

Membre de l'université Paris Lumières

Jean LEMAIRE

**Évaluation de la vulnérabilité sismique du
bâti existant selon l'Eurocode :
Essai méthodologique et application au cas de
Mulhouse – Bâle**
Volume 1

Thèse présentée et soutenue publiquement le 12/02/2018
en vue de l'obtention du doctorat de Génie informatique, mécanique, génie civil
de l'Université Paris Nanterre

sous la direction de M. Luc DAVENNE (Université Paris Nanterre)

Jury :

Ahmed MEBARKI Rapporteur

Sidi- Mohammed ELACHACHI Rapporteur

Yvette VEYRET Examinateur

Myriam MERAD Examinateur

Pierre MOUROUX Examinateur

Philippe SABOURAULT Examinateur

Luc DAVENNE Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais en premier lieu remercier mes directeurs de thèse Madame Yvette VEYRET et Monsieur Luc Davenne, qui ont accepté de diriger cette recherche en partageant leurs connaissances et leur expérience au cours des riches et nombreux échanges que nous avons pu avoir et de m'avoir permis de mener à terme ce projet.

J'adresse également mes remerciements à mes rapporteurs, Ahmed MEBARKI et Sidi Mohammed ELACHACHI, ainsi qu'à mes 5 examinateurs, Yvette VEYRET, Myriam MERAD, Ménad CHENAF, Pierre MOURoux, Philippe SABOURAULT composant l'ensemble des membres du jury lors de la présentation publique.

Je remercie aussi l'ensemble des enseignants que j'ai pu rencontrer au cours de ces années de travail et notamment les enseignants invités lors des journées de doctorants, qui m'ont fait bénéficier de conseils et d'encouragements précieux et ceux qui m'ont accueilli dans leurs laboratoires.

Je désire aussi remercier Monsieur Chenaf, Directeur Adjoint du Département "*Sécurité – Structure – Feu*" du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) pour ses conseils scientifiques, sans lesquels l'aboutissement du chapitre 5 relatif au modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant n'aurait pu aboutir.

Mes remerciements s'adressent également à Vincent Marcillac pour m'avoir accordé de son temps pour les relectures du manuscrit et pour ses conseils de géographes qui m'ont ouvert l'esprit à la dimension humaine.

Je voudrais aussi remercier vivement l'ensemble des personnes qui m'ont permis de réaliser les enquêtes de terrain à Mulhouse comme à Bâle et plus particulièrement Madame Marie-Paule ZINS responsable de la gestion des risques naturels à Mulhouse qui m'a fait part de nombreux documents et contacts sans lesquels ce travail n'aurait pu être possible.

Une pensée reconnaissante va enfin à ma famille et à mon entourage, qui ont su me soutenir et m'encourager durant cette période.

Merci enfin à ma fille Emmanuelle pour avoir supporté le meilleur et surtout le pire, que j'encourage et souhaite lui apporter mon soutien sans faille pour l'accompagner à mon tour dans son projet de recherche, qui je suis sûr va bientôt voir le jour.

Pour conclure, je voudrais mentionner ici les professeurs, qui depuis ma reprise des études, m'ont transmis le goût du savoir et de la connaissance. Je n'ai pas ici les mots pour dire combien ils ont changé ma vie en me donnant l'envie et les moyens d'aller toujours un peu plus loin à chaque étape. Ils sont si nombreux que je ne peux les nommer ici, mais ce travail n'existerait pas sans eux.

J'oublie certainement des gens, qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à l'élaboration de cette thèse. Qu'ils m'en excusent et qu'ils soient remerciés du fond du cœur.

RESUME

Le risque sismique est un sujet d'étude pluridisciplinaire qui fait l'objet de nombreux travaux de recherches. Pendant longtemps, il a été étudié sous l'aspect de l'aléa et ce n'est qu'au milieu du XXe siècle que nous nous sommes intéressés à la vulnérabilité des éléments exposés. Malgré la multiplicité des études sur le risque sismique, aucune d'entre elles n'adopte une démarche globale en utilisant la réglementation parasismique. Dans le cadre de cette thèse, nous soutenons l'hypothèse selon laquelle il est possible d'évaluer la vulnérabilité des lieux d'habitation à l'échelle de plusieurs bâtiments en utilisant la norme Européenne, l'Eurocode 8. Utiliser cette réglementation a l'avantage de réduire les temps d'étude de la vulnérabilité physique puisque l'on évalue la résistance sismique d'un unique bâtiment dont ce dernier représente une population de plusieurs immeubles à usage d'habitation collective. La méthodologie proposée, illustrée sur l'exemple de la conurbation Mulhouse-Bâle, se compose de deux phases.

La première consiste à étudier l'aléa sismique de la zone urbaine de Mulhouse et de Bâle à travers les études bibliographiques de quelques auteurs. Cette phase consiste aussi à examiner la compatibilité de la réglementation parasismique européenne et helvétique. En dernier lieu, un diagnostic du bâti existant et de la population est réalisé pour évaluer la vulnérabilité de ces deux territoires urbains, après un découpage des deux villes en secteurs historico géographiques.

Une seconde phase consiste à proposer un modèle simplifié d'évaluation déterministe et probabiliste de la vulnérabilité du bâti, Celui-ci est fondé à partir de la nouvelle réglementation Européenne et de la mécanique des structures, pour évaluer la résistance sismique des bâtiments. L'aspect probabiliste a permis d'affiner le modèle proposé afin d'intégrer certaines incertitudes. Une étude de cas simulant un séisme important de magnitude M_w égale à 6 sur l'échelle de Richter, intégrant les phénomènes d'effets de site comme le préconise l'Eurocode 8, a permis de valider l'application du modèle envisagé.

Le modèle d'évaluation proposé a pour intérêt de fournir un outil permettant d'évaluer la vulnérabilité du bâti sans effectuer de calcul mécanique. Il se veut donc accessible à tous (géographes, ingénieurs, sismologues, etc...). Plus généralement, ce modèle pour objectif de fournir un outil d'aide à la décision dans la démarche de prévention que doivent les autorités publiques à la population, puisqu'ils permettent de déterminer la plus ou moins grande vulnérabilité des zones étudiées.

Mots-clés : Risque sismique, Aléa, Vulnérabilité, Mulhouse, Bâle, Evaluation déterministe, Evaluation probabiliste, Incertitudes, Règlementation parasismique européenne (Eurocode), Outil d'aide à la décision.

ABSTRACT

The seismic risk is a subject of multidisciplinary study which is the object of numerous research works. For a long time, it was studied in terms of hazard and it is only in the middle of the 20th century that we became interested in the vulnerability of the exposed elements. In spite of the multiplicity of the studies on the seismic risk, none of them adopts a global approach by using the earthquake-resistant regulations. Within the framework of this thesis, we support the hypothesis that it is possible to estimate the vulnerability of dwellings on the scale of several buildings by using the European standard, Eurocode 8. Using these regulations has the advantage of reducing the time to study physical vulnerability by assessing the seismic resistance of a single building, where the latter represents a population of several buildings used as collective dwellings. The proposed methodology, illustrated on the example of the Mulhouse-Basel conurbation, consists of two phases.

The first one consists in studying the seismic hazard of the urban area of Mulhouse and Basel through the bibliographical studies of some authors. This phase also consists in examining the compatibility of the European and Helvetic seismic regulations. Finally, a diagnosis of the existing structures and of the population is made to assess the vulnerability of these two urban territories, after a division of both cities into historic-geographical sectors.

A second phase consists in proposing a simplified model of deterministic and probabilistic assessment of the vulnerability of the built, based on the new European regulation and the mechanics of the structures, to evaluate the seismic resistance of buildings. The probability aspect allowed to refine the proposed model to integrate certain uncertainties. A case study feigning an important earthquake of magnitude M_w equal to 6 on the Richter scale, integrating the phenomena of site effects as recommended by Eurocode 8, validated the application of the envisaged model.

The proposed evaluation model is intended to provide a tool for assessing the vulnerability of the built without performing mechanical calculations. Thus, it aims to be accessible to all (geographers, engineers, seismologists, etc...). More generally, this model aims to provide a decision-making tool in the approach of prevention which the public authorities owe to the population, because they allow to determine the more or less big vulnerability of the studied areas.

Keywords: Seismic risk, Seismic hazard, Seismic vulnerability, Mulhouse, Basel, Deterministic evaluation, Probabilistic evaluation, Uncertainties, European seismic regulations (Eurocode), Decision-making tool.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| REMERCIEMENTS..... | 3 |
| RESUME..... | 5 |
| TABLE DES MATIERES..... | 7 |
| INTRODUCTION GENERALE | 9 |
| INTRODUCTION DU SUJET DE RECHERCHE..... | 9 |
| OBJET ET PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE | 10 |
| PRINCIPALES SOURCES D'INFORMATION – DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE..... | 11 |
| ORGANISATION DE LA THÈSE | 14 |
| PREMIERE PARTIE : LE RISQUE SISMIQUE AU SUD DE L'ALSACE ET DANS LA REGION BALOISE..... | 17 |
| INTRODUCTION | 17 |
| <i>CHAPITRE 1 : De l'aléa au risque sismique.....</i> | <i>18</i> |
| 1- L'aléa sismique..... | 18 |
| 2- Principes d'évaluation de l'aléa sismique | 20 |
| 3- Le risque sismique | 22 |
| 4- La vulnérabilité au risque sismique..... | 23 |
| 5- Evaluation de la vulnérabilité du bâti..... | 28 |
| Conclusion du chapitre 1 | 34 |
| <i>CHAPITRE 2 : Les Règlementations parasismiques</i> | <i>35</i> |
| 1- La réglementation spécifique au risque sismique en France | 35 |
| 1-1 Les premières réglementations en France..... | 36 |
| 1-2 L'Eurocode, ses spécificités et ses apports | 38 |
| 2- La réglementation parasismique en Suisse..... | 47 |
| 2.1 Les premières réglementations en Suisse | 47 |
| 2.2 Les normes SIA 260 à 267, leurs spécificités..... | 49 |
| 3- L'Eurocode et la réglementation Suisse..... | 54 |
| 3.1 Les réglementations en France et en Suisse | 54 |
| 3.2 Deux réglementations différentes de part et d'autre de la frontière ?..... | 58 |
| Conclusion du chapitre 2 | 61 |
| <i>CHAPITRE 3 : Une conurbation soumise aux risques sismiques : Mulhouse - Bâle</i> | <i>62</i> |
| 1- La sismicité dans la région : Importance du risque | 62 |
| 2- Contexte géologique et sismotectonique du sud de l'Alsace et de la région Bâloise | 69 |
| 3- Une zone régionale d'aléa sismique modéré à moyen | 78 |
| 4- Mulhouse et Bâle : Un site aggravant les effets des séismes..... | 80 |
| Conclusion du chapitre 3 | 90 |
| <i>CHAPITRE 4 : Une conurbation très vulnérable</i> | <i>91</i> |
| 1- Un découpage spécifique du territoire mulhousien et bâlois..... | 91 |
| 2- La population et densité de l'agglomération Mulhouse – Bâle | 104 |
| 3- L'habitat dans la conurbation..... | 114 |
| Conclusion chapitre 4 | 133 |
| CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE..... | 133 |

**DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION D'UN MODELE D'EVALUATION DU RISQUE
SISMIQUE ADAPTE AU CAS DE MULHOUSE ET BALE..... 135**

INTRODUCTION 135

*CHAPITRE 5 : Un modèle opérationnel d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti dans la
région de Mulhouse – Bâle 136*

1- Etude mécanique déterministe : Une évaluation primaire de la ruine du bâti 136

1-1 Identification des facteurs de vulnérabilité et des critères physiques du bâti 137

1-2 Des bâtiments élémentaires représentatifs de l'habitat de Mulhouse et Bâle - Caractéristiques
mécaniques – Incertitudes 141

1-3 Résistance mécanique déterministe du bâti 149

1-4 Résistance mécanique statistique déterministe du bâti 171

2- Etude mécanique probabiliste : Une évaluation complémentaire de l'analyse déterministe 174

2-1 Modèle de calcul de la probabilité de ruine du bâti selon trois techniques différentes 175

2-1 Evaluation de la probabilité de ruine du bâti selon trois techniques différentes 180

3- Un modèle opérationnel d'évaluation de la vulnérabilité sismique 182

Conclusion du chapitre 5 184

CHAPITRE 6 : Evaluation du risque sismique : l'échelle de la conurbation Mulhouse – Bâle 185

1- De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique 185

2- L'analyse spatiale du risque sismique dans la conurbation de Mulhouse et de Bâle 191

3- Un inégal risque sismique à l'intérieur des différents secteurs historico-géographiques 208

Conclusion du chapitre 6 222

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE 223

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... 225

BIBLIOGRAPHIE 231

LISTE DES FIGURES 251

LISTE DES TABLEAUX 258

GLOSSAIRE 260

ACRONYMES 263

ANNEXES 264

INTRODUCTION GENERALE

Introduction du sujet de recherche

Depuis tout temps, l'homme craint les tremblements de terre qui surviennent et produisent d'importants dommages et victimes. Il est vrai que les grandes catastrophes marquent les esprits, les cas de Bâle, 1356 et de Lisbonne, 1755 [PERREY, 1844] et plus récemment le cas de Sumatra (2004) faisant 230 000 pertes en vies humaines et de nombreux dégâts matériels [GOMEZ *et al*, 2010] entretiennent la mémoire des risques. L'inventaire des catastrophes sismiques qui se sont produites au cours de l'histoire nous montre bien une répétitivité du phénomène. Le comportement de la population à l'égard du danger sismique a évolué au cours du temps : du fatalisme vers une volonté de plus en plus marquée de protection et de prévention. Les sociétés qui cultivent le souvenir des catastrophes passées s'avèrent plus sensibilisées, plus réceptives aux campagnes de prévention. De nos jours, la problématique des dangers sismiques est examinée sous l'angle de la protection mais également sous l'aspect de la prévention, en diffusant à la population, de l'information précise et conforme à la situation réelle. La connaissance et l'évaluation du risque sismique constituent les éléments essentiels de l'information. L'amélioration de la connaissance d'un séisme nécessite d'étudier son phénomène physiques, ainsi que ses composantes (l'aléa et la vulnérabilité). L'évaluation du risque sismique porte sur l'estimation des conséquences des pertes en vie humaine et des dégâts matériels. Le risque de perte en vie humaine dépend selon certains moments (jour-nuit) du risque d'effondrement du bâti existant. L'évaluation du risque d'effondrement des bâtiments implique notamment de développer un modèle d'évaluation de la vulnérabilité des territoires à l'échelle urbaine. Pour pouvoir appréhender et estimer le risque d'effondrement du bâti existant à l'échelle d'une ville, il est nécessaire de quantifier ce risque avec suffisamment de précision. C'est pour cela que la partie essentielle de cette recherche (chapitres 4 et 5) portent sur un modèle d'estimation de la vulnérabilité à l'échelle des bâtiments individuels puis à l'échelle d'une population de bâtiments.

La recherche présentée dans ce document se concentre uniquement sur l'habitat collectif existant et ses habitants. Ce choix a été arrêté du faite que les lieux d'habitation causent beaucoup de pertes en vie humaine à la suite d'un tremblement de terre. Il est néanmoins important de ne pas négliger le rôle joué dans le fonctionnement d'un territoire urbain par les infrastructures de transport, d'alimentation en eaux ou d'approvisionnement en électricité qui peuvent être affectées par un séisme. Ces aspects ne sont pas abordés dans ce travail, mais une démarche similaire d'évaluation de la vulnérabilité peut être envisagée. Le modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti proposé est appliqué au cas de deux villes situées en zone frontalière (Mulhouse – Bâle) avec les spécificités de chacune de ces deux

villes. Cette recherche peut être menée de façon similaire pour d'autres contextes et d'autres zones urbaines.

Objet et problématique de la thèse

Dans l'objectif d'aider les pouvoirs publics dans leur devoir de prévention pour sensibiliser la population exposée au risque sismique, nous nous sommes interrogé sur la possibilité d'évaluer la vulnérabilité du bâti collectif à usage d'habitation en utilisant la nouvelle réglementation Européenne (Eurocode 8). Il en découle la problématique générale suivante.

"Est-il possible d'envisager un modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti existant en utilisant l'Eurocode 8 sans que l'utilisation de ce modèle implique de réaliser des calculs mécaniques" ?

Cette problématique entraîne plusieurs questions :

" La nouvelle réglementation parasismique Européenne est-elle applicable au territoire bâlois ? Comment évaluer la vulnérabilité du bâti existant à l'échelle de plusieurs bâtiments ? Faut-il envisager des types de bâtiments différents par leur âge notamment, les matériaux qui les composent, la hauteur des constructions pour analyser de manière assez précise la vulnérabilité des espaces urbains de l'étude ? Dans la simulation d'un scénario sismique donné, comment cartographier le risque d'effondrement du bâti et le risque encouru par la population" ?

Nous avons souhaité élaborer un modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti existant en utilisant la nouvelle réglementation parasismique Européenne, tout en considérant l'aléa sismique. Ce modèle d'évaluation est développé à partir d'une approche déterministe complété d'une approche probabiliste. Ces deux approches complémentaires ont pour objectif de définir si le bâti est défaillant (effondrement) et avec une probabilité de défaillance déterminée. Le modèle envisagé doit permettre d'évaluer au mieux dans le temps, l'espace et selon des ressources collectées sur le terrain la résistance sismique du bâti. Notre travail s'intéresse aux maçonneries composées de pierres naturelles, de blocs de terre cuite ou de blocs de béton de granulats ainsi qu'aux constructions en béton armé. Ces types de constructions sont en effet très employés dans notre terrain d'étude. Dans les pays européens, la majorité des bâtiments sont construits en maçonnerie et réalisés avant l'apparition des normes parasismiques. Il est donc nécessaire d'évaluer la vulnérabilité des constructions existantes pour estimer les dégâts matériels probables afin de mieux protéger les populations et leurs biens.

Notre zone d'étude située entre la France et la Suisse constitue une région vulnérable en raison de sa localisation dans un bassin économique tri-national (France – Allemagne – Suisse) et d'une concentration importante de la population. Au sur plus de ce contexte local, vient s'ajouter l'application d'une réglementation parasismique différente de part et d'autre de la frontière. La ville française est de nos jours régie par la nouvelle réglementation parasismique européenne (l'Eurocode 8), alors que la ville de Bâle est gérée par la réglementation parasismique helvétique. En d'autres termes, dans le cadre de ce travail nous souhaitons appliquer la même réglementation parasismique, l'Eurocode 8 dans les deux villes soumises au même aléa afin de déterminer si la réponse en termes de risque sismique dans la conurbation de Mulhouse – Bâle est identique. Cependant, avant d'utiliser l'Eurocode 8 pour évaluer la vulnérabilité du bâti existant implanté dans la ville de Bâle, il est nécessaire de vérifier si cette réglementation respecte les contraintes imposées par la réglementation suisses

L'objet de notre travail de thèse est donc à partir d'une observation sur le terrain du bâti existant de construire un modèle d'évaluation de la résistance sismique des bâtiments selon la réglementation Européenne et d'estimer la vulnérabilité de la population à l'échelle urbaine. Ce modèle va permettre de déterminer le risque de dégât du bâti collectif à usage d'habitation ainsi que le risque de pertes en vie humaine entraînée par l'effondrement des bâtiments. L'évaluation du risque sera représentée sur des cartes de risques à l'échelle urbaine afin de localiser de manière objective et synthétique les zones de niveau de risque plus ou moins élevé.

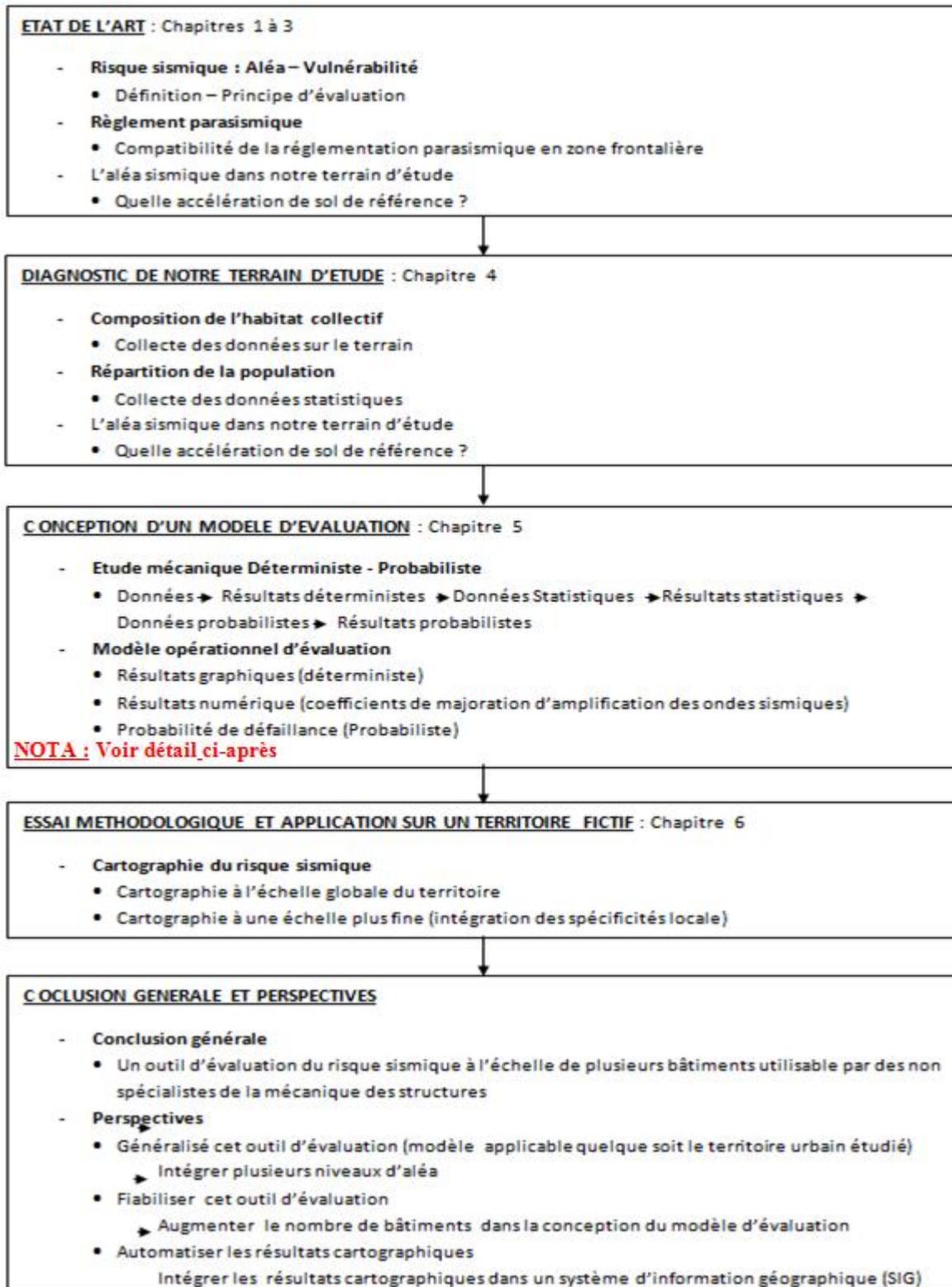
Principale sources d'information – Démarche méthodologique

Principale sources d'information

Nous avons appuyé nos travaux de recherche sur deux grands types de sources, les sources bibliographiques et les données collectées sur le terrain. En premier lieu, nous nous sommes intéressés aux phénomènes sismiques et à la réglementation parasismique. Notre objectif était de comprendre à quelle force sismique notre zone d'étude était susceptible d'être exposée. Les informations obtenues à travers la littérature nous a permis de connaître l'accélération de sol de référence à travers les événements du passé. Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une analyse comparative de la réglementation Européenne et la réglementation Suisse qui nous a permis de savoir si la réglementation Européenne était applicable sur le territoire frontalier coté helvétique, tout en respectant les prescriptions des deux règlements. En deuxième lieux nous avons examiné la composition de l'habitat collectif

à usage d'habitation de notre terrain d'étude. L'objectif était de chercher à déterminer les différentes typologies d'habitats collectifs contenus dans notre territoire d'étude par une enquête de terrain.

Démarche méthodologique



DETAIL – DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA CONCEPTION DU MODÈLE D'ÉVALUATION (Chapitre n° 5)

ETAPE 1 : Etude mécanique déterministe

- 1- Calcul des charges gravitaires
- 2- Calcul du spectre élastique
- 3- Calcul de la force sismique horizontale et du moment fléchissant à la base du bâtiment
- 4- Répartition en élévation des forces sismiques (forces horizontales et moments fléchissant)
- 5- Distribution des forces sismiques sur les éléments porteurs (forces horizontales et moments fléchissant)
- 6- Calcul de la déformée du bâtiment
- 7- Vérification de la résistance sismique locale (éléments porteurs) et globale (résistance du bâtiment) Equation : Résistance = Demande / Capacité sismique < 1 (Le bâtiment résiste)

Nota : Les résultats sont des valeurs (Haute – moyenne et basse) de résistance sismique du bâtiment étudié

ETAPE 2 : Etude mécanique statistique déterministe

- 1- Simulation de Monte-Carlo de la demande et de la capacité sismique des résultats obtenus dans l'étape précédente (Il a été réalisé 350 simulations numériques de Monte-Carlo. Ces simulations correspondent à un échantillon de 350 bâtiments)

Nota : Les résultats sont des valeurs (moyenne (μ) et écart type (σ)) de la demande et de la capacité sismique des éléments porteurs et du bâtiment étudié

ETAPE 3 : Etude mécanique probabiliste

- 1- Simulation de Monte-Carlo de la demande et de la capacité sismique des résultats obtenus dans l'étape précédente
 - 3 Techniques de calcul des probabilités de défaillance du bâtiment étudié
 - Comptage direct
 - Séparation des variables aléatoires
 - Comptage direct + tirages conditionnés

Nota : Les résultats sont des valeurs de probabilité de défaillance du bâtiment étudié

NOTA : Voir Annexe 5.H (Exemple des données et résultats obtenus)

Organisation de la thèse

Le contenu de ce manuscrit se compose de deux parties. La première partie est divisée en quatre chapitres et la partie suivante en deux chapitres.

Le premier chapitre fait un état des connaissances du risque sismique et ses composantes : l'aléa et la vulnérabilité. Dans ce chapitre, il est fait un rappel des définitions du risque, de l'aléa et de la vulnérabilité. Le principe d'évaluation de l'aléa est décrit selon deux approches différentes : l'approche déterministe et l'approche probabiliste. Pour étudier la résistance du bâti collectif à usage d'habitation nous verrons que l'approche probabiliste est utilisée. En dernier lieu de ce chapitre, un état des connaissances des différents principes d'évaluation de la vulnérabilité du bâti va nous permettre de constater que l'évaluation de la vulnérabilité du bâti à l'échelle d'une population de bâtiment selon la nouvelle réglementation parasismique (l'Eurocode 8) n'a jamais été envisagée.

Dans le deuxième chapitre, une analyse de la nouvelle réglementation parasismique (Eurocode 8) au regard de la réglementation précédente (Norme PS92) a permis de constater que la nouvelle réglementation apporte des simplifications dans les calculs de résistance des bâtiments. Ce chapitre propose aussi une comparaison de la nouvelle réglementation Européenne et la nouvelle réglementation appliquée en Suisse. En effet, notre terrain d'étude est situé à la frontière Française et Suisse, plus précisément dans les zones urbaines de Mulhouse et de Bâle. Cette comparaison va nous permettre de déterminer si il nous est possible d'appliquer la réglementation Européenne avec ou sans adaptation au territoire bâlois.

Le chapitre 3 établit un état des lieux de la sismicité de la région étudiée. Dans ce chapitre, nous examinons les événements du passé, le contexte sismotectonique pour localiser les failles et évaluer la sismicité régionale. Dans un second temps, un examen de la morphologie, du relief et de la nature des sols permet de déterminer si les zones urbaines de Mulhouse et de Bâle sont susceptibles de générer des amplifications des ondes sismiques aggravants les risques de dégâts. Et enfin dans ce chapitre, il est envisagé de comparer les accélérations de sols définies selon différentes études à celles préconisées par l'Eurocode. Cette comparaison a pour objectif d'identifier des accélérations de sols susceptibles d'être plus élevées que les accélérations de sol préconisées par la nouvelle réglementation.

Le quatrième chapitre a pour intérêt de réaliser un diagnostic de notre territoire d'étude sur la population et le bâti collectif à usage d'habitation. Il s'agit tout d'abord de proposer un découpage géographique de la ville de Mulhouse et de Bâle. Le découpage proposé dans le cadre de ce travail est réalisé en fonction de l'évolution de l'étalement urbain et de l'évolution de l'âge du bâti. Dans un second lieu, nous étudions la répartition de la population selon le découpage géographique envisagé. L'intérêt de cette analyse est de déterminer les zones où le risque de perte en vie humaine est le plus élevé suite à un séisme. Enfin en dernier lieu, nous avons réalisé un diagnostic de l'habitat selon différents types de bâtiments en fonction de l'âge, des matériaux et de la hauteur des constructions. Ce bilan nous a permis de localiser les zones plus ou moins vulnérables aux événements sismiques

Le cinquième chapitre est consacré à la proposition d'un modèle d'évaluation la vulnérabilité du bâti, à partir d'une étude mécanique déterministe et complétée d'une étude mécanique probabiliste. Pour ce faire, il est envisagé d'identifier cinq types de bâtiments à travers l'âge et les matériaux des constructions. Les cinq types de bâtiments que nous appellerons les « Bâtiments Élémentaires Représentatifs (B.E.R.) » vont être identifiés à partir des caractéristiques mécaniques des bâtiments et des matériaux. L'approche déterministe va nous permettre d'obtenir des résultats graphiques informant si le bâti résiste à un séisme donné. L'approche probabiliste qui nous permettra d'introduire les incertitudes liées d'une part aux connaissances des caractéristiques des matériaux et d'autre part à la conception architecturale à pour intérêt de compléter les résultats déterminés dans l'approche déterministe par des probabilités de défaillance (ruine) des bâtiments.

Le dernier chapitre est destiné à l'application concrète du modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti au cas des zones urbaines de Mulhouse et de Bâle. Il s'agit tout simplement de cartographier le risque sismique à l'échelle des villes et à une échelle plus fine, celle du découpage des secteurs historico-géographiques retenus au chapitre 4. Pour accomplir notre démarche, nous envisageons de procéder en trois étapes. Dans la première étape, il s'agit de déterminer des résultats quantitatifs puis de les transformer en résultats qualitatifs en deuxième étape, afin de cartographier en dernier lieu le risque d'effondrement du bâti et le risque de pertes en vies humaines. Ces cartographies ont pour intérêt principal de proposer plusieurs cas de priorité d'intervention pour chercher à réduire le risque des dégâts matériels du bâti collectif à usage d'habitation ainsi que le risque de perte en vie humaine.

Enfin, la conclusion résume les apports de ce travail et propose quelques perspectives de recherche dans l'intérêt d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus et de poursuivre la réflexion sur le modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant.

PREMIERE PARTIE : LE RISQUE SISMIQUE AU SUD DE L'ALSACE ET DANS LA REGION BALOISE

Introduction

Mulhouse et Bâle, deux villes localisées au sud du fossé rhéan sont exposées au risque sismique. Cette région urbaine est située en zone de sismicité modérée¹. Bien que les séismes destructeurs soient rares, leur probabilité d'occurrence n'est pas nulle. Le séisme de référence le plus fort connu aux alentours de Bâle date de 1356, il a été d'une magnitude de 6,7 sur l'échelle de Richter [LAMBERT *et al.* 2005]. Dans cette région frontalière, la densité de population est importante, les activités industrielles et tertiaires sont nombreuses. La vulnérabilité est donc considérable. Or, plusieurs travaux de recherche sur les risques [DU-BOIS-MAURY et CHALINE, 2002 ; VEYRET, 2003, 2004] ont souligné les difficultés d'évaluation du risque au sein des espaces urbains.

Il est nécessaire d'envisager une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité et par là-même du risque sismique, notamment par le biais d'analyses techniques notamment concernant l'habitat. Associer les disciplines technique et géographique devrait contribuer à mieux cerner la vulnérabilité face aux aléas sismiques.

¹ Modéré : Classement selon l'Eurocode

CHAPITRE 1 : De l'aléa au risque sismique

Définir le risque, l'aléa sismique, et la vulnérabilité constitue un préalable nécessaire à l'étude. Il est indispensable de distinguer aléa sismique et risque et de cerner le contenu de ces deux notions.

1- L'aléa sismique

Le terme d'aléa vient du mot latin désignant les " dés " (aleum au singulier, un dé), rendu célèbre par la phrase de César franchissant le Rubicon (alea jacta est). Ce terme recouvre aussi l'idée de « chance ». Il renvoie au vocabulaire des probabilités. Il désigne en géologie la possible manifestation d'un phénomène naturel (un séisme). L'aléa sismique peut donc se définir comme : " *la probabilité d'occurrence d'un événement sismique, de caractéristiques données (intensité, magnitude, profondeur focale en particulier) pour un lieu géographique donné* " [TERRIER *et al.*, 2008]. L'aléa sismique résulte du jeu des failles. On définit par faille la cassure de roches accompagnée d'un déplacement relatif des deux compartiments. La connaissance et la compréhension des phénomènes sismiques se sont beaucoup développées au cours du XX^{ème} siècle en relation avec la "découverte" de la tectonique des plaques. Au contact des plaques en mouvement se produisent de fortes tensions et une accumulation d'énergie qui justifient des ruptures à l'origine de failles. On distingue trois types de failles : normale, inverse, transformante (décrochement) détaillées en annexe [Annexe n° 1 – Chapitre 1 – Figures n° A1 à A 3]. Les failles normales sont associées à un phénomène d'extension, les failles inverses à une compression et les failles transformantes un mouvement de coulissage horizontal.

L'aléa se définit par son **temps de récurrence**, intervalle de temps entre deux séismes successifs sur la même portion de faille. Il correspond théoriquement au temps nécessaire à l'accumulation des contraintes pour aboutir à une nouvelle rupture. Dans les régions à forte sismicité ce temps de récurrence peut être de quelques dizaines à quelques centaines d'années, mais il est difficile à définir. La connaissance de cette récurrence est fondamentale pour définir l'aléa sismique nécessaire à connaître pour déterminer le risque sismique. Cependant aucune méthode ne permet aujourd'hui de prédire avec certitude la survenue d'un séisme à un moment donné. La prévision basée sur l'évaluation de l'aléa à partir de la sismicité historique et instrumentale, est pourtant très importante.

Les données accélérométriques recueillies lors des séismes montrent les variations de vitesse de propagation des ondes sismiques en fonction du milieu travers [CORSINI, 2008]. En effet, la propagation des ondes sismiques depuis le foyer dans les roches et dans les sols jusqu'à la surface, s'effectue différemment selon le type de roches et de sols. L'effet de site (détaillé plus après), explique les modifications subies par l'onde sismique. En milieu sableux et saturé d'eau le sol perd sa cohésion, c'est le processus de liquéfaction dont les conséquences sur les bâtiments sont extrêmement dommageables.

Un séisme se définit par son foyer et son épïcentre. Le foyer correspond au point d'origine de la rupture au sein de l'écorce terrestre. L'épïcentre, est le point situé en surface du sol à la verticale du foyer où généralement la secousse ressentie est la plus élevée. Les longueurs permettant de localiser le foyer d'un séisme sont la distance focale, la distance épïcentrale et la profondeur focale. La distance focale est une relation entre la distance épïcentrale et la profondeur épïcentrale (figure n° 1).

Les sismologues classent également les séismes suivant leur profondeur. Il y a trois catégories. Les séismes sont dits superficiels quand le foyer se situe dans les premiers 70 kilomètres. Ce sont de loin les plus nombreux. Entre 70 et 300 kilomètres on parle de séismes intermédiaires et de séismes profonds jusqu'à 700 kilomètres.

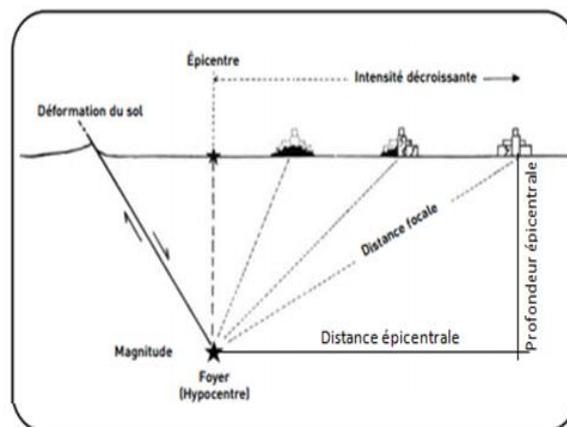


Figure n° 1 : Les composantes d'un séisme
Source : [Institut des Risques Majeurs de Grenoble (IRMa)]

Un séisme est caractérisé par sa magnitude ou énergie libérée par la rupture qui se produit au foyer d'un tremblement de terre. Lors de ce processus 20 à 30% de l'énergie libérée se propage au loin sous forme d'ondes élastiques (il s'agit du rendement sismique, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie des ondes et l'énergie totale) tandis que la plus grande partie se dissipe sous forme de chaleur. Charles F. Richter (1935) a établi une échelle des magnitudes qui mesure l'énergie émise sous forme d'ondes élastiques. La magnitude ne s'envisage pas sur une échelle en degrés, elle est une fonction continue qui en principe, n'a

pas de limite. Pourtant, les plus fortes magnitudes enregistrées jusqu'ici ne dépassent guère 9 sur l'échelle de Richter. En réalité, la valeur minimale de la magnitude est liée à la sensibilité des sismomètres. Aujourd'hui on utilise plutôt la magnitude du moment, ou de Kanamori M_W , mieux adaptée aux très gros séismes. Elle est calculée à partir d'un modèle physique de source sismique et est reliée au moment sismique m_0 : $m_0 = \mu S \Delta u$ où μ correspond à la rigidité du milieu, Δu au déplacement moyen sur la faille, et S à la surface de la faille.

2- Principes d'évaluation de l'aléa sismique

L'évaluation de l'aléa sismique se fait à plusieurs échelles [BERTIL *et al.* 2008]. La procédure d'évaluation se compose d'une phase d'identification de la source sismique, d'une phase de caractérisation de l'activité sismique et d'une phase de quantification de l'énergie libérée par ces sources selon la distance. Identifier la source sismique revient à analyser le contexte sismotectonique dans le but de mettre en évidence les liens entre la sismicité et les structures tectoniques actives actuelles ou d'un passé récent. Caractériser l'activité des failles nécessite de recenser les évènements du présent et du passé. Cela conduit à identifier la force des séismes qui se sont déjà produits. Quantifier l'énergie libérée, c'est-à-dire l'accélération de sol en un lieu donné permet d'envisager l'importance des évènements qui peuvent survenir dans le futur. Pour quantifier cette accélération de sol, il existe deux approches différentes : l'approche " *déterministe* " [BLÈS *et al.* 1998] et l'approche " *probabiliste* " [MARTIN *et al.* 2002].

L'approche " *déterministe* " conduit à s'interroger sur le mouvement du sol attendu pour un séisme de magnitude donnée dont l'épicentre est localisé à un endroit donné. L'approche " *déterministe* " est utilisée pour évaluer l'aléa, lorsque l'on cherche à déterminer le risque d'endommagement des installations dites à " *risque spécial* " (barrages, centrales nucléaires, viaducs, etc.). Cette approche considère que le séisme de demain sera de la même force que le séisme passé le plus important connu. Elle cherche donc à identifier l'intensité maximale des évènements passés afin de déterminer le séisme de référence (séisme maximum historiquement vraisemblable S_{MHV}). Ce séisme de référence est estimé à partir d'une analyse du contexte sismotectonique de la région, de l'identification des séismes du présent et du passé. L'intensité de ce séisme de référence qui est l'intensité maximum historiquement vraisemblable (I_{MHV}) est convertie en magnitude par la relation empirique (intensité-magnitude) de Karnik [KARNIK *et al.* 1957] et en accélération de sol par la relation (intensité-accélération du sol) de Murphy et O'Brien, [MURPHY et O'BRIEN, 1977] pour fournir une donnée physique utile en génie parasismique.

L'approche " *probabiliste* " que nous utiliserons dans le cadre de ce travail, s'interroge sur la probabilité P qu'un séisme de magnitude donnée se produise au moins une fois dans un endroit étudié sur une période de temps donnée. Ainsi, à Mulhouse, quelle est la probabilité que se produise un séisme d'une accélération du sol d'une valeur égale à $1,10 \text{ m/s}^2$ sur une période de 50 ans ? Le zonage sismique de la France s'appuie sur le principe de l'approche probabiliste. Cette approche sert à évaluer l'aléa permettant d'estimer le risque d'endommagement des ouvrages dits à " *risque normal* ", c'est-à-dire les bâtiments, les équipements et les installations pour lesquels les effets demeurent circonscrits à leurs occupants et à leur voisinage immédiat.

Les travaux de Reiter [REITER, 1990] et Kramer [KRAMER, 1986] proposent une bonne introduction à l'estimation de l'aléa selon Cornell – Mc Guire, tandis que Dominique et Abrahamson [DOMINIQUE, 1999 ; ABRAHAMSON, 2000] font le point sur les pratiques actuelles en matière d'estimation probabiliste. Céline Beauval [BEAUVAL, 2003] s'intéresse aux incertitudes liées à l'estimation probabiliste. L'approche développée par Cornell [CORNELL, 1968] consiste à analyser la sismicité du passé et du présent à l'aide de la loi de Gutenberg-Richter (1944 et 1954) pour envisager les séismes futurs, en utilisant le modèle de Poisson que nous détaillons plus après. Cela permet d'évaluer les caractéristiques de ces futurs séismes par une loi d'atténuation. L'objectif de cette approche est donc de définir l'aléa sismique exprimé par l'accélération de sol, afin de déterminer la résistance des bâtiments.

La première étape de cette approche consiste donc, à analyser les retours d'expérience provenant des séismes passés et présents. Ces séismes sont quantifiés en utilisant la relation fréquence – magnitude de Gutenberg et Richter [GUTENBERG and RICHTER, 1944 et 1954] exprimée par l'équation : $\log_{10} N = a - bM$. Les constantes (a) et (b) sont des coefficients qui dépendent de la région et du niveau de sismicité. A l'aide de ces informations et du nombre de séismes évalués, il est possible de définir les magnitudes maximales et minimales à prendre en compte pour la détermination de la sismicité du futur. Les séismes du futur sont supposés se produire de façon aléatoire à la fois dans le temps et dans l'espace. Par conséquent, la deuxième étape de cette approche consiste à considérer le modèle de Poisson [CORNELL & WINTERSTEIN, 1986]. Celui-ci permet d'estimer la probabilité P qu'un phénomène se produise au moins une fois pendant une période t selon la relation de Poisson : $P = 1 - e^{-t/T}$, où $t < T$ avec la période de retour de référence $T = 475$ ans et la durée de vie $t = 50$ ans pour les bâtiments. La durée moyenne de vie des bâtiments est de 50 ans. Pour les séismes, une période de retour de 475 ans est équivalente à un risque de 10% (probabilité $P = 10\%$) sur 50 ans d'avoir un mouvement du sol qui dépasse la valeur calculée et donc une probabilité de 90% d'avoir un mouvement de sol plus faible que la valeur calculée. Par exemple à Mulhouse, on suppose d'avoir un évènement sismique donnant une ac-

celération de sol égale à $1,10 \text{ m/s}^2$ (valeur réglementaire). La période de retour de 475 ans est équivalente à un risque de 10% sur 50 ans d'avoir un mouvement du sol (une accélération de sol) supérieur ou égale à $1,10 \text{ m/s}^2$ et donc une probabilité de 90% d'avoir un mouvement inférieur à $1,10 \text{ m/s}^2$. Au-delà d'une accélération de sol de $1,10 \text{ m/s}^2$, il y a une forte probabilité pour que les bâtiments s'effondrent. La sismicité du futur et les magnitudes minimum et maximum étant ainsi déterminées, la troisième et dernière étape de l'approche probabiliste peut être réalisée. Il s'agit de quantifier les mouvements de sol (accélération de sol) à partir de la probabilité d'occurrence des séismes du futur, en fonction de chaque magnitude. Pour quantifier les mouvements de sol il suffit d'appliquer une loi d'atténuation adaptée au contexte de la sismicité locale qui dépend de la magnitude, de la distance focale ou épacentrale et de la profondeur. Les différentes lois d'atténuation [COTTON *et al.* 2003 ; SARDIGH *et al.* 1997 ; AMBRASEYS, 1995] sont bien adaptées aux zones actives superficielles telles que la région de Mulhouse et Bâle.

Dans l'évaluation du séisme de référence à l'échelle régionale, le milieu est supposé géologiquement homogène. Ce qui implique que l'on calcule un mouvement sismique de référence en conditions standards² (« *rocher horizontal affleurant*³ »), associé à un séisme maximal. L'évaluation à l'échelle locale intègre les données du lieu étudié en prenant en compte les effets de site et les effets induits (stabilité des pentes et comportements particuliers des sols sous l'effet du mouvement vibratoire). Les effets de site se manifestent par une amplification ou une atténuation du mouvement sismique. Les conditions géologiques locales sont ainsi à même d'amplifier l'aléa [BARD, 2002 ; GUEGUEN *et al.* 2003]. La topographie intervient diversement dans le cas des pentes, des collines et des vallées. Les amplifications/atténuations des mouvements sismiques dépendent essentiellement des formes de pentes, des dénivelés ainsi que de l'ampleur des reliefs. Dans la majorité des cas le mouvement est amplifié au sommet d'une pente, d'une colline et aux bords des vallées [NGUYEN, 2005]. Les effets de sites peuvent se traduire par des dégâts importants.

Si l'aléa définit le processus physique potentiellement source de danger, il faut le distinguer du risque.

3- Le risque sismique

Le terme risque vient de l'ancien italien "*risco*" (aujourd'hui "*rischio*"). Son origine peut provenir du latin *rixare* signifiant se "*quereller*" ou de l'espagnol *riesgo* (rocher découpé), elle peut aussi être grecque *rhizikon* ou arabe *risk*. Le terme "*risque*" a été utilisé dès la Renaissance pour envisager les aléas liés au transport de marchandises par navires. Mais ce n'est

² Conditions standards : signifie que le support rocheux est géologiquement homogène

³ Rocher horizontal affleurant : signifie que le lieu étudié est composé d'un sol de surface rocheux

qu'à partir du milieu du XXe siècle que le terme " *risque* " se diffuse dans les sociétés européennes avec l'émergence du risque nucléaire lorsque dans les années 1970 des événements graves se produisent à Lucens dans le canton de Vaud en Suisse, et à Saint-Laurent-des-Eaux dans le Loir-et-Cher. On passe dès lors à ce que le sociologue Ulrich Beck [BECK, 2002] définit comme " *la société du risque* " où tout devient risque dans nos sociétés.

Le terme de risque rejoint celui de danger pour un individu ou un groupe d'individus. Si l'aléa relève de la physique et des sciences dites « dures », le risque relève des sciences sociales. Sans la perception du danger il n'y a pas de risque. Objet social, le risque implique perception, représentation, vécu de la part des populations.

Le risque a une dimension temporelle [MESCHINET de RICHEMONT, 2003] et une dimension spatiale [PROPECK-ZIMMERMANN, 2003].

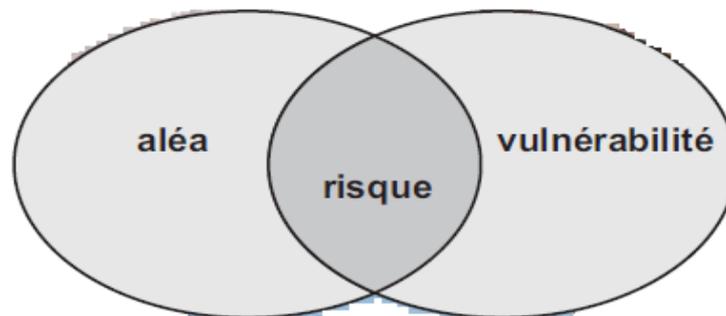


Figure n° 2 : Définition du risque. Le risque est fonction de la combinaison de l'aléa sismique et des éléments vulnérables

4- La vulnérabilité au risque sismique

La magnitude d'un aléa sismique n'est pas l'unique composante responsable du nombre de victimes et de l'ampleur de l'endommagement du bâti. Ainsi, pour deux aléas de magnitude proche, le nombre de victimes et l'ampleur des dégâts n'ont parfois rien à voir. Le séisme de Spitak (Arménie – 1988) d'une magnitude égale à 6,9 (Richter) a provoqué entre 25 000 et 100 000 décès et 530 000 sans-abri. A l'opposé, le séisme d'une magnitude égale à 7,1 de Loma Prieta (États Unis – 1989) a entraîné 62 morts et 12 000 personnes sans abri [VEYRET, 2006]. Cette différence provient notamment d'éléments techniques inégaux dans les deux villes (mauvaise qualité de la construction, constructions non parasismiques dans un cas plus que dans l'autre etc.), d'éléments sociaux et économiques (quartiers pauvres

plus fragiles probablement), d'éléments fonctionnels et structurels (inégaie préparation à la gestion du risque et de la crise, etc.). Ces situations traduisent une inégaie vulnérabilité.

Wisner et al emploient en 1976 le terme de vulnérabilité [WISNER *et al.* 1976]. Dans le même temps, White souligne que la capacité d'adaptation (*adaptive capacity*) des sociétés à l'aléa explique leur capacité à faire face (*coping capacity*) à la crise [WHITE, 1945 ; WHITE, 1974 ; VEYRET et REGHEZZA, 2005]. La vulnérabilité est définie comme un degré de pertes quand survient un évènement dommageable [STARR, 1969]. C'est aussi " *la susceptibilité de subir des pertes due à l'exposition à l'aléa* " [GEORISK, 1999]. La vulnérabilité exprime donc le niveau des conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux soumis à cet aléa. Elle dépend de la densité des populations, des éléments exposés. On désigne ainsi, la population, l'habitat, les ouvrages d'art (ponts, routes, voies ferrées, barrages...), les infrastructures critiques (réseaux de communication, de transports, les centrales nucléaires, etc.), mais aussi des activités économiques, de service, de loisir, etc., le patrimoine culturel et environnemental (monuments, paysages, biodiversité...). Tout ceci constitue ce que l'on nomme les enjeux.

