité.

L'utilisation des données de l'établissement cantonal d'assurance (ECA) a permis de visualiser l'état du bâti pour les différentes périodes considérées. La carte donnée en annexe 9.1 permet de se rendre compte de l'évolution du bâti.

5.2.1. 1800 – 1899

A cette époque, la ville de Renens n'est encore qu'un petit village rural, d'où le faible nombre de bâtiments représentés à cette période. A partir de 1875, la création de la gare de triage va impliquer un important développement de la zone près de la gare, surtout à partir du début du 20^e siècle. Le bâti est essentiellement constitué de maçonnerie de pierre brute avec plancher en bois.

5.2.2. 1900 – 1944

La ville se développe autour de deux centres ; la gare et le village. Le début du 20^e siècle voit apparaître de nouveaux matériaux de construction. La maçonnerie de pierre est peu à peu

remplacée par de la maçonnerie de brique puis de bloc de béton. De même, les planchers en béton faiblement armé font leur apparition.

5.2.3. 1945 – 1969

Les deux centres que sont la gare et le village se rejoignent pour former une unique zone bâtie. Le développement industriel de la ville nécessite la construction d'un grand nombre d'habitations, premièrement des immeubles de taille moyenne en maçonnerie de brique ou de bloc de béton puis les plus récents avec voiles en béton armé et dalles pleines.

5.2.4. 1970 – 2008

Le développement de Renens continue, des zones de villa apparaissent au nord de la ville et le sud de la gare voit arriver de gros ensembles d'habitation. Le bâti est surtout composé de bâtiments avec voiles en béton armé ou construits en maçonnerie en bloc de ciment. On retrouve également des entrepôts avec une structure métallique.

5.2.5. Concordance des dates de construction

Comme il a été précédemment mentionné, les méthodes de détermination des indices de vulnérabilité utilisent comme paramètre la période de construction des bâtiments étudiés. Celle-ci a été estimée lors des relevés, ce qui constitue un exercice relativement difficile. En comparant ces estimations avec les dates officielles tirées des données fournies par l'ECA, nous remarquons que nous avons placé les bâtiments dans la bonne période à hauteur de 66 %, l'erreur moyenne sur l'ensemble des édifices étant de 6 ans, et l'écart type de 12 ans (chaque bâtiment dont la date de construction était dans la bonne période a une erreur nulle).

5.3. Répartition spatiale des types EMS

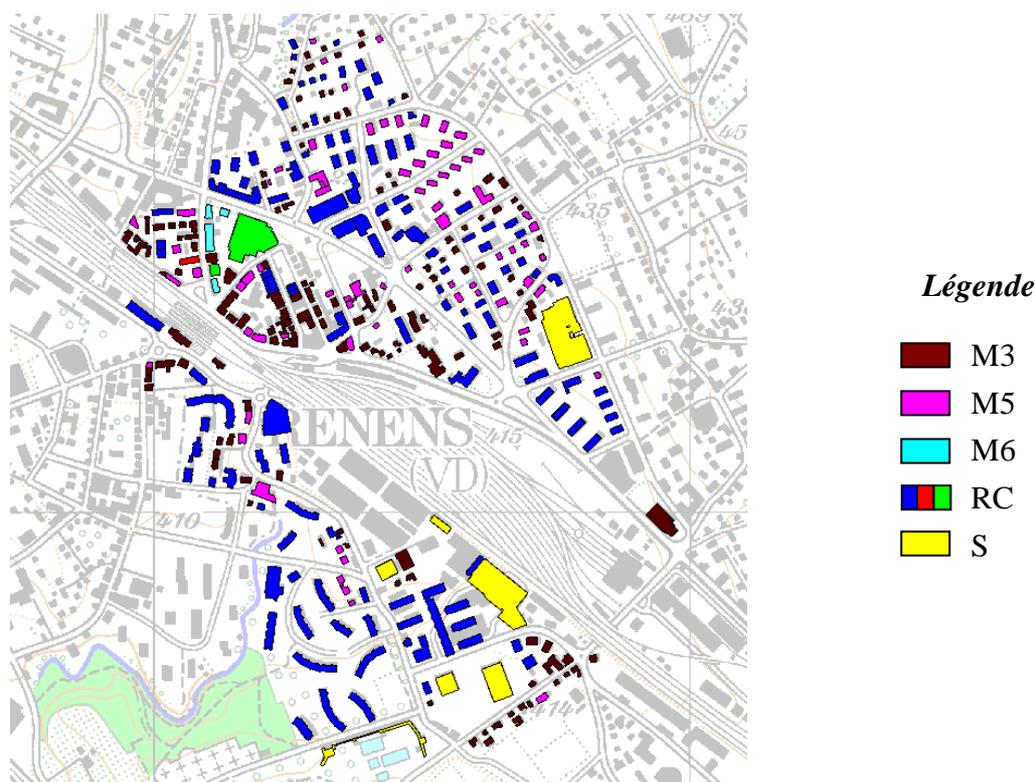


Figure 2: Répartition spatiale des types EMS

Les différents types de construction sont clairement reconnaissables. Au centre ville, on retrouve les vieux bâtiments en maçonnerie de pierre de type M3 ainsi que quelques bâtiments en maçonnerie de brique (M5). Les grands bâtiments d'habitation avec voiles en béton armé, construits pour la plupart à la chaîne (type RC) sont bien identifiables sur la carte, de même que les vieux bâtiments d'habitation, plus petits, construits en maçonnerie de type M5.

Le matériau de construction le plus fréquemment rencontré est la maçonnerie, puisque 63 % des bâtiments étudiés sont construits de cette manière, alors que 35 % sont en béton et seulement 2 % en acier.

5.4. Nombre d'étage :

Nous avons défini 3 classes distinctes en fonction du nombre d'étage des bâtiments. Cela permet de distinguer clairement les bâtiments les plus vulnérables, c'est-à-dire ceux de 3 à 8 étages. Ces bâtiments sont pour la plupart des habitations. Les bâtiments de moins de 3 étages sont principalement des villas, des entrepôts ou des grands commerces. La ville de Renens n'a que très peu de constructions dépassant les 8 étages, des grands bâtiments de logement.

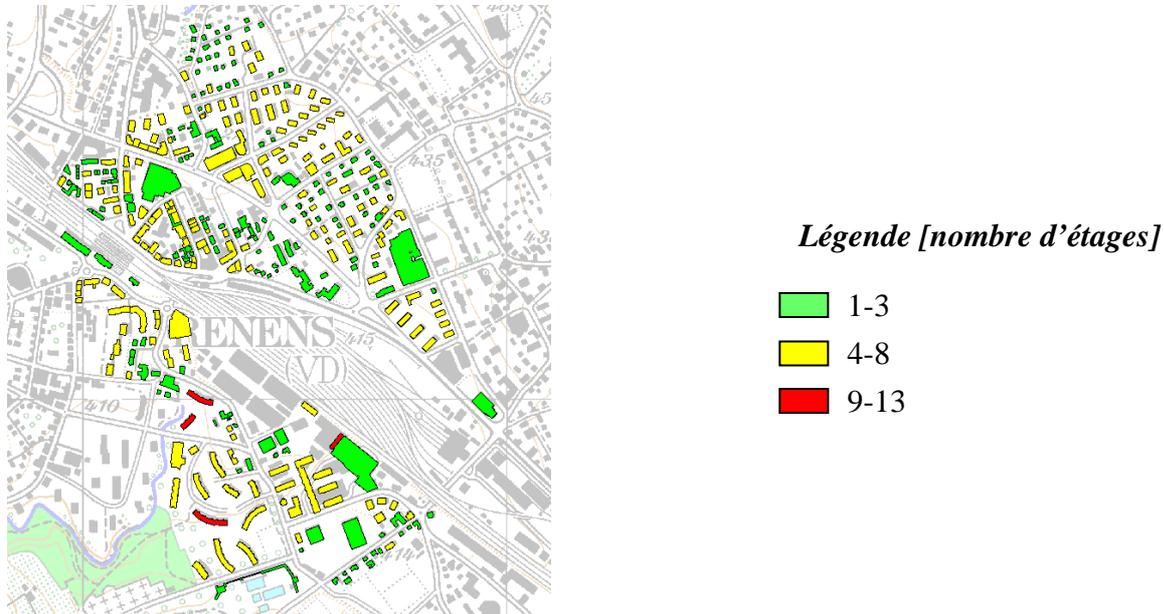


Figure 3: Catégorie de bâtiment en fonction du nombre d'étage

5.5. Indices de vulnérabilité

Les cartes représentant les indices de vulnérabilité calculés selon les deux méthodes utilisées figurent sur l'annexe 9.2².