« La vulnérabilité traduit la fragilité d'un système, et de manière indirecte, sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa. Plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable, plus il est résilient [MEBARKI *et al.* 2012 ; DAUPHINE, 2004]. Elle indique aussi des pertes et des dommages en fonction du degré d'exposition des enjeux suite à la réalisation d'un aléa [NICHOLLS *et al.*, 1999]. On parle de vulnérabilité sociale comme la " *possibilité d'un groupe social à subir des pertes suite à un évènement dommageable* " [CUTTER *et al.* 2000]. Elle dépend notamment des propriétés humaines (perception du risque, âge, sexe, ethnique, etc.) et mesure les conséquences dommageable sur l'enjeu humain (décès, blessés des victimes sans abri), Elle rejoint cependant la vulnérabilité physique qui envisage " *les conséquences de l'impact d'un aléa sur des bâtiments, des réseaux, des infrastructures, voire des populations. On parle de vulnérabilité physique car cette vulnérabilité dépend uniquement de l'impact physique de l'aléa et de la valeur des enjeux concernés* " [REGHEZZA, 2006].

La vulnérabilité dans ses différents composants est un élément majeur dans l'analyse du risque sismique. Cette notion renvoie aux spécificités et à l'organisation d'un territoire menacé, à ses acteurs, à la préparation à faire face aux effets des processus sismiques et plus généralement à la vulnérabilité des lieux [CUTTER *et al.* 2003]. La vulnérabilité est désormais introduite dans les politiques de gestion du risque et en particulier, dans les documents réglementaires tels les Plans de Prévention des Risques (PPR). Toutefois, l'utilisation du concept est difficile notamment à cartographier dans toute sa complexité et ses interactions, ainsi la carte de vulnérabilité des Plans de Prévention des Risques (PPR) reste extrêmement sommaire. En outre les chaînes de risques sont difficiles à prendre en compte.

Dans ses travaux de recherches, Magali Reghezza propose une grille de lecture spatiale du risque d'inondation de la métropole parisienne sous l'angle de la vulnérabilité [REGHEZZA, 2006]. L'auteur distingue trois aspects : matériel, structurel et fonctionnel. Cette grille de lecture permet à la fois d'introduire l'espace géographique et d'y examiner la complexité du risque urbain. Pour concevoir cette grille de lecture, l'auteur s'est appuyée sur les travaux de J-F Gleyze sur les risques des réseaux de transports où " l'aléa (agent perturbateur initial) frappe l'enjeu qui lui est exposé et provoque des dommages matériels. Ces dommages matériels dégradent la structure (ou organisation) de cet enjeu et provoquent de fait des dommages dits structurels ". Ce sont donc non seulement les dommages matériels, mais aussi la dégradation de la structure qui sont responsables de l'endommagement fonctionnel ".

Dans son étude de cas de la métropole parisienne, M. Reghezza souligne que la vulnérabilité de l'espace est liée à sa spécificité même (son mode d'organisation, la densité du bâti, l'âge du bâti et ses fonctions). L'auteur souligne aussi que le passage de l'endommagement matériel à l'endommagement fonctionnel s'opère par un niveau intermédiaire, celui de l'organisation, qui n'apparaît pas dans les études d'impact traditionnelles. En tant que dynamique spatiale, l'urbanisation agit à la fois sur la matérialité, la structure et la fonctionnalité de l'espace géographique. Cette notion enrichit considérablement l'approche traditionnelle du risque et de la vulnérabilité.

La vulnérabilité doit aussi envisager les effets en chaîne ou effets « domino » qui peut aussi se traduire par des interactions entre risques naturels et technologiques (figure n° 3).

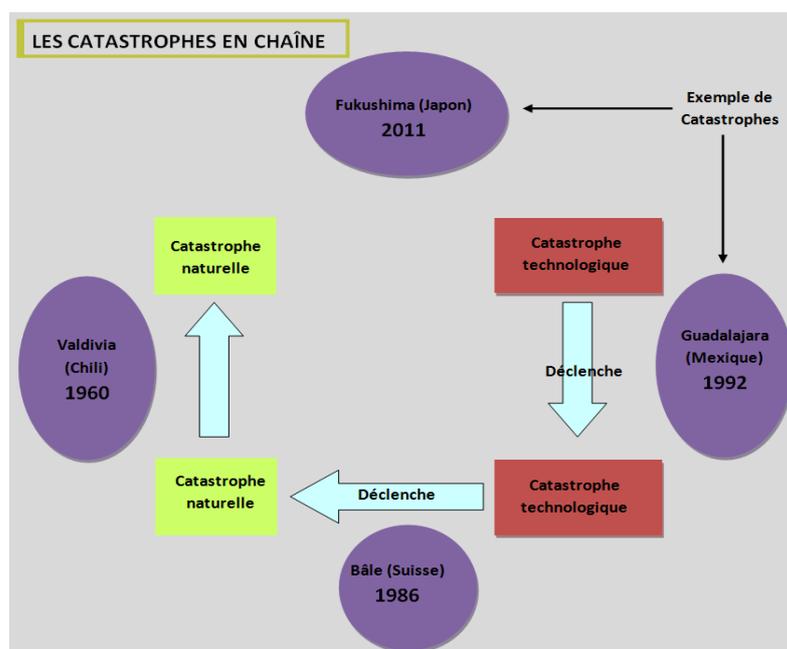


Figure n° 3 : Les catastrophes en chaîne
 Source : [VEYRET et LAGANIER, 2012, p 81]

La vulnérabilité des enjeux peut être évaluée de manière qualitative [DAUPHINE, 2004 ; BILLOT *et al.* 2003]. La vulnérabilité appréciée en fonction des conséquences dommageables qui permettent d'établir l'intensité des séismes constitue une approche qualitative. Plusieurs échelles ont été établies pour définir l'intensité des séismes. La première a été introduite par le volcanologue Giuseppe Mercalli en 1902, modifiée en 1956, elle a été suivie par l'échelle MSK en 1964, du nom des trois sismologues européens Medvedev, Sponheuer et Karnik. Depuis 1996, la Commission Sismologique Européenne recommande l'usage d'une nouvelle échelle, l'Echelle Macrosismique Européenne (EMS98) qui présente douze degrés d'intensité et s'appuie sur les critères suivants : effets sur les humains, effets sur les objets et sur la nature, dégâts sur les bâtiments. Cette échelle détaillée dans le rapport du conseil de l'Europe pages 14-20 [GRÜNTAL *et al.*, 2001 est présentée ici sous sa forme abrégée (Tableau n° 1).

Tableau n° 1 : Echelle Macrosismique Européenne (EMS98)

| Intensité EMS | Définition | Description des effets observés (résumé) |
|----------------------|--------------------------|---|
| I | Non ressenti | Non ressenti |
| II | Rarement ressenti | Ressenti uniquement par quelques personnes dans les maisons |
| III | Faible | Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement |
| IV | Largement observé | Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent. |
| V | Fort | Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart des personnes, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment. |
| VI | Dégâts légers | De nombreuses personnes sont effrayées et des précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre. |
| VII | Dégâts | La plupart des personnes sont effrayées et de précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés, petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées, des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage. |
| VIII | Dégâts importants | De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler. |
| IX | Destructions | Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants : défaillances sérieuses des murs et effondrement partiel structural partiel |
| X | Destructions importantes | De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent. |
| XI | Catastrophe | La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits. |
| XII | Catastrophe généralisée | Pratiquement tous les bâtiments sont détruits. |

Source : [GRÜNTAL *et al.*, 2001, p103]

Press et Siever proposent une correspondance entre l'intensité sismique et la magnitude [PRESS et SIEVER, 1974]. Cette correspondance permet de convertir l'intensité des très anciens séismes en magnitude de Richter et inversement, pour une utilisation simultanée des données des séismes très anciens et des données de la sismicité instrumentale.

Tableau n° 2 : Correspondance approximative entre l'intensité maximale et la magnitude pour les séismes superficiels

| Intensité maximale | Magnitude Mw | Effets locaux | Rayon de perceptibilité | Nombre de secousses |
|--------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| XII | Mw > 8,0 | Changement de paysage | - | - |
| XI | Mw > 7,4 | Catastrophe | 600 Km | 4,0 |
| X | Mw > 7,0 | Très grands dommages | 400 Km | 15 |
| VIII-IX | Mw > 6,2 | Dommages importants | 220 Km | 100 |
| VII | Mw > 5,5 | Dommages légers aux constructions | 150 Km | 500 |
| VI | Mw > 4,9 | Secousses ressenties par tous | 120 Km | 1 500 |
| IV-V | Mw > 4,3 | Secousses ressenties par beaucoup | 80 Km | 5 000 |
| II-III | Mw > 3,5 | Secousses ressenties par certains | 15 Km | 30 000 |
| I | Mw > 2 | Secousses non perceptible | - | 800 000 |

Source : [Laboratoire de Géophysique et Géodynamique Archives du Réseau Sismique Provence. D'après PRESS et SIEVER, 1974]

La vulnérabilité des enjeux peut aussi être évaluée en envisageant des fonctions d'endommagement [CHARDON et THOURET, 1994 ; THOURET et LAFORGE, 1994 ; LEONE, 1995 ; LEONE *et al.* 1995], ou encore en proposant une approche par les coûts de dommages [TORTEROTO, 1993 ; THOURET et LAFORGE, 1996 ; TIERNEY *et al.*, 2007]. Ces estimations à valeurs quantitatives se traduisent soit par des indices de vulnérabilité à valeur unique (multi enjeux), soit par des valeurs économiques. La réduction à un indicateur unique, ou à une traduction monétaire uniforme, a l'inconvénient de gommer les interactions entre les enjeux, qui pourtant sont essentielles.

Nous envisageons d'effectuer une évaluation de la vulnérabilité du bâti et les impacts possibles d'un séisme sur la population menacée par l'effondrement des bâtiments. La vulnérabilité du bâti est fondée sur la résistance sismique des constructions.

Plusieurs programmes de recherche européens ont cherché à évaluer la vulnérabilité physique multi enjeux (bâti collectif, enjeux stratégiques et vitaux) à l'échelle des villes, c'est le cas des programmes " GEMITIS (1990) " coordonné par le BRGM et " Risk-UE (2003) " dans le cas Nice. Le projet ANR "URBASIS (2009) " cherche à développer une démarche d'évaluation plus approfondie en associant vulnérabilité physique et sociale à l'échelle de la ville selon une approche systémique. Ces différents programmes ont pour but de proposer

des méthodes standardisées d'évaluation multi enjeux. Il s'agit de cartographier les fragilités du système urbain et de hiérarchiser les zones les plus sensibles aux effets de l'aléa.

L'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments est une procédure d'estimation des dommages probables pour le bâti ancien comme pour le bâti plus récent. Ainsi, définir la vulnérabilité physique du bâti, implique de distinguer la vulnérabilité collective et celle du bâti individuel. La vulnérabilité collective qui revient à analyser la vulnérabilité d'un groupe de bâtiments est abordée à l'aide de méthodes statistiques, voire probabilistes. Il s'agit d'étudier la résistance sismique d'un bâtiment unique représentatif d'un groupe de bâtiments. La représentativité de celui-ci est déterminée à partir de ses caractéristiques physiques. L'étude de la vulnérabilité collective sert à cartographier la vulnérabilité de différents territoires (définis par des types de bâtiments spécifiques) étudiés et d'effectuer une hiérarchisation des zones vulnérables afin de fournir un outil dans une démarche de prévention. A l'opposé, l'étude de la vulnérabilité individuelle revient à évaluer la vulnérabilité des bâtiments immeuble par immeuble. Cette analyse permet d'évaluer précisément la résistance d'une structure particulière à l'égard d'une sollicitation sismique de référence afin de proposer des solutions de renforcement parasismiques. Ainsi, les études des vulnérabilités collective et individuelle poursuivent deux buts différents.

5- Evaluation de la vulnérabilité du bâti

Dans le cadre de ce travail, nous procéderons à l'étude de la vulnérabilité collective en procédant à l'évaluation de la résistance d'un bâtiment fictif, représentatif d'un groupe de constructions. Une fois le bâtiment fictif défini, sa vulnérabilité sera envisagée selon les mêmes méthodes que celles employées pour procéder à l'évaluation de la vulnérabilité individuelle. Ces méthodes d'évaluations, comme le font les programmes GEMITIS, 1990 – 2000 ; HAZUS 1997 – 1999, sont fondées sur des diagnostics se rapportant à la structure étudiée, sur des constats de dégâts et des modèles mécaniques. Différents modèles mécaniques existent pour évaluer la vulnérabilité du bâti à partir de l'intensité sismique ou à partir de la magnitude. Ces modèles sont généralement développés à partir de probabilité de dommages, d'indices de vulnérabilité ou de différentes courbes : de capacité, de vulnérabilité ou de fragilité. On peut citer les modèles de [ATC⁴-13,1985 ; ATC-40, 1996 ; BENEDETTI D. et PETRINI V., 1984 ; BARBAT A. et al, 1996 ; Risk-UE 2003. Il ne s'agit pas ici de réaliser une étude mécanique détaillée des différents modèles d'évaluation de la vulnérabilité du

⁴ ATC – Applied Technology Council : Conseil Technologique Appliqué, en coopération avec l'Agence fédérale des situations d'urgence (Federal Emergency Management Agency FEMA), cherche des propositions d'évaluation sismique de constructions

bâti mais de répertorier les principaux modèles existants et de présenter leur principe d'évaluation.

Le programme "Applied Technology Council" [ATC-13, 1985] a été consacré à l'observation post sismique du bâti. La matrice suivante (figure n° 4) est construite à partir d'observations et d'expériences des experts. Cette matrice a pour but d'exprimer à partir d'une échelle de dommage, un niveau de dommage au bâti (intervalle de dommage) et une probabilité d'atteindre ce niveau de dommage. Par exemple, supposons qu'un séisme d'une intensité égale à VIII survienne à Mulhouse. Les bâtiments en béton armé très résistant ont une probabilité de 0,9% de subir des dégâts de niveau important. Selon l'expérience des experts les dégâts de niveau important signifient que 30% à 60% (figure n° 4) de la structure des bâtiments est endommagée.

| échelle de dommage | intervalle de dommage en % | probabilité de dommage en % en fonction de l'intensité du séisme | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| aucun | 0 | 0.1 | | | | | | |
| très léger | 0-1 | 27 | 2.2 | | | | | |
| léger | 1-10 | 72.9 | 89.3 | 32.2 | 3.0 | | | |
| moyen | 10-30 | | 8.5 | 66.9 | 68.1 | 19.9 | 3.9 | 0.1 |
| important | 30-60 | | | 0.9 | 28.9 | 74.2 | 57.8 | 12.4 |
| lourd | 60-100 | | | | | 5.9 | 38.3 | 84.3 |
| ruine | 100 | | | | | | | 3.2 |

Figure n° 4 : Exemple de matrice de probabilité pour une structure en béton armé
 Source : [Applied Technology Council (ATC -13) – 1985, «*Earthquake damage evaluation data for California*», Tech. rep. Applied Technology Council]

Benedetti Petri V ont proposé un autre modèle. Ce dernier est composé d'une matrice d'indice de vulnérabilité essentiellement basée sur l'observation de critères mécaniques, des matériaux, de l'environnement et des techniques de constructions. La conception de ce modèle est réalisée à partir de l'examen de 78 bâtiments représentatifs du bâti Californien. Pour construire cette matrice, les auteurs ont retenu onze paramètres identifiés dans le tableau suivant (figure n° 5). Chacun des paramètres est examiné selon 58 caractéristiques mécaniques supposées participer à la tenue sismique des bâtiments [BENEDETTI et PETRINI, 1984].

| Paramètres | K_i | | | | W_i |
|--------------------------------|-------|----|----|----|-------|
| | A | B | C | D | |
| Etat de conservation | 0 | 5 | 25 | 45 | 1,00 |
| Pente du terrain et fondations | 0 | 5 | 25 | 45 | 0,75 |
| Résistance conventionnelle | 0 | 5 | 25 | 45 | 1,50 |
| Caractéristiques des planchers | 0 | 5 | 15 | 45 | 1,00 |
| Type de toit | 0 | 15 | 25 | 45 | 1,00 |
| Régularité en plan | 0 | 5 | 25 | 45 | 0,50 |
| Régularité en élévation | 0 | 5 | 25 | 45 | 1,00 |
| Eléments non structuraux | 0 | 0 | 25 | 45 | 0,25 |
| Respect des norms sismiques | 0 | 5 | 20 | 45 | 1,00 |
| Qualité des matériaux | 0 | 5 | 25 | 45 | 0,25 |
| Distance maximum entre murs | 0 | 5 | 25 | 45 | 0,25 |

Figure n° 5 : Indices de vulnérabilité proposés par Benedetti et Petrini

Source : [BENEDETTI D. et PETRINI V., – 1984, «*Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura : proposta di un metodo di valutazione*», L'industria della costruzioni 18, pp. 66-74]

Cette matrice est composée de deux critères de pondération (K_i) et (W_i). La valeur des critères de pondération sont déterminés à partir d'observations techniques et du retour d'expérience des ingénieurs. Le premier critère (K_i) a pour but de déterminer le niveau de résistance mécanique de chaque paramètre. Par exemple, un bâtiment jugé en très mauvais état de conservation se voit attribuer une note selon le barème défini (figure n° 5) égale à zéro, dans le cas contraire la note est égale à 45. Le deuxième critère (W_i) a pour objectif d'identifier la contribution de résistance des onze paramètres. Selon la figure précédente (figure n° 5), on peut constater que les ingénieurs ont estimé que la contribution de résistance liée à l'état de conservation des bâtiments, dont le critère (W_i) est égal à 1,00 est beaucoup plus importante que la contribution de résistance des éléments non structuraux dont le critère (W_i) est égal à 0,25. Les auteurs de cette méthode d'évaluation de la résistance des bâtiments proposent de définir la vulnérabilité des bâtiments par un indice de vulnérabilité (I_v) selon l'équation suivante. Ainsi, cet indice de vulnérabilité (I_v) est obtenu par une somme pondérée des deux critères précités.

$$I_v = \sum_{i=1}^N K_i \times w_i$$

K_i : Critère de pondération de la résistance mécanique de l'ouvrage.

W_i : Critère de pondération du poids relatif au critère (K_i)

D'autres auteurs ont développé des modèles mécaniques fondés sur des courbes de vulnérabilité. Ces courbes expriment le dommage moyen en fonction du niveau de menace. Elles sont obtenues à partir d'un traitement statistique des données observées, complétée d'une simulation numérique. Les données observées sont les dommages sur les bâtiments entraînés par les séismes. Ces dommages sont obtenus à partir de relevés sur le terrain. Plusieurs études telles que celles de [ANGELETTI et al, 1988] ; le groupe [GNDT⁵, 1993 (en Italie)] ; [BARBAT et al, 1996 (en Espagne)] et [YEPEZ F. et al, 1998] proposent des fonctions de vulnérabilité. Ces dernières permettent de relier l'index de vulnérabilité I_v avec l'index de dommage I_d pour une intensité sismique donnée (figure n° 6). Dans ce modèle d'évaluation l'intensité des séismes est mesurée sur l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik (aussi appelée échelle MSK). L'obtention de ces courbes par des simulations numériques ne reste valable que pour le type de bâtiment analysé, c'est-à-dire pour des bâtiments de même configuration structurelle.

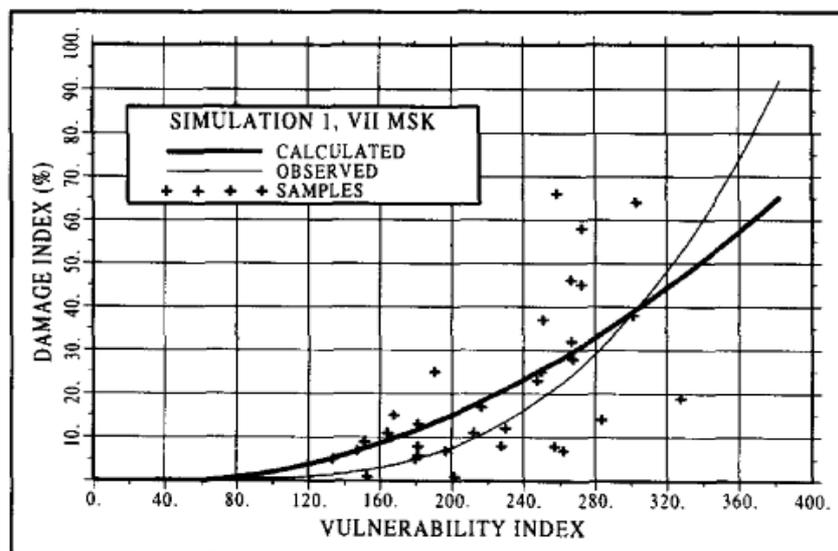


Figure n° 6 : Exemple de la courbe de vulnérabilité (schéma cas de l'Espagne– Barcelone)
 Source : [BARBAT A, et al, 1996 (en Espagne)]

Le modèle d'évaluation du bâti selon la courbe en capacité de résistance, développé par exemple dans le logiciel de calculs [HAZUS 1999], a été expérimenté respectivement aux États Unis "Northridge Earthquake Study Region", aux Antilles et à Nice. Il consiste à déterminer le point de performance, que l'on peut observer (figure n° 7). Ce point de performance correspond à l'état limite d'effondrement du bâtiment étudié. Pour déterminer cet état limite, c'est-à-dire la limite de résistance du bâti, il suffit de superposer la courbe de la "Demand spectrum" et de la "Capacity spectrum". La courbe de la "Demand spectrum"

⁵ GNDT : Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti

correspond à la demande sismique, c'est-à-dire à l'action sismique. L'action sismique est un mouvement de sol produit par un séisme. En génie parasismique, ce mouvement de sol qui fait osciller le bâtiment est caractérisé par une accélération de sol. Nous avons vu au paragraphe précédent qu'une accélération de sol est définie à partir de la magnitude et de la probabilité d'occurrence des séismes. La courbe de la "Capacity spectrum" correspond à la capacité sismique, c'est-à-dire à la résistance sismique du bâti. Cette courbe en capacité est obtenue par une analyse mécanique (statique linéaire ou non linéaire).

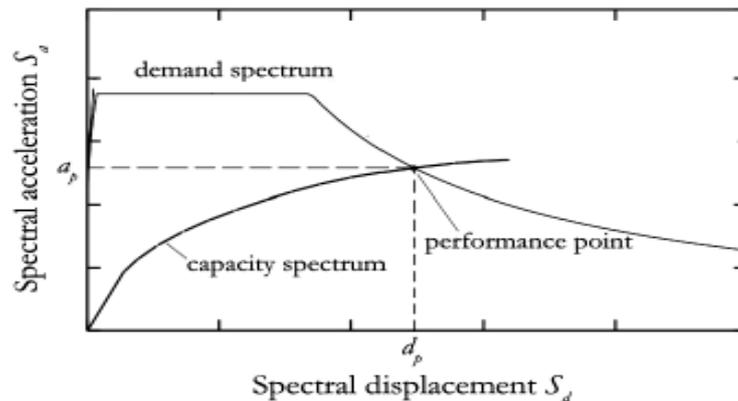


Figure n° 7 : Exemple de la courbe de capacité (schéma RISK-UE, 2003)
Source : [MOUROUX *et al*, 2004 – Méthode Européenne RISK-UE, 2003]

Les courbes de fragilité dans le modèle suivant d'évaluation de la vulnérabilité expriment la probabilité de dépasser un niveau de dommage donné en fonction d'une magnitude donnée et pour un type de structure donné. La courbe peut notamment être obtenue à partir de données collectées provenant des retours d'expérience et des jugements d'experts. De telles courbes ont été par exemple utilisées dans la méthode du " *Conseil Technologique Appliqué (ATC)* " développées par Anagnos [ANAGNOS *et al.*, 1995]. Un type de construction est identifié préalablement. Le comportement de la structure est ensuite étudié par des modèles mécaniques déterministes [RISK-UE, 2003] ou probabilistes [BONETT DIAZ, 2003]. L'exemple de courbe de fragilité (figure n° 8) a été utilisé dans la méthode Européenne RISK-UE, 2003. Dans cet exemple, la probabilité de dommage est exprimée en fonction du déplacement spectral réglementaire de la structure étudiée (PGD : Peak Ground Spectral Displacement) pour une accélération maximale réglementaire du sol PGA (Peak Ground Accélération) donnée.

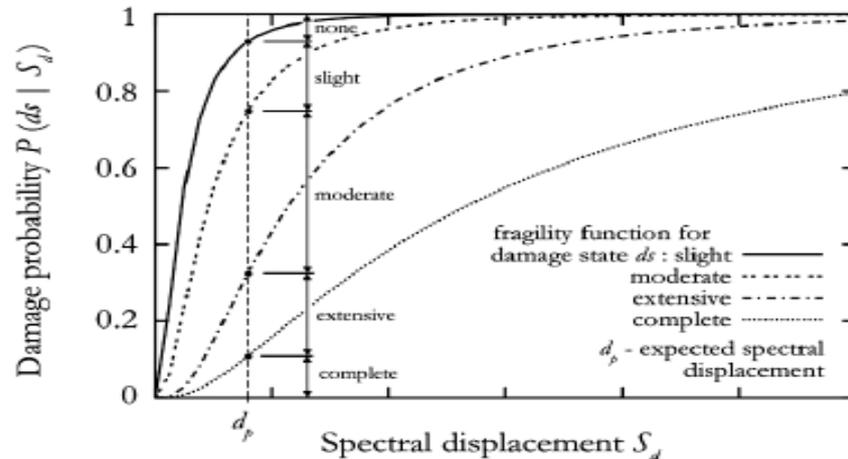


Figure n° 8 : Exemple de la courbe de fragilité (schéma RISK-UE, 2003)
 Source : [RISK-UE, 2003]

Ces différents modèles mécaniques développés par différents auteurs ont permis de concevoir plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Nous avons vu que certains modèles utilisent l'intensité des séismes et d'autres modèles l'accélération du sol en envisageant la magnitude des séismes (Tableau n° 3).

Tableau n° 3 : Différents " Outils " intégrés dans les modèles d'évaluation de la vulnérabilité du bâti

| Matrices/Courbes | Modèles d'évaluation | Pays | |
|---|--|-------------------------------|---|
| Matrice de probabilité des dommages | Modèle basé sur l'observation post sismique | USA (Californie) | Modèle ATC-13 1985 (Applied Technology Council) |
| Matrice composée d'indices de vulnérabilité | Modèle basé sur l'observation post sismique | Italie | Benedetti D. et Petrini V., 1984 |
| Courbe de vulnérabilité | Modèle basé sur l'observation post sismique ou sur simulation informatique | Italie Espagne (Barcelone) | Angeletti P, et al. 1988 Modèle GNDT, 1993 (en Italie), Modèle Barbat A, et al, 1996 (en Espagne) |
| Courbe de capacité | Modèle basé sur simulation informatique | USA (FEMA) France | HAZUS 1999, RISK-UE, 2003 |
| Courbe de fragilité | Modèle basé sur simulation informatique | France USA | RISK-UE, 2003 ATC 13 et ATC 40 1995 (Applied Technology Council) |

Sources : [ATC-13, 1985 ; BENEDETTI et PETRINI, 1984 ; BARBAT *et al.* 1996 ; HAZUS 1999 ; RISK-UE, 2003]

Ces modèles mécaniques que nous venons de présenter sont composés de matrices de probabilité des dommages, de matrices d'indices de vulnérabilité ou de courbes en vulnérabilité, en capacité ou en fragilité. D'autres modèles mécaniques que nous n'avons pas évoqués sont également disponibles au niveau international, dont les modèles canadien, américain (FEMA-154), japonais et néo-zélandais [AUFRET et ROUSSILLON, 2008]. Quelque soient les modèles mécaniques disponibles au niveau national et international, ces derniers poursuivent tous le même objectif, celui de déterminer à quelle intensité ou à quelle magnitude (selon le modèle) les groupes de bâtiments risquent de s'effondrer. Il ne s'agit pas de quantifier précisément la vulnérabilité physique bâtiment par bâtiment mais de hiérarchiser les priorités des zones présumées les plus vulnérables. Si les résultats de ces approches sommaires peuvent permettre de planifier des actions de prévention, la définition concrète et précise de mesures de réduction de la vulnérabilité du bâti nécessitera par la suite la conduite d'analyses précises de vulnérabilité des bâtiments.

Il existe enfin une autre méthode d'évaluation de la vulnérabilité du bâti qui est fournie par l'Eurocode, mais cette méthode n'a encore jamais été utilisée pour procéder à une évaluation de la vulnérabilité collective telle que nous l'avons définie plus haut. Cette approche sera envisagée plus loin, quand nous définirons l'Eurocode.

Conclusion du chapitre 1

Ainsi la connaissance de l'aléa, comme l'approche de la vulnérabilité sont indispensables pour envisager le risque sismique et sa gestion. La seule connaissance de l'aléa ne permet pas de comprendre l'ampleur des dégâts et les conséquences inégales des activités sismiques. La nécessité d'envisager la vulnérabilité dans toute sa complexité est désormais incontournable dans l'analyse des risques. S'agissant des risques sismiques, la vulnérabilité du bâti est fondamentale à envisager. Des **modélisations** et des **simulations numériques** doivent contribuer à mettre en évidence les bâtiments les plus fragiles et les espaces urbains les plus sensibles à un possible séisme. Ces connaissances sont indispensables pour envisager la gestion du risque et pour préparer la gestion de crise.

L'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité ont conduit les États à établir et à mettre en œuvre des réglementations parasismiques que nous allons maintenant envisager.

CHAPITRE 2 : Les Règlements parasismiques

La politique de gestion des risques naturels s'articule autour de la prévention, de la protection et de l'aménagement du territoire. Dans le cas des risques sismiques, une réglementation spécifique existe (Eurocode 8) relative à la construction parasismique. L'Eurocode 8 est une nouvelle réglementation harmonisée à l'échelle Européenne qui intègre aussi les spécificités techniques de chaque pays par des annexes nationales et des annexes informatives. Les réglementations appliquées en France et en Suisse diffèrent, nous distingueront donc les nouvelles normes européennes parasismiques et la nouvelle réglementation suisse (SIA 260 à 267) afin d'envisager la compatibilité de ces deux réglementations.

1- La réglementation spécifique au risque sismique en France

La réglementation en France et en Suisse de réduction du risque sismique est intégrée à la gestion des risques naturels en général. Elle s'articule autour de plusieurs textes de lois récapitulés en annexe [Annexe – Chapitre 2 – Tableaux n° A 1 et A 2]. Des convergences existent dans la gestion des risques naturels entre la France et la Suisse, y compris dans la gestion des risques sismiques comme le souligne les travaux d'Anne Peltier [PELTIER, 2005]. La définition des objectifs pour gérer les risques naturels, l'information et la connaissance des risques sont pour partie du ressort de l'État (MEDD⁶ – DETEC⁷) dans les deux cas. En Suisse, à l'échelle du Canton sont coordonnées les activités, la mise en place des plans de zonage réglementaires (PAC⁸) et la connaissance du risque ainsi que la gestion des crises. En France, si la réalisation des plans de prévention des risques (PPR) est impulsée par l'Etat (au travers de ses services déconcentrés), les PPR sont réalisés à l'échelle locale (Communes). Les missions d'application des lois (PLU⁹, permis de construire,...), de gestion de crise (DICRIM¹⁰, PCS¹¹, Plaquettes d'information, alerte de la population) reviennent aux communes et/ou communautés de communes. Dans le domaine des assurances, la Suisse n'impose aucune assurance obligatoire, coté français c'est le principe de solidarité

⁶ MEDD : Ministère de l'Écologie, du Développement Durables et de L'Énergie

⁷ DETEC : Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et des communications

⁸ PAC : Plan d'aménagement Communaux

⁹ PLU : Plan Local d'urbanisme

¹⁰ DICRIM : Document d'information Communal sur les Risques Majeurs

¹¹ PCS : Plan Communal de Sauvegarde

par le régime "CAT-NAT" qui indemnise les victimes. En France, les PPR sismiques distinguent trois zones : constructible, constructible avec préconisations (zone bleue) ou inconstructible. En Suisse, la réglementation intègre aussi trois zones : constructible, constructible avec prescriptions particulières selon le tableau 27 de la norme SIA-261 ou inconstructible.

1-1 Les premières réglementations en France

Dès 1955, les premières recommandations parasismiques, encore rudimentaires ont vu le jour. Dans les années 1970 le règlement parasismique français prend une valeur juridique et devient le PS69 avant d'être complété par les zonages sismiques au début des années 1980 pour devenir le PS69/82. Au début des années 1990 ce dernier est remplacé par un nouveau règlement, le PS92 où sont intégrés les effets de site. Désormais, l'Eurocode 8 unifie la réglementation parasismique à l'échelle Européenne

Le séisme d'Orléansville (Algérie - 1954) a entraîné la rédaction, des recommandations antisismiques dites « Recommandations AS 55 »

- **Recommandations et Règles parasismiques**

Les premiers calculs destinés à réduire les effets sismiques sur le bâti, prennent en compte des forces horizontales uniformément réparties sur toute la hauteur des constructions. Ces forces horizontales de calcul correspondaient à un pourcentage du poids des constructions. Les recommandations publiées en 1955 fournissent des éléments variables selon les zones de sismicité et la hauteur des bâtiments [Archive Nationale, L'historique des règles parasismiques – Article 5.2.1.2].

Après le séisme d'Agadir (Maroc – 1960, 12 000 à 15 000 morts et environ 25 000 blessés) [Le TOULLEC, 2002] ont été élaborées les règles parasismiques PS 62/64. En 1969 ces règles ont été transformées en Document Technique Unifié (DTU) pour devenir les règles PS 69, résultat d'un consensus entre les professionnels du bâtiment et les pouvoirs publics [<http://www.planseisme.fr>]. Ces dernières ont été complétées en 1982 pour constituer les règles PS 69/82 pour être transformées en Document Technique Unifié (DTU P 06-003), suite aux enseignements tirés du séisme d'El Asnam (1980). Le règlement PS69/82 impose par l'arrêté du 6 mars 1981 (Journal Officiel République Française) des conditions parasismiques d'une part pour les habitations individuelles et collectives situées aux Antilles et d'autre part pour les habitations collectives situées dans certaines régions de la Métropole. Ces conditions parasismiques correspondent à des exigences en matière de conception (privilégier des formes simple des bâtiments pour éviter les phénomènes de torsion, éviter les porte à faux (type balcon) mais également à des dispositions constructives des matériaux à mettre en œuvre (mise en place des armatures dans les éléments porteurs). Ces condi-

tions parasismiques, s'appliquent aux constructions individuelles situées en zone de sismicité de niveau 3 (modéré). Ces conditions parasismiques s'appliquent aussi pour l'habitat collectif situé en zone de sismicité de niveau 2 à 3 (faible – modéré). Les constructions individuelles sont définies comme se composant de un étage et un rez-de-chaussée. Le bâti collectif se compose au minimum de 2 étages plus un rez-de-chaussée. Ces règlements concernent les constructions neuves et ne traitent pas du renforcement du bâti existant. Les règles PS 69/82 excluent de leur champ d'application les établissements dits de 5^{èmes} catégorie, qui sont les établissements recevant du public et comptant moins de 300 personnes [Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer].

Les règles PS92 remplacent le règlement PS69/82 en 1992, suite à différents grands séismes des années 1980 (Mexico en 1985, Spitak en Arménie en 1988, Loma-Prieta en Californie en 1989). Elles sont complétées par les règles de calculs simplifiés (PS-MI89/92) qui ne concernent que les maisons individuelles. Outre les premières recommandations rudimentaires des années 1955 évoquées précédemment, les règles parasismiques successives que nous venons d'évoquer se composent d'un zonage sismique, de méthodes de calcul des ouvrages plus ou moins simplifiées et de prescriptions des dispositions constructives des matériaux. La réglementation PS 92 a amélioré de manière significative la couverture du risque sismique par rapport aux Règles PS 69/82. Celle-ci impose de prendre en compte les différents types de fondations usuelles (fondations superficielles ou profondes), ainsi que les problèmes liés au sol par des analyses d'interaction dynamique sol-bâtiment et les effets amplificateurs liés à la géologie et à la topographie.

Les évolutions techniques en matière de construction parasismique et la volonté d'harmoniser les normes au niveau Européen ont conduit à l'adoption d'une nouvelle réglementation parasismique européenne, les règles Eurocode 8 (EC8) et qui sont entrées en vigueur en 2011. Une réglementation parasismique européenne a été transposée en droit français (EC8.1 – Bâti neuf et EC8.3 – Bâti existant). Cette nouvelle réglementation fixe un nouveau cadre et le décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 définit dans son article premier d'une part cinq zones de sismicité croissante et d'autre part les catégories d'importance des bâtiments, c'est-à-dire quatre catégories de bâtiments relatives au type d'occupation des locaux, qui diffère d'une catégorie à l'autre. Les types d'occupation des établissements varient de l'habitation, aux locaux professionnels, aux établissements recevant du public. Les bâtiments de catégorie I sont ceux parmi lesquels il n'y a pas d'activité humaine nécessitant un séjour de longue durée (pas de prescription parasismique). Les bâtiments de catégorie II sont les habitations individuelles et l'habitat collectif de hauteur inférieure à 28 m. Les bâtiments de catégorie III sont les établissements scolaires et les habitations collectives et bureaux de hauteur supérieure à 28 m. Ces bâtiments comportent des prescriptions parasis-

miques plus ou moins importantes selon la hauteur des immeubles. Les bâtiments indispensables aux besoins vitaux tel que les hôpitaux, les casernes de pompiers, les établissements de maintien de l'ordre public, etc. sont de catégorie IV. Ces établissements comportent le plus de prescriptions parasismiques.

Nous venons de voir que la réglementation parasismique en France a changé au fil des catastrophes pour évoluer vers une sécurité de plus en plus importante des habitants.

1-2 L'Eurocode, ses spécificités et ses apports

L'Eurocode 8 s'inscrit dans un vaste projet visant à harmoniser les techniques de construction dans l'Union Européenne pour faire face aux risques sismiques. C'est le comité européen de normalisation (CEN) qui a entrepris ce processus. Les normes européennes ainsi élaborées ont dû être transposées en droit français (Tableau n° 4). Ces normes bénéficient des progrès récents du génie parasismique. L'Eurocode se compose de l'ensemble des normes destinées à définir les modalités de dimensionnement des ouvrages, y compris le bâti neuf et le bâti existant soumis à des événements sismiques. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons l'Eurocode 8-1 (EC8-1) relatif aux bâtiments neufs et l'Eurocode 8-3 (EC8-3) destiné aux bâtiments existants, ainsi que les annexes nationales. Certaines clauses de l'EC8-1 sont applicables à l'EC8-3.

Tableau n° 4 : Ensemble des normes parasismiques composant le règlement de l'Eurocode 8

| | |
|----------------------------------|--|
| NF EN 1998-1 de septembre 2005 | Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments |
| NF EN 1998-1/NA de décembre 2007 | Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - annexe nationale à la NF EN 1998-1 |
| NF EN 1998-2 de décembre 2006 | Partie 2 : ponts |
| NF EN 1998-2/NA de octobre 2007 | Partie 2 : ponts - annexe nationale à la NF EN 1998-2 |
| NF EN 1998-3 de décembre 2005 | Partie 3 : évaluation et renforcement des bâtiments |
| NF EN 1998-3/NA de janvier 2008 | Partie 3 : évaluation et renforcement des bâtiments - annexe nationale à la NF EN 1998-3 |
| NF EN 1998-4 de mars 2007 | Partie 4 : silos, réservoirs et canalisations |
| NF EN 1998-4/NA de janvier 2008 | Partie 4 : silos, réservoirs et canalisations - annexe nationale à la NF EN 1998-4 |
| NF EN 1998-5 de septembre 2005 | Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques |
| NF EN 1998-5/NA de octobre 2007 | Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques - annexe nationale à la NF EN 1998-5 |
| NF EN 1998-6 de décembre 2005 | Partie 6 : tours, mâts et cheminées |
| NF EN 1998-6/NA de octobre 2007 | Partie 6 : tours, mâts et cheminées - annexe nationale à la NF EN 1998-6 |

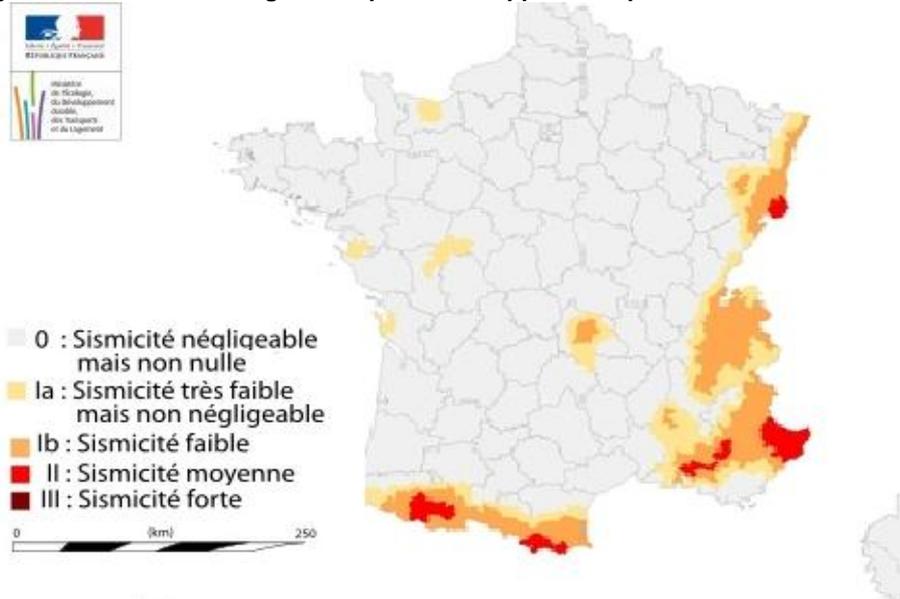
Source : [Association française de normalisation (AFNOR), Ministère de l'Industrie]

Dans le cadre de notre étude, nous utiliserons la norme NF EN 1998-1 de septembre 2005 et son annexe nationale NF EN 1998-1/NA de décembre 2007 (relatives au bâti neuf), la norme NF EN 1998-3 de décembre 2005 et son annexe nationale NF EN 1998-3/NA de janvier 2008 (relatives au bâti ancien)

Globalement, ce règlement définit les modalités de prise en compte de l'aléa et les modalités de dimensionnement des ouvrages et envisage la résistance sismique des bâtiments.

Zonage sismique – En application de la directive européenne, la France a procédé à un nouveau zonage, publié par décret le 22 octobre 2010. (Figure n° 9).

Découpage de la France en zonage sismique mis en application par le décret n° 91-461 de mai 1991



Découpage de la France en zonage sismique mis en application par le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010

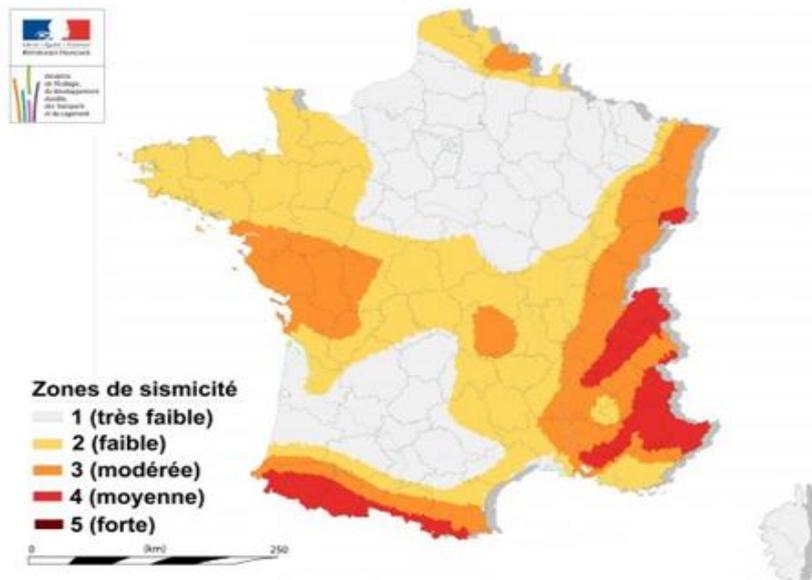


Figure n° 9 : Ancien et nouveau zonage sismique de la France

Source : [Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Plan séisme, prévention du risque sismique, Article D. 563-8-1 du code de l'environnement, Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 et Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010]

Le nouveau zonage sismique divise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante en fonction de la probabilité d'occurrence des séismes et d'une magnitude croissante. Le décret n°2010-1255 délimitant les zones de sismicité du territoire français est entré en vigueur le 1^{er} mai 2011. Ce nouveau zonage réglementaire qui distingue cinq zones de sismicité de la zone 1 (très faible) à la zone 5 (fort) a été réalisé à partir d'études probabilistes [MARTIN *et al.* – 2002]. Le calcul probabiliste se fonde sur l'ensemble de la sismicité connue à partir de la magnitude 3,5 – 4. Le nouveau zonage a ainsi bénéficié de l'amélioration de la connaissance de la sismicité historique et des nouvelles données de sismicité instrumentale. Le zonage est défini à partir des accélérations de sol, identifiées par une grandeur physique. Dans le règlement PS 92, le territoire est aussi divisé en cinq zones de sismicité croissante par le décret n°91-461 du 14 mai 1991 – article 4 (zone 0, Ia, Ib, II et III). Le zonage sismique est déterminé à partir de l'intensité macrosismique¹², identifiée par une observation subjective.

Le nombre de communes concernées par la réglementation parasismique, zones 2 à 5 est de plus de 21 000 avec le nouveau zonage contre 5 000 communes environ (zones Ia à III) dans le zonage précédent de 1991.

Accélération de sol – Dans la nouvelle réglementation (Eurocode 8) et dans l'ancienne réglementation parasismique (PS92), l'aléa régional de chacune des zones est associé à une accélération de sol dite accélération de "référence". Cette valeur d'accélération du sol est envisagée sur une période de retour de 475 ans, laquelle est une période de "référence", un standard. Dans l'Eurocode, l'accélération de "référence" dénommée (a_{gr}), déterminée à partir des événements du passé et du présent est définie, en France, par l'arrêté du 22 octobre 2010 – article n° 4. Dans le règlement PS 92, l'accélération de "référence", dénommée accélération nominale (a_N) est définie par le produit de deux critères : les zones de sismicité et les catégories de risque des bâtiments.

Lors de la révision du zonage sismique, la région mulhousienne a été reclassée. Cette région classée selon la réglementation précédente et l'arrêté du 29 mai 1997 en zone Ib – sismicité faible, avec une accélération de sol $a_N = 1,5 \text{ m/s}^2$, a été placée selon l'arrêté du 22 octobre 2010 en zone 3 – sismicité modérée avec une accélération de sol $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$, soit une diminution d'environ 30%. Dans notre cas d'étude, pour les bâtiments de catégorie II (Habitat : le coefficient de majoration est égale à 1,00), l'accélération de sol préconisée par le nouveau règlement est moins contraignante, c'est-à-dire moins élevée que l'accélération de sol préconisée dans le règlement précédent.

¹² Intensité macrosismique : L'intensité d'un séisme est définie en un lieu par rapport aux effets (dégâts dans une région donnée) produits par un séisme

Les effets de site – Les caractéristiques spécifiques des sites amplifient ou diminuent l'effet sismique. Dans les deux réglementations parasismiques les différentes spécificités du site sont définies par des coefficients à partir d'une classification des sols. Le coefficient majorant l'accélération de sol dépend de la topographie et de la nature de la géologie superficielle, lorsque cette dernière est composée d'une couche « *meuble* ». Un sol « *meuble* » a peu de cohérence, c'est le cas de sols sableux ou tourbeux. Une évaluation de la susceptibilité de la liquéfaction de sol doit être effectuée lorsque le sol de fondation comprend des couches ou des lentilles épaisses de sable, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe phréatique, et lorsque ce niveau est proche de la surface du sol. La classification des sols est réalisée par des études géotechniques. Dans la nouvelle norme, les sols sont regroupés en cinq catégories (de A à E). " *Les catégories des sols sont déterminées à partir de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement, $v_{s,30}$ lorsque cette dernière est disponible. Dans le cas contraire, il est fait usage de la valeur des N_{SPT} , valeur déterminée à partir d'essais au pénétromètre* " (Euro code 8 – article 3.1 – § 3.1.2), qui consiste à compter le nombre de coups pour enfoncer un pieu dans le sol dans une profondeur de 30 centimètres. Dans le règlement antérieur (PS92) la classification des sols se compose de quatre catégories détaillées en fonction de leurs propriétés mécaniques, définies à partir de la valeur des N_{SPT} (Norme parasismique PS92 – article 5.2 – § 5.2.1). La classification des sols de ces deux règlements ne s'appuie pas sur les mêmes caractéristiques mécaniques, l'établissement de correspondance entre les deux (Tableau n° 5) se révèle donc difficile.

Tableau n° 5 : Correspondance de la classification des sols entre l'Eurocode et le règlement parasismique PS92

| EURO CODE 8 – article 3.1 – § 3.1.2 | | Norme parasismique PS92 – article 5.2 – § 5.2.1 | |
|--|--|---|--|
| Classe de sol | lithologie | Catégorie de substrat | lithologie |
| A | Roche dure ou autre formation géologique avec une couche superficielle d'au plus 5 mètres de matériaux moins résistant | Roche dure | Rochers sains et craies dures |
| B | Dépôts de sable, de gravier ou d'argile consolidés, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur | a | Sols de résistance bonne à très bonne (par exemple sables et graviers compacts, marnes ou argiles fortement consolidées) |
| C | Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de graviers ou d'argile moyennement résistants ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres | b | Sols de résistance moyenne (par exemple roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, marnes ou argiles de résistance moyenne) |
| D | Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couche cohérentes) | c | Sols de faible résistance (par exemple sables ou graviers non consolidés, argiles faiblement consolidées, craies altérées, vases) |
| E | Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de Vs de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m et environ 20m reposant sur un matériau plus résistant avec Vs > 800 m/s | | |
| <p>Nota : Les valeurs des paramètres physiques (résistance au pénétromètre, résistance des sols, vitesse des ondes de cisaillement) sont détaillées dans l'Euro code 8.1 – article 3.1 – § 3.1.2 et dans la Norme parasismique PS92 – article 5.2 – § 5.2.1</p> | | | |

Source : [Règlement Eurocode 8, (EC8), Norme EN-1998-1, 2005, Article 3.1.2 (1), « Identification des classes de sol – Règlement Parasismique (PS92), Norme NF P 06-013, « Classification des sols »]

L'Eurocode à l'opposé de l'ancien règlement (PS92) distingue les sols composés de sables ou graviers des sols formés d'alluvions. Le sol de classe (D) du nouveau règlement correspond au sol de classe (C) de l'ancien règlement. Ce sol se compose de sable ou de graviers qui a peu de cohésion. La cohésion d'un sol dans l'exemple des sables et des graviers est l'agglutinement des grains de (sable, graviers) les uns aux autres. Ces grains sont solidaires

pour former un sol compact. Cette cohésion est assurée généralement par un mélange sable et/ou graviers – argile. Le sol de classe (E) du nouveau règlement concerne les alluvions reposant sur un matériau plus résistant que les alluvions. Dans son article 3.2.2.2.(1)P, l'Eurocode précise que les effets de site dans les sols de classe (D) sont plus importants que dans les sols de classe (E). Dans l'ancien règlement cette distinction n'apparaît pas. L'Eurocode 8 intègre une meilleure prise en compte du sol par les valeurs du coefficient de sol S spécifiées, pour la France, au d) de l'article 4 de l'arrêté du 22 octobre 2010. Dans notre étude de cas, cette distinction peut présenter un intérêt si le bâti de Mulhouse et Bâle repose sur des sols de classe (D) ou (E).