5.5.1. RiskUE

On constate sur la carte représentant la vulnérabilité calculée selon la méthode RiskUE que les bâtiments anciens en maçonnerie de pierre ou de brique avec planchers en bois, tels qu'on peut en trouver notamment au nord de la gare, ont un indice relativement élevé. De même, les bâtiments locatifs de taille moyenne en maçonnerie de brique construits en grand nombre représentent un groupe à risque. Les bâtiments en béton possèdent un indice de vulnérabilité un

² Les échelles de couleur des cartes en annexe ne sont pas définies de la même manière suivant la méthode utilisée, de manière à pouvoir faciliter la comparaison entre les deux méthodes.

peu plus faible, mais l'effet négatif des irrégularités en plan ou en élévation de certains d'entre eux qui présentent souvent une architecture un peu moins conventionnelle peut être mis en évidence. Les constructions en acier sont, quant à elles, les moins vulnérables, ce qui peut s'expliquer partiellement par la ductilité de l'acier, et donc son comportement favorable face aux actions sismiques.

5.5.2. Vulneralp

Cette méthode donne des résultats quelque peu différents. En effet, un même type de matériau donne des valeurs d'indices différents. Ces différences sont dues aux effets négatifs pris en compte selon des caractéristiques telles que l'année de construction, la forme du toit, ou encore les irrégularités. Il est à noter que cette méthode ne tient pas compte des constructions métalliques, d'où l'absence de certains bâtiments.

Pour comparer les deux méthodes, il faut se rendre compte que les résultats ne sont pas donnés sur la même échelle. RiskUE produit des indices allant de 0 à 1, alors que ceux donnés par Vulneralp sont sur une échelle de 0 à 100. Pour permettre de comparer visuellement, on distribue les bâtiments dans dix classes. On se rend compte en regardant les deux cartes que les indices de vulnérabilité sont pour la première (RiskUE) importants alors que la seconde méthode (Vulneralp) donne des indices nettement moins élevés. Les bâtiments apparaissent donc plus vulnérables avec la méthode RiskUE. Il n'est peut-être pas judicieux d'effectuer cette comparaison, puisque les deux méthodes ne donnent pas des résultats sur la même échelle. Cependant, on remarque que pour effectuer une comparaison relative des bâtiments, les deux cartes produites semblent conduire plus ou moins au même résultat.

5.6. Probabilité d'effondrement selon la méthode de l'OFEG

Comme il a été expliqué, la partie de la méthode de l'OFEG que nous avons utilisée donne comme résultat une probabilité d'effondrement. Nous n'avons pas poursuivi cette méthode plus loin, car il aurait encore fallu quantifier le dommage potentiel d'une ruine des différents bâtiments, opération beaucoup trop longue pour un travail comme celui-ci. Nous nous sommes alors contentés de relever les éléments permettant de calculer cette probabilité d'effondrement, ce qui permet quand même de qualifier de manière relative la sensibilité aux séismes du bâti, et dont les résultats figurent sur la carte ci-dessous.



Figure 4: Probabilité d'effondrement selon la méthode de l'OFEG

Comme il pouvait déjà être mis en évidence sur les cartes de l'annexe 9.2, quoique de manière moins nette, le vieux centre ville ressort. Les bâtiments, essentiellement en maçonnerie de pierre ou de brique présentent alors une probabilité d'effondrement bien supérieure aux autres types de construction, moins vulnérables. Au contraire de ce que nous attendions, les bâtiments en béton dont le nombre d'étages fait partie de la classe considérée comme dangereuse (3 à 8 étages), n'ont qu'une très faible probabilité d'effondrement.

Il est important de répéter que la première étape de la méthode de l'OFEG n'est pas terminée, mais qu'il faudrait encore déterminer le dommage, de manière à sélectionner les bâtiments qui devraient faire l'objet d'une étape supplémentaire de la méthode.

5.7. Carte des dommages

A partir des indices de vulnérabilité calculés précédemment, il est possible de dresser des cartes de dommages pour différentes intensités de séisme. La norme définit comme séisme de dimensionnement un événement avec une période de retour de 475 ans, ce qui sur l'échelle MSK se traduit en zone Z1 par un séisme d'intensité VI à VII. Dans ce document ne figurent que des cartes de dommage pour un séisme d'intensité VII, de manière à obtenir quelque chose de réaliste pour la situation de la ville de Renens, ainsi qu'un scénario d'intensité IX, de manière à rendre les résultats plus visibles.

5.7.1. Séisme d'intensité VII

Les résultats des dommages aux bâtiments pour un séisme d'une telle intensité sont donnés en annexe 9.3. Les deux méthodes semblent produire les mêmes résultats, à quelques différences près. Mais ce qui est surtout remarquable, c'est que pour ce séisme qui correspond à la période de retour de 475 ans que la norme considère lors d'un dimensionnement parasismique, les dommages sont compris, d'après les deux méthodes utilisées, dans les deux premiers degrés de dégâts définis par l'EMS. Les dommages maximums qui peuvent être attendus sont donc des dégâts structuraux légers et des dégâts non-structuraux qualifiés de moyens.

5.7.2. Séisme d'intensité IX

Pour un séisme d'intensité IX sur l'échelle MSK, les dommages sont bien plus importants, comme le montre l'annexe 9.4. Ce sont à nouveau essentiellement les bâtiments du centre ville et les immeubles d'habitations construits avant 1970 qui sont les plus touchés, de par leur matériau de construction notamment. On remarque que suivant la méthode utilisée, les bâtiments en béton passent de dégâts de degré 2 à des dégâts de degré 3. Cela est dû au fait que la méthode Vulneralp leur associe un dégât très proche du degré 3, et que la méthode RiskUE leur donne des dégâts proche du degré 2. Les dommages à ce type de bâtiment sont donc à cheval sur deux classes, d'où la distinction faite entre les deux méthodes même si leurs dommages sont comparables.

Il faut tout de même rappeler qu'un séisme d'une telle intensité n'a qu'une très faible probabilité d'occurrence dans une zone de faible risque sismique comme Renens. La période de retour d'un tel séisme dans cette région est de l'ordre de 100'000 ans, et donc les dommages présentés ne sont que peu représentatifs de la réalité.

5.8. Influence de la position du bâtiment

La position du bâtiment est un paramètre qui entre en considération dans le calcul des indices de vulnérabilité ainsi que dans la valeur des dommages. Lorsque plusieurs bâtiments sont collés les uns aux autres, ceux situés au bord d'une rangée ainsi que dans un coin sont plus vulnérables en cas de séisme. Nous avons essayé d'illustrer cet effet sur une rangée de bâtiments situés au centre ville.

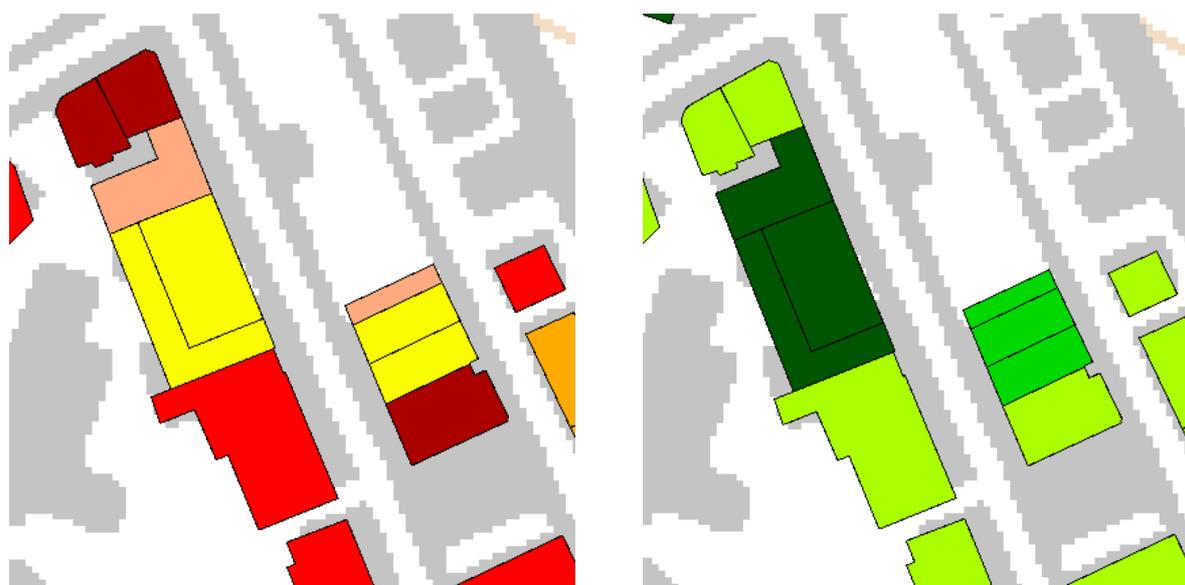


Figure 5: Valeur de la vulnérabilité selon les méthodes RiskUE et Vulneralp.

L'indice de vulnérabilité calculé avec la méthode RiskUE semble en effet montrer que les bâtiments situés au bout d'une rangée sont plus vulnérables. Il est cependant important de garder en mémoire les autres paramètres qui influencent la détermination de cet indice, notamment le fait que ces bâtiments ne sont pas forcément construits avec le même matériau ou durant la même période.

Les indices donnés par Vulneralp ne semblent pas mettre en évidence cette même propriété. Pourtant, la méthode tient aussi compte de la position relative des bâtiments. Le fait que les indices donnés par Vulneralp s'étendent sur une plage moins grande que ceux donnés par RiskUE n'est peut-être pas étranger à cette particularité.