Bâti existant – L'originalité de ce nouveau règlement tient à son champ d'application qui est étendu au bâti existant. L'Eurocode 8 permet de calculer la résistance sismique des bâtiments ayant été construits avant l'existence de la réglementation parasismique. Celle-ci concerne " les bâtiments à risque normal, pour lesquels les conséquences d'un séisme sont limitées à la structure même du bâtiment et à ses occupants " [M.E.D.D.T.L¹³, janvier 2011]. En France, pour le bâti existant, la réglementation impose d'appliquer la réglementation du bâti neuf en minorant l'accélération maximale de référence du sol (a_{gr}) de 60%. Le règlement précédent PS 92 n'impose pas de renforcements parasismiques des bâtiments existants. Dans notre étude de cas, ce nouveau règlement à l'avantage de nous permettre d'étudier la résistance sismique du bâti existant que nous envisagerons dans les chapitres suivants.

Classes des bâtiments – Les classes des bâtiments permettent de distinguer l'utilisation des différents immeubles. Le risque de perte en vie humaine est différent dans un hangar agricole et dans un bâtiment collectif à usage d'habitation. Dans le règlement PS92, les bâtiments sont classés selon quatre niveaux de risque de la catégorie A à la catégorie D par le décret n°91-461 du 14 mai 1991 et l'arrêté du 16 juillet 1992. Dans ce règlement les catégories de risques des bâtiments ne sont pas définies explicitement (pas de coefficient), elles sont définies simultanément avec l'accélération de sol. Dans le nouveau règlement, l'approche est différente. Les classes des bâtiments sont définies explicitement par un coefficient. Afin d'examiner les apports de l'Eurocode nous allons combiner les accélérations de sol et les classes des bâtiments comme il a été fait dans l'ancien règlement. Les résultats détaillés dans le tableau suivant sont des accélérations de sol intégrant les différentes classes de bâtiments.

¹³ M.E.D.D.T.L : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

Tableau n° 6 : Comparaison des accélérations de sol entre règlement parasismique PS92 et l'Eurocode

| Zones | Eurocode 8 | | | | PS92 | | | Δ |
|---|------------|-----------------|-------------|--|----------------------|-------|-------------|--------------|
| | a_{gr} | Y_I | a_g | | Zones | Y_i | a_N | |
| Min (Zone 1) | 0,4 | $Y_I = 0,8$ | 0,32 | | Min (Zone Ia) | B | 1,00 | 212% |
| Max (Zone 5) | 3,0 | $Y_{IV} = 1,4$ | 4,20 | | Max (Zone III) | D | 4,50 | 7,2% |
| Bâtiments collectifs $\leq 28m$ ht ^(a) ou $\geq 28m$ ht ^(b) | | | | | Bâtiments collectifs | | | |
| Min ^(a) (Zone 1) | 0,4 | $Y_{II} = 1,0$ | 0,40 | | Min (Zone Ia) | B | 1,00 | 150% |
| Max ^(b) (Zone 5) | 3,0 | $Y_{III} = 1,2$ | 3,60 | | Max (Zone III) | C | 4,00 | 11,1% |

Y_I : Bâtiments d'importance mineure pour la sécurité des personnes, par exemple bâtiment agricole, etc.

Y_{II} : Bâtiment courant n'appartenant pas aux autres catégories

Y_{III} : Bâtiment dont la résistance aux séismes est importante compte tenu des conséquences d'un effondrement, par exemple : école, salle de réunion, institutions culturelles, etc.

Y_{IV} : Bâtiments dont l'intégrité en cas de séisme est d'importance vitale pour la protection civile, par exemple : hôpitaux, casernes de pompier, centrale électrique, etc.

B : Ouvrages et installations offrant un risque dit " courant " pour les personnes

C : Ouvrages représentant un risque élevé pour les personnes en raison de leur fréquentation ou de leur importance socio-économique

D : Ouvrages et installations dont la sécurité est primordiale pour les besoins de la Sécurité Civile, de l'ordre public, de la Défense et de la survie de la région

Sources : [Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Plan séisme, prévention du risque sismique, Article D. 563-8-1 du code de l'environnement, Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 et modifié par le décret n°2015-5 du 6 janvier 2015]

L'Eurocode impose de prendre des mesures de renforcements parasismiques pour les bâtiments de classe I, à l'opposé de l'ancien règlement qui n'impose aucune mesure de confortement parasismique pour les bâtiments de catégorie A, ainsi que pour les bâtiments situés en zone sismique Z0 (très faible) quelque soit la catégorie des bâtiments. L'Eurocode est donc plus strict que l'ancien règlement pour les bâtiments de type hangar agricole. En revanche, pour les autres bâtiments, l'Eurocode est moins sévère puisque la combinaison des accélérations de sol et la classe des bâtiments est moins élevée. Cela revient à dire que pour notre étude de cas des immeubles mulhousiens de classe II et pour les bâtiments bâlois de catégorie B les accélérations de sol à prendre en compte seront moins élevés en utilisant l'Eurocode.

Tableau n° 7 : Combinaisons accélération de sol et classes des bâtiments

| | | Règlement Eurocode | | | | Règlement PS92 | | | | | |
|--------|----|---------------------------|------|------|------|-----------------------|------|---|------|------|------|
| | | Catégorie bâtiments | | | | Catégorie bâtiments | | | | | |
| | | I | II | III | IV | A | B | C | D | | |
| Zonage | Z1 | 0,32 | 0,40 | 0,48 | 0,56 | Zonage | Z0 | - | - | - | - |
| | Z2 | 0,56 | 0,70 | 0,84 | 0,98 | | ZIa | - | 1,00 | 1,50 | 2,00 |
| | Z3 | 0,88 | 1,10 | 1,32 | 1,54 | | ZIb | - | 1,50 | 2,00 | 2,50 |
| | Z4 | 1,28 | 1,60 | 1,92 | 2,24 | | ZII | - | 2,50 | 3,00 | 3,50 |
| | Z5 | 2,40 | 3,00 | 3,60 | 4,20 | | ZIII | - | 3,50 | 4,00 | 4,50 |

Sources : [Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ; Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 et modifié par le décret n°2015-5 du 6 janvier 2015 ; Règlement PS 92 ; Articles 3.1, 3.2 et 3.3]

Une étude de l'Eurocode et du règlement parasismique PS92 a été réalisée par Hervé Yamkoudougou dans le cadre d'un projet de fin d'étude [YAMKOUDOUGOU, 2010]. Il est intéressant de comparer l'analyse modale ainsi que la méthode de calcul simplifiée (méthode des forces latérales) dans l'Eurocode et dans l'ancien règlement.

Méthode de calcul simplifiée – L'article 4.3.3.2.2 – EC8 permet un calcul direct de l'effort tranchant à la base de l'ouvrage, à l'opposé du règlement PS92 qui ne l'a pas prévu.

Une déformation plastique est une déformation irréversible d'un élément réalisé en matériaux ductiles après que celui-ci ait été chargé au-delà de sa limite d'élasticité. Elle peut donner lieu à une importante dissipation d'énergie favorable pour la résistance au séisme. Les deux règlements introduisent l'effet positif des déformations plastiques par des coefficients de comportement. Au delà des déformations possibles sans dommage il y a dégradation puis rupture. Les dégradations, même importantes, sont moins graves figure 10 (a) que des ruptures qui peuvent entraîner l'effondrement de la structure figure 10 (b).

Endommagement plastique



Figure (a)

Rupture fragile



Figure (b)

Figure (a) : La disposition des aciers longitu-dinaux et transver-saux très rapprochés et de section modérée permet une bonne « plasticité » ou « ductilité » du béton armé.

Figure (b) : Les armatures n'étaient pas appropriées en zone sismique

Figure n° 10 : Exemple de rupture ductile – Exemple de rupture fragile

Sources : [BALANDIER, 2001]

Pour construire notre modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti, l'Eurocode a l'avantage de simplifier les calculs des efforts sismiques supportés par les bâtiments et d'intégrer une plus grande part aux modes constructifs favorisant la dissipation d'énergie.

Les autres apports de l'Eurocode 8 – Fabien Touzelier [TOUZELLIER, 2010] a constaté que l'usage de l'Eurocode 8 apporte une économie financière grâce à la réduction des quantités de matériaux utilisés pour réaliser les bâtiments. L'exemple envisagé est un centre hospitalier composé de six blocs dynamiquement indépendants de 7,50m * 7,50m sur quatre étages. Ce bâtiment composé de poutres – poteaux en béton armé est situé en zone sismique de niveau modéré. Les résultats de cette analyse sont les suivants (Tableau. n° 8).

Tableau n° 8 : Comparaison des deux règlements parasismiques

| | | | PS 92 | EC 8 |
|-------|------------|------|--------------|--------------|
| | | | Trame 7,50 m | Trame 7,50 m |
| Béton | Fondations | [m3] | 3 858 | 3 542 |
| | | | | -8% |
| Acier | Voiles | [kg] | 142 656 | 131 297 |
| | | | | -8% |
| | Poteaux | [kg] | 22 197 | 21 822 |
| | | | | -2% |
| | Fondations | [kg] | 274 431 | 271 396 |
| | | | -1% | |

Sources : [TOUZELLIER, 2010, p. 39]

Ces résultats montrent une diminution des quantités de matériaux (béton – armatures) utilisés pour répondre au risque sismique, cela représente une économie financière d'environ 2% [TOUZELLIER, 2010]. Pourtant, un deuxième projet qui a aussi fait l'objet d'une analyse comparée, conduit à des résultats tout à fait différents. Il s'agit d'un établissement d'enseignement composé de trois blocs dynamiquement indépendants. Ce bâtiment en béton armé et contreventé par des croix de saint André en bois lamellé collé est situé en zone sismique de niveau modéré (niveau 3). Quinze murs en béton ont été analysés. La quantité moyenne d'armature déterminée selon l'Eurocode 8 est un peu plus du double de la quantité déterminée selon le règlement PS92 [YAMKOUDOU, 2010]. Ces deux constats opposés sont à regarder avec prudence. Tout d'abord, ces deux constructions ne sont pas représentatives de l'habitat collectif, ce sont des structures complexes par rapport à l'habitat collectif. Le nombre de structures étudiées est réduit. Néanmoins, l'application de l'Eurocode a un impact sur la quantité de béton et sur les quantités d'armatures.

2- La réglementation parasismique en Suisse

2.1 Les premières réglementations en Suisse

Avant 1970, les risques sismiques semblent être ignorés. Les premières recommandations arrivent en 1970 sous le nom de norme SIA¹⁴160. Cependant, celles-ci sont encore peu élaborées. L'édition de 1989 a apporté des améliorations avec l'élaboration de la carte de dangers, la création d'une classification des ouvrages et la mise en place de mesures constructives spécifiques. Dans la version de 1970, les cartes de dangers hiérarchisaient des zones géographiques et définissaient des spectres de réponse sismique des bâtiments. Dans sa version de 1989, la Suisse s'est notamment inspirée du règlement parasismique

¹⁴ SIA : Société suisse des Ingénieurs et des Architectes

français (PS 69), en établissant un spectre de réponse (SIA 160), dans la classification des ouvrages et dans l'instauration des mesures constructives. Dans son édition 2003, en intégrant ses nouvelles normes parasismiques SIA 260 à 267, la Suisse a harmonisé ses normes avec les normes Européennes pour le bâti neuf et son cahier technique 2018 pour le bâti existant. Elle intègre les développements du génie parasismique, en particulier le dimensionnement en capacité. Cette méthode a été développée dans les années 1970 par les néo-zélandais [PAULAY et PARK, 1975]. Le calcul en capacité se focalise sur la capacité de la structure à se déformer. Dans les dispositions constructives, on met en place " *les arrangements nécessaires* " (disposition des armatures) afin de supporter les sollicitations sismiques par la dissipation de l'énergie en des points précis. Cette énergie est dissipée sous forme de déformations plastiques (apparition d'une rotule plastique) dont la localisation est imposée et contrôlée par l'ingénieur.

En novembre 2004, la Suisse a édité un cahier technique SIA2018 dédié à la vérification et au confortement parasismique du bâti existant.

Rappel des différentes normes.

- Avant 1970 : **Pas de prescriptions parasismiques en Suisse**
 - Les actions sismiques semblaient être ignorées.
- En 1970 : **Norme SIA 160 « action sur les structures porteuses »**
 - Une première recommandation rudimentaire consistait à prendre en compte une force horizontale forfaitaire (2% à 5% du poids de l'ouvrage) en plus des charges classiques (poids de l'ouvrage, poids des personnes et les charges dues au vent et à la neige. La force horizontale forfaitaire était identique pour l'ensemble du pays, à l'exception des régions particulièrement exposées pour lesquels étaient prévues des mesures spécifiques. L'application de ces dernières était laissée à l'initiative des cantons. Seules les autorités du canton de Bâle-Ville avaient décidé, par une directive interne, d'appliquer ces mesures.
- En 1989 : **Norme SIA 160 « action sur les structures porteuses »**,
 - Premières normalisations en dimensionnement avec un niveau de sollicitation adéquat,
 - Premières cartes de zones sismiques,
 - Classification des ouvrages ainsi que des mesures constructives,
- En 2003 : **Normes SIA 260 à 267 sur les structures porteuses**
 - Prescriptions sismiques en adéquation avec l'Eurocode 8,
 - Meilleure prise en compte du sol de fondation et des types de construction,
 - Introduction du dimensionnement en capacité,

- En 2004 : **Cahier technique SIA 2018 pour les bâtiments existants**

- Appréciation basée sur le seuil minimal de sécurité et critères coûts/bénéfices pour le renforcement du bâti. Le seuil minimal est un facteur de conformité obtenu par le rapport entre la demande et la capacité de résistance sismique des bâtiments

Le tableau suivant récapitule les évolutions des normes parasismiques en Suisse depuis les années 1970 à nos jours.

Tableau n° 9 : Évolution des paramètres utilisés dans les normes SIA pour déterminer l'action sismique

| Génération de normes | SIA 160 | SIA 160 | SIA 260 et suivantes |
|--|---------------|-----------|----------------------|
| Entrée en vigueur | 1970 | 1989 | 2003 |
| Nombre de classes d'ouvrages | 2 | 3 | 3 |
| Nombre de zones d'aléa sismique | 1 | 4 | 4 |
| Nombre de classes de sols de fondation | 0 | 3 | 6 |
| Nombre de types de construction | 1 | 5 | 27 |
| Comportement dynamique | non considéré | considéré | considéré |

Sources : [WENK, 2008, p 75]

A la lecture de ce tableau on peut remarquer les évolutions de la sécurité parasismique significatives au fil des générations des réglementations. Par exemple le nombre de zones définies comme sismique est passé de une en 1970 à quatre en 1989. Nous pouvons aussi remarquer que le nombre de classes de sols de fondation a doublé entre 1989 et 2003. A propos du bâti existant la proportionnalité est introduite comme critère d'appréciation important, où il s'agit d'examiner l'importance des travaux de renforcement parasismique à réaliser et la durée d'utilisation restante (durée de vie restante) du bâtiment.

2.2 Les normes SIA 260 à 267, leurs spécificités

Les normes parasismiques Suisse s'appuient sur les normes européennes (Eurocode 8) et remplacent depuis 2003 les normes SIA-160. Ce règlement se compose de l'ensemble des normes destinées à définir les modalités de dimensionnement des ouvrages, y compris le bâti neuf. Elles ont été complétées par le cahier technique SIA-2018 traitant des bâtiments existants. Ce nouveau règlement parasismique entré en application en 2003 se compose des *normes* SIA 260 à 267 (Tableau 10).

Tableau n° 10 : Normes parasismiques « Structures porteuses – SIA 260 à 267 » en remplacement des normes parasismiques SIA 160 à 167 de 1989

| | |
|-------------------------|--|
| SIA 260 | Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses |
| SIA 261 | Actions sur les structures porteuses |
| SIA 262 | Construction en béton |
| SIA 263 | Construction en acier |
| SIA 264 | Construction en mixtes acier-béton |
| SIA 265 | Construction en bois |
| SIA 266 | Construction en maçonnerie |
| SIA 267 | Géotechnique |
| Cahiers techniques 2018 | Bâti existant |

Sources : [Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin – 2015, Institution fondée en 1968 par le Canton du Valais et de la Municipalité de Sion]

En 2004, le nouveau zonage sismique est réalisé selon la norme SIA-261. Ce zonage offre quatre zones sismiques 1, 2, 3a et 3b. La carte des zones d'aléa sismique a été réalisée à partir d'études probabilistes. La réglementation parasismique Suisse qui nous intéresse ici est relative à l'habitat collectif existant. La carte du zonage sismique Suisse (figure n° 11) montre la hiérarchie des aléas, depuis la zone Z1 peu sismique, à la zone Z3b très sismique.

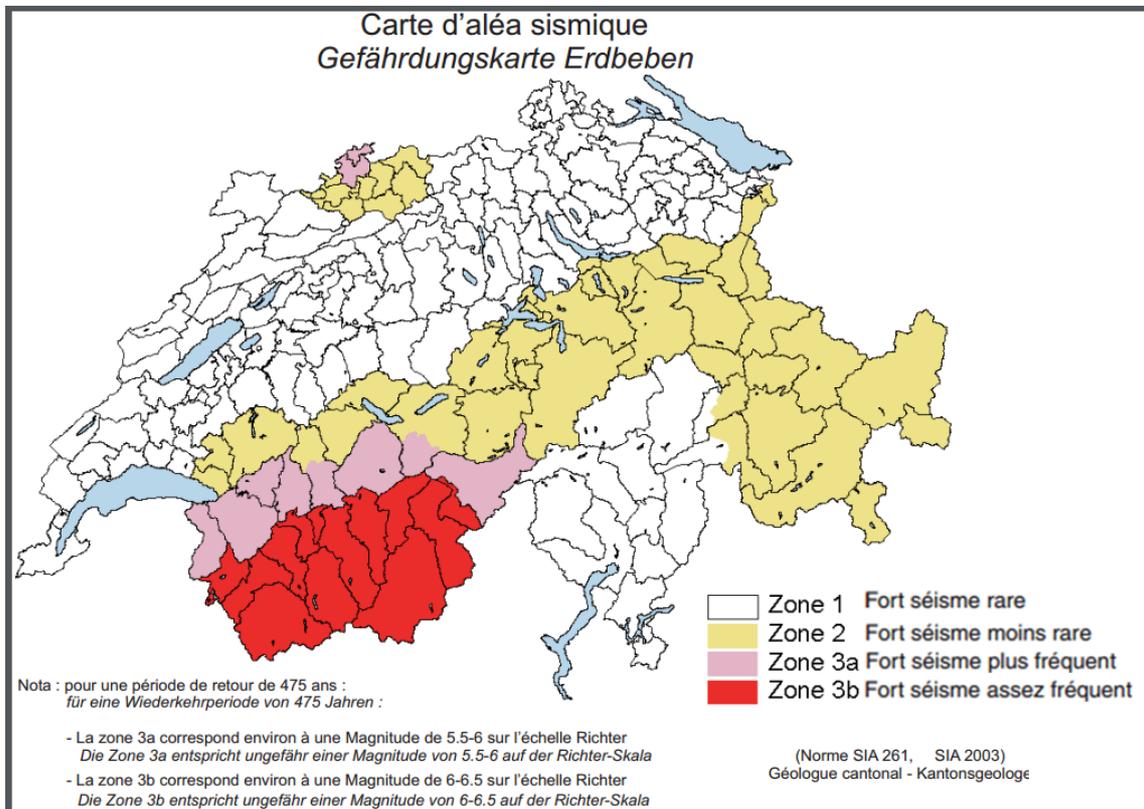


Figure n° 11 : Carte des zones d'aléa sismique selon la norme SIA 261
Sources : [Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), 2015]

L'aléa associé à chacune des zones, elles mêmes définies par une accélération maximale de référence du sol (a_{gd}) est évalué sur une période de retour de 475 ans. L'accélération horizontale maximale de référence (a_{gd}) au niveau d'un sol varie de $0,6 \text{ m/s}^2$ (zone 1) à $1,6 \text{ m/s}^2$ (zone n° 3b). Tout comme l'Eurocode, la norme SIA 261 intègre les effets de site et les fonctions des bâtiments par le biais de coefficients majorateurs.

La classification du bâti correspond à trois catégories d'importance en fonction de son usage (du bâtiment ordinaire au bâtiment ayant une fonction vitale). La classification des sols définie selon leur nature est répartie en six classes de A à F. La classe F est elle-même divisée en deux sous classes F1 et F2. Le coefficient majorateur de l'action sismique régionale lié aux effets de site est déterminé en fonction du relief. Les phénomènes de liquéfaction de sol sont abordés avec des essais similaires aux essais pratiqués dans l'union Européenne. Le zonage de l'aléa sismique ainsi que les différentes variables caractérisant l'aléa local dans la norme SIA-261 sont déterminés selon un principe équivalent à celui de l'Eurocode. Néanmoins, des différences existent.

Les valeurs de l'accélération horizontales du sol issues des dernières études du Service Sismologique Suisse (SSS) sont très proches des accélérations du sol envisagées dans l'édition précédente (1989, Norme SIA-160). Les quatre zones Z1, Z2, Z3a et Z3b ont ainsi été maintenues. Seule l'extension géographique des différentes zones a subi quelques

changements. Plusieurs régions ont été reclassées dans une catégorie supérieure. C'est le cas de la région bâloise [LESTUZZI *et al.* 2008]. Cette région est classée selon la norme – SIA161 en zone 2 avec une accélération de sol $a_g = 1,0 \text{ m/s}^2$ et reclassée avec la nouvelle norme SIA – 261 en zone Z3a avec une accélération de sol $a_g = 1,3 \text{ m/s}^2$, soit une augmentation de 30%. Les ouvrages sont conçus en fonction de l'aléa déterminant (zone d'aléa sismique, classe de sol de fondation) de leur site et de l'importance des ouvrages selon leur utilisation (classe d'ouvrage). Ils sont calculés, dimensionnés et conçus dans le détail pour le bâti neuf et vérifié pour le bâti existant par l'ingénieur civil.

En Suisse la vérification du bâti existant se réalise selon trois étapes, de la plus simple à la plus détaillée. La démarche générale quelle que soit l'étape envisagée est essentiellement basée sur l'approche coût/bénéfice. Il s'agit d'examiner les coûts d'investissement de la mise à niveau de sécurité parasismique et de la valeur vénale du bien analysé. En présence de « malformations », les ouvrages doivent être renforcés en tenant compte de l'importance des coûts. Les coûts de protection parasismique pouvant s'élever, selon l'importance des travaux à réaliser de 2% et 10% (voire 20%) de la valeur de l'ouvrage. Pour réaliser une planification de la protection parasismique sur plusieurs décennies, les résultats des vérifications conduisent à définir des priorités d'interventions pour les projets de transformation et d'assainissement des bâtiments appartenant à la Confédération ou subventionnés par elle, ainsi que pour tous les bâtiments existants de classe d'ouvrages II et III, propriété de la Confédération. Le cahier technique SIA 2018 « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants », définit la sécurité parasismique acceptable pour les bâtiments existants en considérant leur durée d'utilisation restante. Ce cahier technique impose entre autres des calculs d'exigibilité et de proportionnalité des coûts d'intervention en fonction de coûts de la vie humaine. Le cahier technique SIA 2018 sert de référence pour le contrôle de la sécurité parasismique des projets de transformation des bâtiments appartenant à la Confédération. Un projet de transformation se définit par un changement d'utilisation d'un bâtiment. Par exemple, un bâtiment ne recevant pas de public du fait de son utilisation initiale devient un bâtiment recevant du public du fait de sa nouvelle utilisation. Ce cahier technique sert également pour l'inventaire de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage COII et COIII. Un ouvrage de classe II correspond à nos établissements recevant du public, un ouvrage de classe III est un bâtiment ayant une fonction vitale (casernes des pompiers, bâtiments des services de l'ordre, etc.).

La vérification de la sécurité parasismique des ouvrages comporte trois étapes distinctes. La première est essentiellement basée sur la collecte de données issues des enquêtes de terrain. Les deuxième et troisième sont également fondées sur des enquêtes de terrain, mais également axées sur des calculs mécaniques plus ou moins approfondis. Le temps de procédure de ces différentes étapes est respectivement d'une demi-journée, de 3

à 5 jours et d'une semaine ou plus pour l'étape la plus détaillée [Cahier technique SIA 2018, 2004]. Thomas Wenk a réalisé une analyse de plusieurs bâtiments implantés sur le territoire Suisse et a déterminé des fourchettes de coûts de confortement sismique [WENK, 2008]. Ces fourchettes varient en moyenne entre 2,4 % et 14,7 % de la valeur vénale du bien. Les coûts relatifs des confortements parasismiques sont ramenés aux valeurs suivantes (Tableau n° 11).

Tableau n° 11 : Résultats des études des coûts de confortements parasismiques des bâtiments Suisse

| Coûts de confortements parasismiques par rapport à la valeur vénale du bâti | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------|
| CO III en zone Z3b : 2 - 29 % | CO II en zone Z3b : 2 - 3 % | CO I en zone Z3b : 4 % |
| CO III en zone Z3a : 5 - 23 % | CO II en zone Z3a : 3,5 - 11 % | CO I en zone Z1 : 0,7 % |
| | CO II en zone Z2 : 0,4 % | |
| | CO II en zone Z1 : 0,4 - 10 % | |
| Moyenne = 14,7% | Moyenne = 3,9% | Moyenne = 2,4% |
| <u>Classes d'ouvrages :</u> | | |
| COI : Bâtiments "Courants" (Hangars agricole, etc.) | | |
| COII : Bâtiments avec grands rassemblements de personnes (Etablissements recevant du public) | | |
| COIII : Infrastructures ayant une fonction vitale (Casernes de pompiers, bâtiments des services de l'ordre, etc.) | | |

Sources : [WENK, 2008]

Les coûts les plus faibles témoignent d'interventions locales et limitées, consistant par exemple à contreventer un seul étage. Si de nouveaux éléments porteurs sont nécessaires sur toute la hauteur d'un bâtiment, les coûts augmentent considérablement, même dans la zone la moins sismique Z1. Une nette augmentation des coûts est aussi observée lorsque les fondations doivent également être renforcées [WENK, 2008]. On peut aussi souligner que les coûts de confortement parasismiques dépendent davantage de la fonction des bâtiments que du zonage sismique. Par exemple, il suffit de comparer le coût du bâtiment de catégorie CO III situé en zone Z3b au coût du bâtiment de catégorie COII implanté dans le même zonage sismique.

3- L'Eurocode et la réglementation Suisse

3.1 Les réglementations en France et en Suisse

La réglementation relative au génie parasismique est différente en Suisse et en France. S'agissant des constructions neuves, l'application des réglementations relatives au génie parasismique est obligatoire dans les deux pays. Pour les bâtiments existants, la situation est autre. La France a introduit les premières recommandations parasismiques dans ses règles de construction bien avant que la Suisse ne le fasse. La Suisse a préconisé ses premières recommandations parasismiques lorsque la France a transposé ses recommandations en normes, les rendant ainsi d'application obligatoires. L'application des recommandations suisses est laissée à l'initiative des cantons. C'est dix ans plus tard que la Suisse transpose ses recommandations en normes avec une application obligatoire. La France intègre les retours d'expérience de plusieurs séismes survenus dans d'autres pays. Au début des années 2000 la France comme la Suisse revoient leur réglementation à l'initiative de l'Union Européenne.

La recherche d'une harmonisation de la réglementation parasismique a été l'occasion d'une révision en profondeur de la carte des zones d'aléa sismique, tant pour la France que pour la Suisse. Globalement dans la réalisation de son nouveau zonage, la Suisse a cherché à s'inscrire dans la démarche probabiliste adoptée dans l'Eurocode.

Une comparaison de l'Eurocode et de la norme Suisse peut être envisagée afin d'examiner les différences de ces deux règlements. Le zonage réglementaire n'est pas similaire en nombre de zones et en valeurs d'accélération de sol au rocher (a_{gr}). Le territoire Français est composé de cinq niveaux d'aléa, alors que la Suisse en comptabilise quatre. En Suisse, les niveaux très faible et faible sont confondus. Les accélérations de sol (figure n° 12) sont différentes d'un règlement à l'autre.

| ACCELERATION REGLEMENTAIRE | | | | ZONAGE REGLEMENTAIRE |
|----------------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| (bâti collectif) | | | | |
| France (EC8) | | | | |
| | | neuf | existant | |
| Zones | Niv° d'aléa | a_{gr} (m/s ²) | a_{gr} (m/s ²) | |
| 1 | Très faible | 0,4 | — | |
| 2 | Faible | 0,7 | — | |
| 3 | Modéré | 1,1 | 0,66 | |
| 4 | Moyen | 1,6 | 0,96 | |
| 5 | Fort | 3,0 | 1,80 | |

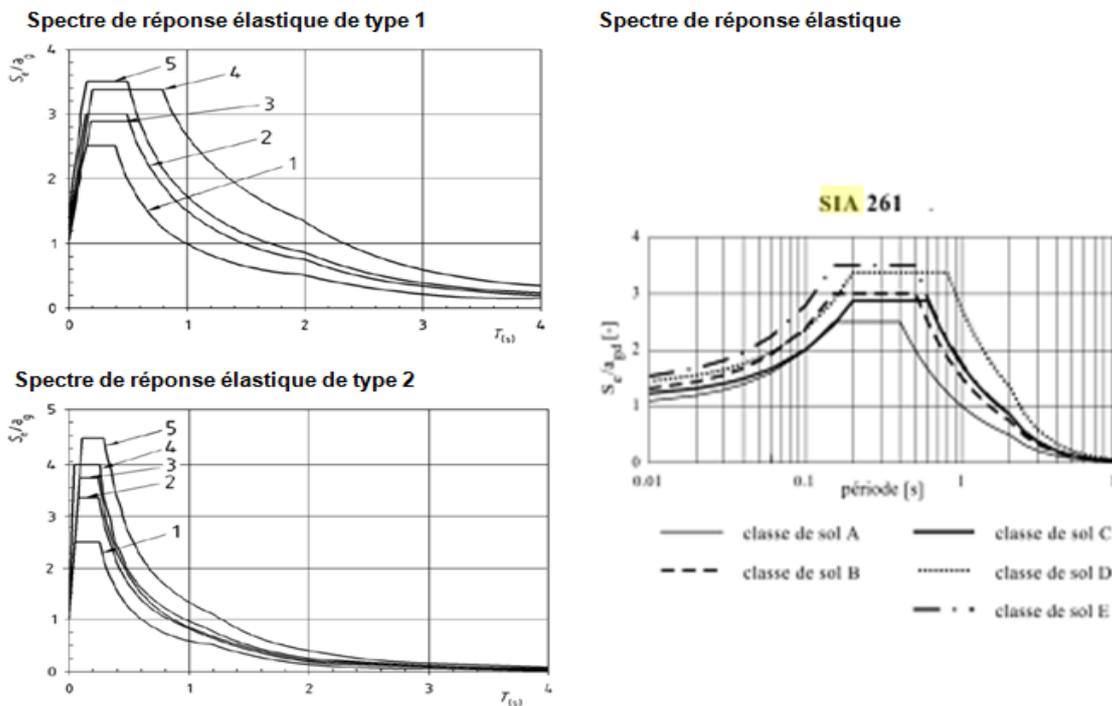
| ACCELERATION REGLEMENTAIRE | | | | ZONAGE REGLEMENTAIRE |
|----------------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| (bâti collectif) | | | | |
| Suisse (SIA 261) | | | | |
| | | neuf | existant | |
| Zones | Niv° d'aléa | a_{gr} (m/s ²) | a_{gr} (m/s ²) | |
| 1 | - | 0,6 | 0,6 | |
| 2 | - | 1,0 | 1,0 | |
| 3a | - | 1,3 | 1,3 | |
| 3b | - | 1,6 | 1,6 | |

Figure n° 12 : Zonage – Accélérations réglementaires bâti neuf – existant
 Source : [Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 (Plan Séisme, programme national de prévention du risque sismique)] ; [Norme SIA 261 (Service Sismologique Suisse (SED))]

L'accélération de sol ($0,66 \text{ m/s}^2$) préconisée par l'Eurocode en zone sismique la plus élevée est moins importante que celle préconisée par le règlement Suisse ($1,30 \text{ m/s}^2$).

S'agissant de la classification des bâtiments, l'Eurocode comporte quatre classes de bâtiments, alors que le règlement Suisse en comporte trois. Nous avons vu précédemment que l'Eurocode distingue les bâtiments d'une hauteur supérieure à 28 mètres. La norme SIA 260 à 267 ne fait pas cette distinction. Les bâtiments d'une hauteur inférieure ou égale à 28 mètres de catégorie II implantés à Mulhouse ont un coefficient d'importance d'occupation des lieux égale à 1,00. A Bâle quel que soit la hauteur des bâtiments, ce coefficient d'importance est égal à 1,20. Ce constat implique que l'application de l'Eurocode au territoire de Bâle ne permet pas de respecter la préconisation du règlement Suisse relative au coefficient d'importance d'occupation des bâtiments.

Ce qui intéresse l'ingénieur dans la vérification de la résistance sismique du bâti est la réponse élastique des bâtiments définie dans le règlement (figure n° 14). Cette réponse résulte de la combinaison des accélérations de sol et du coefficient relatif à la classification des sols et des bâtiments.



Type 1 (T1) : Les séismes qui contribuent le plus à l'aléa sismique défini pour le site dans le cadre de l'évaluation probabiliste de l'aléa ont une magnitude déduite des ondes de surface, $M_{S_{0,5}}$ supérieur à 5,5
 Type 2 (T2) : Les séismes qui contribuent le plus à l'aléa sismique défini pour le site dans le cadre de l'évaluation probabiliste de l'aléa ont une magnitude déduite des ondes de surface, $M_{S_{0,5}}$ inférieure ou égale à 5,5

Figure n° 14 : Spectres élastique préconisés par l'Eurocode et la norme Suisse
 Sources : [Eurocode 8.1 – art.3.2.2.2(2)P et [Norme SIA – 261 à 267]

L'Eurocode propose deux types de spectre de réponse élastique quand la géologie profonde n'est pas prise en compte. Un spectre de réponse élastique est une courbe donnant une accélération en fonction de la période de vibration. Le spectre correspond à l'accélération maximale d'un oscillateur simple en fonction de sa période fondamentale pour un amortissement visqueux égale à 5%. Il dimensionne le mouvement sismique à prendre en compte dans les règles de construction. L'accélération maximale est l'accélération que peut subir un bâtiment, en supposant qu'il se comporte comme un oscillateur simple. Une période propre correspond au temps que met un bâtiment pour effectuer un balancement. L'amortissement correspond à une quantité d'énergie dissipée au cours des oscillations du bâtiment, due principalement au comportement non linéaire des matériaux au cours des cycles. Le spectre de type 2 préconisé dans l'Eurocode 8 est établi à partir des séismes dont la magnitude déduite des ondes de surface M_S est inférieure ou égale à 5,5. Le spectre de type 1 préconisé aussi par l'Eurocode 8 est défini avec les séismes dont la magnitude est supérieure à 5,5. Le spectre de réponse élastique proposé dans la norme SIA 261 est déterminé avec tous les séismes quelle que soit leur magnitude. A Mulhouse, la majorité des séismes sont d'une magnitude M_S inférieure ou égale à 5,5. Le spectre de type 2 doit donc être appliqué. On peut aussi constater que ce spectre est plus contraignant que le spectre de type 1 car l'accélération de sol est plus élevée. Il est donc possible d'utiliser le spectre de type 2 sur le territoire de Bâle. L'utilisation de ce spectre permet de respecter l'application de la norme SIA 261.

S'agissant des constructions neuves, en France comme en Suisse, l'application de la réglementation parasismique est obligatoire. Les exigences des deux règlements sont équivalentes. L'Eurocode et la norme SIA-261 imposent d'intégrer dans le dimensionnement des ouvrages les effets des séismes. Pour les bâtiments existants, la situation est autre. En France l'objectif minimal de la réglementation sur le bâti existant est la non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment. Le principe général d'application se décline en trois aspects :

- Le premier est fondé sur le volontariat à l'amélioration du comportement du bâti. L'Eurocode 8-3 permet au maître d'ouvrage d'adapter l'objectif de sécurité qu'il souhaite atteindre.
- Le deuxième est lié à la réalisation de travaux lourds sur un bâtiment. Une mise en conformité parasismiques est obligatoire, avec modulations par rapport au bâti neuf. La structure modifiée est dimensionnée avec les mêmes règles de construction que le bâti neuf, mais en modulant l'accélération de sol de référence. En zones de sismicité 3 à 5, l'Eurocode préconise à l'ingénieur de prendre en compte dans les calculs de résistance sismique du bâti l'accélération de sol préconisée pour le bâti neuf et de réduire cette ac-

célération de sol de 40% pour réaliser les calculs de résistance sismique du bâti existant.

- Le troisième aspect est relatif à la création d'une zone d'extension (agrandissement de l'habitation) avec un joint de fractionnement. Le respect du règlement parasismique est obligatoire selon les normes appliquées aux constructions neuves, c'est-à-dire selon l'Eurocode 8-1.

En Suisse, Le principe général d'application de la norme parasismique SIA-261 est fondé sur deux aspects :

- Le premier concerne les bâtiments appartenant à la Confédération fédérale et tous les bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III. Les projets de transformation et d'assainissement exécutés ou subventionnés par la Confédération doivent être vérifiés quant à leur sécurité parasismique. Les prescriptions du cahier technique 2018 préconisent qu'en présence de lacunes essentielles, ces ouvrages soient renforcés en tenant compte de l'importance des coûts selon une approche coût/bénéfice.
- Le deuxième aspect se rapporte à tous bâtiments n'appartenant pas à la Confédération fédérale, dont la réglementation n'impose aucune obligation.

Les exigences de la norme Européenne n'impose pas de procéder au renforcement parasismique du bâti public ne faisant pas l'objet de réalisation de travaux lourds, à l'opposé de la norme SIA-261. Dans le cas du bâti privé faisant l'objet de réalisation de travaux lourds, les exigences de la norme SIA-261 n'imposent pas de renforcement parasismique, à l'opposé de l'Eurocode.

3.2 Deux réglementations différentes de part et d'autre de la frontière ?

Nous envisageons dans le cadre de cette étude d'appliquer l'Eurocode 8 de part et d'autre de la frontière dans le but d'utiliser le même règlement parasismique entre Mulhouse et Bâle. Il convient de rappeler que nous avons vu que le règlement parasismique Suisse est très proche de l'Eurocode. L'utilisation de l'Eurocode à Mulhouse et à Bâle comporte un double intérêt. Tout d'abord, rappelons que ces deux villes sont soumises au même phénomène physique, il est donc fondamental de déterminer laquelle de ces deux villes est la plus vulnérable et par conséquent laquelle de ces deux villes frontalières comporte le risque sismique le plus élevé. En d'autres termes, nous nous interrogeons parmi ces deux villes, laquelle comportent le plus grand risque de perte en vie humaine, ainsi que le plus grand risque d'effondrement du bâti. Le deuxième intérêt est de déterminer laquelle de ces deux

viles nécessite le plus de moyens préventifs destinés à la population à mettre en place, et le plus de moyens de renforcement parasismique du bâti à mettre en œuvre. La synthèse suivante relative à l'application des réglementations parasismiques respectives des deux territoires (Français Suisse) montrent que les conditions d'application de l'Eurocode et de la réglementation Suisse ne sont pas identiques. Pour le bâti existant, les obligations de renforcement parasismique sont obligatoires ou non obligatoires selon le que les bâtiments soient publics ou privés (Tableau n° 12).

Tableau n° 12 : Conditions d'application de l'Eurocode et du règlement parasismique Suisse

| | REGLEMENTATIONS EURO CODE – REGLEMENTATIONS SUISSE | | | |
|---|--|--------|---------------------------------------|--------|
| | Cas ne faisant pas l'objet de travaux lourds | | Cas faisant l'objet de travaux lourds | |
| | France | Suisse | France | Suisse |
| Bâtiment public | X | O | O | O |
| Bâtiment privé | X | X | O | X |
| X : Pas d'obligation de renforcement parasismique O : Obligations de renforcement parasismique | | | | |

Sources : [Eurocode 8.1 – art.4.2.5(5)P et 3.2.2.2(2)P ; [Norme SIA – 261 à 267]

Ainsi, l'application de l'Eurocode et de la réglementation Suisse varie selon le type de travaux réalisés. En effet, pour les bâtiments privés dans le cas de travaux lourds, à l'opposé de l'Eurocode le règlement Suisse ne rend pas obligatoire la remise à niveau de la sécurité parasismique. La réglementation n'est pas non plus identique pour les bâtiments publics ne faisant pas l'objet de travaux lourds car le règlement Européen n'impose pas de remise à niveau de sécurité parasismique, à l'opposé de la norme Suisse. En revanche, la réglementation est identique en France et en Suisse pour les bâtiments privés ne faisant pas l'objet de travaux lourds où il n'y a aucune obligation de confortement parasismique. La réglementation est aussi identique dans le cas de bâtiments publics faisant l'objet de travaux lourds dont les deux réglementations (Européenne et Suisse) imposent de réaliser des travaux de confortement parasismiques [Annexe – Chapitre 2 – Tableau n° A 3]. Les paramètres principaux (accélération de sol, classe des bâtiments et des sols) utilisés dans la méthode de calcul par force latérale nécessaire sont différents d'un règlement à l'autre de part et d'autre de la frontière. Les valeurs des paramètres principaux préconisés dans la norme Suisse sont supérieures à celles préconisées par l'Eurocode (Tableau n° 13).

Tableau n° 13 : Paramètres principaux (accélération de sol, coefficients multiplicateurs en fonction des catégories des bâtiments et des classes de sols) pour le calcul de la résistance sismique des bâtiments par la méthode des forces latérales dans l'Eurocode et le règlement Suisse

| ZONAGE SISMIQUE | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--|--------|------------------------------|-----------|
| France | | | Suisse | | |
| Zones | Se(T) [m/s ²] | | | Se(T) [m/s ²] | Zones |
| 1 | a _g = 0,40 | | < | a _{gd} = 0,60 | 1 |
| 2 | a _g = 0,70 | | > | | |
| 3 | a_g = 1,10 | | > | a _{gd} = 1,00 | 2 |
| 4 | a _g = 1,60 | | > | a_{gd} = 1,30 | 3a |
| 5 | a _g = 3,00 | | > | a _{gd} = 1,60 | 3b |

| CLASSE DES BATIMENTS | | | | | |
|----------------------|----------------|--|--------|----------------|-------------|
| France | | | Suisse | | |
| Catégorie Bt | Y | | | Y | Classe Bt |
| Cat. I | Y = 0,8 | | < | Y = 1,0 | COI |
| Cat. II | Y = 1,0 | | = | | |
| Cat. III | Y = 1,2 | | = | Y = 1,2 | COII |
| Cat. IV | Y = 1,4 | | = | Y = 1,4 | COIII |

| CLASSE DE SOLS | | | | | |
|----------------|----------------|-----------------|--------|-----------------|----------------|
| France | | | Suisse | | |
| Classe de sols | T ₁ | T ₂ | | T ₁ | Classe de sols |
| A | Y = 1,00 | Y = 1,10 | = | Y = 1,00 | A |
| B | Y = 1,20 | Y = 1,35 | < | Y = 1,50 | B |
| C | Y = 1,15 | Y = 1,50 | < | Y = 1,70 | C |
| D | Y = 1,35 | Y = 1,80 | < | Y = 2,60 | D |
| E | Y = 1,40 | Y = 1,60 | < | Y = 1,70 | E |

T1: Les séismes qui contribuent le plus à l'aléa sismique défini pour le site dans le cadre de l'évaluation probabiliste de l'aléa ont une magnitude déduite des ondes de surface, $M_{s,0}$ supérieur à 5,5
T2: Les séismes qui contribuent le plus à l'aléa sismique défini pour le site dans le cadre de l'évaluation probabiliste de l'aléa ont une magnitude déduite des ondes de surface, $M_{s,0}$ inférieure ou égale à 5,5
- Pour les sols de classes S₁ et S₂, il convient de mener des études particulières pour déterminer les valeurs correspondantes de S

Sources : [Eurocode 8.1 et Euro code 8.3 ; Norme SIA – 261 à 267]

Ainsi, pour appliquer l'Eurocode au territoire bâlois nous avons réalisé quelques adaptations de la valeur des paramètres principaux (Tableau 14) afin de respecter en tous points les préconisations de l'Eurocode et tenir compte des préconisations de la norme Suisse.

Tableau n° 14 : Paramètres à retenir selon les préconisations de l'Eurocode et du règlement Suisse pour le calcul de la résistance sismique des bâtiments par la méthode des forces latérales

| Accélération de sol en [m/s ²] | | | Catégorie Bâtiments | Classe de sol | Accélération de sol (Ag) |
|--|-----------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|--|
| a _{gr} | (A) | agr | | | |
| agr = 1,10 (Eurocode) | 60% | 0,66 | Y = 1,00 | Coef= 1,35 Coef = 1,50 | 0,891 m/s ² 0,990 m/s ² |
| agr = 1,30 (Norme Suisse) | 100% | 1,30 | Y = 1,20 | Coef = 1, 50 Coef = 1,70 | 2,340 m/s ² 2,652 m/s ² |
| agr = 1,20 (Moyenne) | 90% (Adaptation) | agr = 1,10 | Y = 1,10 | Coef = 1, 35 Coef = 1,50 | Ag = 1,485 m/s² Ag = 1,650 m/s² |

(A) : Minoration de l'accélération de sol préconisée par l'Eurocode du bâti neuf au bâti existant

Classe de sol : Coefficient majorateur permettant d'intégrer les amplifications des ondes sismiques

Sources : [Eurocode 8.1 et Eurocode 8.3 ; Norme SIA – 261 à 267]

Pour atteindre cet objectif, nous avons pris la valeur moyenne des accélérations (a_{gr}) de sol de référence pour le bâti neuf préconisées par les deux nouveaux règlements (Eurocode – SIA261), puis pris 90% de cette accélération de sol au lieu de 60% comme le préconise l'Eurocode. Pour la catégorie des bâtiments (habitations) il a été pris une valeur moyenne entre les préconisations de l'Eurocode et la norme SIA161 – Suisse (Voir tableau ci-dessus. A propos des catégories des classes de sol, nous avons respecté les préconisations de l'Eurocode. L'accélération de sol (Ag) de calcul est obtenue par le produit de l'accélération de sol (agr), la catégorie des bâtiments et la classe des sols.

Conclusion du chapitre 2

La réglementation parasismique a pour but de réduire les dégâts aux constructions et les pertes humaines. Depuis l'application de la nouvelle réglementation parasismique (l'Eurocode), l'activité sismique est prise en compte plus précisément grâce à l'évaluation probabiliste de l'aléa.

L'apport fondamental de ce règlement est d'élargir son champ d'application au bâti existant et d'offrir un niveau de sécurité plus élevé que la réglementation parasismique française antérieure (PS92) en permettant aux habitants d'évacuer l'ouvrage endommagé avant son effondrement grâce à l'utilisation de la plastification des matériaux.

Les exigences de l'Eurocode et de la norme parasismique Suisse relative aux bâtiments publics ne faisant pas l'objet de travaux lourds ne sont pas exactement en phase. Le

constat est identique pour les bâtiments privés faisant l'objet de travaux. Une harmonisation des deux règlements serait donc nécessaire. En fait, le coefficient minorateur (60%) prévu par l'Eurocode pour vérifier la résistance sismique du bâti existant est remplacé par une valeur égale à (90%) et une valeur moyenne des paramètres principaux (classe des bâtiments et des sols) a été prise en compte dans le cadre de cette étude pour respecter les conditions de l'Eurocode et de la réglementation parasismique Suisse.

CHAPITRE 3 : Une conurbation soumise aux risques sismiques : Mulhouse - Bâle

Analyser la sismicité d'une région et notamment d'une zone urbaine revient à examiner les événements du passé, à identifier l'intensité d'un événement sismique d'une magnitude donnée susceptible de se produire. Etudier la sismicité d'une région implique nécessairement de connaître le contexte sismotectonique, de répertorier et localiser les failles et d'en estimer la potentielle sismicité. Examiner les effets locaux, ou de surface "*effets de site*" implique d'observer les aspects morphologiques et le relief, d'analyser la nature des roches, des formations superficielles et des sols. Il s'agit donc dans ce chapitre de procéder à un diagnostic de l'activité sismique afin de comparer les accélérations de sols à celles préconisées par l'Eurocode.

1- La sismicité dans la région : Importance du risque

La sismicité du passé d'une région donnée ne peut être envisagée qu'au travers des données du passé. Elle peut être envisagée grâce à la géologie, à l'archéosismologie, à l'histoire. Les archives de nature variée constituent de précieux indices.

L'archéosismologie permet d'identifier les séismes anciens en étudiant les dégâts qu'ils ont provoqués dans des sites archéologiques comme en témoignent les travaux de B. Bousquet et Y. Péchoux (1997) effectués autour de la mer Égée [BOUSQUET et PÉCHOUX, 1997]. L'archéosismicité fournit des données quand les sources écrites font défaut [LEVRET et COMBES, 1997].