5.9. Comparaison avec les résultats de la ville de Viège selon la méthode RiskUE

Un travail de relevé et de calcul des indices de vulnérabilité a déjà été effectué pour la ville de Viège dans le cadre d'une étude similaire. Nous pouvons ainsi profiter des résultats obtenus pour comparer les dommages obtenus selon la méthode RiskUE pour un séisme d'intensité IX.

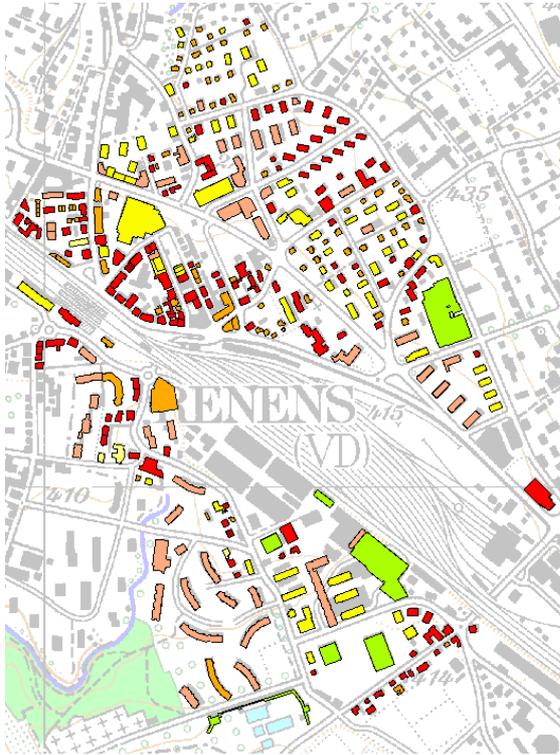


Figure 6: Ville de Renens

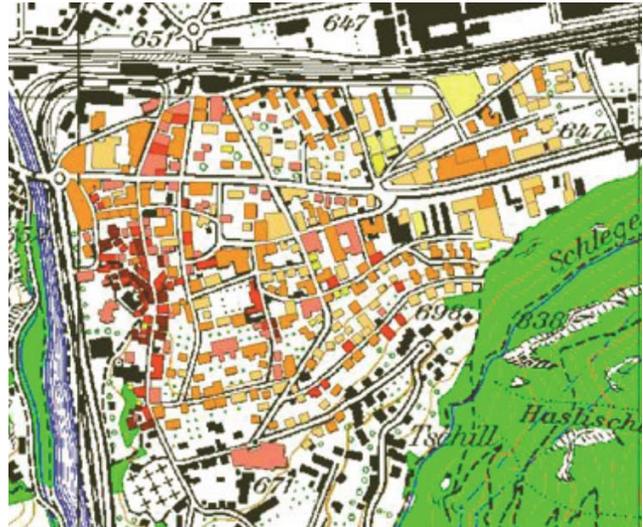


Figure 7: Ville de Viège

En analysant les deux cartes, nous constatons que le vieux centre de la ville ressort très clairement en rouge foncé, correspondant aux vieux immeubles de type M3 ou M5. Ces deux villes paraissent relativement semblables. Nous constatons toutefois que la ville de Viège n'a presque pas de grandes constructions métalliques, reconnaissables en vert sur la carte de Renens et de faible vulnérabilité.

Une différence importante intervient dans le fait qu'à Viège, un séisme d'intensité IX a une période de retour nettement plus faible (cette ville se situe en zone Z3b, la plus dangereuse en Suisse), correspondant presque à la période définie par la norme. Dès lors, même si ces deux villes sont comparables d'un point de vue dégâts possibles résultant d'un même séisme, la ville de Viège est dans une situation de risque beaucoup plus importante que Renens.

6. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES SUR LE TERRAIN

Le but de ce paragraphe est de synthétiser et de rendre attentif le lecteur aux difficultés rencontrées lors des relevés visuels sur le terrain.

Premièrement, la distinction du matériau de construction n'est pas toujours évidente. En effet, les bâtiments étant souvent recouverts d'une importante couche de crépi, distinguer la maçonnerie en brique de celle en pierre naturelle est particulièrement délicate. Dans certains cas, même la distinction entre béton armé et briques en terre cuite n'est pas évidente. Les critères utilisés pour distinguer ces différents matériaux de construction sont l'épaisseur des murs et la forme des fenêtres (des fenêtres plus larges témoignent généralement de murs en béton armé).