La sismicité historique est souvent plus documentée grâce à des gravures, des textes, des peintures,... . Les exemples les plus connus sont le séisme de Lisbonne en 1755 (" Poésie sur le désastre de Lisbonne" par Voltaire 1756 et la " Lettre sur la providence " 1756 de J-J Rousseau) et celui de Bâle du 18 octobre 1356 (" Peinture de Karl Jauslin ")



Figure n° 15 : Le tremblement de terre de Bâle en 1356 illustré par le peintre Suisse Karl Jauslin. (Collection Privée)

La connaissance des séismes passés obtenue à partir des archives (*manuscrits, presse, publications à caractère scientifique, etc.*) a permis d'élaborer des catalogues, notamment celui de " *Langenbeck (1892)* " fournissant un recensement des événements sismiques historiques [LANGENBECK 1892]. Les travaux historiques [ALEXENDRE 1990] et [STUCCHI 1993] ont permis d'identifier de " *faux séismes* ", de résoudre des problèmes de chronologie et de toponymie¹⁵. Des révisions de la connaissance de la sismicité du passé ont été effectuées par Vogt [VOGT 1987] qui a ainsi renseigné des événements jusque là oubliés. Ainsi, la crise sismique rhénane qui a affecté en 1763 la région de Lauterbourg dans le département du Bas-Rhin avait été oubliée et a été redécouverte grâce aux travaux de Vogt. Cet événement a eu une intensité épiscopentrale proche de VII [VOGT 1995].

Les tentatives de reconstitution documentaire de la sismicité¹⁶ historique ont pris en France une réelle ampleur dans les années 1970. Des recherches ont alors été lancées par le BRGM, couvrant l'ensemble du territoire national et ses marges frontalières. Au total, 6 200 séismes, 110 000 observations et 11 000 références bibliographiques distinctes composent la base SisFrance. Il ressort que de fortes secousses d'une intensité épiscopentrale supérieures à VII ($I_0 > VII$) se sont déjà produites dans la région sud du fossé Rhénan.

¹⁵ Toponymie : Etude étymologique des noms de lieux

¹⁶ Sismicité : localisation et fréquence des tremblements de terre selon les grandes failles de l'écorce terrestre

Le séisme de Bâle de 1356 a eu vraisemblablement une intensité de VIII-IX, celui de REMIREMONT de 1682 d'une intensité de VIII. La moitié des séismes « majeurs » a eu une intensité de VI-VII comme les évènements de Sierentz (1980) et de Rambervilliers (2003). Le séisme survenu dans la région de Bâle en 1356 a été ressenti, à Berne, Zurich, Lucerne et jusqu'à Constance en Allemagne. En France, l'Alsace, la Lorraine, la Franche-Comté, la Bourgogne, la Champagne et l'Ile-de France furent plus ou moins touchées. Selon Cadiot, Mayer-Rosa et Vogt dans l'étude des tremblements de terre en France [VOGT 1979], l'intensité épiscopentrale de niveau compris entre VII > I₀ > IX aurait été concentré autour de Bâle. Le niveau approximatif d'intensité maximum I₀ = VIII se serait étendu jusqu'à Mulhouse (France), Berne (Suisse) et Fribourg (Allemagne). Cet évènement avec une moindre intensité en raison de la distance épiscopentrale aurait été perçu jusqu' à Paris mais aussi jusqu'en Pologne et en Italie. L'épicentre se situait probablement au Sud de Bâle.

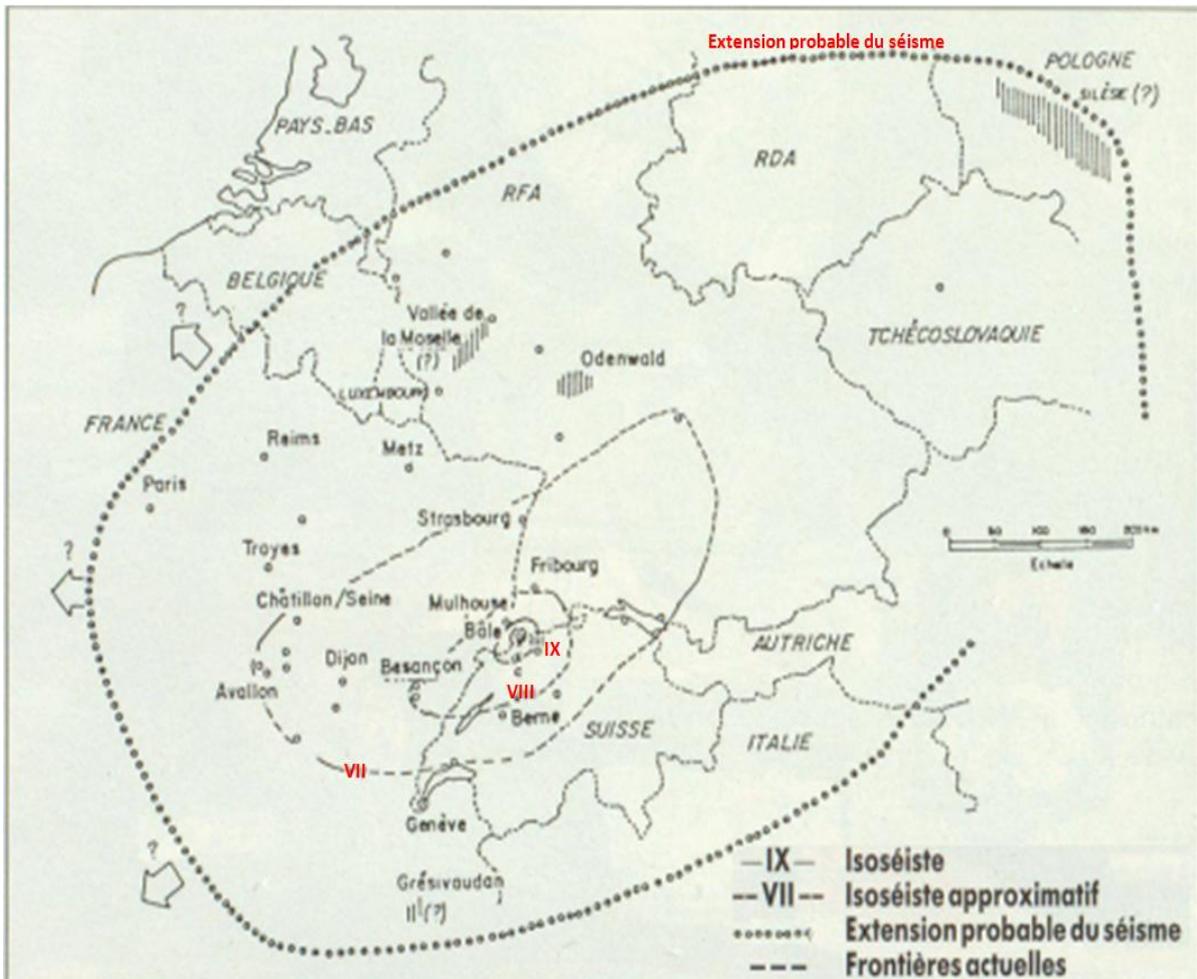
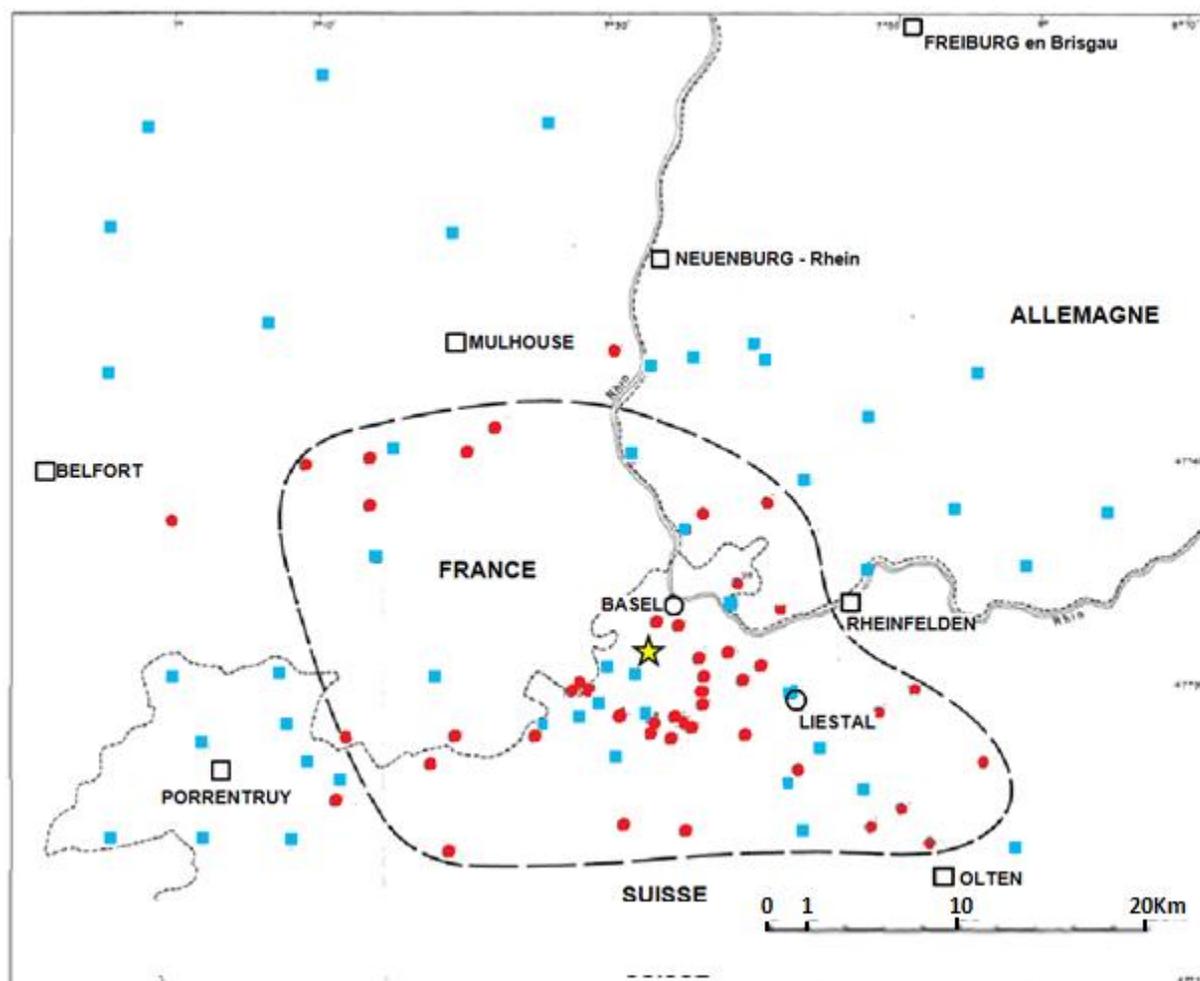


Figure n° 17 : Cartographie isoséiste de l'évènement du 18 octobre 1356
 Source : [VOGT, 1979], d'après B. Cadiot, Mayer-Rosa et Vogt]

L'*Alphabetum Narrationum* de (K. von Waltenkofen) est écrit en 1357, donc peu de temps après le séisme. Il fournit de précieuses informations sur les dégâts dus au séisme. L'*Alphabetum Narrationum* indique que " *En l'an de grâce 1356, le jour de la Saint-Luc, avant vêpres, il y eut à Bâle et dans ses environs jusqu'à une distance de deux milles un tremblement de terre qui provoqua la chute de nombreux bâtiments, églises et châteaux et la mort de nombreuses personnes [.]*".

Des ouvrages ultérieurs, telle la chronique de Faber dans laquelle l'auteur a cherché à reconstituer le déroulement de l'événement de Bâle rappelle que la terre a subi deux secousses majeures entre 17h00 et 22h00. [FABER 1488]. Le travail de Faber décrit un séisme si violent que la majorité de la ville de Bâle fut notablement endommagée et ravagée par un important incendie aggravé par une inondation dû à l'obstruction de la " Birse¹⁷ " par les débris des bâtiments détruits. Le récit de Hyenne parle d'une inondation terrible qui a détruit les moulins et toutes les constructions en partie submergés sous les murs de la ville de Bâle [HYENNE 1876]. Lambert du BRGM [LAMBERT 1988] a repris l'étude de l'évènement à partir des archives (*manuscrits, chroniques, ...*), dans le but de localiser l'épicentre de l'évènement et d'évaluer son intensité.

¹⁷ Birse : La Birse est une rivière suisse, et un affluent du Rhin.



LEGENDE

- : Châteaux } Dommages signalés
- : Villes } Dommages signalés
- : Châteaux } Dommages non signalés
- : Villes } Dommages non signalés
- : Limite probabilité de l'aire des dommages présumée supérieure à VIII MSK effets cumulés des secousses
- ★ : Epicentre macrosismique

Figure n° 18 : Localisation et répertoire des châteaux endommagés

Source : d'après E. MULLER, 1380 ; J. STUMPF et G. TSCHUDI, in rapport BRGM [LAMBERT (sous la Dir.) 1988]

Pour ce faire, l'auteur a analysé la répartition des châteaux détériorés. La première liste de ces châteaux endommagés a été fournie dès le XIVe siècle par Muller [MULLER 1380], elle a été complétée 200 ans plus tard par Stumpf [STUMPF et TSGHUDI 1548] et a permis de réaliser une cartographie du périmètre des dégâts majeurs. Lambert a aussi envisagé les dégâts plus lointains en France [CLOSENER, 1362 ; PETIT 1905], en Alle-

magne [Chronique, 1600 ; Chronique, 1891] et en Suisse [WACKERNAGEL, 1856 ; AMIET, 1952]. L'auteur a conclu que la première secousse a été d'une intensité comprise entre VII-VIII à VIII et que l'intensité de la deuxième secousse a été de VIII à VIII – IX. Les coordonnées de l'épicentre seraient de 7° 33' à ± 9' de longitude et de 47° 31' N à ± 6' de latitude [LAMBERT J. (sous la Dir.) – 1988].

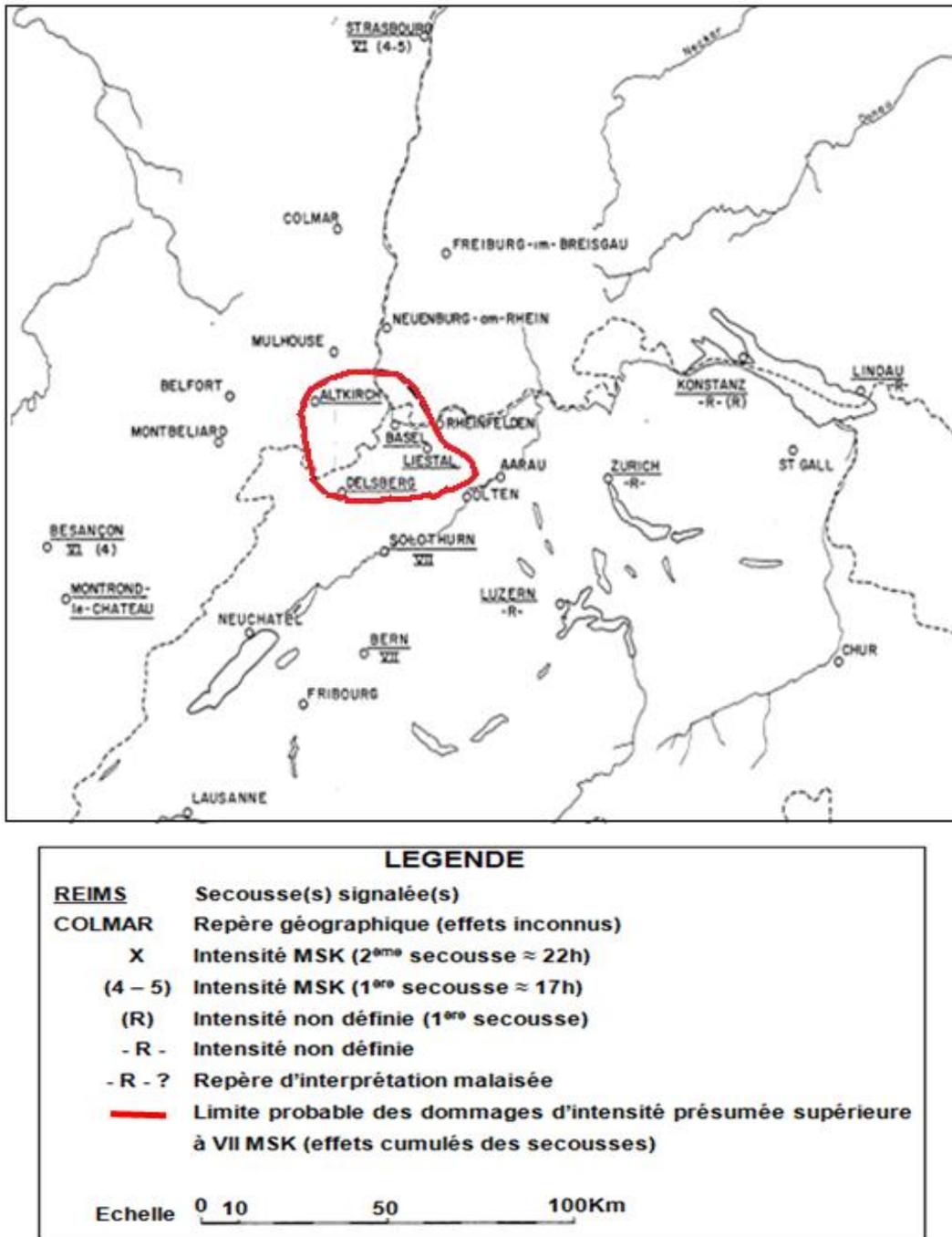


Figure n° 19 : Cartographie isoséiste du séisme de Bâle du 18 octobre 1356
 Source : [LAMBERT (sous la Dir.), 1988]

Les chercheurs qui se sont intéressés à l'origine de ce séisme à partir d'études scientifiques ont permis de déterminer l'origine et de localiser plus précisément la source de cet évènement.

" Les failles visibles aujourd'hui dans la couverture, qu'elles soient d'orientation E-W ou N-S, n'ont pas une taille suffisante pour expliquer l'énergie libérée par un tel séisme. Selon Blès et al. [BLES. et al., 1994], deux systèmes structuraux ont dû jouer simultanément pour expliquer ce fort séisme : un mouvement de remontée du socle nord jurassien en direction du Nord-Ouest, et l'opposition des failles NNE-SSW du compartiment occidental. Selon Meghroui [MEGHRAOUI et al. 2001], qui ont mené des investigations de paléosismicité dans le prolongement Sud du système de failles bordières majeures du Fossé Rhénan, une rupture sur la faille normale de Rheinach pourrait avoir produit le séisme de Bâle. Selon Ustaszewski [USTASZEWSKI et al. 2005], l'extrémité Sud du Fossé Rhénan est marqué par l'interaction entre les deux familles de failles en présence : le système de failles bordières d'orientation N-S et la réactivation d'un graben permo-carbonifère d'orientation E-W sous les plissements du Jura.

Les conclusions des différents travaux évoqués s'accordent raisonnablement sur une valeur d'intensité épacentrale ($I_0 = IX$ MSK ; $M_L = 6,2$) et sur sa localisation, soit une dizaine de kilomètres au Sud de la ville de Bâle [BELLIER et al. 2009].

2- Contexte géologique et sismotectonique du sud de l'Alsace et de la région Bâloise

La sismicité du Fossé Rhénan s'inscrit dans le contexte tectonique de l'Europe central. Ce contexte dépend du mouvement des plaques Eurasiatique et Africaine, laquelle se déplace vers le Nord et entre en collision avec la première. Ce mouvement à l'origine de la formation des chaînes montagneuses des Alpes et du Jura produit une accumulation de contrainte le long des failles du Fossé Rhénan, qui est à l'origine des séismes lorsque l'énergie emmagasinée est libérée.

Des failles limitent le fossé rhénan. Les failles bordières (failles majeures) normales, sont dues à des mouvements de distension ; le champ de failles occidentales, explique l'existence des collines sous vosgiennes. D'autres failles transversales existent (figure n° 20)

dont celles qui limitent le horst¹⁸ de Mulhouse. Le Fossé Rhénan compte parmi les zones sismiquement actives [SITTLER 1969 et 1965 ; ILLIES 1975b ; VILLEMIN et BERGERAT 1987 ; ZEIGLER 1992]. Large de 40 km en moyenne et long de 300 km du Nord au Sud, le fossé rhénan est occupé par la plaine d'Alsace parcourue par le Rhin. Dans la région de Mulhouse, un horst justifie un relief un peu plus élevé qui va de 250m à 350m [DOEBL and OLBRECHT 1974 ; BARTZ 1974 ; HAIMBERGER et al. 2005].

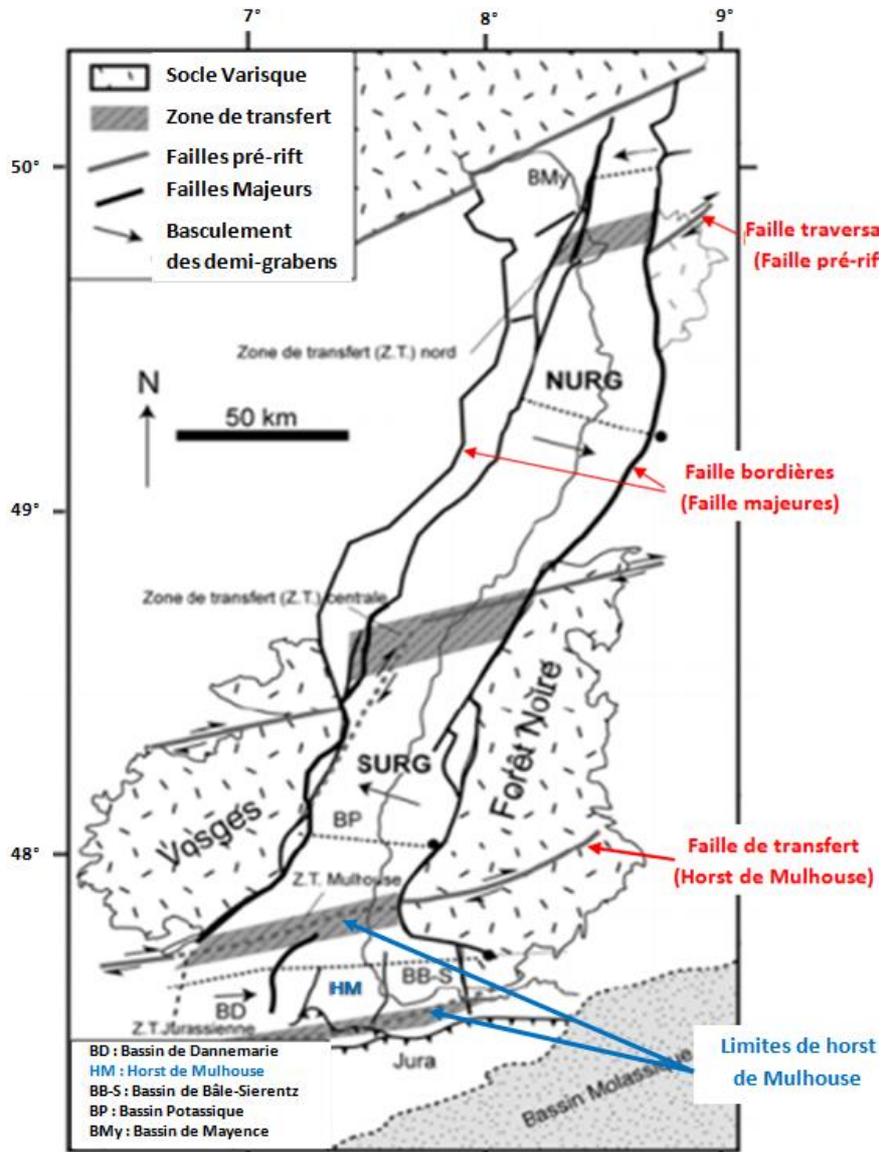


Figure n° 20 : Schéma structural du fossé Rhénan montrant le système de failles bordières qui limite le fossé et les failles intra graben.

Source : d'après GIDEON et al., 2006, [in Thèse BOUIFLANE 2008, Thèse sous la Dir. MUNSCHY]

¹⁸ Horst : En géologie, géomorphologie et géographie physique, un horst désigne un compartiment soulevé. Ce soulèvement résulte de la combinaison de failles normales conjuguées.

Ce fossé s'est formé durant l'ère tertiaire en deux phases, dont la première a débuté de la fin de l'Éocène à Oligocène (39-36Ma) et la seconde phase s'est poursuivie de l'Oligocène jusqu'au Miocène (25-20Ma) [VILLEMIN et COLETTA 1990]. Le graben¹⁹ du Rhin d'axe NNE-SSW est rempli de sédiments de l'ère tertiaire et d'alluvions de l'ère quaternaire [SITTLER 1974].

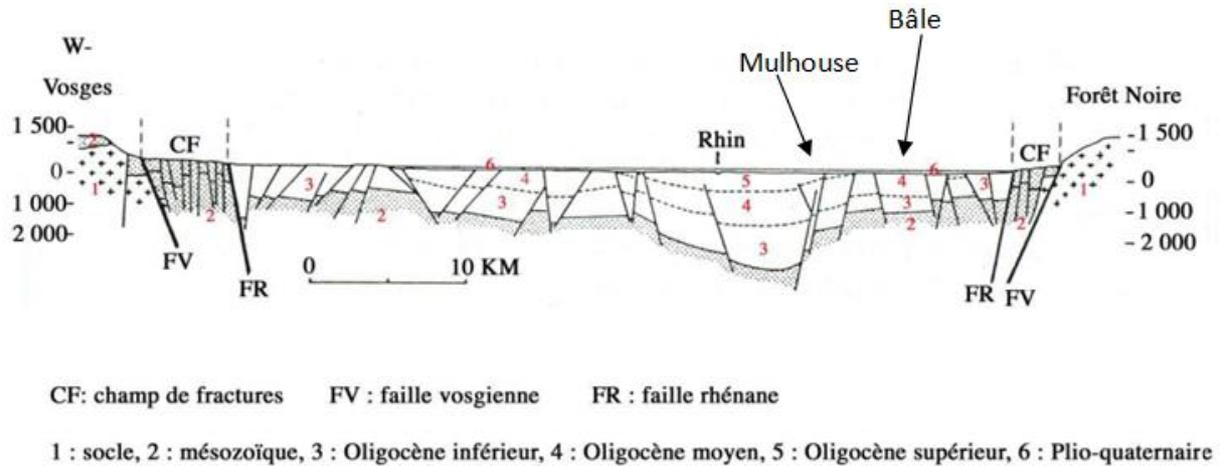


Figure n° 21 : Coupe transversale du champ de fracture du fossé Rhénan

Source : [SITTLER 1974, « *Le Fossé Rhénan*, in *Géologie de la France*, Paris, pp78 – 104]

La sismique réflexion est une méthode de prospection qui a permis d'identifier les structures géologiques en profondeur du fossé rhénan grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques. L'imagerie qu'on possède sur la structure profonde de la croûte est fournie par l'interprétation des profils ECORS (Etude Continentale et Océanique par Réflexion et réfraction Sismiques) et DEKORP (Deutsches Kontinentales Reflexionsseismisches Programm) [BRUN et al. 1991]. A partir de ces programmes de recherches " ECORS – DEKORP " la stratigraphie du fossé Rhénan est bien connue [LUTZ et al. ; MICHON et al. 2003,; DEZES et al. 2004], [BOUIFLANE 2008, Thèse sous la Dir. MUNSCHY] (figure n° 22).

¹⁹ Graben : Structure géologique limitée des deux côtés par des failles

| Ere | Système/ Epoque | Etage | Lithologie |
|-------------|------------------------|---|---|
| QUATERNAIRE | | | Alluvions et lœss |
| TERTIAIRE | Pliocène | | Galets gréseux, granitique et sable fin |
| | Sup | Messinien Tortonien | Sables et graviers selon la région |
| | Miocène. Moy | Serravallien Langhien | Activité volcanique  |
| | Inf | Burdigalien Aquitainien ? | Dépôts marins (Jura) |
| | Sup | Chattien | Calcaire lacustre et marnes grise à la base |
| | Oligocène Inf | Rupélien | Formation salifère (couches, diapirs) marnes à la base et au sommet |
| | Sup | Priabonien | Marnes et calcaires lacustres avec marnes grises au sommet |
| | Eocène | Bartonien | |
| | moy | Lutétien | |
| | SECONDAIRE | Jurassique | Malm Dogger Lias |
| Trias | | ¹ Keuper ² Muschelkalk ³ Buntsandstein | Dépôts rouges : argiles Marnes et calcaires Grès rouges |
| PRIMAIRE | Permien | | Dépôts détritiques issus de l'érosion, Epanchements volcaniques |
| | Socle dévono-Dinantien | | Dépôt volcano-sédimentaire, argiles : selon les régions |

¹Keuper : mot allemand signifiant argiles bariolées. Equivalent germanique du Carnien et du Norien, 1er et 2ème étage du Trias supérieur.

²Muschelkalk: mot allemand signifiant calcaire coquillier. Equivalent germanique du Trias moyen qui est daté d'environ - 237 Ma à - 220 Ma.

³Buntsandstein: signifie grès multicolore en allemand. Equivalent germanique du Trias inférieur, daté d'environ - 245 Ma à - 237 Ma. Il est lui-même divisé en trois sous-étages (Griesbachien, Nammalien, Spathien)

Figure n° 22 : Composition géologique du fossé rhénan et de ses bordures

Source : [BOUIFLANE 2008, Thèse sous la Dir. MUNSCHY]

Pendant le Quaternaire, la plaine d'Alsace a fonctionné comme un piège à sédiments, d'autant plus que la subsidence y est restée active. Le Rhin a divagué sur toute la largeur de la plaine entre Mulhouse et Strasbourg déposant de grandes quantités d'alluvions auxquelles s'ajoutent des alluvions vosgiennes. [MENILLET 1995].

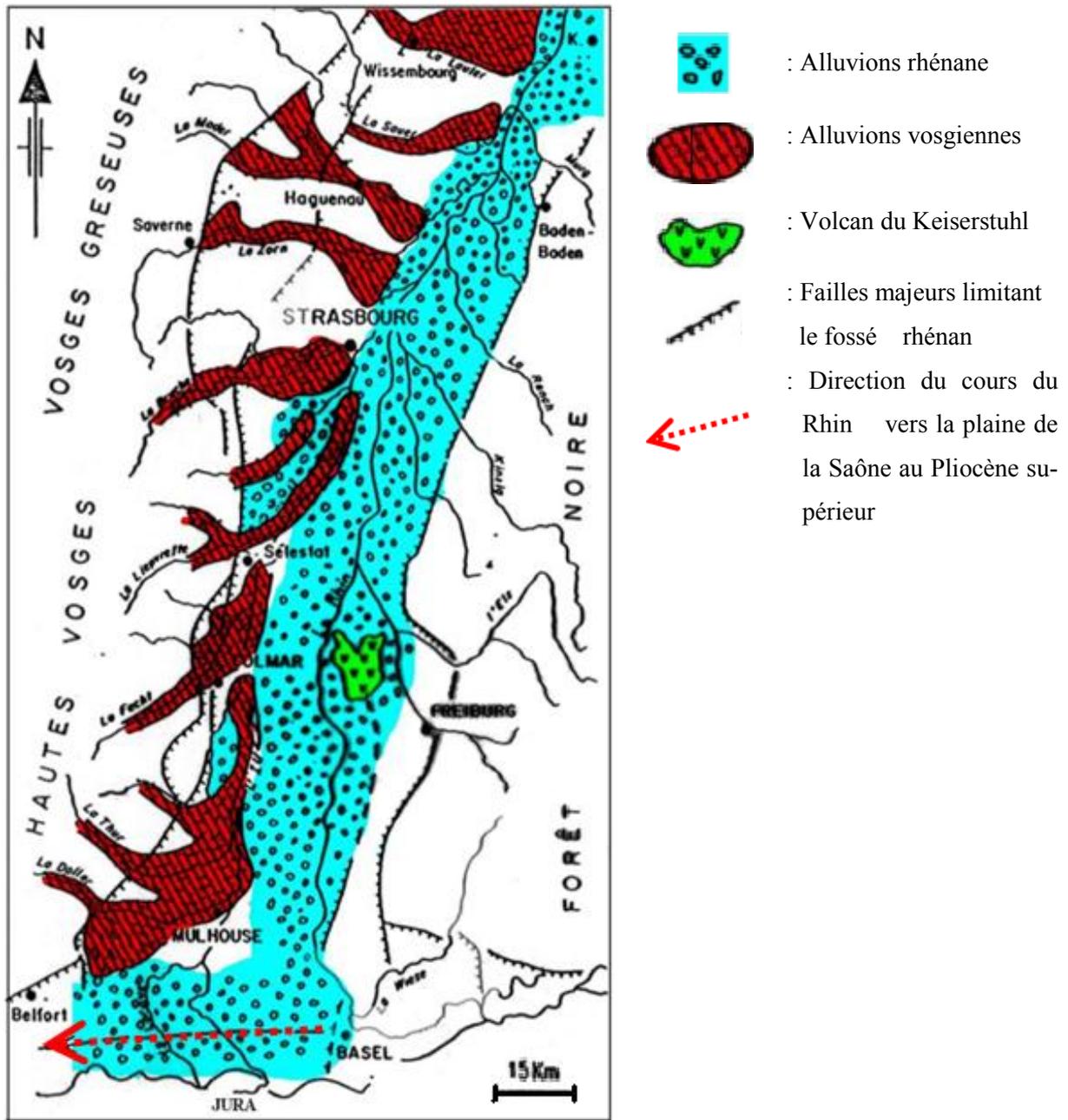
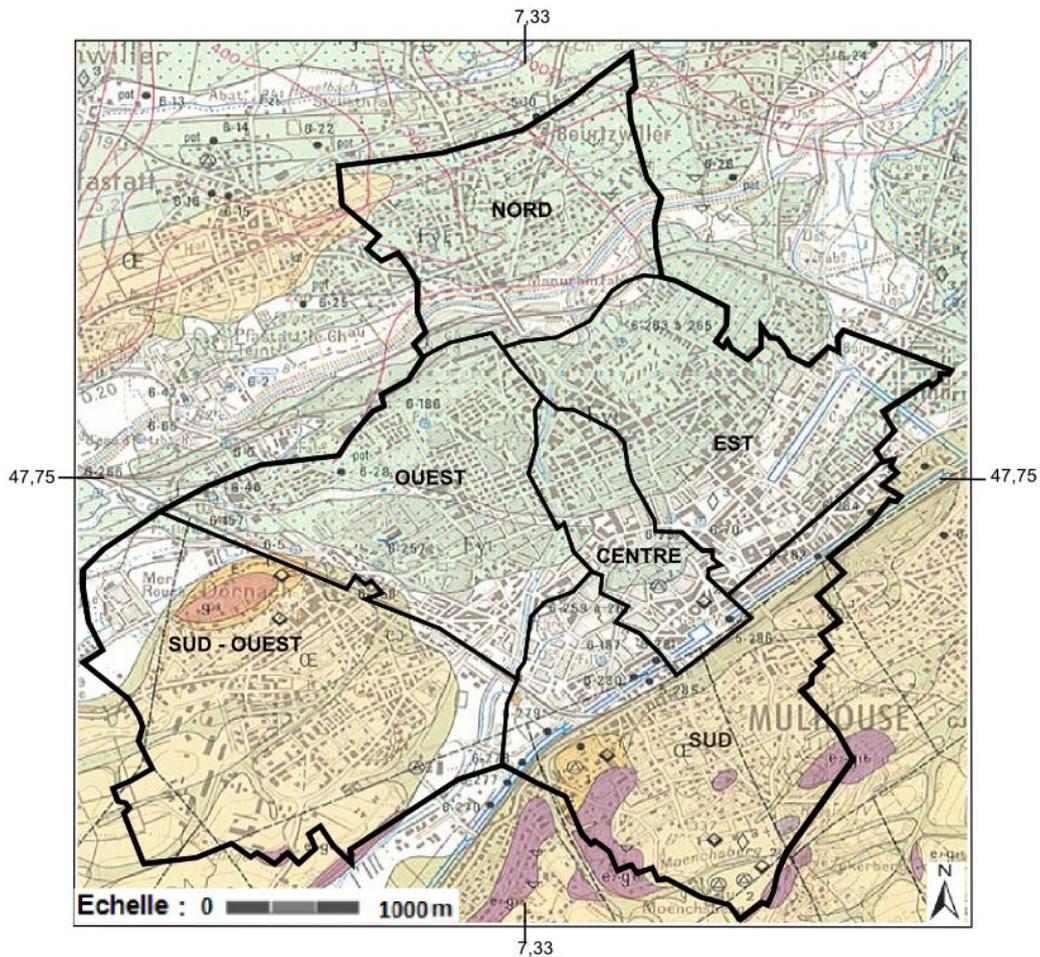


Figure n° 23 : Géologie de surface – extension des alluvions dans la plaine d'Alsace
 Source : [MENILLET 1995]

Dans la région de Mulhouse et Bâle une étude des différents types de sols pour une meilleure connaissance des effets de site a été effectuée [BD Carto, IGN, Carte géologique de France à 1/50 000 – BRGM 2001- Autorisation n° 2004/039 ; WITTMANN et al. 1969]



LEGENDE

| | |
|----------------------------|--|
| Fyv : Alluvions anciennes | E : Éboulis |
| FyR : Alluvions anciennes | g3a : Molasse alsacienne du Chattien |
| FyI : Alluvions récentes | e7 g1b : Calcaire à mélanies du Latdorfien |
| CE : Lœss et lehms du Würm | |

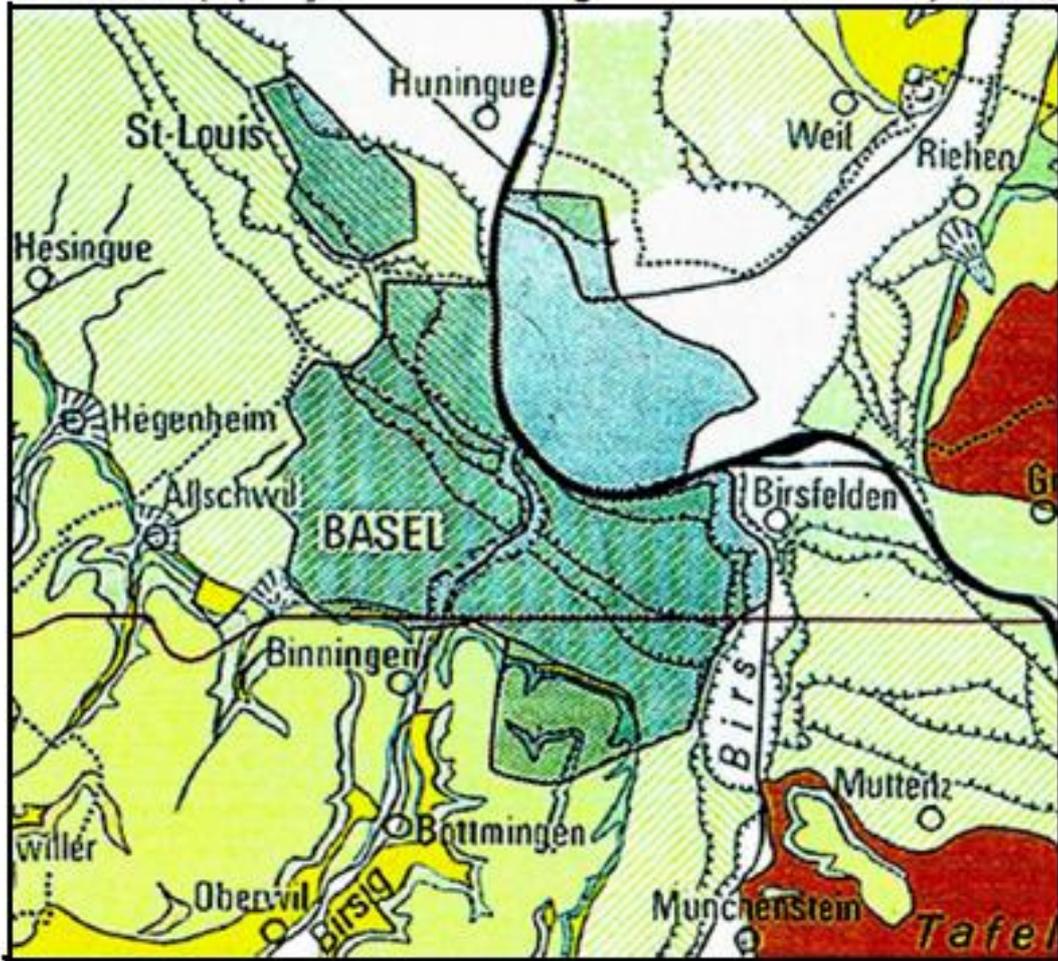
Figure n° 24 : Carte géologique de la ville de Mulhouse.

« La majeure partie de cette zone est caractérisée par des alluvions ancienne vosgiennes repérée (Fyv) à l'Ouest, des alluvions anciennes rhénanes repéré (FyR) à l'Est, des alluvions récentes (FyI) recouvertes d'une fine couche de limons sableux du Quaternaire et de Lœss et Lehms du Würm repéré (CE) ».

Source : [BD Carto, IGN, Carte géologique de France à 1/50 000 – BRGM 2001- Autorisation n° 2004/039]

Quartärgeologische Übersicht

(Aperçu de la Géologie du Quaternaire)



Echelle : 0 1 2 3Km



LEGENDE

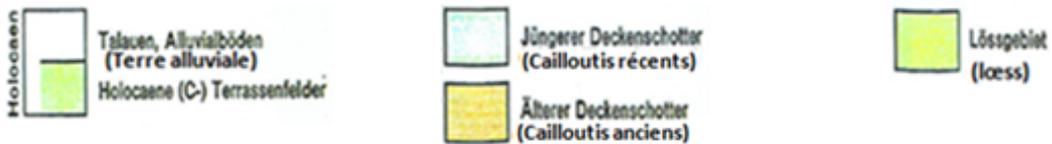
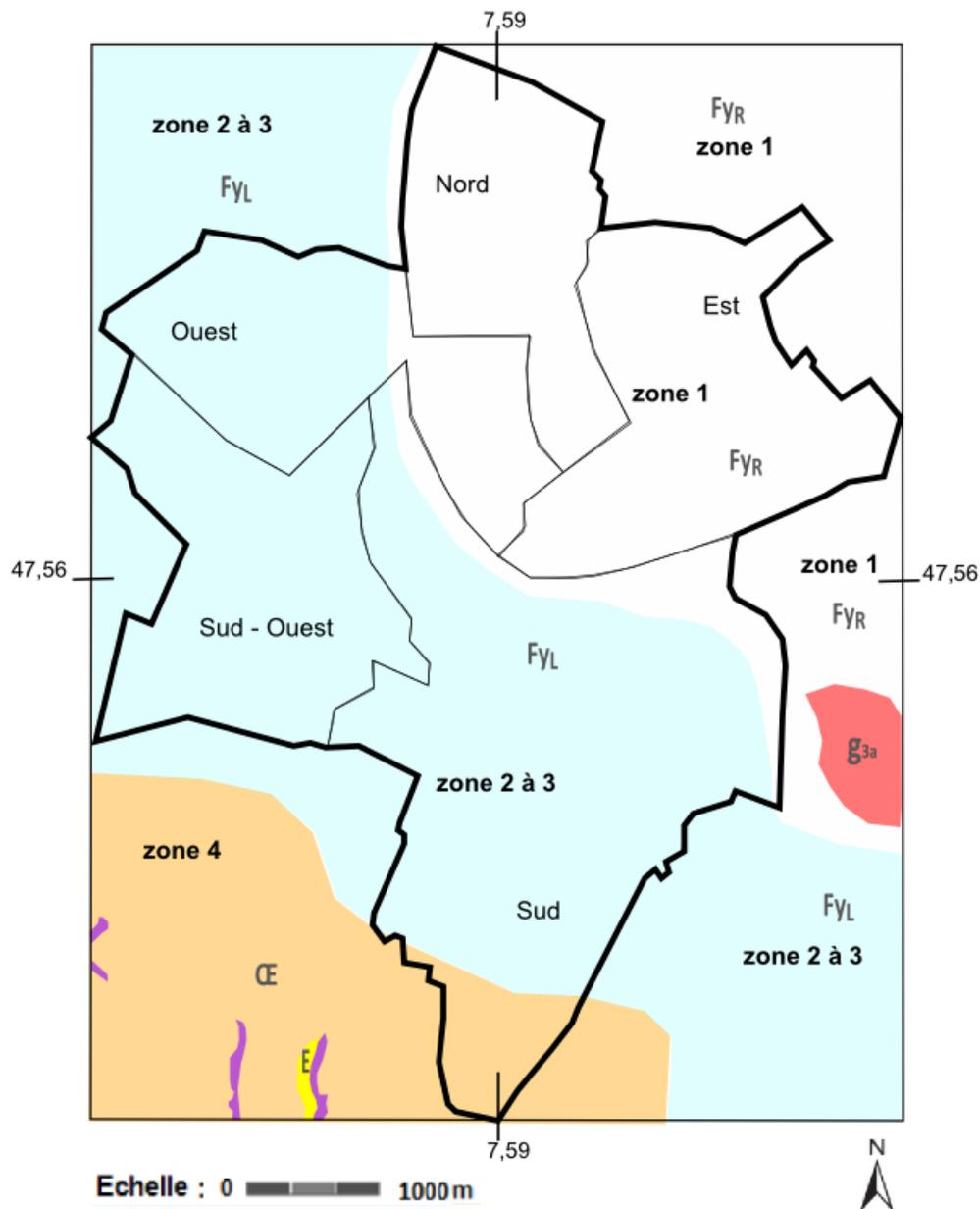


Figure n° 25 : Carte géologique des formations quaternaires de la région de Bâle
 "Les cailloutis anciens et les cailloutis récents sont des alluvions déposées par le Rhin"

Source : D'après [WITTMANN et al. 1969]



LE-
GENDE

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|--|
|  | Fyv : Alluvions anciennes |  | E : Éboulis |
|  | FyL : Alluvions récentes |  | g3a : Molasse alsacienne du Chattien |
|  | CE : Loess et lehms du Würm |  | e7 g1b : Calcaire à mélanies du Latdorfien |

Figure n° 26 : Carte géologique de la ville de Bâle.

« La majeure partie de cette zone est caractérisée par des alluvions anciennes rhénanes (FyR), des alluvions récentes (FyL) recouvertes d'une fine couche de limons sableux du Quaternaire et de Loess».

Source : D'après [WITTMANN. et al. 1969]

Les alluvions rhénanes sont constituées de galets et de sables gris verdâtre micacés (30 à 50 %). Sans réelle stratification, les alluvions présentent des intercalations de sable, de limon et de tourbe (inférieures à 2 m d'épaisseur). Elles sont souvent recouvertes d'une fine couche (0,10 à 1,50 m) de limon sableux gris ou de limon tourbeux brunâtre à noir (mélange de sable fin, d'argile et de carbonate).

Le loess a été déposé par le vent pendant la période Quaternaire [BIRTLER 2006]. Ce matériau est un dépôt constitué de particules fines dont la taille varie de 0,002 à 0,05 mm (silts). La superposition des couches de loess déposées durant les périodes successives constitue des complexes loessiques dont l'épaisseur cumulée peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Minéralogiquement, les loess sont surtout constitués de fines particules de quartz, de mica, de feldspath, ainsi que d'oxydes de fer. Les loess-lehms sont plus argileux et plus compacts [BIRTLER 2006].

Globalement, les formations superficielles (sables, graviers, galets, argiles) du secteur Mulhouse et Bâle ont une épaisseur qui varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Plus précisément, à Mulhouse selon l'étude réalisée par Simler et Théobald [SIMLER et THÉOBALD 1970] et la cartographie géologique de Théobald et Hudeley [THEOBALD et HUDELEY 1976], l'épaisseur des alluvions du quaternaire varie de 40 à 60 mètres.

Tableau n° 15 : Épaisseurs des alluvions de Mulhouse et ses alentours

| | Carte géologique 1 / 50.000 | SMILER et THEOBALD (1970) |
|----------------------|--|--------------------------------------|
| Ottmarsheim | > 80 m | ≈ 120 m |
| Chalampé | > 80 m | ≈ 100 m |
| Mulhouse | 0 - 40 m* | 0 - 60 m* |
| Staffelfelden | ≈ 40 m | (≈ 20 m)* |
| Thann | ? | ? |
| Wittelsheim | ≈ 50 m | (≈ 20 m) |
| Huningue | ? | (≈ 20 m) |
| Cernay | ? | ? |

* : Suivant le lieu

Source : D'après [SIMLER et THEOBALD 1970, in VOGT et SILTTER 1972] et la [THEOBALD 1976 (carte géologique 1/50 000 de Mulhouse)]

3- Une zone régionale d'aléa sismique modéré à moyen

Les travaux historiques montrent l'importance de la sismicité dans la partie sud du fossé rhénan.

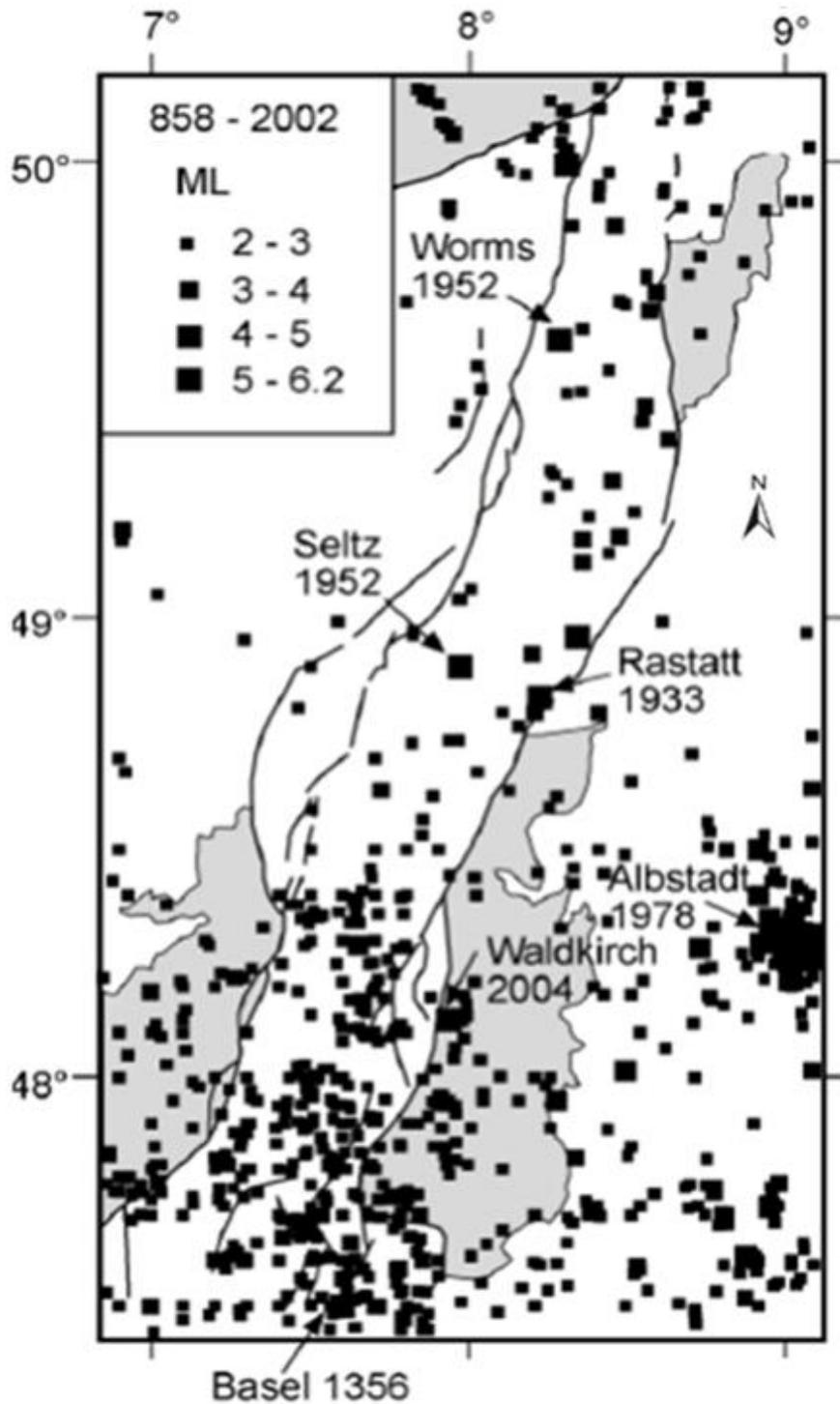


Figure n° 27 : Distribution des séismes enregistrés dans le fossé Rhénan entre 858 et 2007, selon la magnitude (ML) de Richter
Source : [PETERS, 2007]

Entre 1980 et 2000, les failles continuent à « bouger » mais la magnitude (ML) est globalement assez faible (3 à 4) sur l'échelle de Richter (figure n° 28).