Un problème similaire s'est posé pour déterminer le matériau de construction des planchers. Des balcons en porte à faux témoignent de la présence de planchers en béton armé, tandis que l'existence de supports sous ces balcons indique que les planchers sont en bois.

Le problème des combles est également à souligner. La principale question qui se pose fréquemment à ce sujet est : faut-il considérer les combles comme un étage en soi ? Pour répondre à cette question, une estimation de l'ordre de grandeur des masses qui entrent en jeu est déterminante.

Dans un espace urbain, la place à disposition ne permet pas toujours le recul nécessaire pour observer la forme du toit ou la présence de cheminées.

Finalement, il n'est pas toujours possible d'entrer à l'intérieur des bâtiments. Ainsi, la présence d'ascenseurs ou la nature des éléments stabilisants verticaux n'est pas toujours aisée à déterminer depuis l'extérieur.

7. CONCLUSION

Tout d'abord, en observant les cartes de dommages calculées avec les deux méthodes pour un séisme d'intensité VII, on remarque que les dommages sont compris dans les deux premiers degrés de dégâts définis par l'EMS. Les dommages maximums qui peuvent être attendus sont donc des dégâts structuraux légers et des dégâts non-structuraux qualifiés de moyens. Ainsi, d'après les estimations données par nos méthodes de calcul, la ville de Renens dans sa globalité ne pose que peu de problèmes au niveau de sa vulnérabilité sismique.

En comparant les résultats obtenus pour les deux principales méthodes de calcul utilisées (Vulneralp et RiskUE), on remarque qu'au niveau de l'indice de vulnérabilité, la méthode Vulneralp est plus optimiste que la méthode RiskUE. Cette tendance se retrouve dans la carte des dommages pour le séisme d'intensité IX, mais est fortement atténuée. A nouveau, cette remarque démontre qu'il faut être prudent lors de l'analyse des résultats obtenus.

Comme nous venons de le voir, nous avons rencontré certaines difficultés récurrentes lors de nos relevés visuels. Ces difficultés engendrent des incertitudes sur les paramètres et se reportent évidemment sur les résultats obtenus.

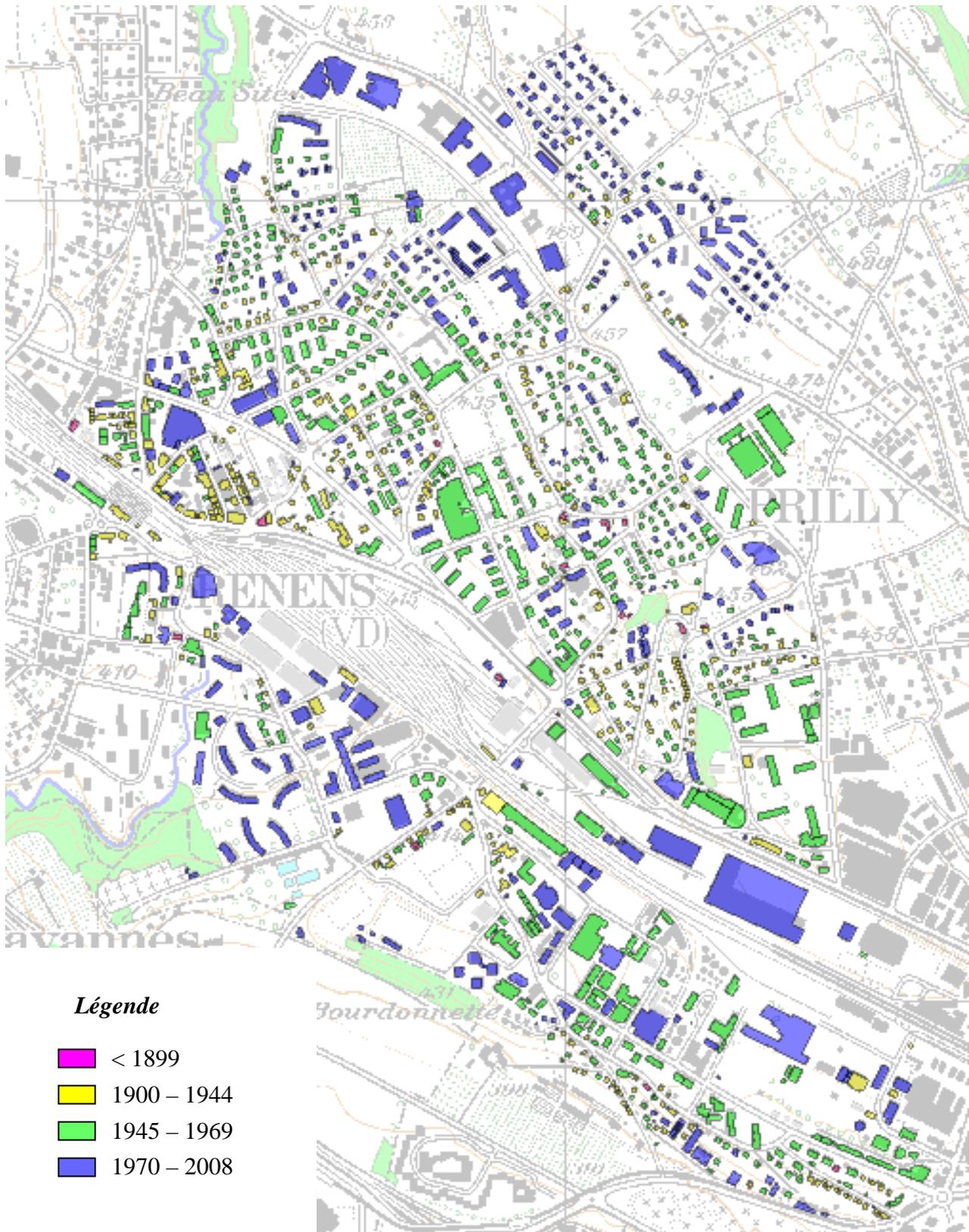
Pour conclure, il faut bien garder à l'esprit que ces méthodes ne permettent pas de manière absolue de prendre une décision sur les interventions à mener. En effet, les résultats se basent sur un relevé visuel assez rapide et il n'est pas justifié de se baser uniquement sur ces résultats pour déterminer les bâtiments nécessitant une intervention. Cependant, ils donnent une bonne idée des bâtiments requérant une analyse dynamique plus approfondie.

8. BIBLIOGRAPHIE

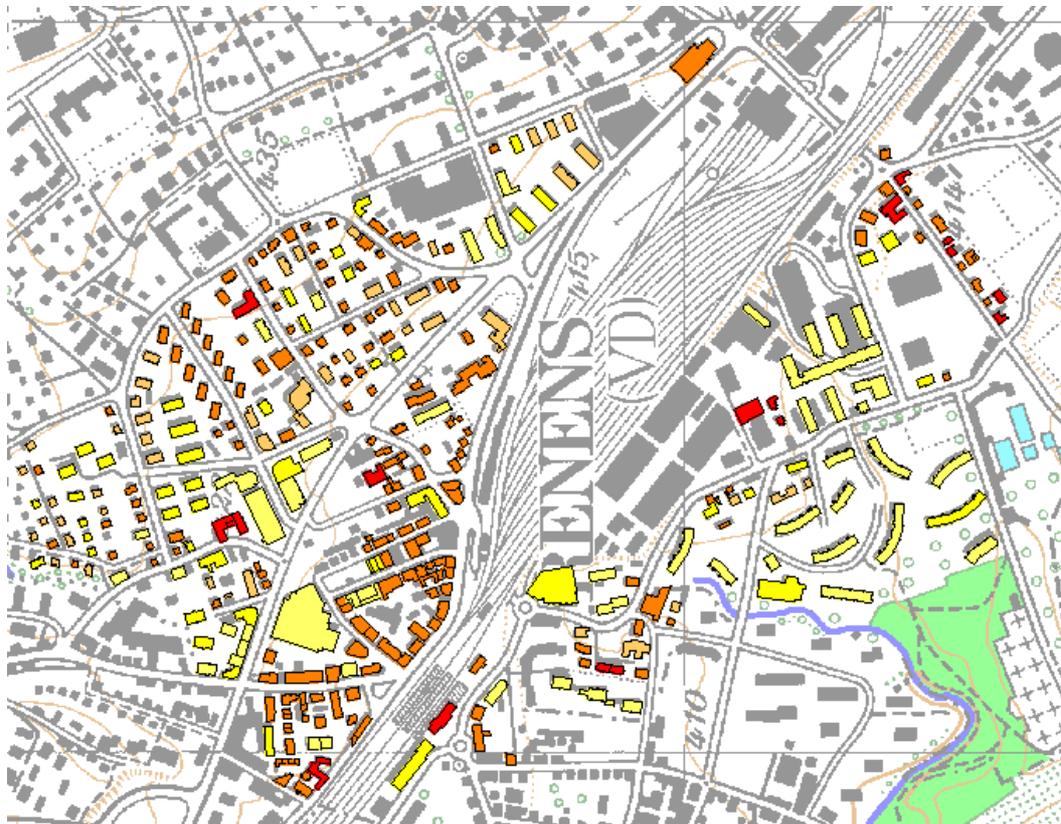
- [1] C. Grünthal, European Seismological Commission, *L'échelle macrosismique européenne (EMS-98)*, édition française A.Levret, Luxembourg 2001.
- [2] Clotaire Michel, Pierino Lestuzzi, *Typologie du bâti existant en maçonnerie en Suisse*, Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction, EPFL-ENAC-IS-IMAC, Juin 2008.
- [3] Philippe Guéguen, *Evaluation de la VULNérabilité Sismique à l'échelle d'une ville de Rhône-ALPes – Application à Grenoble*, Laboratoire de Géophysique interne et Tectonophysique, Université Joseph Fourier, juillet 2007.
- [4] Youssef Belmouden, Pierino Lestuzzi, *Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en Suisse*, Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction, EPFL-ENAC-IS-IMAC, avril 2006.
- [5] E. Kölz, B. Duvernay, *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants – Concept et directives pour l'étape 1*, Office fédéral de l'eau et de la géologie OFEG, 2005.
- [6] Philippe Guéguen, *Représentation des enjeux d'un séisme : Vulnérabilités publiques de l'agglomération grenobloise*, Laboratoire de Géophysique et Tectonophysique Observatoire de Grenoble, Août 2006
- [7] Philippe Guéguen, Clotaire Michel, Laele LeCorre, *A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble*, Bulletin of Earthquake Engineering, Juin 2007