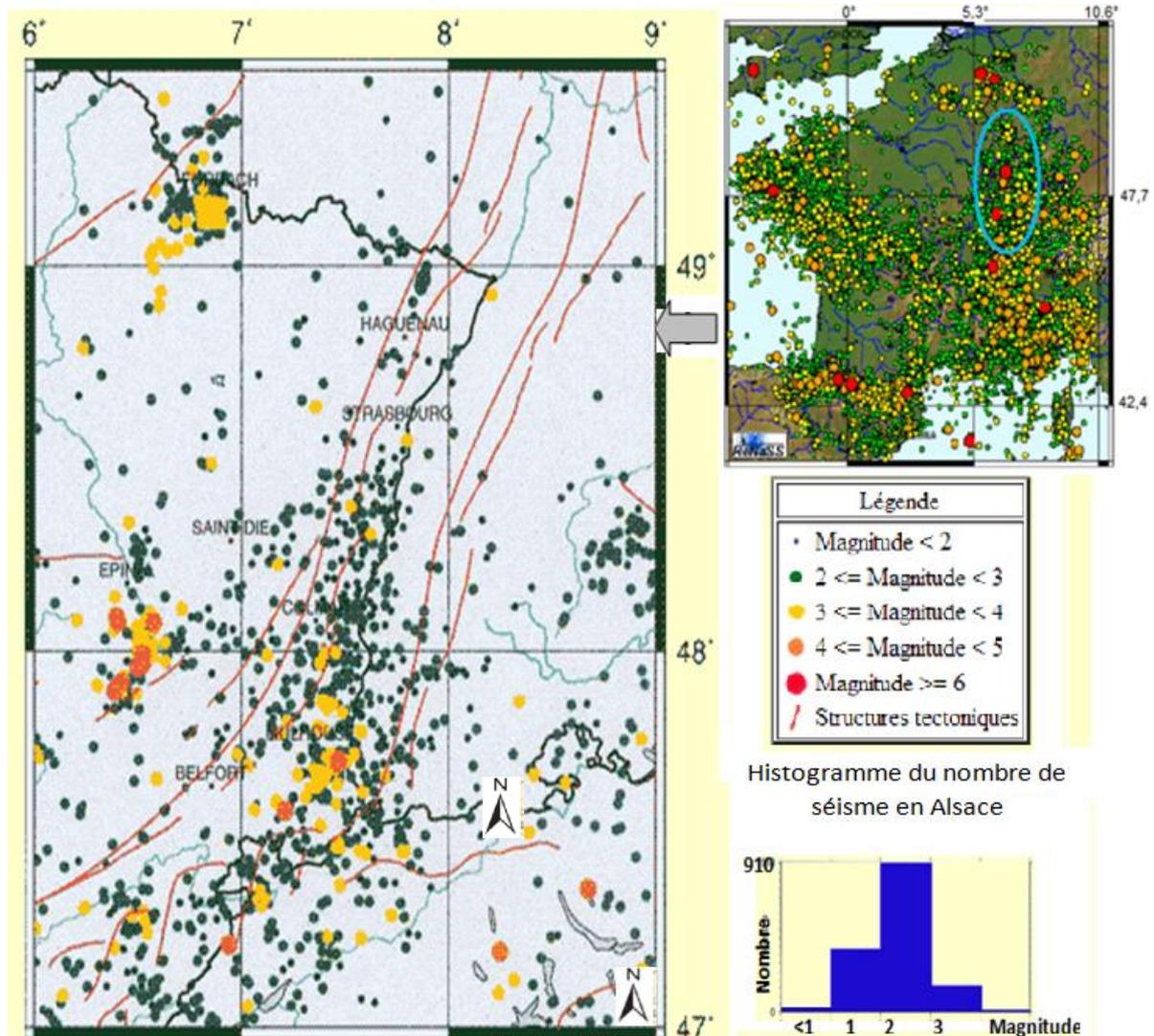


Figure n° 28 : Sismicité instrumentale sur la période de janvier 1980 à septembre 2000
Source : [RéNaSS, Prim.net, EOST, M.S.M.T.]

Les données précédentes complétées d'une première série d'informations extraite de la base de données nationale de la sismicité historique (SisFrance – 2014, BRGM, EDF, IRSN) et d'une deuxième série de données du Service Sismologique Suisse (SED) mis à jour en 2012 ont permis d'examiner la sismicité de la région Alsacienne et de la région Bâloise. Afin de combiner les données de la sismicité historique et instrumentale, nous avons utilisé la correspondance intensité – magnitude (magnitude de Kanamori M_w) de Press et Siever. [PRESS et SIEVER 1974], la relation empirique de Karnik [KARNIK et al. 1957] intensité – magnitude locale M_L (Richter), ainsi que la conversion entre les différentes magnitudes (magnitude d'énergie M_w – magnitude de surface M_s) [YENIER et al. 2008]. La magni-

tude de surface M_s est importante à définir pour l'application de la réglementation. La majorité des événements affectant le fossé rhénan, plus précisément le Sud de ce fossé sont d'une magnitude de surface (M_s) inférieure ou égale à 5,5 (figure n° 29).

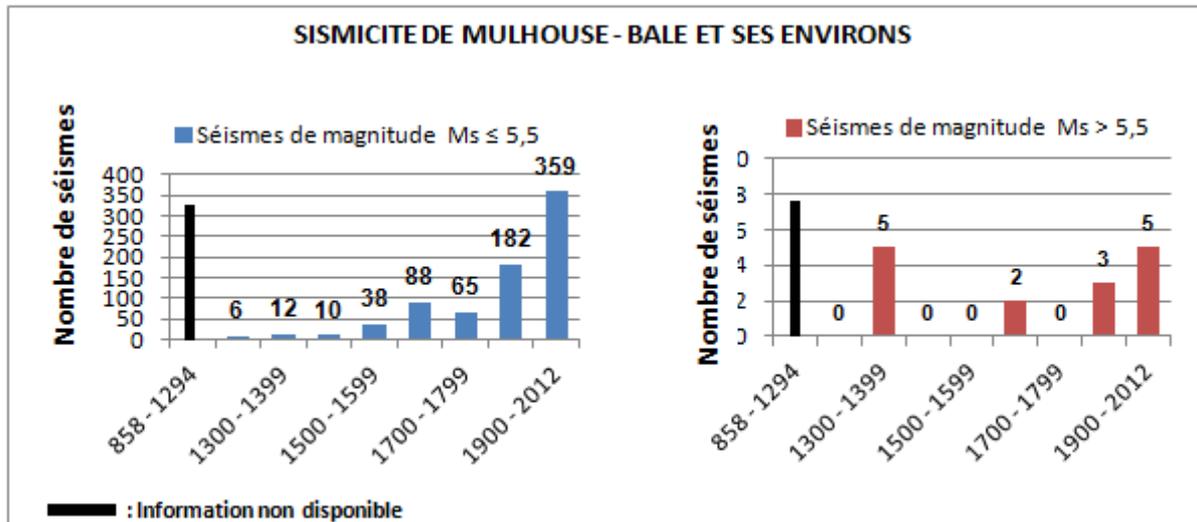


Figure n° 29 : Sept siècles d'événements sismiques

Source : [SisFrance, mise à jour 2012, (Catalogue des tremblements)] ; [SERVICE SISMOLOGIE DE SUISSE, – 2009 – SED (Catalogue des tremblements)]

4- Mulhouse et Bâle : Un site aggravant les effets des séismes

La distance épiscopale n'est pas l'unique paramètre gouvernant l'amplitude des mouvements de sol. Les conditions locales topographiques et géologiques atténuent ou amplifient ces amplitudes sismiques. Il est donc indispensable pour vérifier la résistance des ouvrages d'intégrer ces facteurs d'amplifications que nous appellerons " *effets de sites* ". La présence de formations superficielles variées et plus ou moins épaisses (alluvions, Loëss et lehms du Würm, éboulis,...) peut aggraver les effets d'un séisme. L'intensité macrosismique²⁰ n'est cependant pas une grandeur physique et à ce titre, elle est insuffisante pour les besoins du génie parasismique, à l'opposé des accélérations et des vitesses de mouvements de sol [GODEFROY et LEVRET 1985].

A partir des séismes du passé (figure n° 30), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) [MOUROUX et HERRERO 1990] a retenu l'évènement de Bâle (1356), ainsi que l'évènement de Sierentz (1980) pour réaliser une étude déterministe sismotectonique régionale des dangers pour les installations industrielles à " *haut risque* ", dans le fossé Rhénan. Cette étude a permis aux auteurs de démontrer que pour vérifier la résistance

²⁰ Intensité macrosismique : L'intensité d'un séisme est définie en un lieu par rapport aux effets (dégâts dans une région donnée) produits par un séisme

sismique des installations industrielles à " *haut risque* " situées à proximité de Mulhouse et de Bâle, il est nécessaire de déterminer une accélération de sol minimale et maximale. La sélection de ces séismes repose sur les valeurs du couple (I_0 : intensité épacentrale et Δ_0 : distance épacentrale minimale au site). Dans cette étude, les auteurs ont considéré que les accélérations de sol peuvent provenir du séisme de Bâle (1356) ou du séisme de Sierentz (1980). Les accélérations de sol ont été obtenues par deux approches différentes. Une première approche permet d'évaluer les accélérations de sol par une corrélation directe entre intensité macrosismique et accélération horizontale [MURPHY et O'BRIEN 1977]. Une seconde approche est fondée sur un modèle d'atténuation et une loi de corrélation entre accélération, distance épacentrale et magnitude [JOYNER et al. 1981 ; CAMPBELL 1981 ; SEED et al. 1982]. Dans la première approche il s'agit d'évaluer l'intensité de l'évènement à partir des dégâts en un lieu donné. Dans la deuxième, il s'agit de quantifier l'énergie libérée à la source et d'estimer le potentiel de dégât en établissant une corrélation entre la distance du lieu donné et de la source d'énergie. Ces deux approches ont été utilisées pour obtenir une valeur d'accélération moyenne et une valeur minimum et maximum. Ainsi, les accélérations de " Références " (accélération sur sol rocheux) sont récapitulées dans le tableau suivant. Ces accélérations de sol vont être comparées aux accélérations de sol préconisées par l'Eurocode, dans le but de vérifier si des évènements sismiques plus violents que ceux préconisés par la nouvelle réglementation peuvent se produire dans le sud du fossé rhénan.

Tableau n° 16 : Evènements sismiques majeurs retenus pour l'étude

| | 1^{ère} Approche | 2^{ème} Approche |
|--|---|---|
| SIERENTZ 15 juillet 1980 Accélération à Mulhouse et Bâle | a = 0,08g à 0,15g (pour $I_0 = VII$) $a_{moy} = 0,115g$ | a = 0,07g à 0,122g (pour $M_L = 4,7$) $a_{moy} = 0,105g$ |
| BÂLE 18 octobre 1356 Accélération à Bâle | a = 0,25g à 0,40g (pour $I_0 = VIII - IX$) $a_{moy} = 0,325g$ | a = 0,132g à 0,414g (pour $I_0 = VIII - IX$) $a_{moy} = 0,275g$ |
| NOTA : Accélération maximale horizontale au rocher | | |

Source : [MOUROUX et HERRERO 1990]

L'étude réalisée par le BRGM, à partir de la simulation du séisme de Sierentz montre que les accélérations de sol situées entre 1,05 à 1,15 m/s², avoisinent les préconisations de la réglementation Européenne (1,10 m/s²). Néanmoins, la simulation à partir du séisme de l'an 1356 montre que les mouvements de sol peuvent atteindre des valeurs au-delà de la réglementation européenne 2,75 à 3,25 m/s² dans la région de Bâle et même au delà de la

règlementation Suisse ($1,60 \text{ m/s}^2$). Ainsi, les accélérations présentées précédemment que nous appelons " *Accélérations de Référence* " sont à considérer sur un sol de type rocheux. Il convient donc de modifier ces valeurs pour tenir compte des conditions topographiques et géologiques locales (effets de site) propres à chaque site.

Un autre scénario sismique à été envisagé par le BRGM [MARÇOT et ARNAL 2004] dans la ville de Mulhouse dans le cadre d'un programme européen " SAFE "²¹. L'évènement est caractérisé par ses paramètres physiques : intensité (VII-IX, EMS98), magnitude de moment (M_w) de 5,3 (Kanamori), avec une distance épacentrale $d = 3\text{Km}$ et une profondeur focale de 10 Km. Ce séisme est supposé provenir du jeu de la faille d'Illfurth, situé au Sud-est de Mulhouse (figure n° 30).

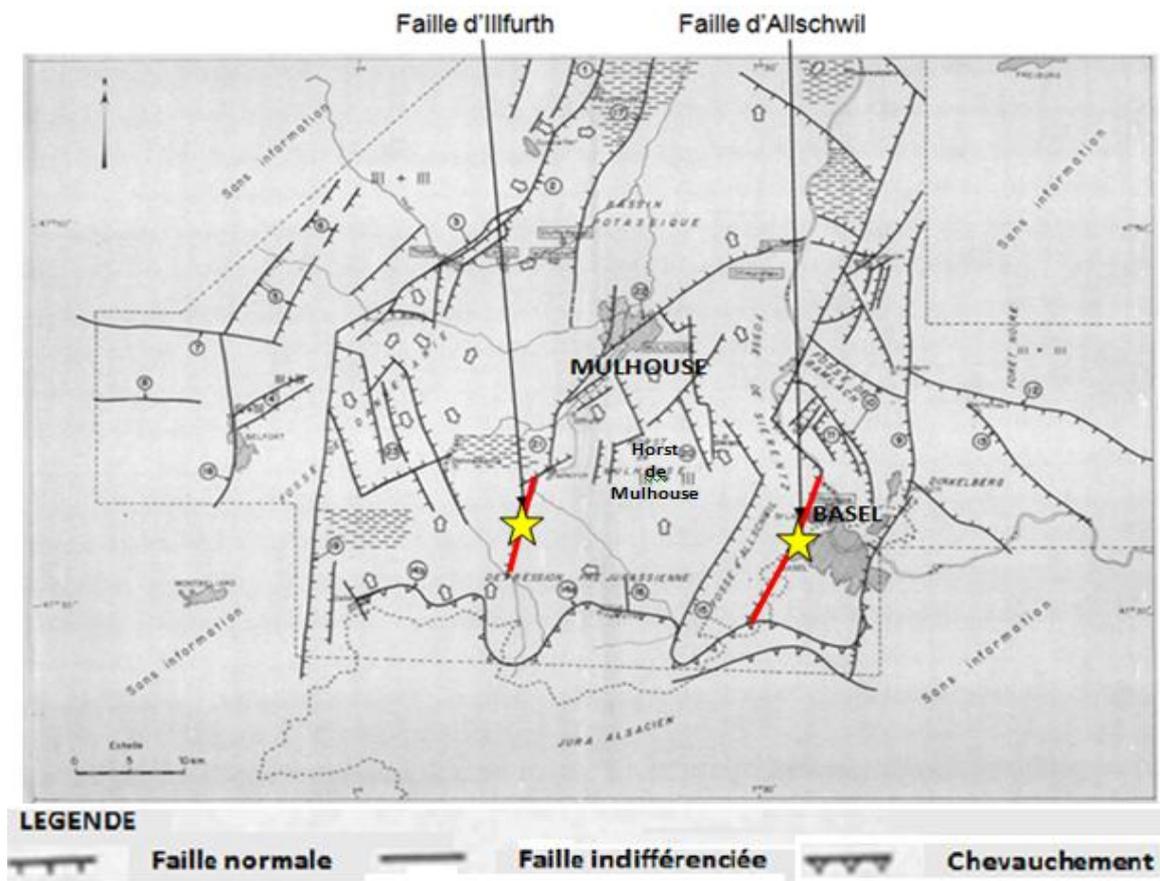


Figure n° 30 : Localisation des failles tertiaires, failles de la région de Mulhouse
Source : [SAUTRET, 1988]

Le choix de ce scénario concerne les victimes possibles et les dégâts causés au bâti d'habitation. La détermination de l'accélération de " *Référence* " est similaire à celle de l'étude précédente, appuyée sur un calcul reposant sur un modèle d'atténuation, le modèle de Sadigh [SADIGH et al. 1997]. Or, cette accélération ne prend pas en compte les effets de site qui sont intégrés par Marçot et Arnal en réalisant un micro zonage à partir de données

²¹ SAFE : Slow Active Fault in Europe (2001 – 2004), 5° PCRD ; Coordinateur scientifique : M. Sébrier, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI

de forages BSS²², de la carte géologique au 1/50 000 (Feuille 413 « Mulhouse ») et d'un rapport du BRGM sur le micro zonage sismique du bassin de Mulhouse [MOURoux THIERRY 2003]. Ces effets de site ont été introduits par l'application d'un coefficient prenant en compte la classification de la nature des roches et sols, l'amplification sismique apparaît ainsi (figure n° 31).

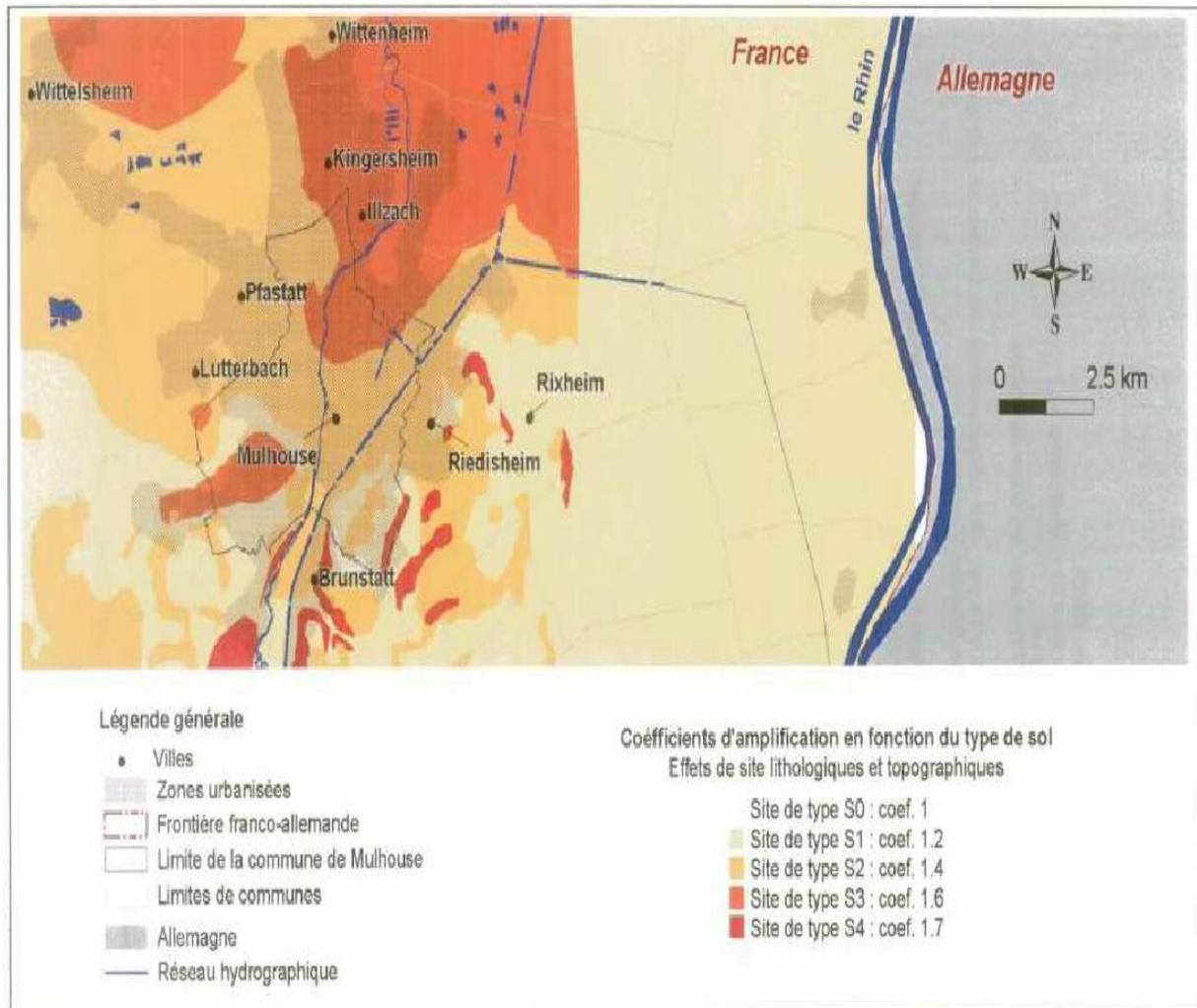


Figure n° 31 : Micro zonage sismique de Mulhouse et sa région
Source : [MOURoux et THIERRY 2003]

La combinaison de l'accélération de Référence et des zones à effets de site aboutissent à des accélérations de sol qui varient de 1,50 à 2,67 m/s² sur le territoire urbain de Mulhouse [MARÇOT N et ARNAL 2004].

²² BSS : Banque de données du sous sol gérée par le BRGM

Elise Beck a également réalisé une étude sismique de la ville de Mulhouse et ses alentours [BECK 2006, Thèse]. Elle a simulé deux séismes l'un sur la faille d'Illfurth, pour prendre en compte un scénario pénalisant pour la ville de Mulhouse, l'autre sur la faille d'Allschwil, localisée à proximité de Bâle. Dans le cas du premier scénario, le tremblement de terre d'une magnitude (M_w) de 6,0 – 6,5 qui pouvait se produire, les accélérations atteignent des valeurs comprises entre 1,10m/s² et 2,50m/s² dans la zone d'étude. La loi d'atténuation retenue est celle calculée par Ambraseys et al [AMBRASEYS, et al. 1996]. L' " Accélération de Référence " obtenue dans la zone urbaine de Mulhouse varie de 1,10 à 2,50 m/s² du Sud – Est au Nord – Ouest. Or, une accélération de sol de 1,00 m/s² est considérée comme la limite de sécurité pour les bâtiments construits en maçonnerie [MADARIAGA et al. 1991]. Pour estimer les effets de site, Elise Beck a procédé selon deux méthodes. La méthode de Nakamura [NAKAMURA, 1989] et celle de fonctions réceptrices. La première méthode revient à réaliser un calcul des rapports spectraux, composante horizontale / composante verticale (H/V) à partir d'enregistrement de bruit sismique ambiant. La deuxième méthode consiste à déterminer des rapports spectraux (H/V), obtenus à partir d'enregistrements de l'activité sismique (sismogrammes). Pour ce faire, elle a procédé à des mesures sur le terrain. Une comparaison des résultats de ces deux méthodes a permis à l'auteur de constater une forte cohérence entre les fréquences fondamentales évaluées et la géologie de surface à laquelle les facteurs d'amplification sont corrélés. Elle a parallèlement souligné quelques divergences dans le sud-est de Mulhouse (horst) vraisemblablement dû à la présence d'une structure faillée et une moindre épaisseur des formations sédimentaires. L'intégration des effets de site dans un scénario réaliste est une étape délicate. Deux manières sont possibles : exprimer les valeurs d'amplification sismique en quantités absolues ou en quantités relatives. Dans la réglementation parasismique les zones d'amplifications sont caractérisées par des quantités absolues, définies par des coefficients majorateur. Dans son étude afin de tirer profit des mesures collectées sur le terrain, l'auteur est parvenu à « découper » la ville de Mulhouse en quatre zones d'amplification sismiques. Ces zones ont été déterminées à partir de la corrélation entre les fréquences fondamentales et la géologie de surface (figure n° 32).

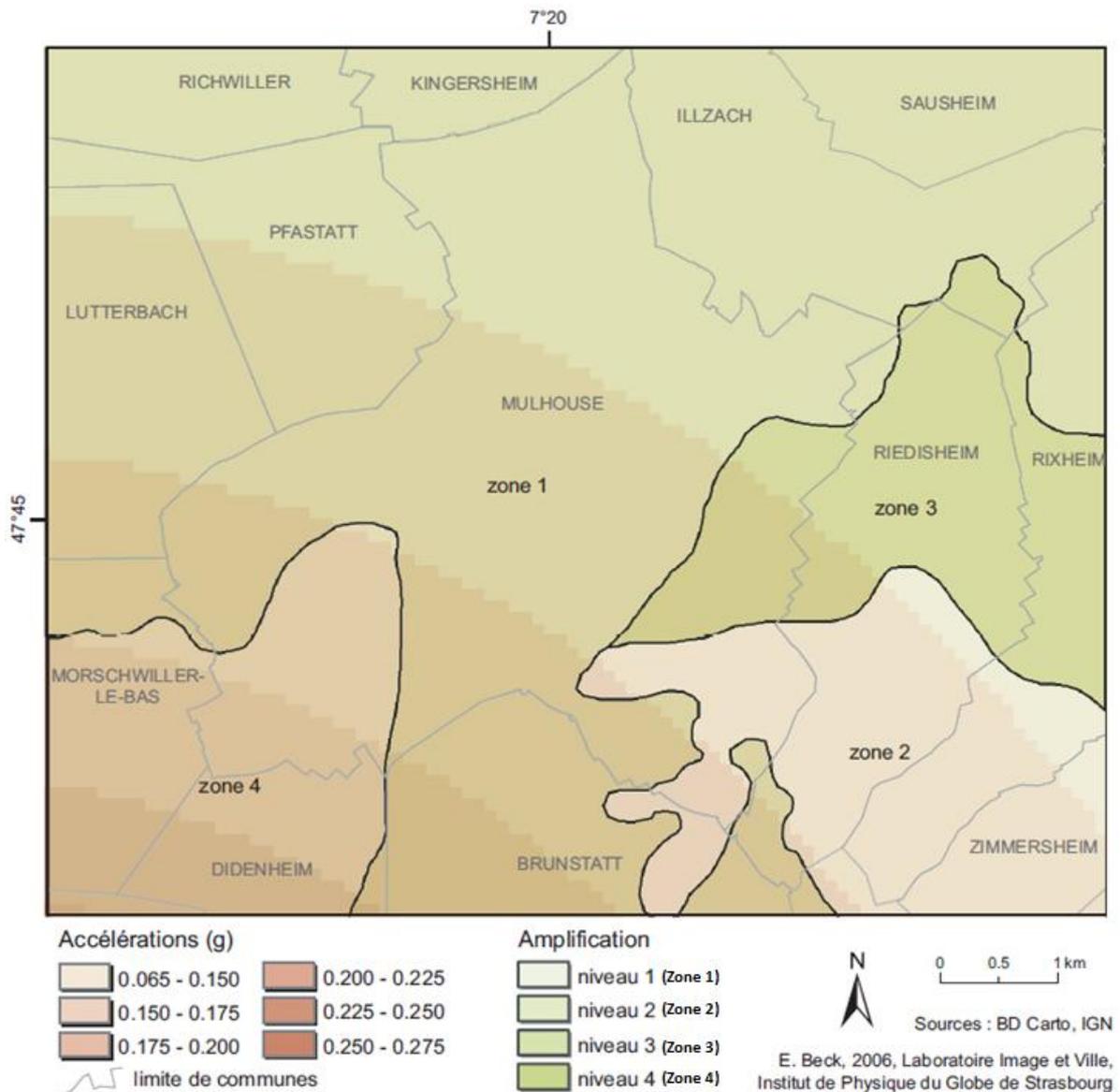


Figure n° 32 : Accélérations de sol et zones d'amplifications sismiques selon le premier scénario sismique – Mulhouse

Source : [BECK 2006, (Dir, Co-Dir) Weber et Granet, «*Approche multirisques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)*», Thèse, université Louis Pasteur Strasbourg I.]

L'auteur a également distingué quatre valeurs de fréquences fondamentales avec des nuances à l'intérieur de chacune d'elles correspondant à quatre zones (figure n° 33).

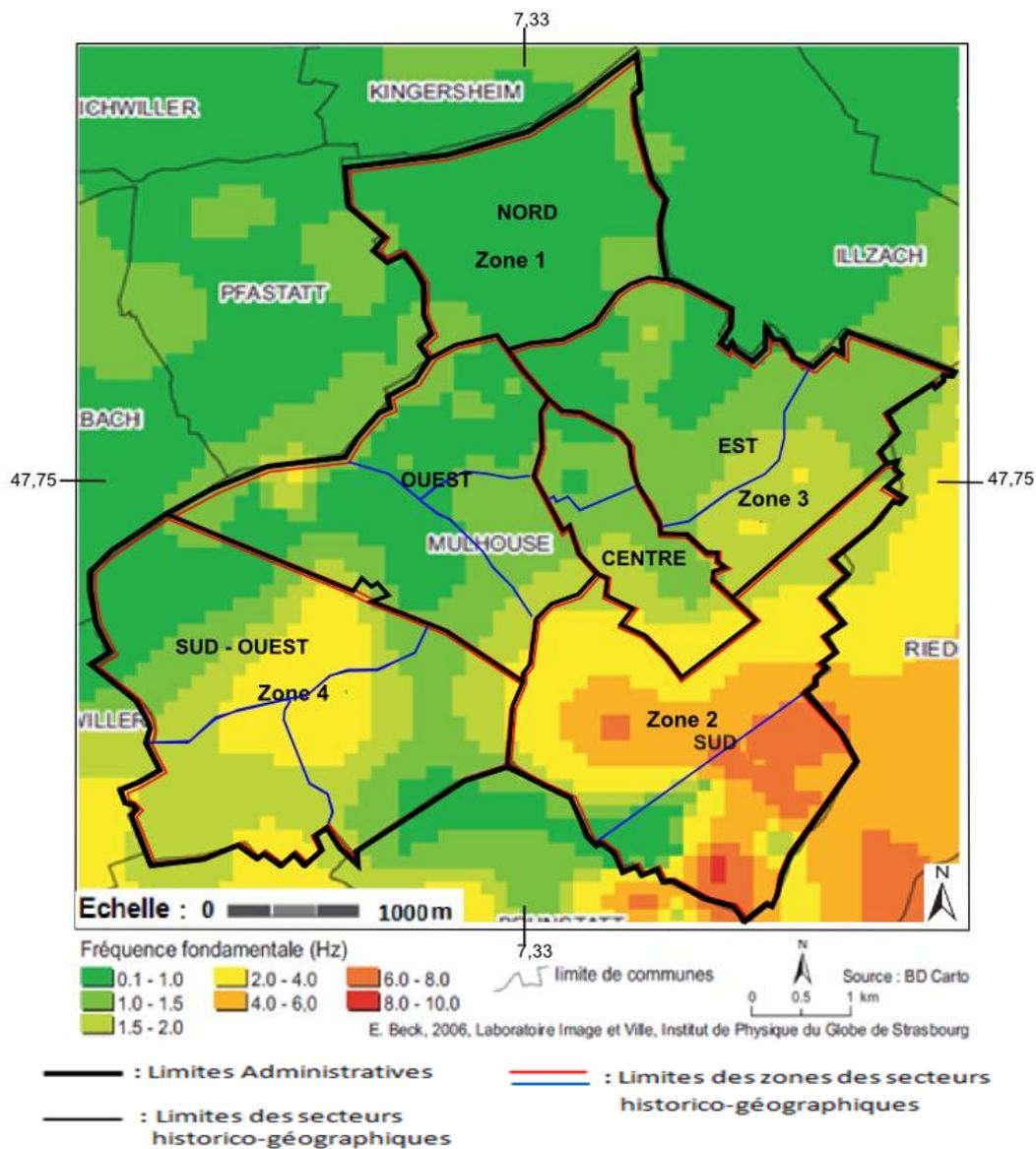
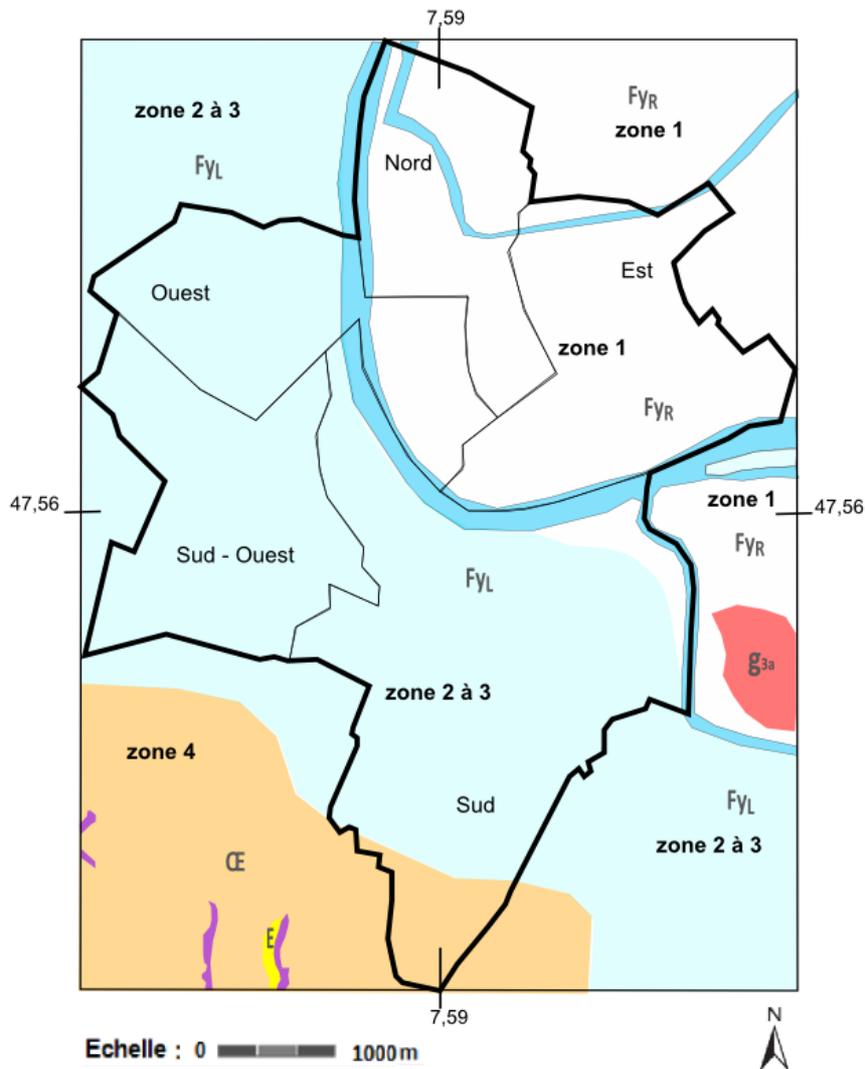


Figure n° 33 : Valeurs des fréquences fondamentales du sol de Mulhouse et de ses alentours estimées par la méthode de Nakamura
 Source : [BECK 2006, (Dir, Co-Dir) Weber et Granet]

En observant les deux cartes précédentes (figures n° 32 et 33), la corrélation entre les amplifications sismiques et les valeurs des fréquences fondamentales du sol apparaît. Le deuxième scénario sismique qu'Elise Beck a envisagé peut correspondre au séisme de Bâle de 1356. Dans ce cas les accélérations atteignent des valeurs comprises entre 0,60m/s² et 1,10m/s² dans la zone d'étude de Mulhouse. La méthode de calcul de l'accélération dite de "Référence" et l'estimation des effets de site sont similaires au scénario précédent. Le résultat provenant de ce second scénario est proche d'une accélération égale à 3,80 m/s² dans l'ensemble de la ville de Bâle. L'auteur souligne que dans la région de Mulhouse situé à 25 km de l'épicentre, cette accélération atteindrait à peine 1,10 m/s². Les caractéristiques

d'amplification sismique envisagées à propos de Mulhouse fournissent des données pour analyser le micro zonage sismique de la ville de Bâle. Ce dernier a été réalisé à partir de la géologie du quaternaire identifiée par Wittmann [WITTMANN et al. 1969] (figure n° 34).



LEGENDE

| Accélération (g) | Amplifications | Géologie superficielle |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| A = 0,38 sur l'ensemble de la ville | □ : Niveau 1 (Zone 1) | FyL : Alluvion récentes |
| | ■ : Niveau 2-3 (Zone 2 à 3) | FyR : Alluvions anciennes |
| | ■ : Niveau 4 (Zone 4) | Œ : Löss |

Figure n° 34 : Accélération de sol et zones d'amplifications sismiques – Bâle
 Source : D'après [WITTMANN et al. 1969]

Les informations résultant des travaux de recherches de Lestuzzi et de Badoux font apparaître des gammes fréquentielles fondamentales dans la ville de Bâle un peu différentes de celles de la ville de Mulhouse [LESTUZZI et BADOUX 2008].

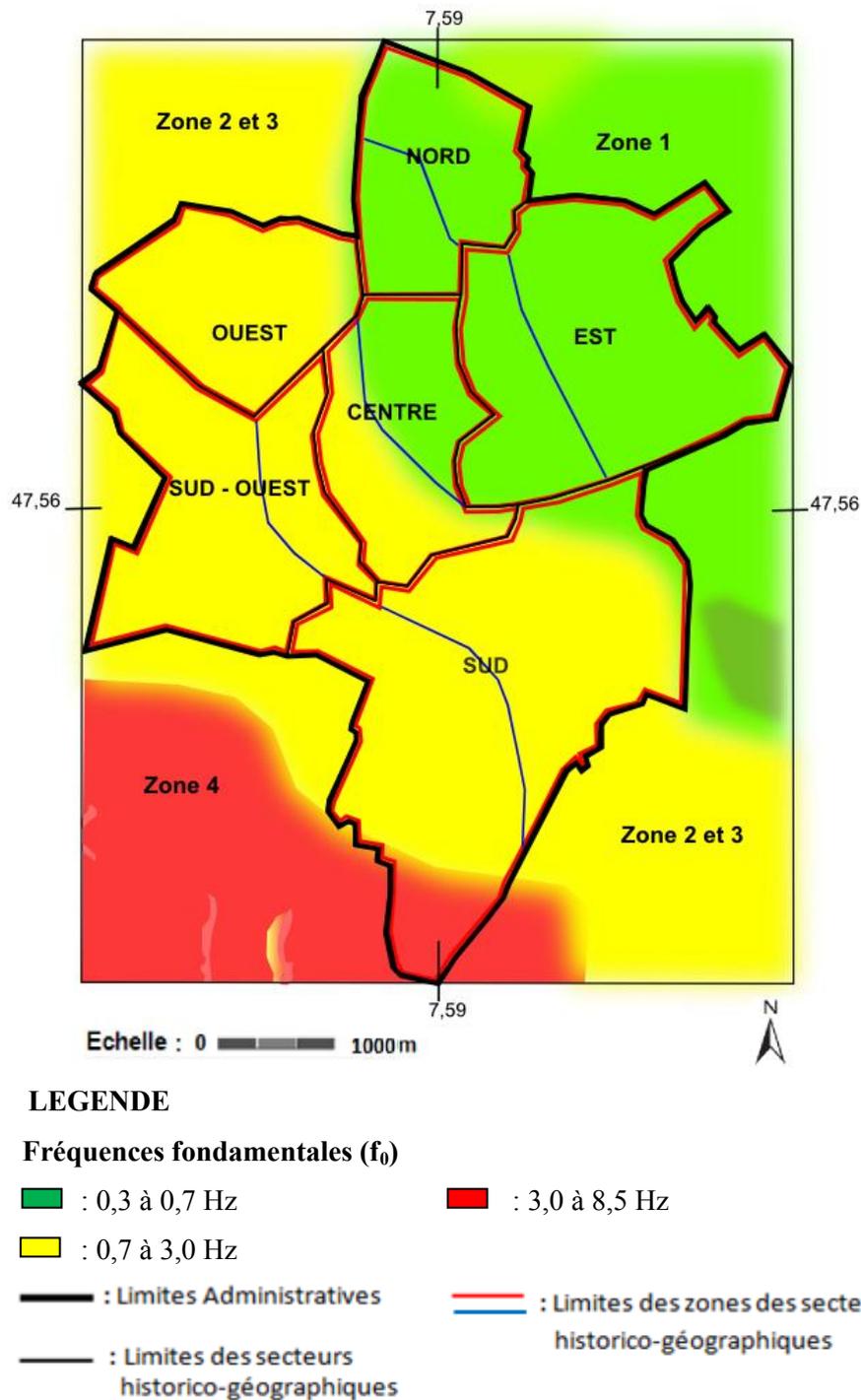


Figure n° 35 : Valeurs des fréquences fondamentales de Bâle et ses alentours
 Source : D'après [LESTUZZI et BADOUX 2008]

Les résultats des deux scénarios présentés par Beck et les accélérations de sol définies dans les deux études du BRGM sont convergents et varient de $1,17\text{m/s}^2$ (en moyenne) à Mulhouse et de $3,40\text{m/s}^2$ (en moyenne) à Bâle. Néanmoins, une sismicité d'intensité supérieure à VII, c'est-à-dire des accélérations de sol supérieures à $1,10\text{ m/s}^2$, bien au delà des accélérations préconisées par la réglementation Européenne et Suisse n'est pas à exclure comme l'ont montré les études de Beck et du Bureau des Recherches Géologiques et Mi-

nières soit de 2,50m/s² (en moyenne) à Mulhouse et de 3,40m/s² (en moyenne) à Bâle. Ainsi, les accélérations de sol définies par les études que nous venons d'évoquer apparaissent dans le tableau suivant (Tableau n° 17).

Tableau n° 17 : Valeurs des accélérations de sol minimum et maximum de Mulhouse et de Bâle et ses alentours

| VALEURS FOURCHETTES | MULHOUSE | BÂLE |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Accélération mini | 1,10 m/s ² | 1,10 m/s ² |
| Accélération maxi | 2,50 m/s ² | 3,40 m/s ² |

Source : [MOURoux et HERRERO 1990 ; MARÇOT et ARNAL 2004 ; MOURoux et THIERRY 2003; BECK 2006 ; LESTUZZI et BADOUX 2008]

Dans notre étude nous allons prendre une accélération de sol égale à 1,10 m/s² conformément aux préconisations de la nouvelle réglementation parasismique. Il est possible de prendre en compte les accélérations maximum précitées (Tableau n° 17). Ce choix peut entraîner des surcoûts pour réaliser le confortement parasismique du bâti et par conséquent risquent de dépasser la valeur vénale du bâtiment. Les études de la zone urbaine de Mulhouse - Bâle ont permis de localiser quatre zones d'amplification des mouvements sismiques. L'étude réalisée en 2004 sur le territoire de Mulhouse par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières précise des coefficients majorateur variant de 1,20 à 1,70 (figure n° 32). Les phénomènes de résonance avec le bâti ne sont pas à exclure [BETBEDER-MATIBET, 2003]. Les processus de liquéfaction pourraient se produire aux abords des cours d'eau de Mulhouse et de Bâle où les formations superficielles sont assez sableuses et l'eau très présente.

Conclusion du chapitre 3

Les résultats obtenus dans les études précitées ont été définies selon une approche déterministe à partir de la sismicité du passé et d'un modèle sismique (loi d'atténuation). Les préconisations de la réglementation européenne s'appuyant sur un séisme de référence proviennent d'un traitement statistique probabiliste de la sismicité du passé. L'approche probabiliste est effectuée à partir de la loi de distribution de Gutenberg-Richter. Cette dernière donne le nombre de séismes en fonction de la magnitude ou de l'intensité épicentrale. L'utilisation d'une loi d'atténuation permet de quantifier les grandeurs physiques (accélération, vitesse ou déplacement de sol). La réglementation (européenne et suisse) préconise une valeur unique d'accélération de sol pour les deux villes étudiées. Or une accélération de sol définie par une loi d'atténuation dépend de la distance du couple source – site. Entre le Nord et le Sud la distance à la source est différente. Par conséquent une valeur unique est une valeur moyenne comportant une incertitude relative à la distance source – site. Cela explique notamment les valeurs d'accélération dite de " *Référence* " variant globalement de 10 à 20%, que le BRGM a obtenu dans son étude des installations industrielles à haut risque.

Les accélérations de sol que nous avons identifiées à travers les différents travaux montrent qu'elles sont très proches d'une étude à l'autre et très proche aussi des accélérations de sol préconisées par le règlement européen. Les deux villes comportent des zones susceptibles d'effets d'amplifications sismiques. La région Mulhousienne – Bâloise, active sismiquement, offre des enjeux humains, matériels et environnementaux vulnérables.

CHAPITRE 4 : Une conurbation très vulnérable

L'organisation spatiale de la ville, la diversité des secteurs historico géographiques en termes d'habitat, la densité de population de la ville dans les différents secteurs historico géographiques, la manière de vivre en ville, les activités qui justifient des mouvements de population entre leur logement et le lieu de travail constituent des facteurs à prendre en compte pour évaluer la vulnérabilité de la ville, des bâtiments face à l'aléa sismique notamment. Nous envisagerons essentiellement les données touchant à la répartition de la population (densité), et à la répartition nocturne et diurne. Nous insisterons aussi sur les bâtiments composant les villes et sur leurs structures plus ou moins résistantes.

1- Un découpage spécifique du territoire mulhousien et bâlois

Etudier le risque de pertes en vies humaines dû à l'effondrement des bâtiments collectifs à usage d'habitation implique nécessairement un découpage spécifique du territoire d'étude. Il s'agit de découper les villes de Mulhouse et de Bâle en plusieurs secteurs historico géographiques. Ce découpage va être réalisé à partir d'une étude de l'évolution historique de la composition du bâti. Cette étude va permettre tout d'abord d'identifier différents types de bâtiments, puis de distinguer dans ces deux villes, différents secteurs caractérisés chacun par un bâti spécifique dominant. Nous proposons d'utiliser les quatre points cardinaux pour localiser géographiquement les différentes zones qui vont être identifiées. Les travaux effectués à Mulhouse [SIMONET et MARÇOT 2004 ; DROUX 2013] fournissent un certain nombre de données. L'étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du Bureau des Recherches Géologiques et Minières [SIMONET F. et MARÇOT N., 2004 BRGM] montre qu'existent à Mulhouse des bâtiments d'âge différent, entre 1797 et 1997 (figure n° 36). Certains sont construits en maçonnerie de pierres naturelles, d'autres plus récents en briques de terre cuite ou en blocs de béton de granulats et pour d'autres encore plus récents en béton armé. Les maçonneries les plus anciennes ne comportent pas de renforcements parasismiques. Les bâtiments construits après les années 1950 où l'application de la réglementation parasismique est devenue obligatoire sont renforcés par des chaînages verticaux et horizontaux en béton armé. Cette enquête a recensé une population de bâtiments se composant de deux à cinq étages pour les constructions anciennes et de quatre à six étages pour les immeubles plus récents, voire plus pour des bâtiments en béton armé [SIMONET et MARÇOT 2004]. Au centre ville de Mulhouse se trouve les bâtiments

historiques et patrimoniaux : la tour du diable (XIII^e siècle), le temple Saint-Étienne (XIV^e siècle) et sur la place de la Réunion, l'hôtel de ville bâti au XVI^e siècle [MOREAU 1992]. Le développement industriel très considérable de Mulhouse au XIX^e siècle, justifie de nombreuses constructions d'âge différent.