9. ANNEXES

9.1. Périodes de construction



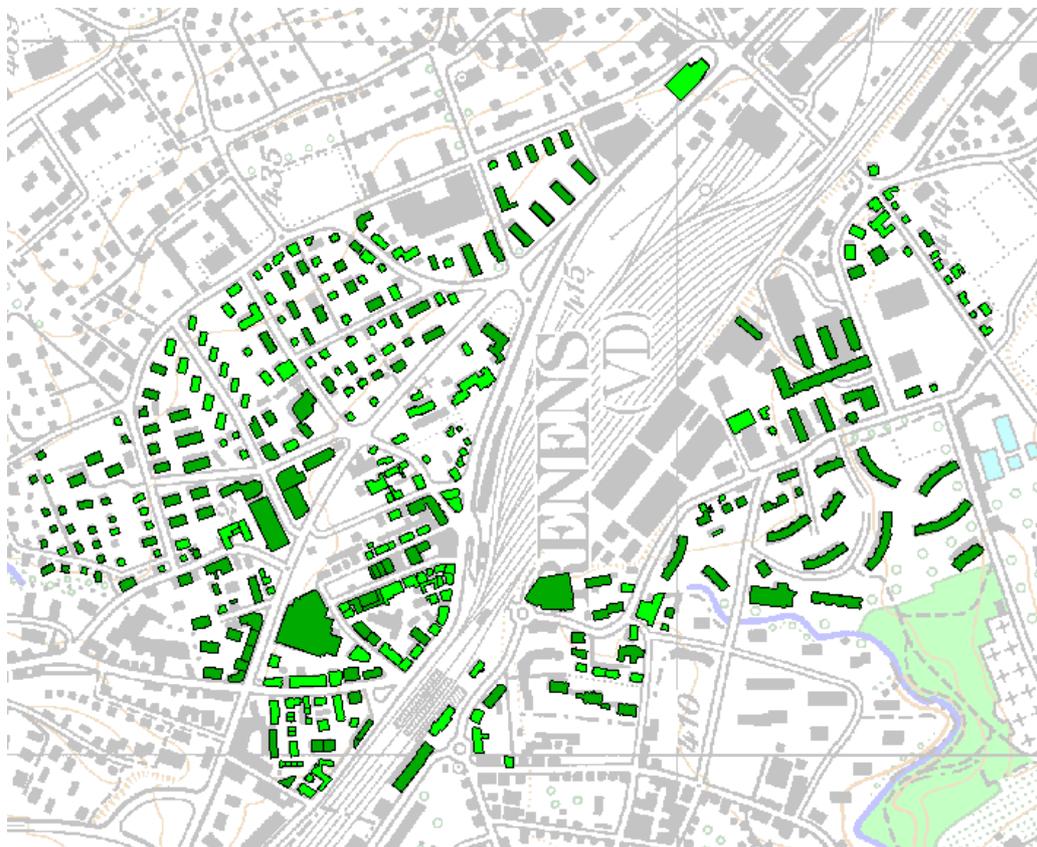
9.2. Indices de vulnérabilité



9.3. Cartes des dommages – Intensité VII



Dommmages d'après la méthode RiskUE



Dommmages d'après la méthode Vulneralp

9.4. Carte des dommages – Intensité IX