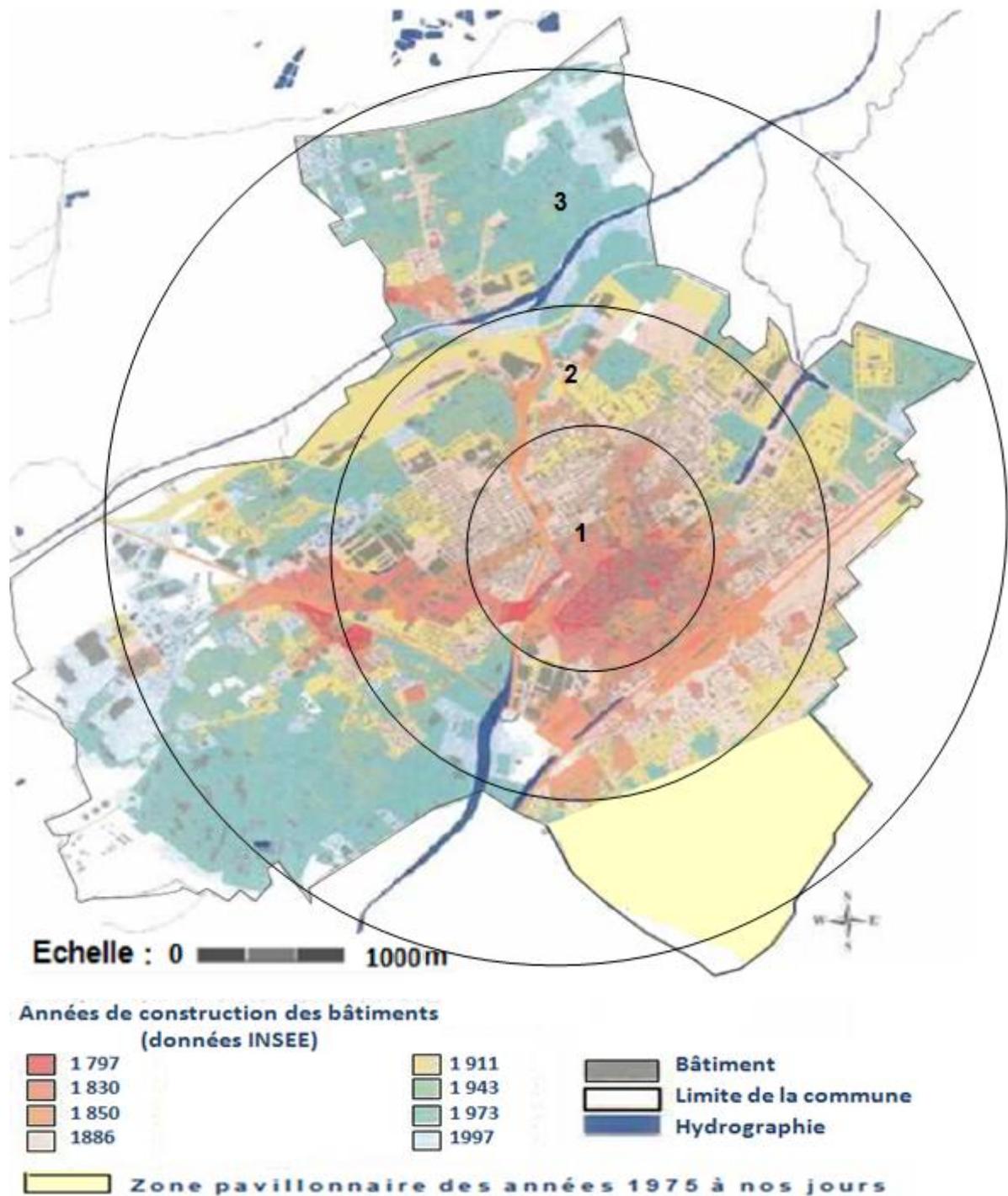
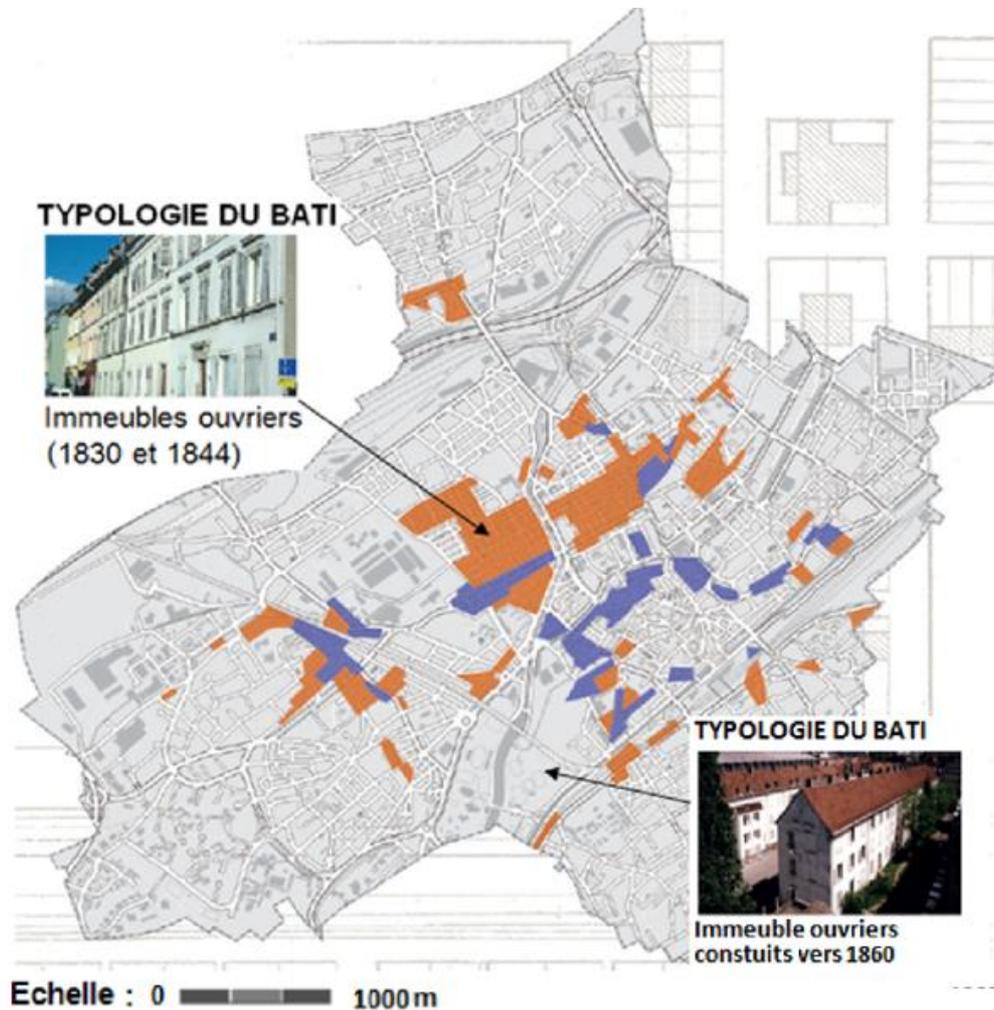


Figure n° 36 : Répartition des bâtiments de Mulhouse par quartiers historiques

Source : D'après [SIMONET et MARÇOT, 2004]

La cartographie précédente est caractérisée par trois zones de constructions d'âge différent. Dans la zone de première couronne (figure n° 36), on peut remarquer que le bâti dominant est très ancien, d'après Simonet et Marçot il s'agit d'un bâti datant du XVIIIe et XIXe siècle. Dans la zone de deuxième couronne (figure n° 36), l'âge du bâti dominant est plus nuancé. Au Sud à l'Ouest ainsi qu'au Sud-est le bâti semble plus ancien qu'au Nord de cette zone. Cela démontre que l'étalement urbain s'est d'abord développé au Sud, à l'Ouest et au Sud-est, puis au Nord. Enfin la dernière zone de troisième couronne (figure n° 36) qui couvre l'extrême Nord et l'extrême Sud-ouest et Est de la ville se compose d'un bâti plus récent des années 1945 à 1997. Il s'agit probablement de la zone d'extension de la ville la plus récente.

Jean-Philippe Droux (2013) retrouve la même chronologie du bâti. Entre les années 1850 à 1897, les constructions d'habitats collectifs en maçonnerie de pierres naturelles composées de 2 à 3 étages se multiplient. C'est le cas dans le quartier des Hauts-Poiriers dans le secteur Sud-ouest et dans les quartiers de Brustlein, de la Cité-Briant et de la Fonderie dans le secteur Ouest (figure n° 37). L'habitat résidentiel, en maçonneries, date des années 1900 autour de l'avenue de Lutterbach et de la rue Daguerre.



LEGENDE :

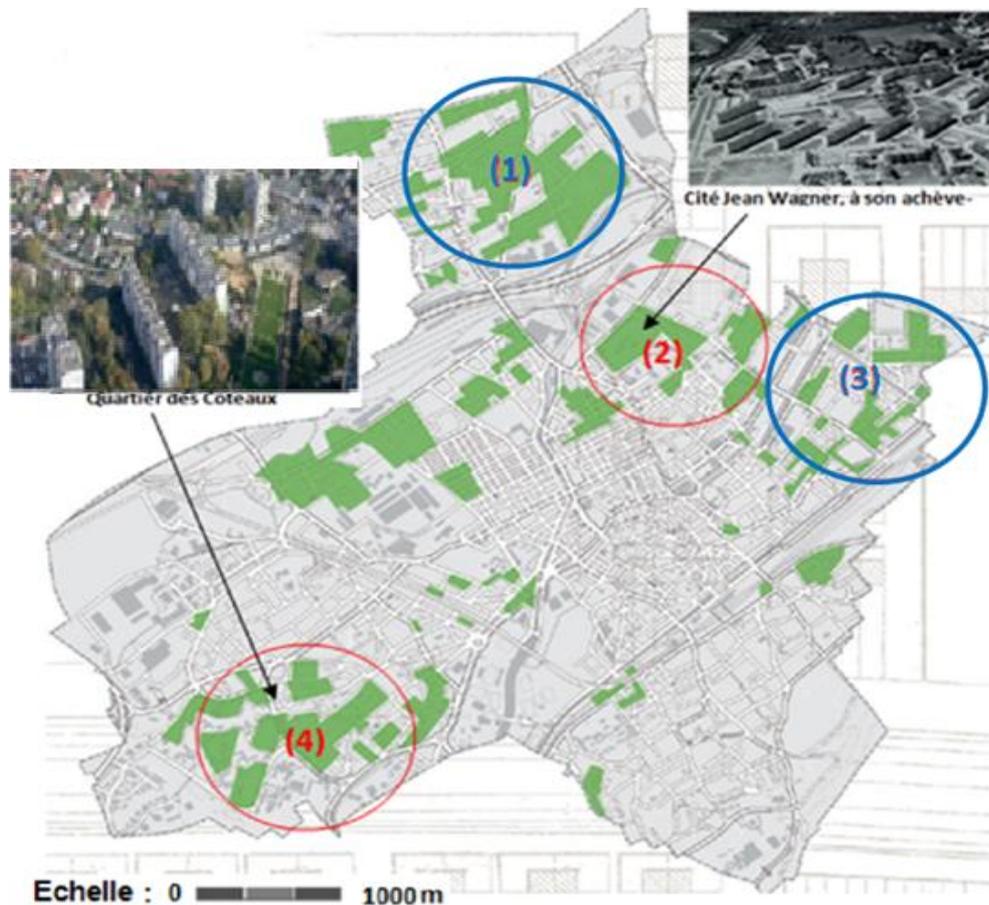
| Années | Nombre d'habitants | |
|--------|--------------------|-------------------------------------|
| 1800 | 7 000 | ■ Habitat édifié avant 1850 |
| 1850 | 33 000 | ■ Habitat édifié entre 1850 et 1897 |
| 1897 | 93 000 | |

Photo : Immeubles ouvriers rue Kléber construits entre 1830 – 1844 (Archives de Mulhouse)

Figure n° 37 : L'habitat populaire construit à Mulhouse avant 1897

Source : D'après [DROUX 2013 ; VIDAL]

Après 1918, Mulhouse saisit les possibilités offertes par la législation française, grâce à l'action de l'Office Public d'Habitations à Bon Marché (HBM) et de Sociétés coopératives. Un parc social complète le secteur privé et le logement patronal. Les destructions de 1944 aggravent la crise du logement et nécessitent une reconstruction considérable. De nouveaux quartiers voient le jour après 1950. Pendant les années 1960 et 1970 les ensembles d'Habitations à Loyer Modéré (HLM) se multiplient. Des constructions en maçonnerie de blocs de terre cuite de 4 à 6 étages et de grands ensembles de 6 niveaux ou plus en béton armé, comptent chacun quelques centaines de logements. C'est le cas des ensembles de Bourzwiller (1), de la cité Wagner (2), de la cité Sellier (3) et la cité des Coteaux – Bel air (4) (figure n° 38).



LEGENDE :

| Années | Nombre d'habitants |
|--------|--------------------|
| 1897 | 93 000 |
| 1977 | 116 000 |

■ Habitat édifié entre 1897 et 1977

○ : Bâtiments des années
1960 à 1970 en béton armé

○ : Bâtiments des années
1960 à 1970 en maçonnerie

Figure n° 38 : L'habitat populaire construit à Mulhouse de 1897 à 1977

Source : D'après [DROUX, 2013, 2013] ; [Photo AURM²³, 2013, Secteur d'habitat de la Zone à Urbaniser en Priorité (ZUP) de Mulhouse créée en 1960]

Après les Trente Glorieuses, Mulhouse connaît la désindustrialisation et les grands ensembles sont fortement remis en cause. Les classes moyennes s'installent en périphérie. Les possibilités d'extension sur le ban communal s'épuisent. On continue de construire, mais la taille des opérations se réduit à de petits immeubles de 2 à 4 niveaux en maçonnerie de blocs de béton de granulats. Des bâtiments de 4 à 6 étages construits en béton armé voient le jour. Ces constructions se localisent plus près du centre, de façon plus éparse (figure n° 39) et la rénovation prend une importance au moins égale à la construction neuve. Parallèlement, les constructions individuelles de type pavillonnaire se développent au sud de la ville.

²³ AURM : Agence d'Urbanisme de la Région Mulhousienne



LEGENDE :

| Années | Nombre d'habitants | |
|--------|--------------------|---|
| 1977 | 116 000 | Habitat édifié entre 1977 et 2012 |
| 2010 | 110 000 | Zone pavillonnaire 1900 à 2012 |

Figure n° 39 : L'habitat populaire construit à Mulhouse depuis 1977 à 2012
Avenue Aristide Briand. SOMCO²⁴

Rue Franklin. Immeuble ancien réhabilité en 2012, parc privé

Source : D'après [DROUX 2013, CCPM et Atelier de cartographie du CRESAT, fond de carte m2A, 2013] ; [KOHLER 2000]

²⁴ SOMCO : Société Mulhousienne des Cités Ouvrières

Ainsi, nous avons identifié à Mulhouse les différents types de constructions qui se décomposent en cinq types (Tableau n° 18).

Tableau n° 18 : Différents types de constructions de l'agglomération de Mulhouse et Bâle

| DIFFERENTS TYPES DE BÂTIMENTS COLLECTIFS A USAGE D'HABITATION | AGE DU BÂTI |
|--|--------------------|
| - Maçonneries en pierres naturelles | Antérieure à 1900 |
| - Maçonneries en blocs de terre cuite ou en béton de granulats | 1950 à 1970 |
| - Construction en béton armé | |
| - Maçonneries parasismiques en blocs de terre cuite ou en béton de granulats | 1970 à 1990 |
| - Construction en béton armé parasismique | 1990 à nos jours |

Source : [SIMONET et MARÇOT 2004 ; DROUX 2013 ; REITEL et TANNIER 2003]

Les études du Bureau des Recherches Géologiques et Minières [[SIMONET F. et MARÇOT N., 2004 BRGM] et de Jean-Philippe Droux [DROUX, 2013] ont montré que l'évolution historique de la ville a permis de distinguer cinq types de bâtiments différents et que l'étalement du bâti s'est développé d'une manière particulière. En effet, dans cette ville les premières constructions sont apparues dans le centre de la ville, puis s'est développée au Sud du centre ville et au Sud-est avec la gare des voyageurs. L'expansion de la ville s'est poursuivie à l'Ouest avec la gare de fret, pour terminer son étalement au Nord et au Sud-ouest avec un type de bâti principalement des années 1950 à 1970. Un découpage du territoire en plusieurs cercles successifs ne semble pas adapté. On peut remarquer par exemple, que dans la zone de la deuxième couronne à l'Ouest et à l'Est le bâti est composé d'un mélange de bâtiments d'âge différents. Dans les zones Nord et Sud-ouest l'âge du bâti semble plus récent et homogène. Le centre historique de la ville et dans la zone Sud le bâti est très ancien. Un découpage en secteurs historico-géographique semble plus adapté pour regrouper le bâti selon les différentes périodes de construction. Ainsi, nous proposons de découper le territoire en six secteurs historico-géographiques dont l'âge du bâti est similaire à l'intérieur d'un même secteur. Dans les secteurs Ouest et Est, les périodes de construction sont plus nuancées avec une combinaison de constructions datant du début du XIXe siècle, des années 1950 à 1970 et des années plus récentes (figure n° 40).

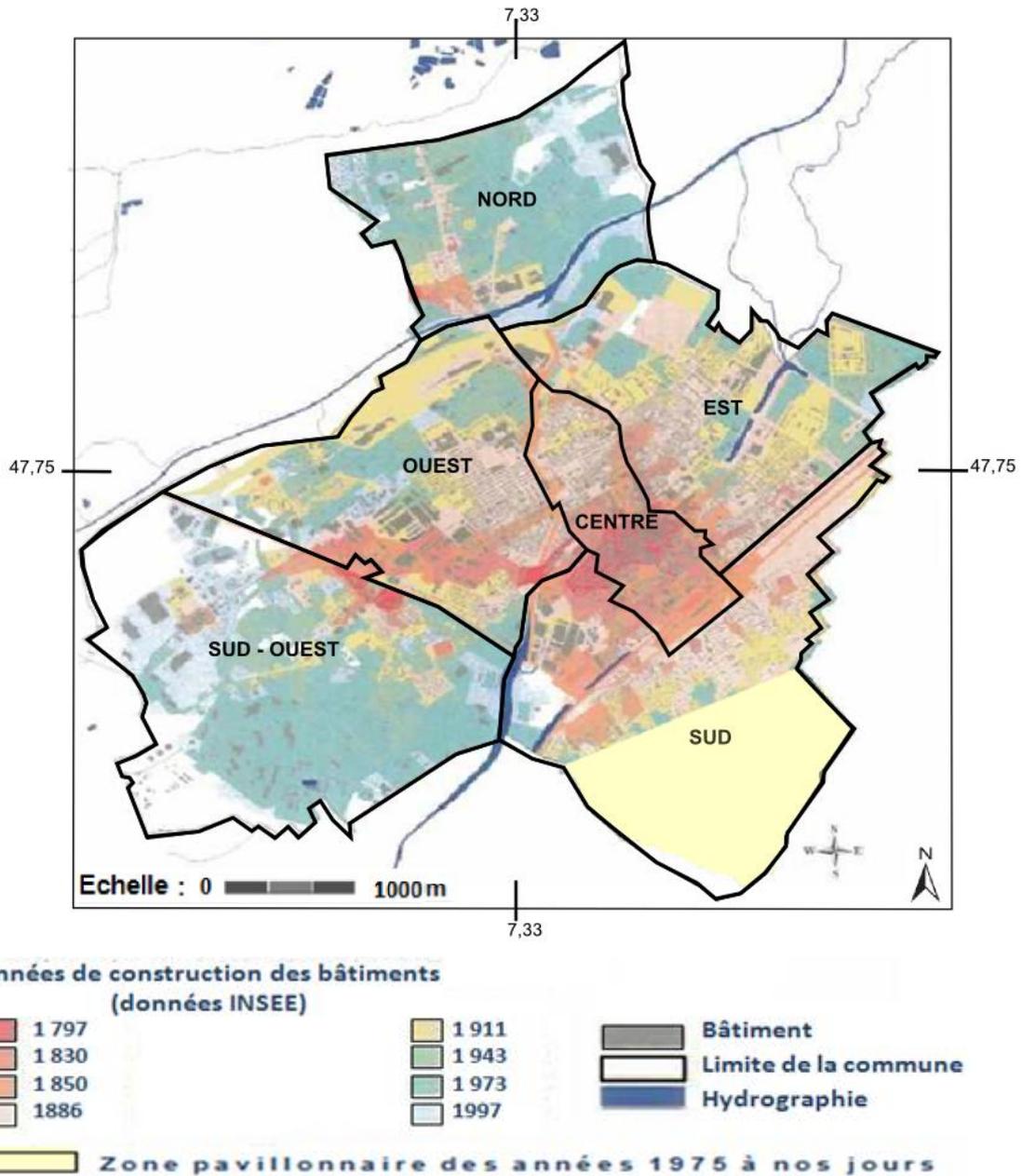


Figure n° 40 : Découpage du territoire de Mulhouse par secteur historico-géographiques selon l'évolution de l'âge du bâti

Source : D'après [SIMONET et MARÇOT, 2004]

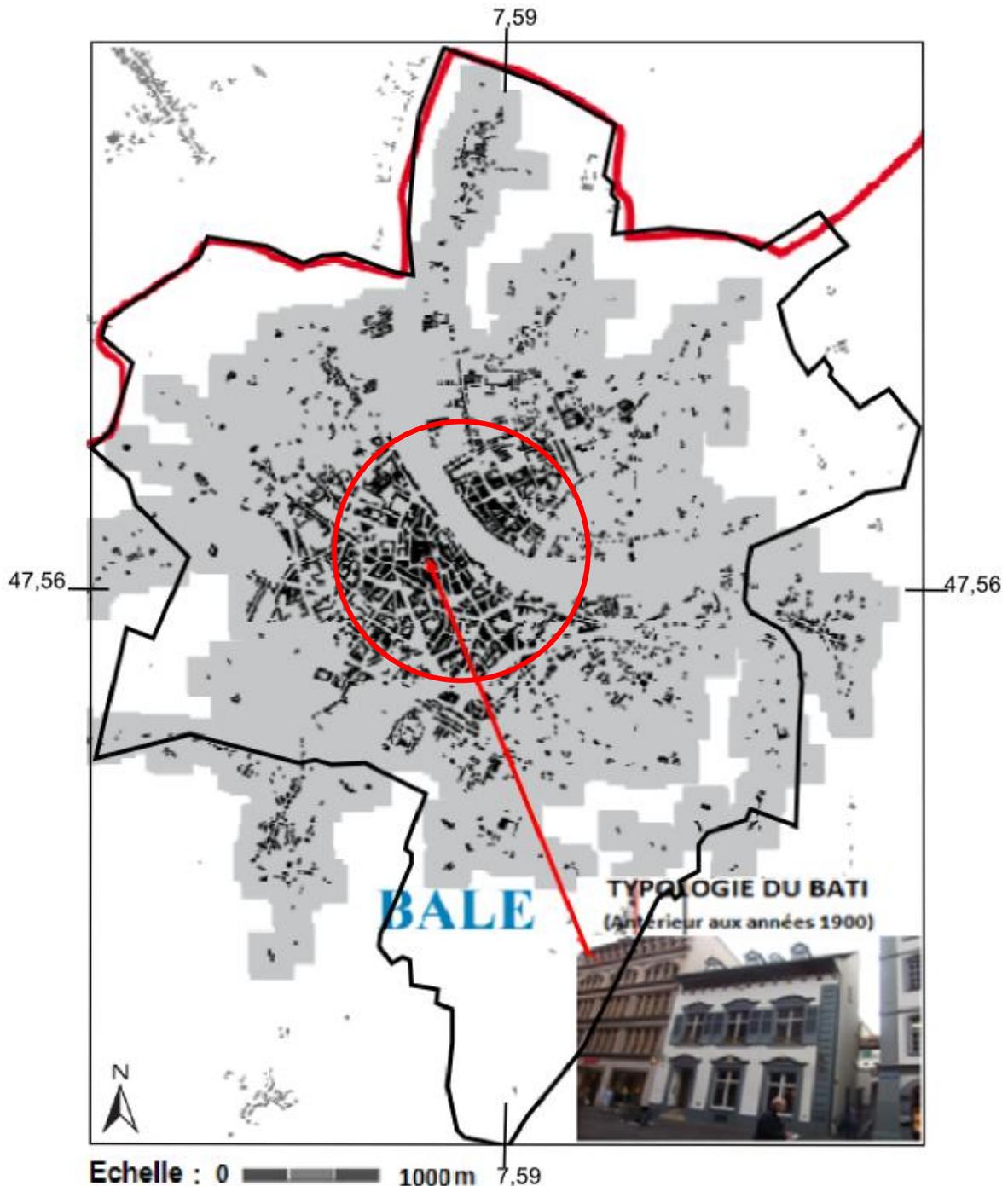
Le découpage du territoire envisagé montre que l'âge du bâti est similaire à l'intérieur de chaque secteur à l'exception des secteurs Ouest et Est. Plus on s'éloigne du centre ville, plus le bâti devient récent (figure n° 40).

L'évolution urbaine de Bâle est connue notamment grâce aux travaux de Reitel et de Tannier [REITEL et TANNIER 2003], Vuidel, Frankhauser [TANNIER et al. 2007]. Bâle s'est largement développé pendant l'essor industriel qui a commencé en 1880. Le centre ville comprend un grand nombre de bâtiments très anciens et notamment des hôtels particuliers du XIXème siècle. Les quartiers au Sud et à l'Est sont résidentiels, avec des maisons

individuelles et des espaces verts, tandis que l'Ouest est surtout constitué de barres d'immeubles et de zones industrielles. L'industrie se concentre aussi au nord de la ville. Des zones pavillonnaires existent aussi sur les hauteurs de la ville, notamment au Sud.

Les bâtiments collectifs datent des années 1890 aux années 2000, ils sont construits selon leur date d'implantation, de matériaux de type pierre naturelles, briques, blocs de béton de granulats et béton armé comme leurs voisins mulhousiens.

Le bâti ancien à Bâle (figure n° 41) est fait de pierres massives, il offre généralement deux à quatre étages et représente 30% du parc immobilier de la ville de Bâle [LANG et BACHMANN 2004].



LEGENDE :

— : Limites Administratives (actuelles)

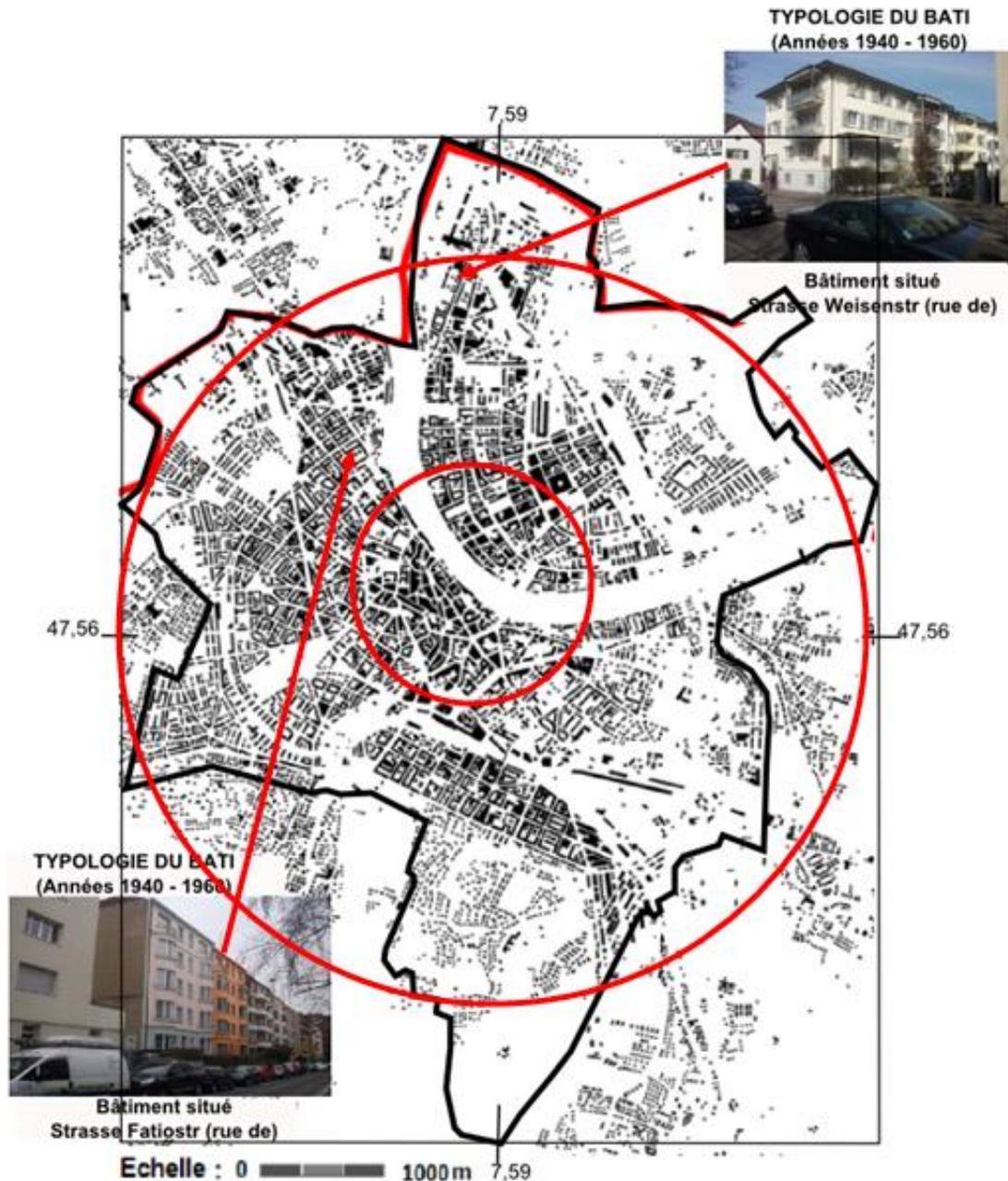
Figure n° 41 : Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1882

Source : [REITEL et TANNIER 2003] (modifié)

Photo – Enquête de terrain mars 2013 (J. Lemaire)

Les bâtiments construits dans les années 1940-1960 sont principalement en maçonnerie ou mixte (composé de poutres et poteaux en béton et de murs en maçonnerie de remplissage). Ils sont composés de 4 à 6 étages. Ce type de bâti représente environ un tiers de

la totalité de l'habitat collectif du parc immobilier actuel (figure n° 42) [LANG et BACHMANN 2004].



LEGENDE :

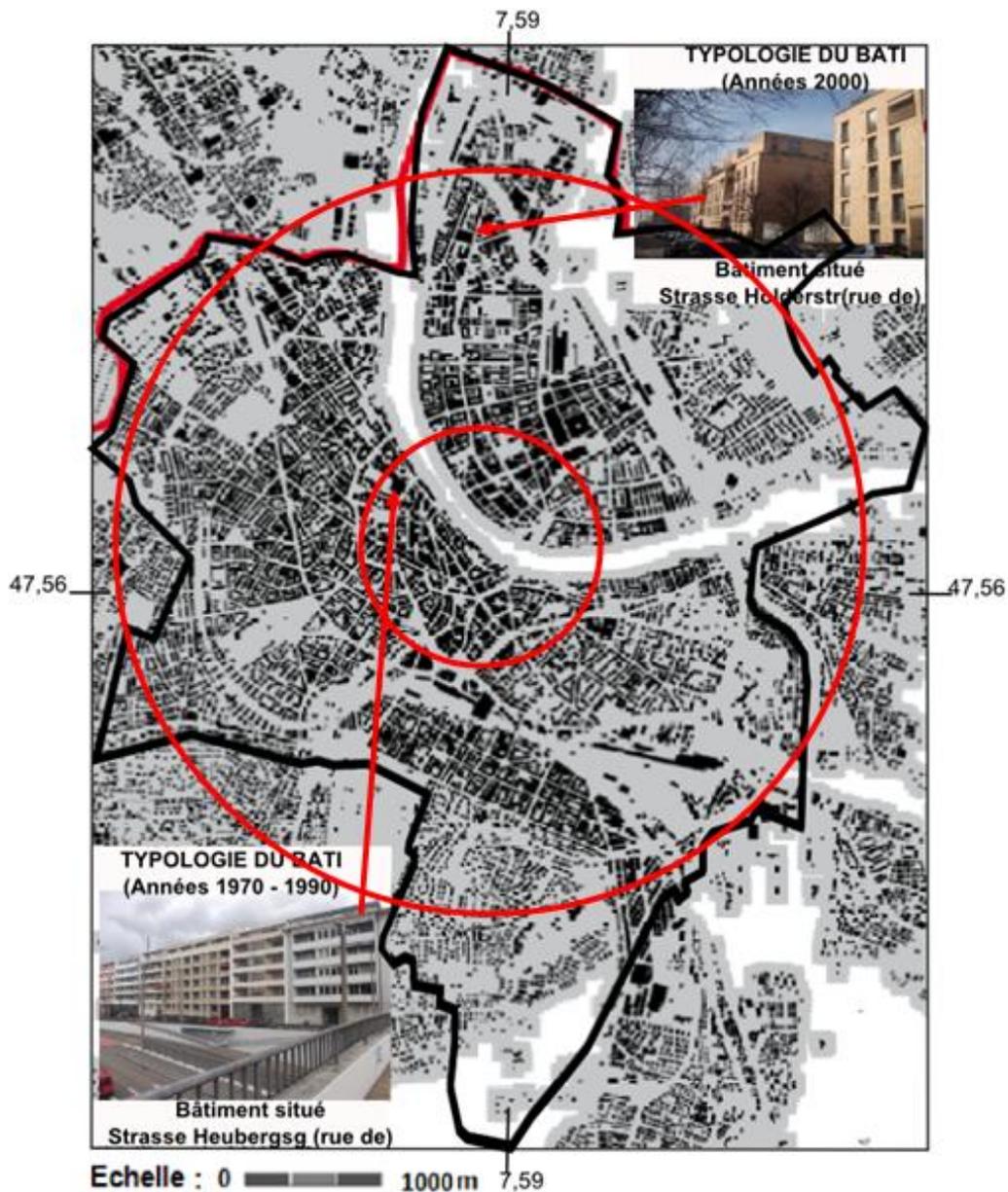
— : Limites Administratives (actuelles)

Figure n° 42 : Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1957

Source : [REITEL et TANNIER 2003] (modifié)

Photo – Enquête de terrain mars 2013 (J. Lemaire)

Dans la seconde moitié du XXe siècle les immeubles sont essentiellement en béton armé. La plupart de ces bâtiments sont venus remplacer des immeubles anciens très vétustes (figure n° 43). Selon l'étude réalisée par Lang et Bachmann, ce bâti récent occupe 40% de la totalité du parc immobilier bâlois actuel [LANG et BACHMANN 2004].



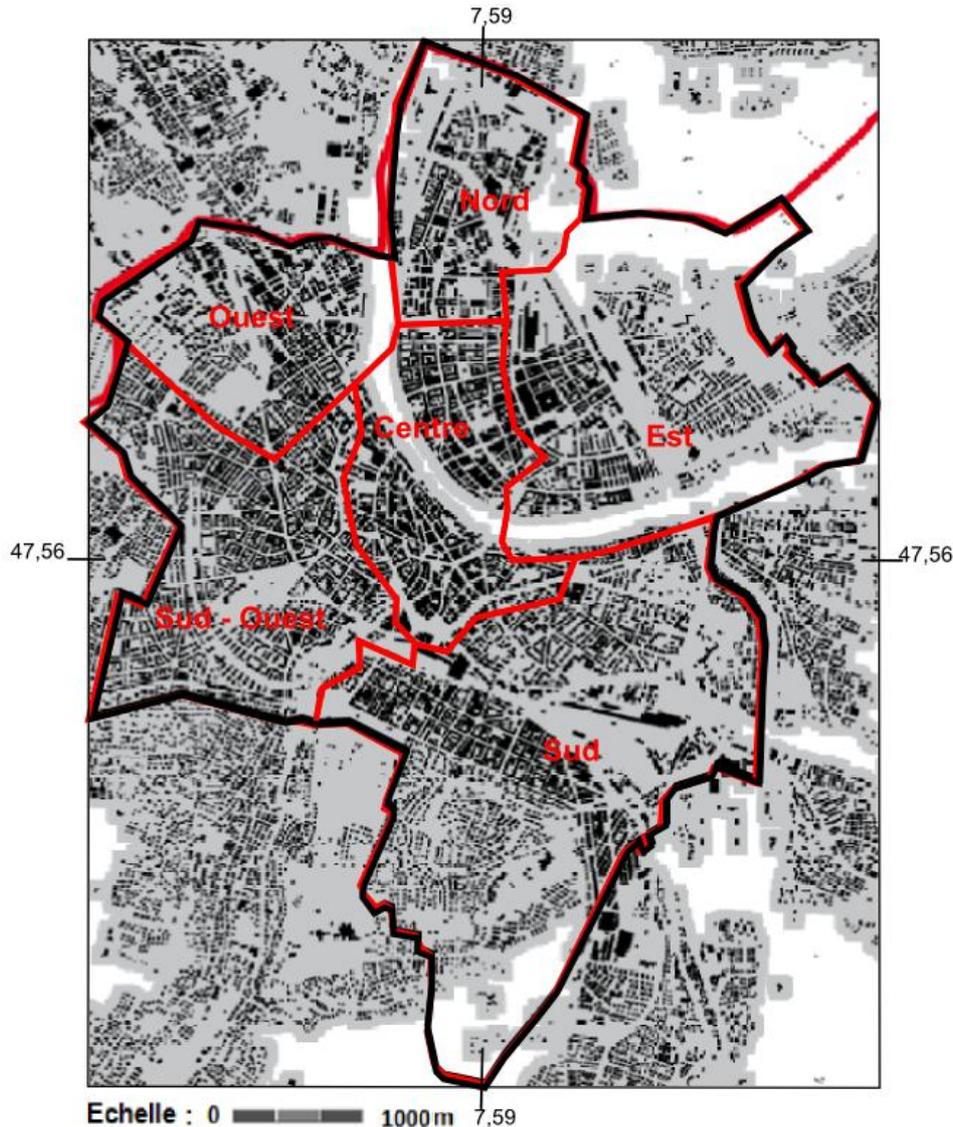
LEGENDE :

— : Limites Administratives (actuelles)

Figure n° 43 : Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1994
 Source : [REITEL et TANNIER 2003] (modifié)
 Photo – Enquête de terrain mars 2013 (J. Lemaire)

Ainsi, nous avons identifié dans la ville bâloise les mêmes types de constructions que dans la ville de Mulhouse. Cela provient essentiellement du fait qu'entre ces deux villes les périodes de construction sont identiques. A l'opposé de Mulhouse, le territoire de Bâle peut être découpé en deux cercles. Une première couronne marque le centre historique et une deuxième couronne plus élargie marque une période de construction plus récente où la ville a atteint sa forme actuelle dans les années 1950 à 1960. Dans cette couronne on peut aussi remarquer une troisième période de construction débutant dans les années 1960 à nos

jours. Ces bâtiments plus récents sont venus remplir les espaces vides de construction. Néanmoins, afin de rester cohérent entre le découpage du territoire mulhousien et bâlois, il est envisagé de découper le territoire de la ville de Bâle en secteurs historico-géographiques (figure n° 44).



LEGENDE :

————— : Limites Administratives (actuelles)

Figure n° 44 : Découpage du territoire de Bâle par secteur historico-géographiques selon l'évolution de l'âge du bâti

Source : [REITEL et TANNIER 2003] (modifié)

Photo – Enquête de terrain mars 2013 (J. Lemaire)

Il apparaît ainsi que Mulhouse et Bâle ont eu des périodes de construction très similaire avec une évolution différente de l'étalement du bâti. Ainsi, les différentes données envisagées de [SIMONET et MARÇOT 2004] ; [DROUX 2013 ; VIDAL ; KOHLER 2000] pour Mulhouse ; [LANG et BACHMANN 2004] ; [REITEL et TANNIER 2007; TANNIER et *al.*

2007] pour Bâle ont permis de distinguer dans ces deux villes cinq types de bâtiments différents et six secteurs historico-géographiques caractérisés chacun par un bâti spécifique dominant. Lorsque l'on étudie la vulnérabilité de la population, celle-ci dépend de la répartition des habitants dans les lieux d'habitation selon le moment de la journée ou de la nuit. La densité de population constitue un critère majeur de vulnérabilité de la population qu'il faut évaluer.

2- La population et densité de l'agglomération Mulhouse – Bâle

Mulhouse est une ville qui compte 110 351 habitants (2011) selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques [INSEE – 2011] répartis sur 22,20 Km². La ville de Bâle comptabilise 158 928 habitants (2011) selon l'Office Fédéral de la Statistique [OFS – 2011] répartis sur une superficie identique à celle de Mulhouse. Dans notre étude, la vulnérabilité au risque sismique de la population est évaluée par une approche quantitative. La densité de population rapportée à la superficie réelle d'emprise au sol du bâti rend compte plus précisément de la vulnérabilité des habitants dus à l'effondrement du bâti [MOULINIÉ et NAUDIN-ADAM 2005, IAURIF²⁵]. Il nous paraît donc important de s'intéresser à quel moment, de jour ou de nuit la concentration de la population est la plus forte dans les lieux d'habitation. L'occupation des lieux de domicile varie d'un moment à l'autre en fonction de l'activité et des déplacements des habitants, selon qu'ils se rendent sur leur lieu de travail, leur lieu d'activité, etc. L'heure de l'aléa de jour ou de nuit constitue donc un critère d'évaluation de la vulnérabilité de la population puisque l'occupation des lieux d'habitation n'est pas identique.

Le BRGM a réalisé une étude de la vulnérabilité de la population mulhousienne [MARÇOT et ARNAL 2004]. L'occupation des différents espaces urbains est envisagée la nuit et le jour et selon le découpage des îlots Regroupés pour des Indications Statistiques (IRIS²⁶). Les auteurs admettent que dans la journée 70% de la population se trouve hors de son domicile et que 30% se trouve à son domicile. De nuit, 99% de la population est considérée se trouver à domicile. Dans cette étude, les lieux hors domicile ont été dénommés " *Bâtiments Autres* ", c'est-à-dire les bâtiments destinés à une fonction autre qu'à usage d'habitation. Ces lieux ont été identifiés comme étant des complexes industriels, commerciaux et d'activités recevant du public. Ainsi, la répartition des habitants de jour et de nuit est détaillée dans le tableau suivant (Tableau n° 19).

²⁵ IAURIF : Institut d'Aménagement d'Urbanisme d'Ile – de – France

²⁶ IRIS : Unité de découpage pour le recensement de la plupart des communes de 5 000 à 10 000 habitants et de toutes les communes urbaines de plus de 10 000 habitants

Tableau n° 19 : Répartition de la population de jour et de nuit à Mulhouse.

| Types de bâtiments | NOMBRE DE PERSONNES | | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | Nuit (20h00 à 6h00) | | Jour (6h00 à 20h00) | |
| - A usage d'habitation | 109 049 | (99%) | 34 108 | (30,0%) |
| - " Autres " | 1 870 | (1%) | 76 811 | (70,0%) |
| Total = | 110 919 | (100,0%) | 110 919 | (100,0%) |

Source : [MARÇOT et ARNAL 2004]

Les résultats précédents nous informent de l'heure de l'aléa qui nous intéresse dans le cadre de notre étude dont le créneau horaire s'étale de 20h00 à 6h00 du matin. Autrement dit, la population est le plus concentrée dans les lieux d'habitation durant la nuit. Nous envisageons d'intégrer la répartition de nuit proposée par le BRGM dans notre modèle d'évaluation de la densité de répartition de la population.

La densité de la population constitue un autre critère d'évaluation de la vulnérabilité de la population puisque cette dernière est rapportée à la superficie réelle d'emprise au sol du bâti. En effet, plus la population est concentrée dans une zone, et plus elle est vulnérable. Cela s'explique par le fait qu'en cas de séisme, une zone concentrée est susceptible d'entraîner plus de pertes humaines qu'une zone moins dense. Ainsi, il est important, non seulement d'évaluer mais aussi de localiser les zones concentrées de population à Mulhouse et à Bâle.

Mulhouse a fait l'objet d'une étude de la vulnérabilité de la population. Dans son étude, Beck [BECK 2006] utilise le critère de la densité de population. Elle a utilisé les données de population fournies par le recensement (IRIS²⁷ 1999) et la superficie réelle d'emprise au sol du bâti. Une zone IRIS correspond à un découpage effectué par l'Institut National de la Statistique des Etudes Economiques, il définit la maille la plus fine pour la diffusion infra communale du recensement de la population. La superficie réelle d'emprise au sol du bâti, définie par Beck est la somme des surfaces d'emprise au sol de tous les bâtiments collectifs de chaque îlots, en excluant les zones non bâties (rues, emprise des réseaux de transport, cours d'eau, friches, etc.). Pour déterminer la densité de population, l'auteur a superposé la carte du découpage (IRIS) des îlots contenant les données de population et la carte (BD Topo®) de la surface du bâti pour identifier les bâtiments inclus dans chaque îlot. Puis la surface totale occupée par les bâtiments de chaque îlot est calculée. La densité de population résulte du rapport du nombre d'habitant de chaque îlot étudié et de la superficie réelle d'emprise au sol des bâtiments associés à chacun des îlots. L'auteur remarque aussi que les bâtiments comportent généralement un commerce au rez-de-

²⁷ IRIS : Îlots Regroupés pour des Indications Statistiques

chaussée et des habitations aux étages supérieurs, ou la combinaison d'habitations et de bureaux. Dans le cas de figure des bâtiments multi-fonctions, l'auteur a identifié ceux-ci comme étant des bâtiments à usage d'habitation, ce qui bien sûr biaise quelque peu les résultats (figure n° 45).

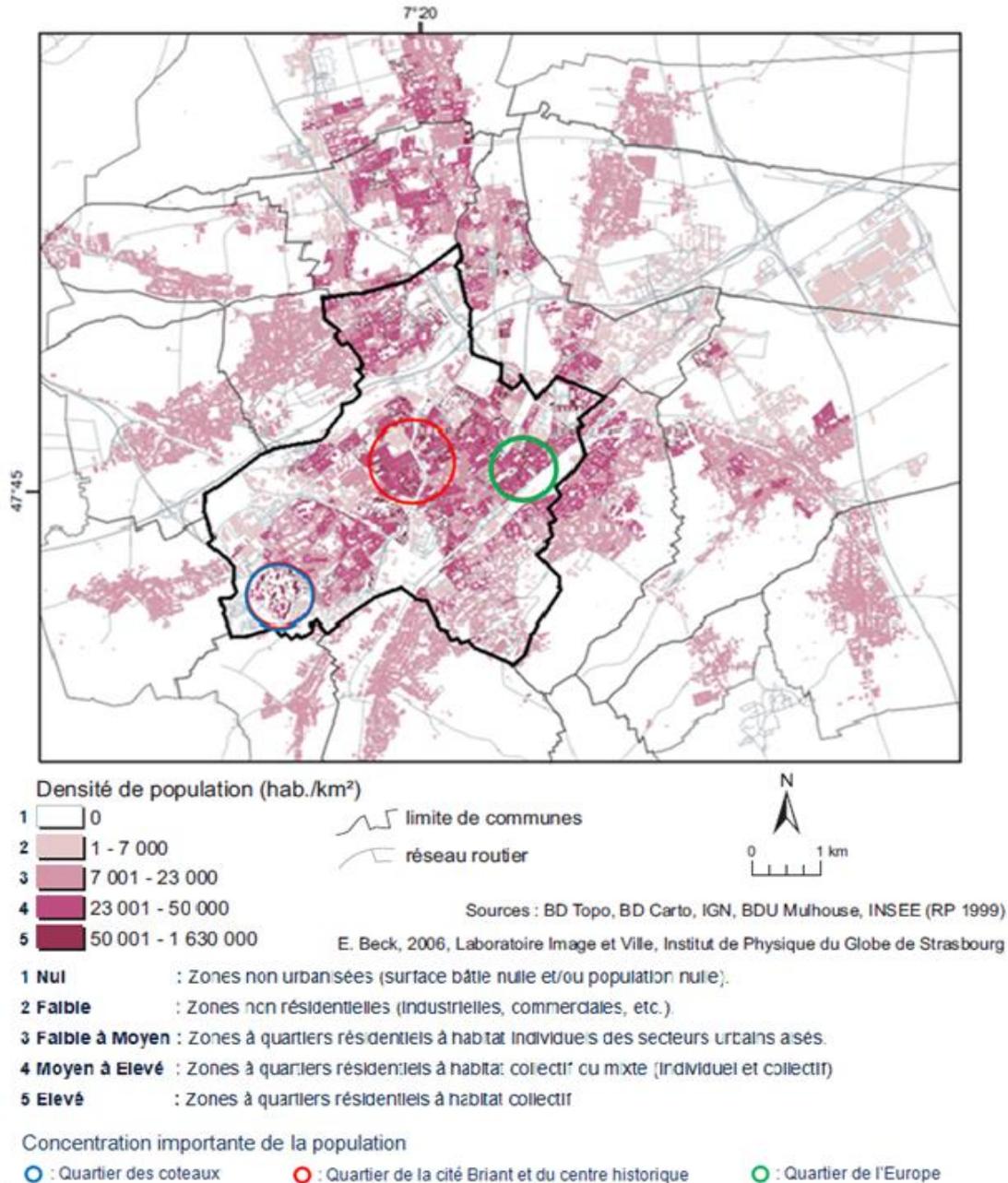


Figure n° 45 : Densité de population ramenée à la surface bâtie à Mulhouse
Source : [BECK 2006]

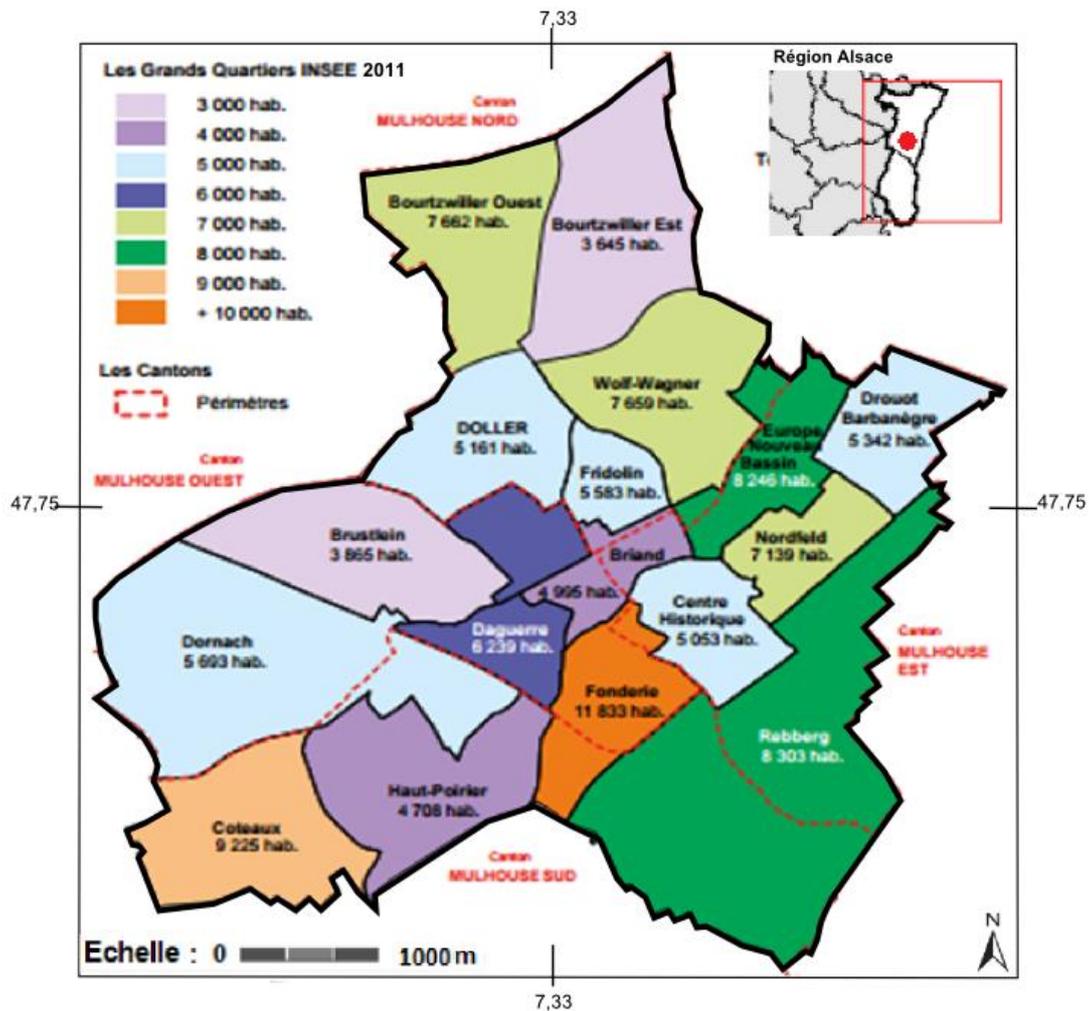
Selon les résultats précédents, les densités de population les plus élevées se trouvent au Sud-ouest à l'Est ainsi que dans le centre ville de Mulhouse. La méthode réalisée par l'auteur est très précise, mais très complexe à réaliser puisqu'il faut mesurer et calculer la surface d'emprise au sol de chaque bâtiment. Ici, nous n'envisageons pas de procéder de cette façon. Nous n'allons pas évaluer directement la superficie réelle d'emprise au sol du

bâti. Pour s'assurer de la validité de la méthode simplifiée d'évaluation de la vulnérabilité de la population que nous envisageons, les résultats obtenus par BECK dans son étude et les résultats que nous allons obtenir avec notre méthode simplifiée seront comparés en ce qui concerne la ville de Mulhouse.

Dans notre étude on s'intéresse à la densité de population de la ville de Mulhouse mais également à celle de Bâle. Aucune étude telle que celle menée par BECK n'a été réalisée à Bâle. Aussi, pour pallier la difficulté de calculer la superficie réelle d'emprise au sol du bâti bâtiment par bâtiment, nous proposons une méthode simplifiée pour évaluer la densité de population qui pourra être utilisée pour la ville de Bâle. Dans notre méthode simplifiée, nous envisageons d'évaluer et d'identifier les zones plus ou moins vulnérables, c'est-à-dire les secteurs historico-géographiques plus ou moins densément peuplés. Notre approche se résume à collecter des données de recensement de la population (étape 1), puis à calculer la superficie réelle d'emprise au sol du bâti (étape 2) afin de déterminer la densité de population (étape 3).

Ainsi, les données de la population de Mulhouse sont extraites de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE, RP 2011 et 2013) et celles de Bâle sont relevées de l'Office Fédéral de la Statistique (OFS – 2011 et 2013) (étape 1). Les cartes suivantes détaillent les données de population nécessaires pour déterminer la densité de population (figures n ° 46 et 47).

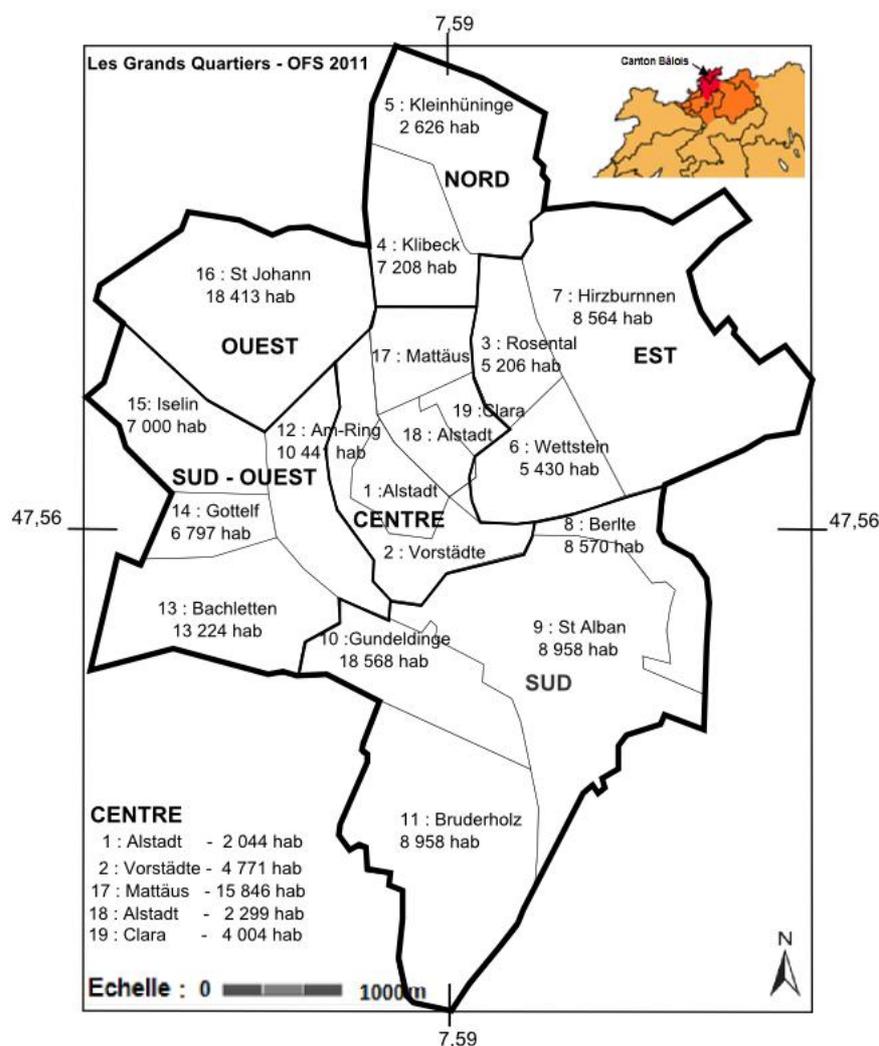
POPULATION DE MULHOUSE



| SECTEURS HISTORICO-GEOGRAPHIQUES | POPULATION | POPULATION |
|--|------------------------|------------------------|
| Population totale | 110 351 ⁽¹⁾ | 113 766 ⁽²⁾ |
| Augmentation de la population | 3,095% | |
| Centre ville | 15 636 ⁽¹⁾ | 16 120 ⁽³⁾ |
| Secteur Nord | 11 307 ⁽¹⁾ | 11 657 ⁽³⁾ |
| Secteur Est | 28 386 ⁽¹⁾ | 29 265 ⁽³⁾ |
| Secteur Sud | 15 136 ⁽¹⁾ | 15 605 ⁽³⁾ |
| Secteur Sud- ouest | 19 626 ⁽¹⁾ | 20 232 ⁽³⁾ |
| Secteur Ouest | 20 260 ⁽¹⁾ | 20 887 ⁽³⁾ |
| (1) : Données provenant de l'INSEES 2011 – Édito Mulhouse | | |
| (2) : Données provenant de l'INSEES 2013 | | |
| (3) : Données calculées | | |

Figure n° 46 : Découpage par secteur du territoire de Mulhouse et données de population
 Source : [Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, INSEE, 2011 ; Géo portail – Carte IGN – Édito Mulhouse avec source INSEE 2011]

POPULATION DE BÂLE



| SECTEURS HISTORICO-GEOGRAPHIQUES | POPULATION | POPULATION |
|--|------------------------|------------------------|
| Population totale | 158 928 ⁽¹⁾ | 163 462 ⁽²⁾ |
| Augmentation de la population | 2,852% | |
| Centre ville | 28 964 ⁽¹⁾ | 29 790 ⁽³⁾ |
| Secteur Nord | 9 834 ⁽¹⁾ | 10 115 ⁽³⁾ |
| Secteur Est | 19 200 ⁽¹⁾ | 19 748 ⁽³⁾ |
| Secteur Sud | 45 055 ⁽¹⁾ | 46 340 ⁽³⁾ |
| Secteur Sud-ouest | 37 462 ⁽¹⁾ | 38 530 ⁽³⁾ |
| Secteur Ouest | 18 413 ⁽¹⁾ | 18 938 ⁽³⁾ |
| (1) : Données provenant de l'INSEES 2011 – Édito Bâle | | |
| (2) : Données provenant de l'INSEES 2013 | | |
| (3) : Données calculées | | |

Figure n° 47 : Découpage par secteur du territoire de Bâle et données de population

Source : [Office fédéral de la statistique (OFS) – 2011, GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel]

Notre démarche se poursuit par une évaluation de la superficie réelle d'emprise au sol du bâti (hors superficie des réseaux de communication) qui est obtenue par le produit de la surface d'emprise au sol des groupes de bâtiment, comprenant la superficie des réseaux de communication et d'un coefficient que les urbanistes appellent le "*Coefficient d'emprise au sol du bâti*".

La superficie d'emprise au sol des groupes de bâtiments est calculée en réalisant un métré surfacique des groupes de bâtiment par îlots à partir de la cartographie de l'Institut Géographique Nationale (IGN) disponible sur le site Géo portail [Géo portail – Carte IGN]. Pour Bâle, cette information sera obtenue à partir de la cartographie disponible sur le site Géo portail [GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel]. Ces cartes sont annexées [Annexe – Chapitre 4 – Figures n° A 4 et A 5].

Le "*Coefficient d'emprise au sol du bâti*" est égal au rapport de la surface réelle du bâti (hors superficie des réseaux de communication) et de la surface d'emprise au sol des groupes de bâtiment (y compris la superficie des voies de communication). Ce "*Coefficient d'emprise au sol du bâti*" va nous permettre de déduire aisément la superficie des réseaux de communication, afin d'obtenir la superficie réelle d'emprise au sol du bâti. Ce coefficient d'emprise au sol du bâti est défini à partir d'une étude d'urbanisme qui a été réalisée à l'initiative de la Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme FNAU²⁸, effectuée par Belliot et al. [BELLIOT et al. 2006] qui est détaillé en annexe [Annexe – Chapitre 4 – Figures n° A 6]. Pour déterminer ce coefficient d'emprise au sol du bâti, nous avons réalisé une étude de la forme urbaine du bâti des différents secteurs historico-géographiques de Mulhouse et Bâle à partir de photos aériennes et de cartographies [Géo portail – Carte IGN ; GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel]. Cette étude est détaillée en annexe [Annexe – Chapitre 4 – Figures n° A 7 – Tableau A 4]. Il reste donc plus qu'à faire le produit de la superficie d'emprise au sol des groupes de bâtiment et du coefficient d'emprise au sol du bâti pour obtenir la superficie réelle d'emprise au sol du bâti [Annexe – Chapitre 4 – Tableau A 5], c'est-à-dire la surface du bâti hors voirie (étape 2). Ainsi, la densité de population est obtenue par le rapport entre les données de population collectées et la superficie réelle d'emprise au sol du bâti (étape 3).

Il est donc envisagé de déterminer la densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif implantés dans les différents secteurs du territoire de Mulhouse selon la méthode simplifiée que nous venons de détailler. La carte suivante renvoie à l'ensemble des résultats de la densité de population (figure n° 48).

²⁸ FNAU : Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme

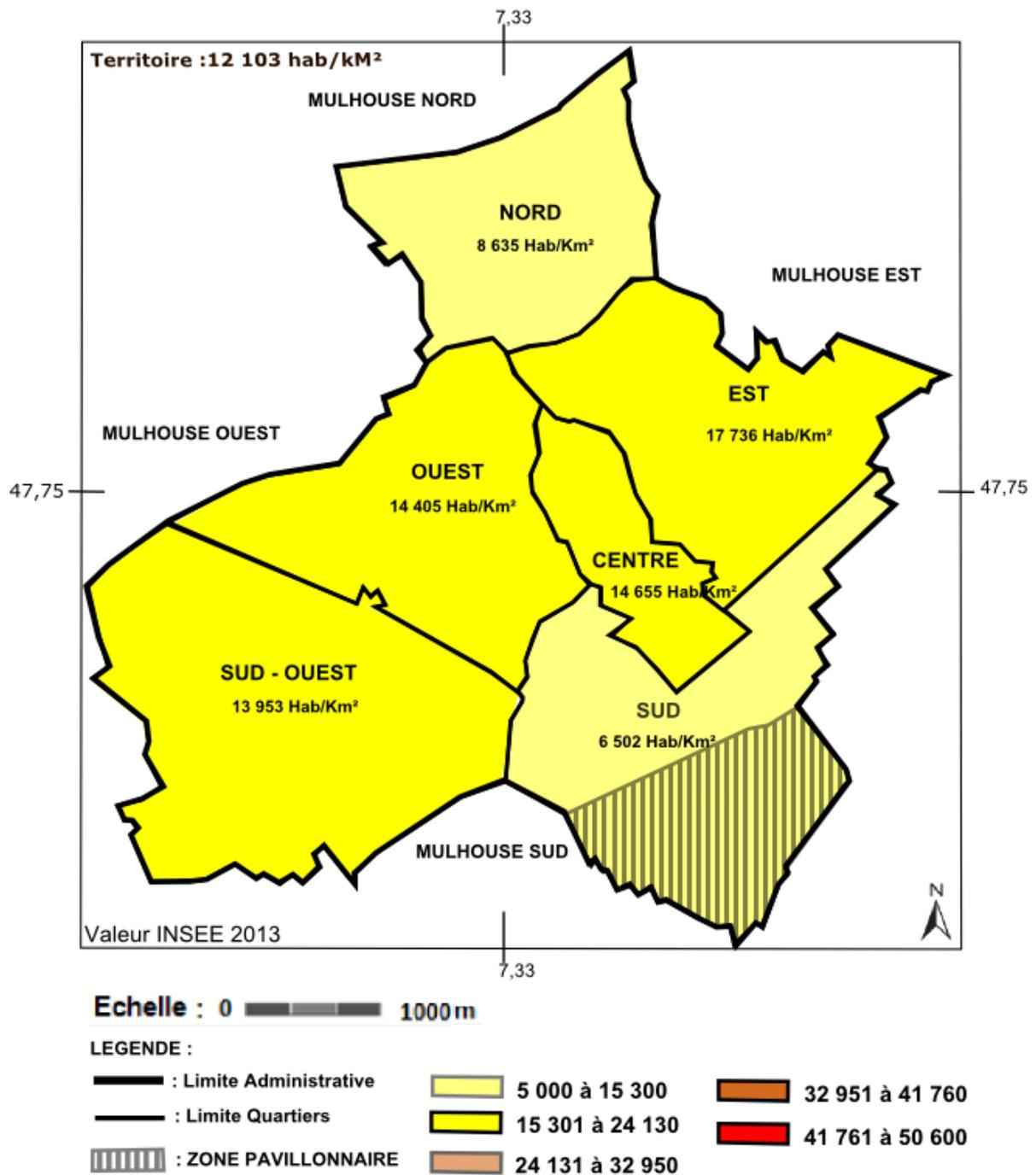


Figure n° 48 : Densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif mulhousien
 Source : [Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, INSEE, RP – 2013 ; Géoportail – Carte IGN]
 (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

La comparaison de la densité de population des différents secteurs historico-géographiques obtenus par Elise Beck et dans notre étude simplifiée montre des résultats très proches (Tableau n° 20). En revanche, les résultats obtenus dans le centre ville sont très éloignés.

Tableau n° 20 : Comparaison de la densité de population entre les résultats de l'étude d'Elise Beck et les résultats de l'étude réalisée dans le cadre de ce travail

| MULHOUSE | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|---------|--------------------------------|------------------------------|
| Secteurs | Densité (Hab. /Km²) | | | Comparaison |
| | E. Beck (2011) | | Etude* (INSEE 2011) | |
| | Valeurs | | | |
| | Fourchettes | Moyenne | | |
| Centre – ville | [50 000 à 1 630 000] | 840 000 | 14 215 | Résultats divergents |
| 1 : Nord | [7 001 à 23 000] | 15 000 | 8 502 | Résultats convergents |
| 2 : Est | [23 001 à 50 000] | 36 500 | 17 415 | Résultats convergents |
| 3 : Sud | [1 à 7 000] | 3 500 | 5 492 | Résultats convergents |
| 4 : Sud-ouest | [7 001 à 23 000] | 36 500 | 14 538 | Résultats convergents |
| 5 : Ouest | [7 001 à 23 000] | 36 500 | 14 898 | Résultats convergents |

Etude* : Résultat de l'analyse obtenus dans le cadre de notre étude

Source : [BECK 2006 ; [Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, IN-SEE, 2011]

Un contrôle plus détaillé s'avère nécessaire dans le secteur du centre-ville. Ce contrôle consiste à comparer les résultats obtenus par Beck et nos résultats avec les données de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE-2011). Il s'agit simplement d'évaluer le nombre d'habitants en réalisant le produit de la densité de population et de la superficie réelle d'emprise au sol du bâti. Les résultats comparatifs analysés sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau n° 21).

Tableau n° 21 : Mulhouse : Nombre d'habitants dans les quartiers du centre ville

| Secteur historico-géographique | Comparatif du nombre d'habitants | | |
|---------------------------------------|---|---|--|
| | Etude Beck (INSEE-2011) | Notre étude (INSEE-2011) | Données INSEE (Édito Mulhouse 2015) |
| Centre – ville | D = 50 000 Hab. / Km ² S = 1,10 km ² P = 55 000 Hab. | D = 13 135 Hab. / Km ² S = 1,10 km ² P = 14 449 Hab. | - - P = 15 631 Hab. |

Source : [BECK 2006 ; Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, INSEE 2011]

Le nombre d'habitants issu de l'étude d'Elise Beck est très éloigné du nombre d'habitants donné par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). En revanche, nos résultats sont très proches des données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Outre la divergence des résultats (nombre d'habitants), que nous avons constatée dans ce seul secteur historico-géographique (centre

– ville), nous admettons que la méthode simplifiée d'évaluation de la densité de population est valide au regard des résultats obtenus avec la méthode détaillée d'Elise Beck. Il nous est donc possible d'utiliser la méthode simplifiée, évoqué précédemment pour évaluer la densité de population du territoire de Bâle.

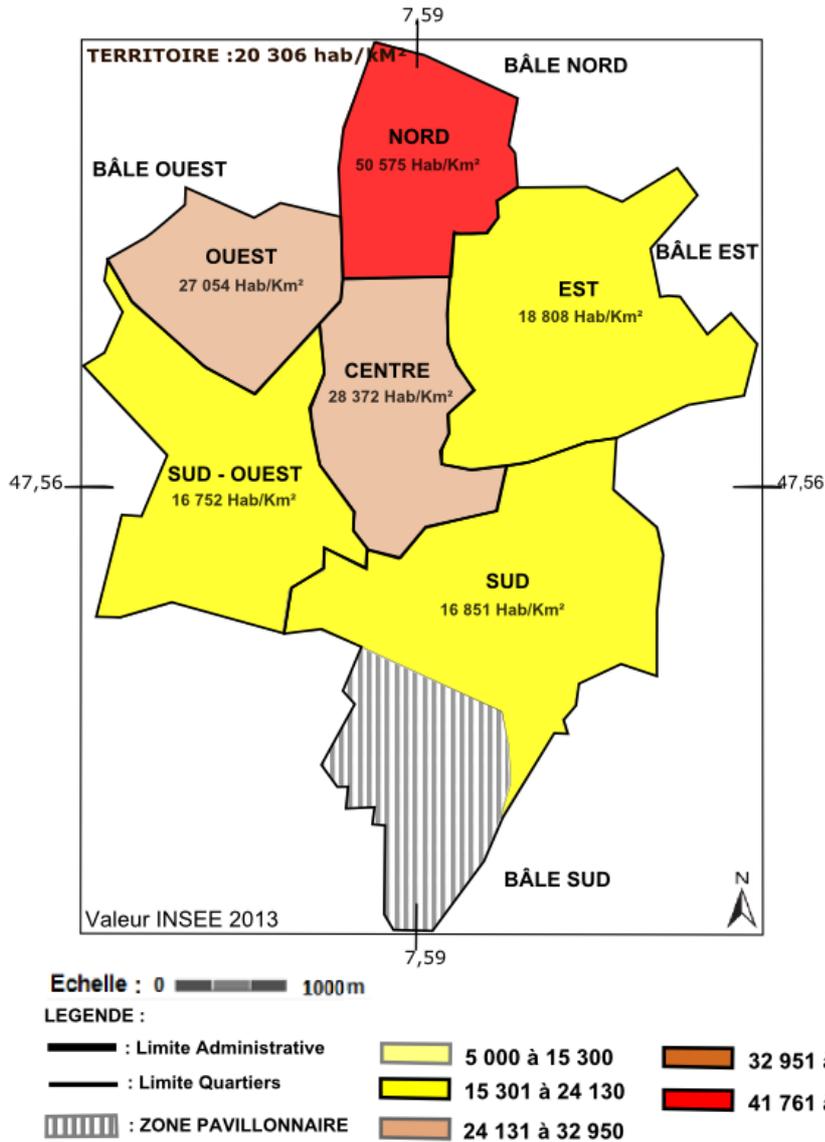


Figure n° 49 : Densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif bâlois
 Source : [Office fédéral de la statistique (OFS) – 2013 ; GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel]
 (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Entre Mulhouse et Bâle la densité de population sur le territoire global est plus importante à Bâle. Il nous paraît important de souligner que le nombre d'habitant est plus élevé Bâle et que la superficie des deux territoires est équivalente. A Mulhouse, la densité de population varie de 10 000 à 24 000 habitants par kilomètre carré d'un secteur historico-géographique à l'autre. A Bâle cette densité varie de 16 800 à 50 000 habitants par kilomètre carré.

Lorsque l'on étudie la vulnérabilité de la population due à l'effondrement du bâti collectif à usage d'habitation, cette vulnérabilité ne dépend pas uniquement de la densité de population. Elle dépend aussi de la résistance sismique du bâti. En cas de séisme, la fragilité des bâtiments constitue également un risque de pertes en vies humaines. La vulnérabilité physique des immeubles constitue un troisième critère de vulnérabilité de la population qu'il faut évaluer.

3- L'habitat dans la conurbation

Comment identifier la répartition des différents types de bâtiments implantés dans les territoires de Mulhouse et de Bâle ? La démarche de vérification de résistance du bâti est essentiellement basée sur des critères physiques. En utilisant ces critères, notre objectif est de collecter suffisamment d'informations pour distinguer les cinq types de constructions répartis dans la conurbation de Mulhouse – Bâle. Il s'agit des cinq types de constructions que nous avons identifiés précédemment. Les informations que nous envisageons de collecter sont relatives aux critères de résistance sismique précisés par l'Eurocode 8. Ces critères que nous avons évoqués au chapitre n° 2 (réglementation parasismique) ont notamment été définis à partir de constats de dégâts du passé. Outre l'âge du bâti, les critères principaux sont le type de matériaux de construction et la hauteur des immeubles.

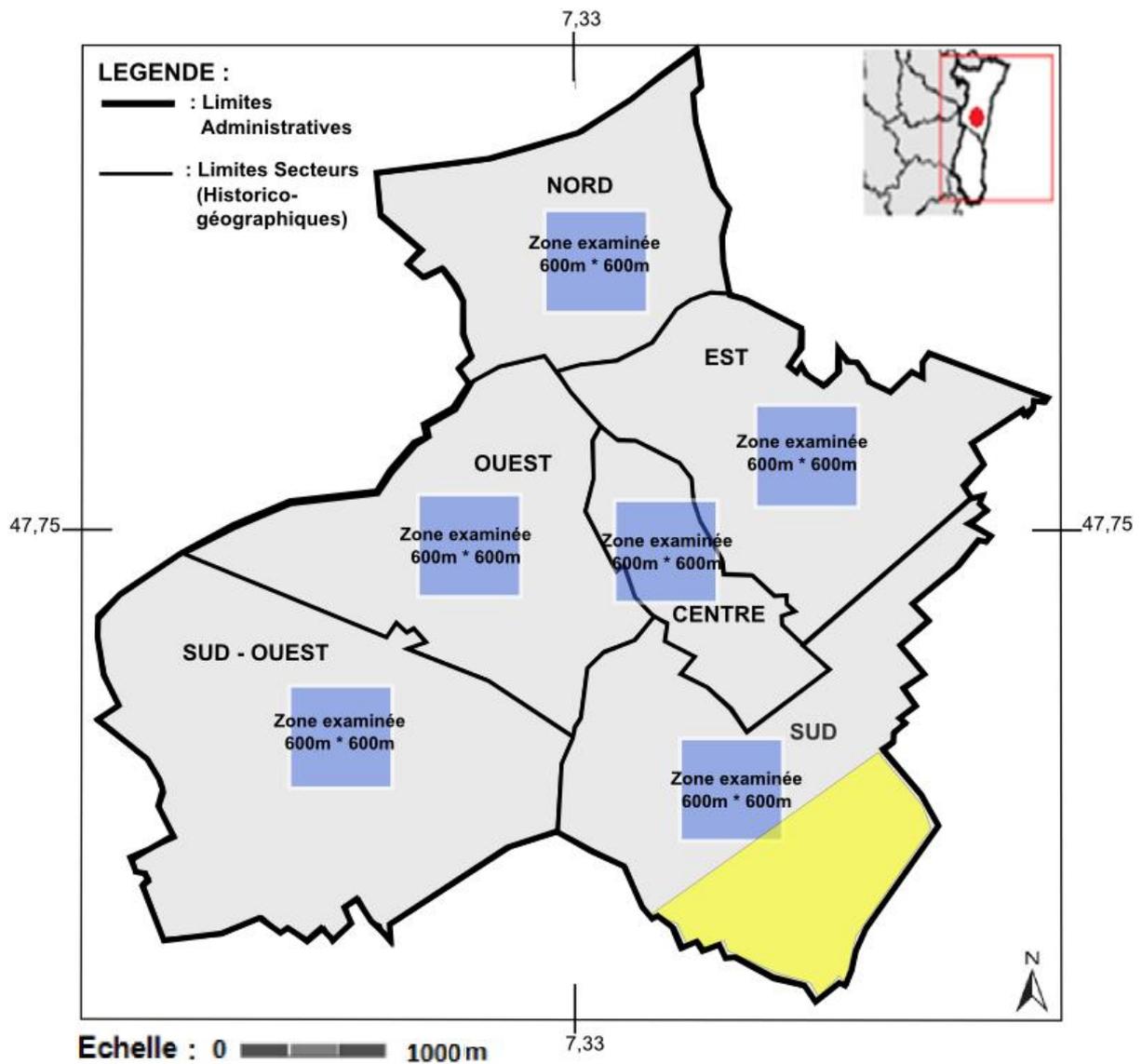
Une enquête de terrain fondée sur l'Eurocode

Les études des auteurs évoqués précédemment [SIMONET et MARÇOT 2004 ; BECK 2006 ; DROUX 2013] nous ont permis d'identifier cinq types de bâtiments (Tableau. n° 18) en fonction de l'âge des immeubles et des types de matériaux de construction. Dans le cadre de notre étude, le bâti est examiné par rapport aux exigences de l'Eurocode 8 dont les critères relèvent de l'âge du bâti, des types de matériaux de construction mais aussi de la hauteur des bâtiments. Examiner le bâti au regard de la nouvelle réglementation parasismique implique nécessairement une enquête de terrain. Les enquêtes menées sur le territoire de Mulhouse par Simonet et Marçot, Beck par et par Droux n'intègrent pas le critère de la hauteur du bâti. L'enquête de terrain envisagée, détaillée plus après, a pour principal objectif de collecter les données relatives à la hauteur du bâti mais elle nous a aussi permis de collecter les données relatives à l'âge du bâti et aux types de matériaux de construction et ce, afin de déterminer la localisation des bâtiments en fonction des critères définis par l'Eurocode 8. La méthode d'enquête de terrain engagée comprend trois étapes : l'une préli-

minaire permettant de définir la méthode à suivre pour réaliser notre enquête, suivie d'une étape de collecte des données sur le terrain et d'une étape de traitement des données recueillies et d'analyse des résultats.

Étape préliminaire – Il s'agit d'abord de sélectionner les zones qu'il est envisagé de visiter dans chaque secteur historico-géographique et les critères d'observation du bâti. Les résultats obtenus ont pour objectif d'identifier les zones plus ou moins vulnérables.

Dans l'enquête de terrain que nous envisageons de réaliser, il ne s'agit pas de parcourir la totalité des rues de la ville, mais de visiter une superficie du territoire qui soit assez importante pour s'assurer de collecter suffisamment d'informations représentatives du bâti étudié. Pour envisager le bâti de Mulhouse et Bâle nous avons donc sélectionné une zone dans chaque secteur historico-géographique où l'habitat collectif est le plus concentré. Pour sélectionner les zones à visiter sur le terrain, nous avons tout d'abord réalisé une étude à partir des cartographies disponibles. Par exemple pour localiser la zone à examiner à l'intérieur du secteur historico-géographique situé au Sud de Mulhouse nous avons sélectionné une zone située au Nord de ce secteur (figure n° 52), car à partir de l'étude cartographique il nous a été possible de constater que la partie Sud était une zone pavillonnaire. Bien que cette première analyse nous ait permis de localiser les zones à visiter, elle ne nous permet pas de déterminer la superficie qu'il est nécessaire d'examiner pour obtenir assez d'informations (hauteur, matériaux, âge) sur le bâti collectif à usage d'habitation qui représente l'ensemble de ces types de bâtiments implantés dans le territoire d'étude. Pour déterminer cette superficie, nous envisageons de réaliser une étude statistique classique. Cette étude est détaillée en annexe [Annexe – Chapitre 4 – Etude statistique] et n'est pas destinée à remplacer une enquête de terrain. Les résultats de cette étude obtenus à partir de la marge d'erreur [Annexe – Chapitre 4 – Etude statistique] préconisent de visiter une zone dans chaque secteur historico-géographique d'une superficie égale à 0,370Km², soit une superficie totale égale à 10% du territoire de Mulhouse et de Bâle (soit 2,22 Km² pour les six zones contenues dans les six secteurs). La figure suivante localise les six zones que nous avons visitées pour prélever l'information nécessaire à notre étude.



LEGENDE

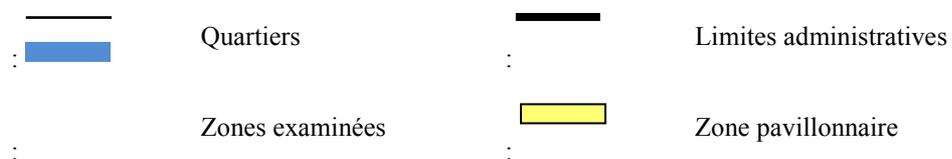


Figure n° 50 : MULHOUSE : Localisation et dimensions des zones dont le bâti va être examiné sur le terrain

Source : [GEO PORTAIL, 2013 – Carte IGN]
 (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

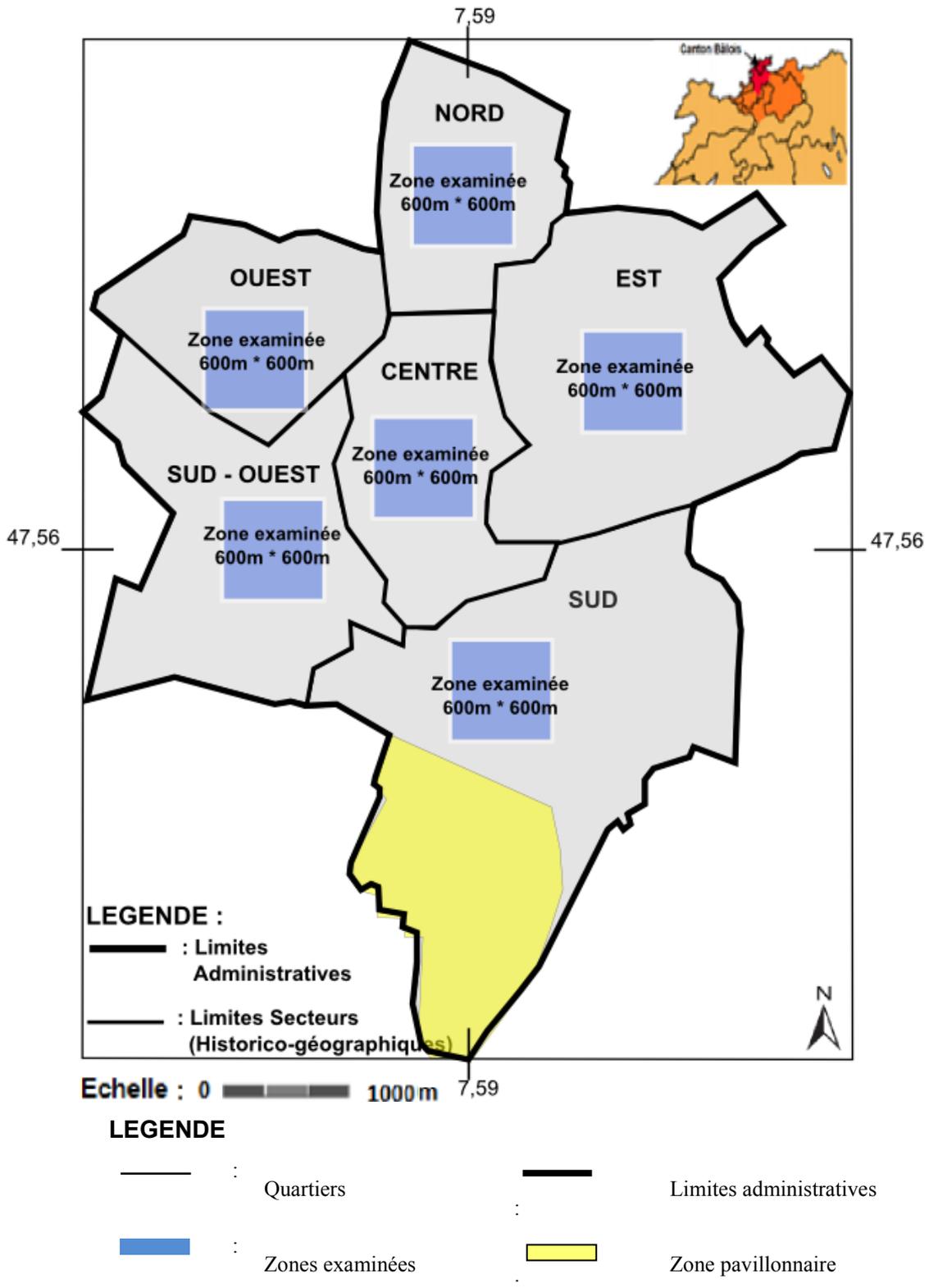


Figure n° 51 : BÂLE : Localisation et dimensions des zones dont le bâti va être examiné sur le terrain
 Source : [GEOPORTAL, 2013 – Geoviewer Canton de Basel]
 (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Étape de collecte des données sur le terrain – La méthode d'enquête choisie s'est appuyée sur les travaux du groupe de travail associant l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) auquel j'ai participé. Ce groupe a travaillé sur le renforcement sismique du bâti existant [Groupe de travail AFPS – CSTB, mars 2013]. Une fiche technique a été mise au point qui permet de collecter les informations pour réaliser un diagnostic, bâtiment par bâtiment dans le but d'évaluer la résistance sismique de ceux-ci. Nous reprenons la même approche à une échelle différente, c'est-à-dire à l'échelle de plusieurs bâtiments. Les documents d'enquête de terrain que nous proposons d'établir se composent d'une fiche technique de collecte des données, d'une fiche descriptive des caractéristiques du bâti ainsi qu'une fiche d'identification du bâti (photos de types bâtiments).

La fiche technique (Tableau n° 22) a été élaborée à partir des critères préconisés par l'Eurocode 8 (EC8). Ces critères sont relatifs à l'âge du bâti, aux types de matériaux de construction et à la hauteur des bâtiments. Le règlement prévoit trois niveaux de connaissance du bâti, le niveau de connaissance : limitée, normale et intégrale. Ces niveaux de connaissance portent sur la géométrie, les dispositions constructives (dispositions des armatures, etc.) et les propriétés mécaniques des matériaux. Le niveau de connaissance limitée repose essentiellement sur les connaissances provenant d'un examen visuel du bâti. Le niveau de connaissance normal, ainsi que le niveau de connaissance intégral reposent à la fois sur un examen visuel des bâtiments, un examen des documents (plans d'ensemble, plans détaillés, etc.) et un examen réalisé à partir de prélèvements de matériaux suivis de tests de résistance mécaniques en laboratoire. La différence entre le niveau de connaissance normal et le niveau de connaissance intégral est définie par le niveau d'inspection des dispositions constructives et par le nombre d'essais de résistance mécaniques en laboratoire ('Eurocode 8 – article 3.4.4 (1)P – Tableau 3.2). Les articles 3.3 et 3.4 de l'Eurocode 8.3 définissent en détail les trois niveaux de connaissance. Dans le cadre de notre étude, le niveau de connaissance ne peut être que limité puisqu'il ne repose que sur l'observation visuelle extérieure des immeubles. La fiche technique proposée est à réponse unique. Ce choix a l'intérêt de fournir des informations précises au regard des critères, c'est-à-dire qu'il ne peut y avoir plusieurs réponses dans chacun des critères. Cette fiche technique qui a pour objectif principal de rassembler les informations sur le bâti va nous permettre de quantifier les cinq types de bâtiments que nous avons identifiés précédemment dans les différents secteurs historico-géographiques.

cuite aux murs minces de (15 à 25 centimètre) et de quatre à six étages indique que celui-ci date des années 1950 à 1960. De plus, si des balcons surplombent les murs, les planchers sont vraisemblablement en béton armé. Les balcons de faible épaisseur (15 cm à 20cm) réalisés dans ce type de bâtiments se différencient des balcons réalisés dans les bâtiments de type Haussmanniens. Dans ces derniers, les balcons sont en pierres massives beaucoup plus épais et bien souvent munis d'ornements décoratifs sculptés dans le matériau. Ce type de balcon est généralement supporté par des corbeaux (un corbeau est une pierre massive placé sous le balcon et encastré dans les murs). Un immeuble composé de huit étages et plus est à forte probabilité en béton armé des années 1970. Un bâtiment doté de murs minces et de conception architecturale simple, c'est-à-dire peu de systèmes en porte-à-faux et peu de décrochement en plan est très probablement un bâtiment des années 1970 en maçonnerie. Un bâtiment composé de murs minces avec beaucoup de décrochements en plan couvert par une toiture en tuiles ressemble aux constructions en maçonnerie des années 1980. Les décrochements en plan (retraits importants des façades) ont pour caractéristique de fragiliser la résistance par l'apparition de phénomènes de torsions. Un immeuble à système de grandes portées et/ou de porte-à-faux, composé généralement de toitures terrasses est sans doute de construction plus récente. Un bâtiment d'une hauteur supérieure à quatre étages composé de façades rideaux (façades vitrées) est obligatoirement en béton armé pour porter ces façades. Ces indices permettent de distinguer sur le terrain les différents types de bâtiments et d'identifier les matériaux composant les murs et les planchers du bâti.

Tableau n° 23 : Fiche descriptive des caractéristiques du bâti

| FICHE DESCRIPTIVE | | |
|--|---|---|
| Indices d'observations | Années de construction | Matériaux |
| <ul style="list-style-type: none"> - Bâti de 1 à 4 ou 5 étages - Murs très larges (40 cm) | <ul style="list-style-type: none"> - Bâti très ancien des années 1850 à 1950 | <ul style="list-style-type: none"> - Murs en maçonnerie en pierres - Plancher bois |
| <ul style="list-style-type: none"> - Bâti de 4 à 6 étages - Bâti de conception architecturale simple - Murs minces (15 à 25 cm) <ul style="list-style-type: none"> - Sans balcon - Avec balcon | <ul style="list-style-type: none"> - Bâti des années 1950 à 1970 | <ul style="list-style-type: none"> - Murs en maçonnerie en blocs de terre cuite, parpaings - Plancher en béton - Plancher bois |
| <ul style="list-style-type: none"> - Bâti de 8 étages et plus - Murs minces (15 à 25 cm) | <ul style="list-style-type: none"> - Bâti des années 1950 à 1970 | <ul style="list-style-type: none"> - Murs en béton - Plancher bétons |
| <ul style="list-style-type: none"> - Bâti de conception architecturale complexe - Murs minces (15 à 25 cm) - Couverture composée de versants | <ul style="list-style-type: none"> - Bâti des années 1980 | <ul style="list-style-type: none"> - Murs en maçonnerie - Plancher bétons |
| <ul style="list-style-type: none"> - Bâti de conception architecturale complexe - Murs minces (15 à 25 cm) - Couverture composée de toitures terrasses | <ul style="list-style-type: none"> - Bâti des années 1990 à 2000 voir plus | <ul style="list-style-type: none"> - Murs en maçonnerie en béton - Plancher bétons |
| <p>Nota :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une conception architecturale simple ne comporte pas de porte-à-faux ni de décrochements importants en plan - Une conception architecturale complexe comporte des porte-à-faux et des décrochements en plan et en élévation importants | | |
| <p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour identifier la largeur des murs, il faut examiner les embrasures des ouvertures (fenêtres, portes) - Pour identifier la nature des planchers, il faut chercher de l'extérieur à observer les plafonds par les ouvertures et les façades. Un bâtiment sans balcon ou avec des balcons en pierre est composé vraisemblablement de plancher bois - Pour déterminer les matériaux composant les murs, il faut examiner les façades et chercher les éventuelles épaufrures (dégradation des revêtements) | | |

Simonet et Marçot [SIMONET et MARÇOT 2004, BRGM] ont réalisé une étude de la composition du bâti collectif à usage d'habitation implanté dans la commune de Mulhouse. Les résultats de cette étude ont été utilisés par Marçot et Arnal [MARÇOT et ARNAL 2004] dans une étude de scénario sismique concernant cette ville. Nous avons déjà évoqué l'étude de Simonet et Marçot en identifiant les différents types de bâtiments implantés dans ce territoire. Ils sont parvenus à définir quatre types de bâtiments collectifs à usage d'habitation d'âge différent regroupés dans une fiche d'identification du bâti (Tableau. n° 24). Cette fiche d'identification nous a servi de base de travail dans la réalisation de notre enquête de terrain pour identifier les différents types de bâtiments selon leur âge de construction.

Tableau n° 24 : Fiche d'identification du bâti d'habitat collectif de Mulhouse

| FICHE IDENTIFICATION DU BATI | | | | |
|--|---|--|------------------------------------|---------------------|
| (BUREAU DES RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES) | | | | |
| Dates | Types de construction | Illustration | Règlementation parasismique | |
| | | | Dates | Règlements |
| Antérieur à 1870 | Maçonnerie |  Bâtiment des années 1900 | Antérieur à 1900 | Pas de prescription |
| 1870 à 1959 | Maçonnerie Acier / Bois Béton armé |  Bâtiment des années 1950 Bâtiment des années 1970 (arrière plan) | 1950 à 1970 | AS55 |
| 1960 à 1992 | Béton armé - (Bâtiment des années 1980) |  Bâtiment des années 1980 | 1970 à 1992 | PS69 |
| Postérieur à 1992 | Béton armé suivant les règles parasismiques |  Bâtiment des années 2000 | 1992 à 2005 | PS92 |
| | | | Postérieur à 2005 | Euro code 8 |

Source : [SIMONET et MARÇOT 2004]
Photographies (mars 2013) – J. LEMAIRE

Les zones que l'on envisage de visiter ainsi que leur superficie étant déterminées, il nous est possible de procéder à la collecte. Les relevés de terrain ont été conduits en parcourant îlot par îlot et rue par rue les 6 zones précédemment définies. Pour détailler la méthodologie de la procédure de collecte des informations sur le terrain, nous envisageons l'exemple concret de l'îlot n° 44 situé au centre historique de Mulhouse. Le repérage de l'îlot a été réalisé à partir de la cartographie disponible sur le site Géo portail [Géo portail – Carte IGN]. A Bâle nous avons utilisé le site Géo portal [GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Base]. La délimitation de l'îlot nous a permis de repérer les différents types de bâtiments et de les compter.



Figure n° 52 : Localisation du bâti de l'îlot n° 44 – Centre historique – ville de Mulhouse
Source : [GEO PORTAIL, 2013 – Carte IGN]

Nous avons ensuite procédé à l'examen de chaque immeuble au regard des critères préconisés par l'Eurocode 8. Cet examen a pour objectif de dater les immeubles, d'identifier les matériaux de construction et compter le nombre d'étages. Le nombre d'étages sert à définir la hauteur des bâtiments.

Pour dater les immeubles nous avons comparé les photos de la fiche d'identification du bâti (Tableau n° 24) et les constructions implantées sur le terrain. Pour identifier les matériaux des bâtiments, la fiche descriptive (Tableau n° 23) présentant les caractéristiques du bâti a été utilisée. La hauteur des constructions a été relevée sur le terrain par un comptage du nombre d'étage des bâtiments. Toutes ces informations ont été recueillies dans la fiche technique (Tableau n° 25).

Tableau n° 25 : Fiche de collecte d'informations sur le terrain des caractéristiques du bâti situé dans l'îlot n° 44 – Centre historique – Mulhouse

FICHE TECHNIQUE COMPLETEE

| REPERE | | CRITERES | | | | | | | | | | |
|--------|---------|--------------|--------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------------|-------|------|------|----------|
| | | Type de bâti | | Age du bâti | | | | Type de matériaux | | | | Hauteur |
| Ilôt | Nb Bat. | Collect. | Indiv. | >1970 | 1970 à 1992 | 1992 à 2005 | <2005 | Maç. | Acier | Bois | B.A. | Nb étage |
| 44 | 16 | X | - | X(a) | - | - | - | X(a) | - | - | - | 4 à 5 |
| | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Nota : - : Pas de bâtiment
X(a) : Maçonnerie plancher bois
X(b) : Maçonnerie plancher béton armé

Nous avons examiné simultanément les trois critères de l'Eurocode 8 (âge, matériaux et hauteur des bâtiments). Néanmoins, un certain nombre d'observations n'entrent pas dans les cadres envisagés, ainsi nous avons constaté sur le terrain des murs très larges, alors que le bâti n'a pas été construit en pierres naturelles. En réalité, la largeur des murs provient simplement d'une isolation par l'extérieur.

Étape de traitement des données et d'analyse des résultats – A partir des données collectées, nous avons tout d'abord identifié les différents types de bâtiments implantés sur le territoire de Mulhouse et de Bâle selon les critères de l'Eurocode 8 et au regard de l'évolution de la réglementation parasismique. Cela revient à identifier les bâtiments datant des années antérieures à 1950 (pas de prescription parasismiques), ceux construits dans les années 1950 à 1970 (premières recommandations parasismiques – règlement AS55), les immeubles réalisés dans les années 1970 à 1990 (recommandations parasismiques obligatoires – Règlement PS69/82) et dans les années 1990 à 2005 (recommandations parasismiques obligatoires – Règlement PS92) et les bâtiments construits après les années 2005 (recommandations parasismiques obligatoires – Règlement Eurocode 8). Les types de bâtiments relevés dans les secteurs historico-géographiques de Mulhouse et de Bâle selon l'âge et les matériaux de construction ainsi que la réglementation parasismique sont regroupés dans le (Tableau n° 26).

Tableau n° 26 : Photographies du bâti d'habitat collectif de Mulhouse et Bâle

HABITAT COLLECTIF DE MULHOUSE ET DE BÂLE

| REGLEMENT France/Suisse | AGE DU BATI | MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS | EXEMPLES | |
|---|------------------------|--|--|---|
| | | | Mulhouse | Bâle |
| Pas de prescription - Pas de prescription | Antérieur à 1950 | Maçonnerie non armée non chaînée en pierres naturelles |  |  |
| AS55 - Pas de prescription | 1950 à 1970 | Maçonnerie armée en blocs de terre cuite ou béton de granulats |  |  |
| | | Béton armé de classe C 16/20 |  |  |

- (1) : Premières recommandations parasismiques
- (2) : Première réglementation parasismique
- (3) : Prescription base Euro code 8

Photographies (mars 2013) – J. LEMAIRE

Tableau n° 26 : Photographies du bâti d'habitat collectif de Mulhouse et Bâle

HABITAT COLLECTIF DE MULHOUSE ET DE BÂLE

(Suite)

| REGLEMENT France/Suisse | AGE DU BATI | MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS | EXEMPLES | |
|---|-------------------------|---|--|---|
| | | | Mulhouse | Bâle |
| PS69 - Norme SIA160 ⁽¹⁾ | 1970 à 1992 | Maçonnerie chaînée en en blocs de terre cuite ou béton de granulats |  |  |
| PS92 - Norme SIA160 ⁽²⁾ | 1992 à 2005 | Béton armé de classe C 25/30 |  |  |
| Euro code 8 - Norme SIA260 à 267 ⁽³⁾ + C.T. 2018 | Postérieur à 2005 | |  |  |

(4) : Premières recommandation parasismiques

(5) : Première réglementation parasismique

(6) : Prescription base Euro code 8

Photographies (mars 2013) – J. LEMAIRE

Les différents types de bâtiments identifiés doivent permettre de réaliser dans le chapitre qui suit une étude mécanique déterministe et probabiliste pour chaque type de constructions, dans le but de déterminer la résistance sismique ainsi que la probabilité de défaillance du bâti. Nous avons vu au chapitre 2, relatif à l'étude de l'Eurocode 8 que dans la formule de calcul de la période fondamentale du bâti, la hauteur constitue une variable importante. Nous envisageons d'identifier les différents types de bâtiments en incluant le critère de la hauteur des bâtiments aux critères de l'âge et des matériaux de construction. Ainsi, les différents types de bâtiments implantés dans les secteurs historico-géographiques de Mulhouse et de Bâle sont identifiés dans le (Tableau n° 27).

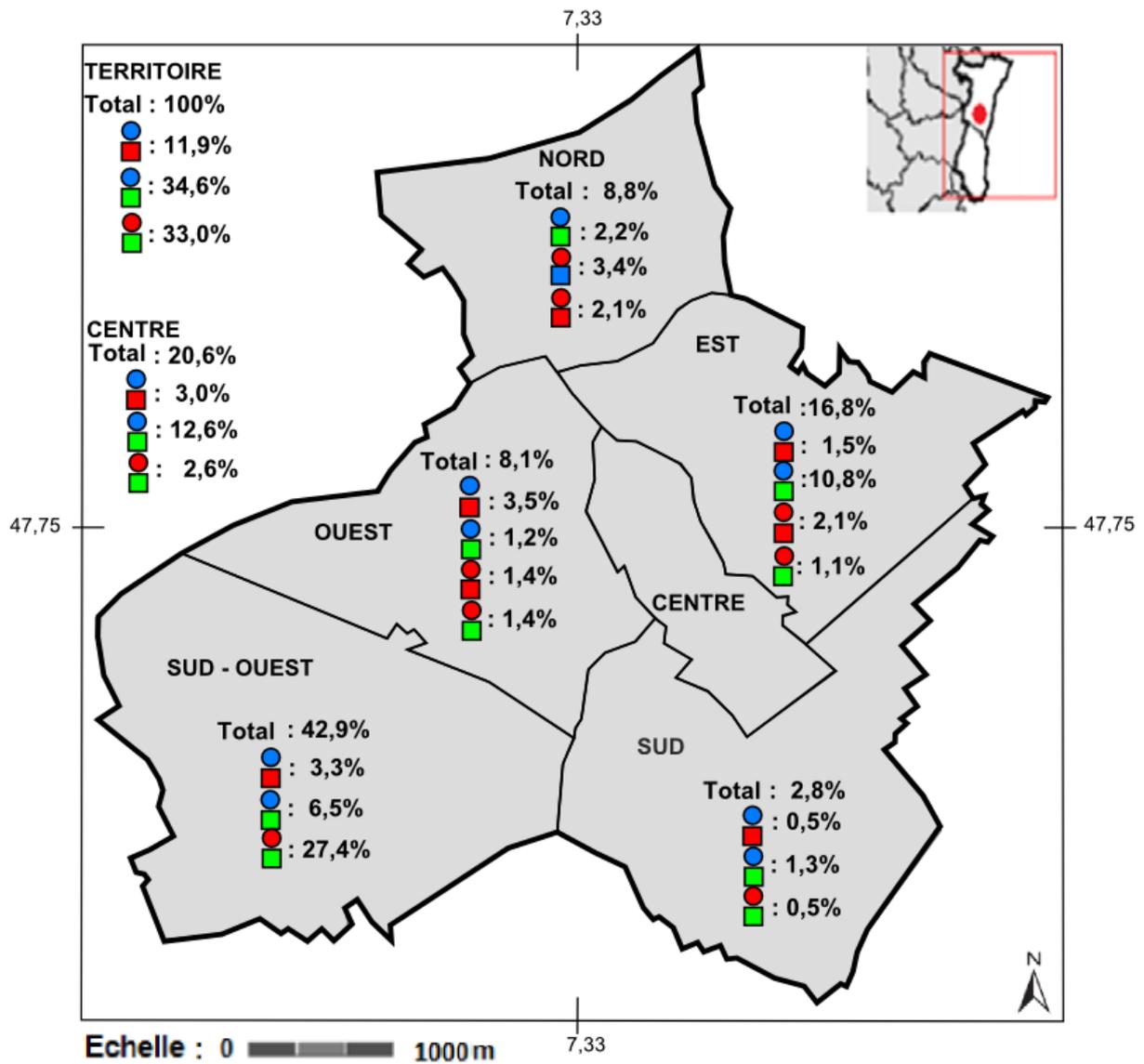
Tableau n° 27 : Combinaison des critères de l'Eurocode 8 définissant les différents types de bâtiments existants dans le territoire de Mulhouse et de Bâle

| | | Critère de l'âge du bâti et des matériaux de construction | | | | |
|---|------------------------------|--|---|---|--|---|
| | | ● : Type 1 T1 < 1900 Constructions en pierres naturelles | ● : Type 2 1950 < T2 < 1970 Constructions en blocs de T.C | ● : Type 3 1950 < T3 < 1970 Constructions en béton armé | ● : Type 4 1970 < T4 < 1990 Constructions en blocs BBM | ● : Type 5 1990 < T5 < 2000 Constructions en béton armé |
| Critère de la hauteur du bâti | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages | X | X | X | X | X |
| | ■ : Bâtiment de 3 étages | X | X | X | X | X |
| | ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages | X | X | X | X | X |
| | ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages | - | X | X | X | X |
| | ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages | - | - | X | - | X |
| | ■ : > 9 étages | - | - | X | - | - |
| X : Type de bâtiment existant sur le territoire de Mulhouse et de Bâle - : Type de bâtiment n'existant pas sur le territoire de Mulhouse et de Bâle Bâtiment de type T1 : Pas de prescription parasismique Bâtiment de type T2 : Premières recommandations parasismiques – règlement AS55 Bâtiment de type T3 : Premières recommandations parasismiques – règlement AS55 Bâtiment de type T4 : Recommandations parasismiques obligatoires – Règlement PS69/82 Bâtiment de type T5 : Recommandations parasismiques obligatoires – Règlement PS92 | | | | | | |

Source : Données collectées sur le territoire de Mulhouse et de Bâle

Pour déterminer le bâti dominant dans chaque secteur historico-géographique, il nous suffit de comptabiliser les immeubles appartenant aux différents types de bâtiments et de faire le rapport entre le nombre de bâtiments selon le type de bâti comptabilisé et le nombre total de bâtiments implantés dans l'ensemble du territoire de Mulhouse et de Bâle. Par exemple, il faut compter les bâtiments construits en pierres naturelles "Bâtiment de type T1" composé de un étage puis rapporter ce comptage au nombre total de bâtiments contenu dans le territoire pour obtenir la proportion de "Bâtiment de type T1" composé de un étage. Cette opération est renouvelée pour les "Bâtiment de type T1" composé de 3 étages, puis pour tous les types de bâtiments. La composition du bâti dominant de Mulhouse et de Bâle selon l'âge et les matériaux de construction ainsi que la hauteur des immeubles apparaissent sur les figures n° 53 et n° 54.

Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique dans le territoire mulhousien et bâlois



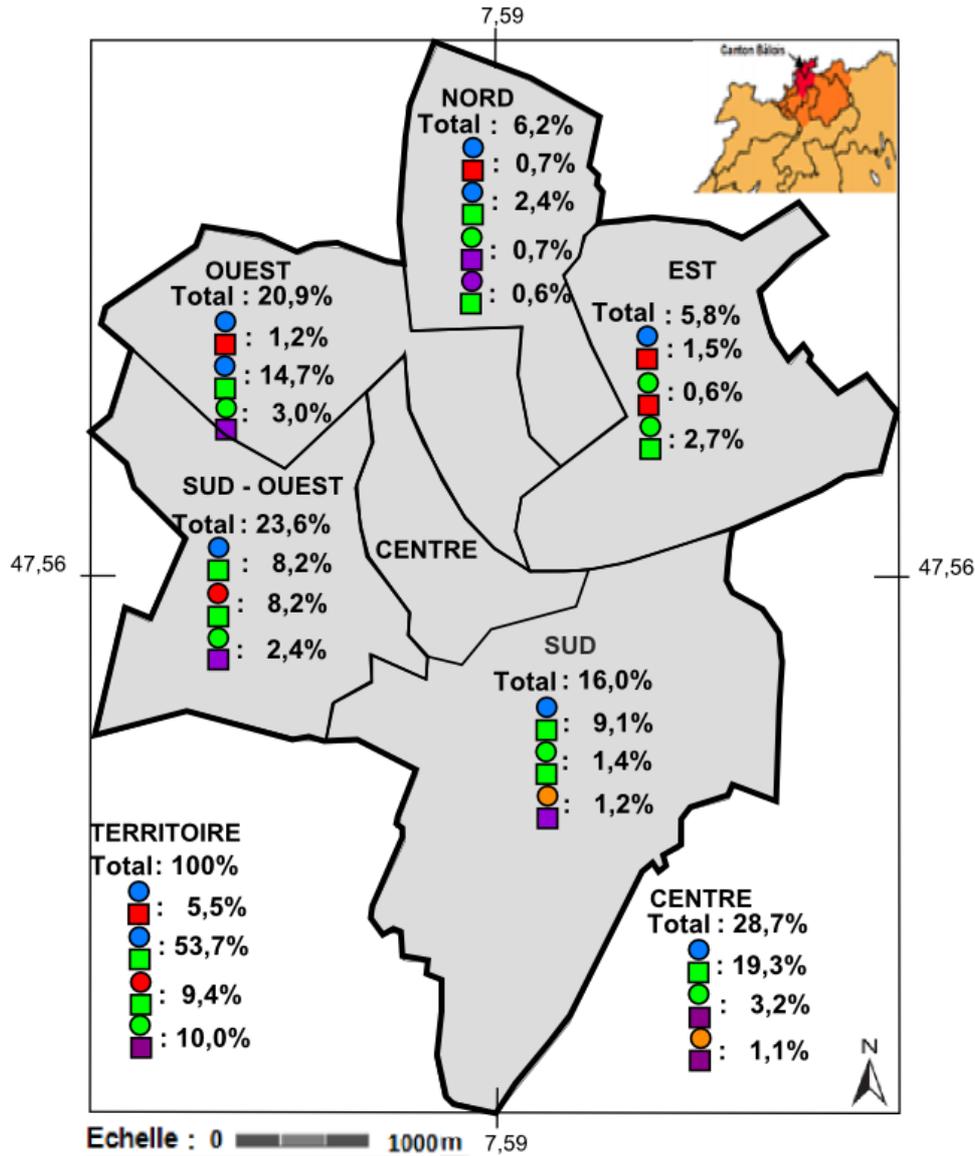
LEGENDE

| | | |
|------------|--|------------------------------|
| ● : Type 1 | T1 < 1900 Constructions en pierres naturelles | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages |
| ● : Type 2 | 1950 < T2 < 1970 Constructions en blocs de T.C | ■ : Bâtiment de 3 étages |
| ● : Type 3 | 1950 < T3 < 1970 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages |
| ● : Type 4 | 1970 < T4 < 1990 Constructions en parpaings | ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages |
| ● : Type 5 | 1990 < T5 < 2000 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages |
| | | ■ : > 9 étages |

Figure n° 53 : Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique selon les critères de l'âge, des matériaux et de la hauteur des constructions du territoire mulhousien

Source : [Données collectées sur le territoire de Mulhouse]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique dans le territoire mulhousien et bâlois



LEGENDE

- | | | |
|------------|--|------------------------------|
| ● : Type 1 | T1 < 1900 Constructions en pierres naturelles | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages |
| ● : Type 2 | 1950 < T2 < 1970 Constructions en blocs de T.C | ■ : Bâtiment de 3 étages |
| ● : Type 3 | 1950 < T3 < 1970 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages |
| ● : Type 4 | 1970 < T4 < 1990 Constructions en parpaings | ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages |
| ● : Type 5 | 1990 < T5 < 2000 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages |
| | | ■ : > 9 étages |

Figure n° 54 : Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique selon les critères de l'âge, des matériaux et de la hauteur des constructions du territoire bâlois

Source : [Données collectées sur le territoire de Bâle]
 (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

On peut observer que la quantité de bâtiments collectifs à usage d'habitation diffère d'un secteur historico-géographique à l'autre. Tout d'abord, globalement le bâti localisé dans les secteurs situés au Nord, à l'Ouest et au Sud de Mulhouse est moins dense que dans le centre ville ainsi que dans les secteurs situés au Sud-ouest et à l'Est de la ville. En observant le bâti dominant implanté dans chaque secteur historico-géographique de Mulhouse, on peut observer que le bâti dominant est très proche de la composition du bâti constatée par Simonet et Marçot (Bureau des Recherches Géologiques et Minières – BRGM) [SIMONET et MARÇOT, 2004] et par Droux [DROUX 2013] dans leur étude de la composition de l'habitat collectif. On retrouve les maçonneries très anciennes construite avant 1900 en pierres naturelles (bâtiments de type 1 - figure n° 53) concentrée dans le centre-ville et dans le secteur Sud ainsi que dans une partie des secteurs Ouest et Est. Le bâti plus récent réalisé en briques de terre cuite ou en blocs de béton de granulats dans les années 1950 à 1970 (bâtiments de type 2 - figure n° 53) est quant à lui beaucoup plus localisé dans les secteurs Nord et Sud-ouest ainsi que dans la partie extrême des secteurs Ouest et Est.

A Bâle, les choses sont différentes. Ce sont dans les secteurs historico-géographiques localisés au Nord, à l'Est et au Sud de la ville que le bâti est moins concentré. Près de 75% de la totalité du bâti de la ville est au centre ville et à l'Ouest ainsi qu'au Sud-ouest de Bâle. Le bâti dominant localisé dans les différents secteurs historico-géographiques est lui aussi très similaire à la composition des différents types de bâtiments constaté par Reitel et Tannier [REITEL et TANNIER 2003]. Là encore, on retrouve le bâti très ancien concentré dans le centre historique, le bâti des années 1950 à 1970 éparpillé sur tout le territoire qui a donné la forme actuelle de la ville et le bâti plus récent qui est venu combler les espaces vides et remplacer les bâtiments très vétuste (figure n° 54). La composition de l'ensemble des différents types de bâtiment dans les différents secteurs de Mulhouse et de Bâle est détaillée en annexe [Annexe – Chapitre 4 – Tableaux n° A 6 et n° A7].

Les différents types d'immeubles étant identifiés dans chaque secteur historico-géographique, il nous paraît important de s'interroger si la répartition de ceux-ci à l'intérieur des secteurs est identique. Par exemple, dans le secteur localisé au Sud-ouest de Mulhouse, les différents types de bâtiments identifiés sont-ils les mêmes selon que l'on se trouve au Nord ou au Sud à l'intérieur de ce secteur ? Il est envisagé d'examiner la composition des différents types de bâtiments à l'intérieur de chaque secteur historico-géographique. Cet examen va nous permettre au chapitre 6 de définir si à l'intérieur de chacun de ces secteurs le risque d'effondrement du bâti est inégalement réparti. Cela revient à s'interroger si la répartition du risque de pertes en vie humaine dû à l'effondrement du bâti est inégale à l'intérieur de chaque secteur historico-géographique. Pour détailler la méthode d'analyse des différents types de bâtiments répartis dans chaque secteur, nous envisageons l'exemple

concret du secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse à travers la zone qui a été visitée (figure n° 55).

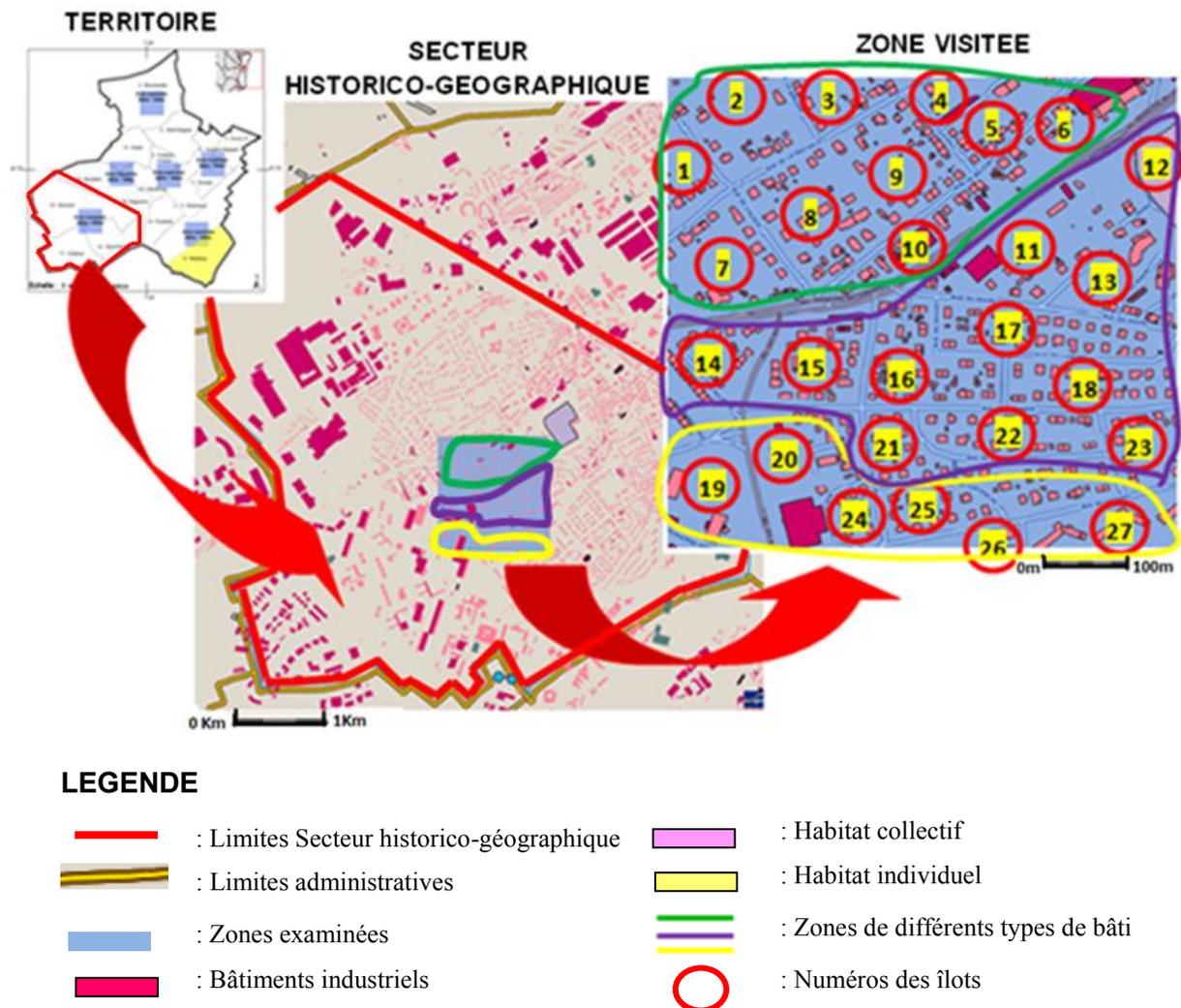


Figure n° 55 : MULHOUSE – Secteur historico-géographique situé au Sud-ouest – Localisation de la zone dont le bâti va être examiné en détail

Source : [GEO PORTAIL, 2013 – Carte IGN]

Le repérage des îlots dans ce secteur à été réalisé à partir de la cartographie disponible sur le site Géo portail [Géo portail – Carte IGN]. Le parcours des rues dans la zone visitée nous a permis d'identifier les différents types de bâtiments. Ainsi, au Nord de la zone visitée, c'est-à-dire dans les îlots n° 1 à 10 (zone repérée en vert sur la figure n° 55) le bâti très ancien construit avant 1900 (bâtiments de type 1) en maçonnerie de pierres naturelles composé de 3 à 5 étages, ainsi que les bâtiments construits dans les années 1950 à 1970 (bâtiment de type 2) en maçonnerie de briques de terre cuite ou de blocs de béton de granulats comportant 4 à 5 étages composent une grande partie de l'habitat collectif. Dans la zone centrale de la zone visitée, c'est-à-dire dans les îlots n° 14 à 23 (zone repérée en violet sur la figure n° 55) les bâtiments sont aussi très anciens datant des années 1900, comportant 4 à 5 étages.

Enfin, au Sud de la zone visitée, dans les îlots n° 19 à 27 (zone repérée en jaune sur la figure n° 55) les immeubles sont de type "Barres des années 1960 à 1970" en béton armé composé de 8 à 9 étages voir plus de 9 étages (bâtiment de type 3). Dans le secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse, la composition des différents types de bâtiments est très proche de celle constatée dans la zone visitée.

Tableau n° 28 : Extrait de l'analyse détaillée de la composition du bâti dominant à l'intérieur du secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse

| | | MULHOUSE : Répartition du bâti | | | | | | |
|---------------|--|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| SECTEURS | QUARTIERS | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| | | 1 à 2 étages | 3 étages | 5 étages | 7 étages | 9 étages | >9 étages | |
| 4 : Sud-ouest | Au Nord du secteur historico-géographique | ● | 0,0% | 7,7% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,2% | 29,7% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,8% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | Au Sud-ouest du secteur historico-géographique | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 10,5% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | Au Sud-est du secteur historico-géographique | ● | 0,0% | 0,0% | 15,2% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 34,1% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 1,8% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| | | ● | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |

LEGENDE

| | | |
|------------|--|------------------------------|
| ● : Type 1 | T1< 1900 Constructions en pierres naturelles | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages |
| ● : Type 2 | 1950<T2<1970 Constructions en blocs de T.C | ■ : Bâtiment de 3 étages |
| ● : Type 3 | 1950<T3<1970 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages |
| ● : Type 4 | 1970<T4<1990 Constructions en blocs béton | ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages |
| ● : Type 5 | 1990<T5<2000 Constructions en béton armé | ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages |
| | | ■ : > 9 étages |

Source : Données collectées sur le territoire de Mulhouse

Ainsi, comme nous l'avons évoqué précédemment, la composition des différents types de bâtiments identifiés dans les zones visitées est représentative de la composition du bâti implanté dans les secteurs historico-géographiques. Selon l'endroit où l'on se trouve au sein de chaque secteur historico-géographique, au Nord, au Sud, à l'Est ou à l'Ouest du secteur, on retrouve des types de bâtiments qui diffèrent. Ceux-ci sont détaillés en annexe dans les tableaux n° A 8 et A 9 [Annexe – Chapitre 4 – Tableau n° A 8 au Tableau n° A 9].

Conclusion chapitre 4

L'état des lieux effectué au niveau de la conurbation de Mulhouse – Bâle doit permettre d'évaluer la vulnérabilité sismique. Nous avons établi un inventaire des différents types de bâtiments en découpant le territoire de Mulhouse et de Bâle en 6 secteurs historico-géographiques considérés comme hétérogènes. Une enquête de terrain a été effectuée pour collecter les informations relatives aux caractéristiques des différents types de constructions. Là encore, les types de bâtiments sont très similaires dans les deux villes (âge, hauteur, matériaux de construction).

En fonction de la répartition de la population, de sa densité, il est possible d'envisager les secteurs les plus sensibles aux effets d'un séisme. Outre la répartition de la population, ses activités, les déplacements de population interviendraient selon l'heure du déroulement de l'aléa.

Ce diagnostic est une étape préliminaire nécessaire pour envisager le modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Ce dernier sera établi à partir de la nouvelle réglementation parasismique européenne (Eurocode 8).

Conclusion de la première partie

La première partie de l'étude est une étape préliminaire indispensable à la conception du modèle d'évaluation de la résistance du bâti. Elle a été l'occasion de revenir sur la définition du risque sismique, d'analyser la réglementation parasismique appliquée en France et en Suisse et de réaliser un diagnostic de la population et du bâti de la conurbation de Mulhouse – Bâle.

L'étude de l'aléa sismique a montré que Mulhouse et Bâle peuvent être affectées par un séisme provenant de la faille d'Allschwil avec des accélérations plus élevées que le préconise la réglementation (accélérations maximales de $2,50\text{m/s}^2$ à Mulhouse et $3,40\text{ m/s}^2$ à Bâle). Nous avons pu constater qu'un séisme se produisant sur la faille d'Illfurth générerait des accélérations de sol quelques peu supérieures aux recommandations de l'Eurocode, soit $1,17\text{m/s}^2$ sur le territoire de Mulhouse. L'étude de la géologie superficielle a montré qu'à Mulhouse et à Bâle il existe des zones d'amplification sismiques.

Les conséquences en termes de pertes humaines en milieu urbain varient selon le moment où se produit l'évènement sismique et selon les activités et les déplacements de la population. Évaluer la vulnérabilité de la population implique nécessairement d'évaluer, de manière particulière, la vulnérabilité du bâti.

L'évaluation de la vulnérabilité de la population due à l'effondrement du bâti revient à évaluer la résistance de tous les bâtiments collectifs à usage d'habitation hors de leur environnement urbain.

Cette approche nécessaire se révèle pourtant insuffisante car elle occulte la localisation de l'habitat collectif et les interactions entre eux. C'est pourquoi l'approche géographique doit compléter le « diagnostic » technique afin de pouvoir évaluer de manière plus précise la vulnérabilité de la population.

Notre principale démarche pour réaliser l'inventaire du bâti a été fondée sur le principe d'une analyse spatiale et urbaine. La dispersion des différents types de bâtiments sur le territoire complexifie fortement l'évaluation de leur résistance sismique. Cela engendre donc la nécessité d'établir un modèle d'évaluation de cette résistance, qui puisse s'appliquer à tous les bâtiments, peu importe leur localisation.

Le modèle d'évaluation projeté a pour objectif d'estimer la vulnérabilité de la conurbation de Mulhouse – Bâle à l'échelle urbaine. Ce modèle constitue la base d'une d'évaluation territoriale, envisagées dans la partie suivante.

DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION D'UN MODELE D'EVALUATION DU RISQUE SISMIQUE ADAPTE AU CAS DE MULHOUSE ET BALE

Introduction

L'identification et le diagnostic des différents types de construction composant le bâti de Mulhouse – Bâle réalisé au chapitre 4 va nous amener dans ce chapitre à établir un modèle d'évaluation du risque d'endommagement du bâti, afin d'utiliser ce dernier dans notre territoire d'étude. Ce modèle a pour objectif d'évaluer le risque d'endommagement du bâti à l'échelle urbaine de Mulhouse et de Bâle. Pour établir ce modèle, la réglementation parasismique sera utilisée ainsi qu'un calcul mécanique déterministe sur les différents types d'immeubles distingués selon l'âge, les matériaux de construction ainsi que la hauteur et les caractéristiques mécaniques du bâti. En second lieu, nous pensons élargir notre analyse par une étude statistique afin d'intégrer un plus grand nombre de bâtiments dans l'étude. En dernier lieu, pour intégrer les incertitudes que nous détaillerons également dans ce chapitre, nous projetons d'évaluer une probabilité de ruine des bâtiments par une analyse mécanique probabiliste. Pour réaliser l'étude de cas de Mulhouse et Bâle nous envisageons d'utiliser les résultats de la résistance sismique du bâti de ce modèle opérationnel des différents types de constructions.

CHAPITRE 5 : Un modèle opérationnel d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti dans la région de Mulhouse – Bâle

L'évaluation de la vulnérabilité répond à plusieurs approches. Pour évaluer la vulnérabilité du bâti, une étude mécanique déterministe et probabiliste peut être développée en application de la réglementation parasismique Européenne.

Nous avons vu au chapitre 1 que le modèle intitulé " *Risk-UE* " se compose de deux niveaux d'évaluation de la vulnérabilité physique du bâti dont le premier niveau correspond à une évaluation sommaire destinée à la vulnérabilité d'une population de bâtiments. Ce modèle est essentiellement fondé à partir de jugements d'experts. Nous envisageons de proposer un modèle d'évaluation de la vulnérabilité physique d'une population de bâtiments non plus à partir de jugements d'experts mais à partir de la réglementation parasismique Européenne.

1- Etude mécanique déterministe : Une évaluation primaire de la ruine du bâti

Les facteurs de vulnérabilité portent dans le cadre de cette étude sur la conception architecturale et sur l'entretien du bâti. Ces facteurs sont également en rapport avec l'application de la réglementation, ils dépendent aussi de la mécanique des structures fonction de l'âge de construction du bâti. Ces différents facteurs font nécessairement appel à des critères physiques du bâti. A partir de ce travail d'identification il sera possible de définir différents types de bâtiments représentant chacun un groupe d'immeubles. Ces bâtiments seront appelés " *Bâtiments Elémentaires Représentatifs* (B.E.R.)". Mais l'analyse comporte beaucoup d'incertitudes que nous proposerons d'intégrer dans le modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti. L'information est relative aux connaissances des caractéristiques physiques et mécaniques des bâtiments. En outre, cette approche sera accompagnée d'une analyse statistique mécanique déterministe qui va nous permettre de définir les éléments nécessaires à l'étude mécanique probabiliste.

1-1 Identification des facteurs de vulnérabilité et des critères physiques du bâti

Facteurs de vulnérabilité du bâti – Pour intégrer les retours d'expériences, les facteurs de vulnérabilité sont identifiés à partir des phénomènes de " ruine ". Les phénomènes dits de " ruine " sont caractérisés par la rupture d'un ouvrage soumis à une contrainte qu'il ne peut supporter. Ces phénomènes sont de quatre natures différentes. Il existe le phénomène de ruine par traction/compression, par cisaillement, par flexion et par torsion.

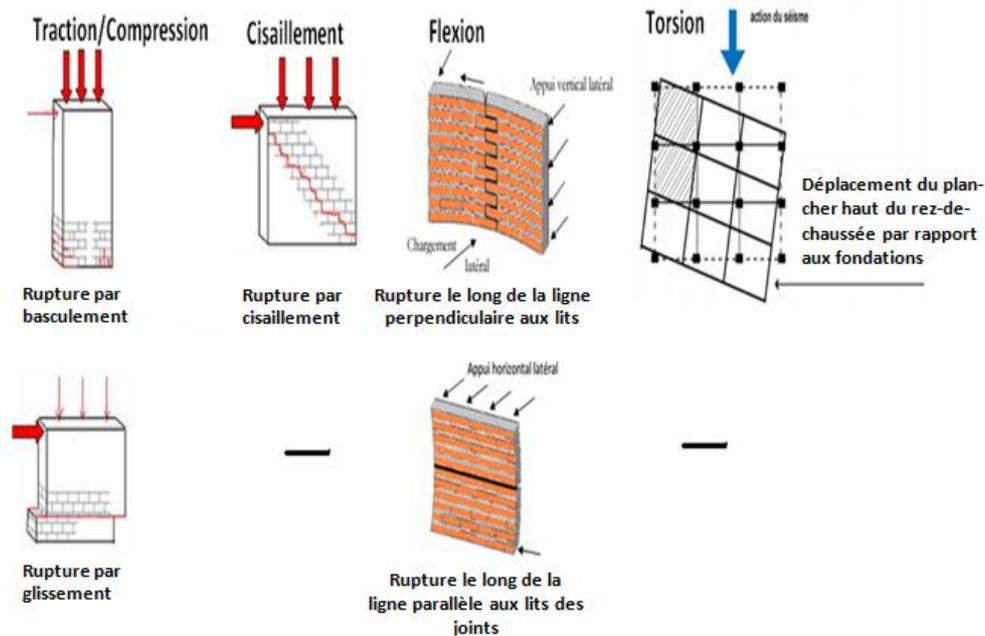


Figure n° 56 : Phénomènes de ruine des bâtiments

Source : [GHANEM 2013] ; [Ministère des Travaux Publics, des Transports et des Communications (MTPTC - Haïti), 2012]

La " ruine " peut être due à un défaut local d'exécution, mais plus généralement à un mauvais comportement global de la structure qui a généré une accumulation localisée de contraintes. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à ce deuxième aspect. La dynamique des structures est donc abordée aux travers de la littérature et d'observations post sismiques. Des retours d'expérience et des relevés de dommages fournis par les missions post-sismiques de l'AFPS²⁹ ont produit des informations permettant d'identifier un certain nombre de facteurs de vulnérabilité associés à la défaillance des structures [BARBAT *et al.* 1996] ; [AFPS – BRGM, 2011]. Ces facteurs sont également relatifs à la conception architecturale des bâtiments [BALANDIER, 2001], et à l'état de vétusté des bâtiments [VALENCIA DAVID 2006]. Les facteurs de vulnérabilité évoluent selon les connaissances de la mécanique des structures [AFPS-CSTB 2013] ; [BENEDETTI et PETRINI 1984]. Les facteurs de

²⁹ AFPS : Association Française du Génie Parasismique

vulnérabilité sont associés à des critères et à des caractéristiques physiques du bâti. Nous allons voir plus après que les caractéristiques physiques détaillées dans le tableau suivant correspondent à des caractéristiques du bâti (dimensions formes du bâti, etc....) et à des caractéristiques de résistance des matériaux (résistance à l'écrasement, au cisaillement, à la flexion et à la torsion des matériaux).

Tableau n° 29 : Relation entre Identification les facteurs de vulnérabilité, les critères physiques du bâti et les caractéristiques physiques du bâti

| FACTEURS DE VULNERABILITE | CRITERES PHYSIQUES | CARACTERISTIQUES PHYSIQUES |
|---|---|--|
| - Conception architecturale | - Forme géométrique (plan/élévation) des bâtiments <ul style="list-style-type: none"> • Un bâtiment en forme de L en plan) comporte un angle rentrant qui génère une accumulation de contrainte, fragilise la résistance sismique. | - Nombre d'étage - Forme des bâtiments |
| - Etat d'entretien | - Vétusté des constructions | - Dégradation des joints des murs en pierres - Armatures apparentes et oxydées |
| Paramètres liés à la mécanique des structures | - Critère des matériaux <ul style="list-style-type: none"> • Avec une conception équivalente un bâtiment en béton armé est plus résistant qu'un bâtiment en maçonnerie en pierre naturelles | - Masse - Raideur - Module de déformation - Résistance à l'écrasement - Résistance au cisaillement - Résistance en flexion - Résistance à la torsion |
| | - Critères géométriques des structures <ul style="list-style-type: none"> • Critère géométrique en plan des structures • Critère géométrique en élévation des structures (ht des bâtiments) • Un bâtiment muni de grandes portées et/ou de portes à faux fragilise la résistance sismique de celui-ci | - Inertie - Fréquence fondamentale |
| | - Types de planchers <ul style="list-style-type: none"> • Un plancher en béton transmet efficacement les efforts sismiques horizontaux aux murs, ce qui évite l'écartement des murs en assurant un fonctionnement monolithique de la structure (rôle de diaphragme des planchers). | - Ancrage/non ancrage des planchers |

Les formes géométriques relatives à la conception architecturale des bâtiments d'habitation collective, que nous avons observés à Mulhouse et à Bâle sont majoritairement rectangulaires ou carrés. Le rapport entre la longueur et la largeur de ces bâtiments est de l'ordre de 1 à 2,25. L'alinéa n° 5 de l'article n° 4.2.3.2 de l'Eurocode 8.1 impose que ce rapport soit inférieur à 4. La réglementation est respectée. Cette clause a pour objectif de protéger les bâtiments des phénomènes de "Coups de fouets". En cas de séisme, un phénomène de "Coups de fouets" se caractérise par un effondrement des extrémités des bâtiments très longs et peu larges.

Sur le terrain, nous n'avons pas constaté de bâtiment dont l'état de vétusté est flagrant (armatures apparentes, fissures importantes, etc. Il est difficile de consulter les carnets d'entretien, lorsqu'ils existent, de l'ensemble du parc immobilier à l'échelle d'une ville. Par conséquent ce facteur de vulnérabilité relatif à l'état de conservation des bâtiments n'est pas retenu dans notre étude.

Le facteur de vulnérabilité relatif à la mécanique des structures est associé au critère des matériaux, aux critères des formes géométriques des structures et aux critères des types de planchers.

- Le critère des matériaux dépend des caractéristiques des matériaux composant les bâtiments.
- L'inertie est une variable mécanique qui dépend du critère géométrique en plan (de la position des éléments verticaux porteurs).
- La fréquence fondamentale de vibration des bâtiments dépend principalement du critère géométrique en élévation (hauteur des structures).
- Et enfin, le critère du type de planchers (bois ou béton) qui est lié à l'ancrage des planchers aux murs (fonctionnement non monolithique des ouvrages) est aussi intégré dans le développement des calculs de résistance selon le type de planchers. Dans le cas de fonctionnement non monolithique des ouvrages (planchers non ancrés), les murs peuvent s'effondrer sur les voies de communication en s'écartant comme un " *château de carte* ". Plus précisément, l'ancrage ou le non ancrage des plancher est intégré dans les calculs par le biais de la hauteur des étages. La hauteur de calcul prise en compte dans les calculs de vérification de la résistance sismique pour les bâtiments muni de planchers bois (plancher non ancré) est égale à la hauteur d'étage réelle. Pour les bâtiments munis de planchers en béton (plancher ancré) cette hauteur de calcul est égale à trois quart de la hauteur réelle d'étage (l'EC8 renvoie à l'EC6 pour la maçonnerie, EN 1996-1-1 §5.5.1.2)

Il apparaît nécessaire à présent de développer les critères physiques du bâti que nous venons d'identifier

Critères physiques du bâti – Les critères sont des paramètres de description physique du bâti. Ces derniers sont identifiés dans le cadre de ce travail à partir d'observations visuelles de terrain, et complétés par des caractéristiques examinées à partir de documents techniques et graphiques. Les critères "visuels" que nous avons observés sur le terrain se réfèrent à l'âge et au nombre d'étage du bâti (hauteur du bâti), ainsi qu'aux types de planchers et aux types de matériaux de construction. L'âge du bâti nous renseigne sur les méthodes de construction qui dépendent de la réglementation parasismique en vigueur lors de la construction de l'ouvrage. Les constructions soumises à la réglementation parasismique en France comme en Suisse, est détaillée au chapitre 2. Par exemple, en France, un bâtiment construit au milieu des années 1990 à 2000 est construit selon la réglementation parasismique (PS92). L'âge du bâti nous informe aussi de la régularité ou de l'irrégularité en élévation des ouvrages. Par exemple, un bâtiment dont les étages sont tous de mêmes dimensions est un bâtiment régulier en élévation. Une conception architecturale simple ou complexe renvoie aux indices d'observations envisagés au chapitre 4 dans l'enquête de terrain. Il s'agit de bâtiments comportant de grandes portées et/ou des porte-à-faux. Les types de matériaux permettent d'envisager la masse des ouvrages. Une bâtisse en pierre est plus lourde qu'une structure béton.

Le calcul de la résistance sismique du bâti envisagé ici est élaboré à partir de la méthode des forces latérales définie par l'Eurocode parasismique. Cette méthode simplifiée fait appel aux caractéristiques physiques fondamentales de la dynamique des structures qui sont notamment : la masse, la raideur et la période fondamentale des structures ainsi que la régularité en plan et en élévation. La masse dépend du poids des matériaux. La rigidité dépend de la nature des liaisons entre éléments structurels (liaisons murs – murs et liaisons murs – planchers), du module de déformation, de l'inertie et de la hauteur du bâtiment. La nature des liaisons (articulation, encastrement) est définie par la méthode de construction et les dispositions constructives. L'inertie est déterminée par la forme géométrique en plan et par l'implantation des éléments verticaux. La hauteur est évaluée par la relation entre le nombre d'étage et leur hauteur. La période fondamentale correspond au temps que met une structure pour effectuer un cycle de balancement ou de rotation et revenir à sa position initiale, en vibration libre. Les méthodes de construction qui entrent dans notre étude se caractérisent par des maçonneries ou des constructions en béton. Les dispositions constructives se caractérisent par la distribution des armatures. Par exemple : Une disposition précise des armatures en pied de poteaux crée un encastrement ou une articulation de ces derniers aux fondations. Il est bien connu aussi que les éléments d'un ouvrage en béton sont encastrés

les uns aux autres, ce qui n'est pas le cas dans les maçonneries non armées. Le nombre d'étage est un paramètre important dans le calcul de la période fondamentale de l'ouvrage. Les phénomènes de ruine après séismes répertoriés par les missions post sismique organisées par l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) constituent un référentiel des différents modes d'endommagement des ouvrages. Ainsi, les études de l'AFPS lors du séisme de Saint-Paul-sur-Ubaye du 7 avril 2014 soulignent que " *la plupart des dégâts sont localisés dans des bâtiments anciens en maçonnerie non chaînée* " [AFPS, Bulletin janvier 2015]. Ces phénomènes de ruine nous ont permis d'identifier les facteurs de vulnérabilité, les critères physiques du bâti. Les caractéristiques physiques que nous avons récapitulées dans le tableau n° 29 sont relatives aux différents bâtiments et aux matériaux de construction. Ces caractéristiques physiques sont détaillées dans le paragraphe suivant après avoir identifié les bâtiments élémentaires représentatifs. Nous devons maintenant définir des bâtiments élémentaires représentatifs d'un groupe de construction de l'habitat collectif de notre terrain d'étude.

1-2 Des bâtiments élémentaires représentatifs de l'habitat de Mulhouse et Bâle - Caractéristiques mécaniques – Incertitudes

Bâtiments élémentaires représentatifs – Pour évaluer la vulnérabilité de notre terrain d'étude, nous avons distingué six types de bâtiments.

Tableau n° 30 : Différents types de bâtiments contenus dans le territoire de Mulhouse et de Bâle

| Type de bâtiments | Matériaux de construction | Âge de construction | Règlementations en rapport à l'âge des constructions |
|-------------------|--|---------------------|--|
| 1- Maçonnerie | Pierres naturelles | Antérieur à 1900 | - Non parasismique - France – Suisse |
| 2- Maçonnerie | Briques de terre cuite ou en blocs de béton de granulats | 1950 à 1970 | - Recommandations AS55 - France - Non parasismique (Suisse) |
| 3- Béton | Béton armé de classe C16/20 | 1950 à 1970 | |
| 4- Maçonnerie | Blocs de béton de granulats | 1970 à 1990 | - Règlement PS69 – France - Recommandations SIA160 |
| 5- Béton | Béton armé de classe C25/30 | 1990 à 2005 | - Règlement PS92 – France - Normalisation SIA160 |
| 6- Béton | Béton armé de classe C25/30 | Postérieur à 2005 | - Eurocode – France - Normalisation SIA260 |

Les bâtiments de type n° 6 construit selon l'Eurocode 8.1 sont peu nombreux et n'entrent pas dans le champ d'étude. Nous avons sélectionné un échantillon de 17 bâtiments [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.A], soit neuf bâtiments en maçonnerie et huit pour les constructions en béton armé. Les immeubles de cet échantillon ont entre 15 à 48 m de longueur et de 8,50 à 23 m de largeur, ils sont composés de 1 à 12 étages. Les bâtiments sont analysés à partir de l'Eurocode 8.1 selon l'article 4.3.3.2. (Régularité en plan), selon l'article 4.3.3.3. (Régularité en élévation) et selon l'article 4.3.3.2.1. (Période fondamentales). Après analyse de cet échantillon, seulement 11% des étages de la totalité des bâtiments sont réguliers en plan. La régularité en plan est envisagée étage par étage. Afin d'examiner la torsion à tous les étages d'un bâtiment exposé à un séisme, il est nécessaire de contrôler la répartition des murs, c'est-à-dire que l'excentricité entre le centre de gravité et le centre de torsion soit inférieure aux tolérances règlementaires. En élévation, 25% des bâtiments composant l'échantillon sont réguliers en hauteur. Cela signifie que ces bâtiments ne présentent pas de retrait important. La répartition homogène en élévation des raideurs et des masses est irrégulière. En réalité, la raideur et les masses varient quand le nombre de parois verticales varie d'un étage à l'autre et quand ces parois ont une masse différente d'un étage à l'autre. En revanche l'ensemble des structures respecte la condition imposée par l'Eurocode à l'égard des périodes fondamentales. En définitive, aucun immeuble envisagé parmi l'échantillon des 17 bâtiments ne respecte simultanément les conditions de régularité imposées par l'Eurocode.

Néanmoins, pour calculer la résistance sismique des ouvrages par la méthode simplifiée des forces latérales, l'ensemble de ces conditions doit être satisfaites. Pour mettre en œuvre cette méthode nous avons sélectionné un étage qui réponde à la condition de régularité en plan, puis nous avons composé les Bâtiments Élémentaires Représentatifs à partir de cet étage afin de lever les conditions d'irrégularité en élévation que nous avons constaté. Nous avons créé un Bâtiment Élémentaire Représentatif pour chaque type de bâtiment, pour respecter l'ensemble des conditions imposées par l'Eurocode. Ainsi, la résistance sismique des Bâtiments Élémentaires Représentatifs peut être réalisée par la méthode des forces latérales.

Les Bâtiments Élémentaires Représentatifs se composent de un à plusieurs étages. Dans notre étude, ces derniers se décomposent ainsi : un B.E.R. de un étage, un B.E.R. de trois étages, puis un B.E.R. de cinq étages pour représenter les bâtiments de type 1. Un B.E.R. d'un étage, puis de trois, cinq et sept étages pour les maçonneries de type 2 et 3. Un B.E.R. d'un étage, puis de trois, cinq, sept neuf et douze étages pour les structures en béton armé de type 4. En dernier lieu, un B.E.R. d'un étage, puis de trois, cinq, sept et neuf étages

pour les structures en béton armé de type 5. Cette composition cumule un total de vingt-deux Bâtiments Elémentaires Représentatifs. Les dimensions de ceux-ci sont détaillées dans le tableau n° 31. Les hauteurs d'étage des B.E.R. sont de 3,50 m pour les rez-de-chaussée et de 2,50 ou 2,60m pour les étages courants.

Tableau n° 31 : Caractéristiques des Bâtiments Elémentaires Représentatifs de Mulhouse et Bâle

| Types de bâtiments | Années | Matériaux | Longueurs | Largeurs | Superficie / étage |
|--------------------|------------------|---------------------|-----------|----------|-----------------------|
| Type n° 1 | Antérieur à 1900 | Pierres naturelles | 17,00 m | 9,70 m | 164,90 m ² |
| Type n° 2 | 1950 à 1970 | Briques terre cuite | 23,50 m | 17,60 m | 390,00 m ² |
| Type n° 3 | 1950 à 1970 | Béton armé | 29,50 m | 17,55 m | 517,70 m ² |
| Type n° 4 | 1970 à 1990 | Blocs de béton | 23,50 m | 17,60 m | 417,60 m ² |
| Type n° 5 | 1990 à 2005 | Béton armé | 29,50 m | 17,55 m | 517,70 m ² |

Ces Bâtiments Elémentaires Représentatifs sont définis par des caractéristiques mécaniques qu'il s'agit à présent de définir.

Caractéristiques mécaniques des Bâtiments Elémentaires Représentatifs – Les caractéristiques mécaniques sont des valeurs quantifiées : masses, rigidités et périodes fondamentales. La rigidité des structures dépend de l'inertie de ces dernières. L'estimation de ces caractéristiques suit la procédure d'étude suivante. Celle-ci a débuté par une analyse de plans, un calcul des caractéristiques mécaniques de l'ensemble des bâtiments de l'échantillon et un traitement statistique afin de déterminer les valeurs moyennes et des écarts types. Plus précisément, les masses ont été déterminées selon la méthode classique des descentes de charges. Les rigidités, c'est-à-dire les inerties des différents bâtiments ont été réalisées selon les calculs usuels de la résistance des matériaux. Les périodes fondamentales du bâti ont été évaluées selon les préconisations de l'Eurocode 8.1 – articles 4.3.3.2.2 – Equations 4.6 ; 4.7 et 4.8., formulées par les relations suivantes.

$$T_1 = C_t * H^{3/4} \quad \text{Eq° n° 1}$$

$$C_t = 0,075 / \sqrt{A_c} \quad \text{Eq° n° 2}$$

$$A_c = \sum [A_i * (l_w / H)]^2 \quad \text{Eq° n° 3}$$

T_1 est défini conformément selon l'Eurocode 8 – Art. 4.3.3.2.2.

C_t et A_c sont définis conformément selon l'Eurocode 8 – Art. 4.3.3.2.2.

A_c est l'aire effective totale des sections des murs de contreventement au premier niveau du bâtiment, en m² ;

A_i est l'aire effective de la section transversale du mur de contreventement dans la direction considérée i au premier niveau du bâtiment, en m² ;

H est comme indiqué en (3) du présent paragraphe ;

l_{wi} est la longueur du mur de contreventement i au premier niveau dans la direction parallèle aux forces appliquées, en m, sous la condition que l_{wi} / H ne dépasse pas 0,9.

Figure n° 57 : Equations de calcul de la période fondamentale des bâtiments de Mulhouse et Bâle

Source : [Eurocode 8.1 – articles 4.3.3.2.2 – Equations 4.6 ; 4.7 et 4.8]

La synthèse des caractéristiques mécaniques des bâtiments Elémentaires Représentatifs apparaissent dans les tableaux n° 32 a, b et c.

Tableau n° 32a : Masses d'un étage courant des BER de Mulhouse et Bâle

| MASSES | | MASSE GLOBALE POUR 1 ETAGE | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|----------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| | | G | | | Q | | | G | | |
| | | Vert. (T/m) | Horiz. (T) | Horiz. (T) | Vert. (T/m) | Horiz. (T) | Horiz. (T) | Vert. (T/m) | Horiz. (T) | Horiz. (T) |
| BATIMENTS EN MACONNERIE | | Pierres naturelles | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 18,1% | 22,1% | 22,1% | | | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 1 | 48,42 | 42,35 | 17,05 | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | | | | Blocs de T.C. ou béton de granulats | | | | | |
| Type n° 2 | | | | | 35,3% | 26,2% | 26,2% | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 4 | | | | 47,47 | 179,03 | 48,82 | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | | | | 60,84 | 173,66 | 47,36 | | | |
| BATIMENTS EN BETON ARME | | CLASSE C 16/20 - C 25/30 | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | | | | | | | 41,9% | 32,4% | 31,8% |
| Type n° 3 | | | | | | | | 46,68 | 179,03 | 48,82 |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 5 | | | | | | | 37,98 | 150,62 | 41,08 |

Nota : Vert. : Eléments verticaux (murs)
Horiz. : Eléments horizontaux (Planchers)

Source : [Eurocode 8.1 – articles 4.3.3.2.2 – Equations 4.6 ; 4.7 et 4.8 ; Relations classiques de la résistance des matériaux]

Tableau n° 32 (suite)

Tableau n° 32b : Inerties d'un étage courant des BER de Mulhouse et Bâle

| RIGIDITE (Inerties) | | BATIMENTS EN MACONNERIE | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|
| | | I_{XG} | | | I_{YG} | | | I_t | | | I_{XG} | | | I_{YG} | | | I_t | | |
| | | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | (m ⁴) | | |
| BATIMENT EN MACONNERIE | | Pierres naturelles | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 29,4% | 37,2% | 56,3% | | | | | | | | | | | | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 1 | 507,88 | 1 558,25 | 3 545,87 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | | | | Blocs de T.C. ou béton de granulats | | | | | | | | | | | | | | |
| Type n° 2 | | | | | 59,4% | 38,8% | 53,7% | 59,4% | 38,8% | 53,7% | | | | | | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 4 | | | | 754,84 | 554,45 | 541,40 | | | | 1 150,96 | 265,20 | 448,98 | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | | | | | | | | | | 76,0% | 48,1% | 63,7% | | | | | | |
| Type n° 3 | | | | | | | | | | | 238,80 | 1 266,31 | 2 161,80 | | | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 5 | | | | | | | | | | 238,80 | 1 266,31 | 2 161,80 | | | | | | |

Nota : I_{XG} : Inertie de flexion dans la direction de l'axe X-X
 I_{YG} : Inertie de flexion dans la direction de l'axe Y-Y
 I_t : Inertie de torsion

Source : [Eurocode 8.1 – articles 4.3.3.2.2 – Equations 4.6 ; 4.7 et 4.8 ; Relations classiques de la résistance des matériaux]

Tableau n° 32 (suite)

Tableau n° 32c : Fréquence propres par étage des BER de Mulhouse et Bâle

| FREQUENCES FONDAMENTALES | | 1 Etage | | 3 Etages | | 5 Etages | | 7 Etages | | 9 Etages | | 12 | |
|--------------------------|-----------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | F _x | F _y | F _x | F _y | F _x | F _y | F _x | F _y | F _x | F _y | F _x | F _y |
| | | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) | (Hz) |
| BATIMENTS EN MACONNERIE | | Pierres naturelles | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 14,7% | 23,6% | 18,7% | 8,8% | 28,0% | 40,5% | | | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 1 | 21,86 | 21,44 | 11,54 | 11,36 | 7,01 | 6,92 | - | - | - | - | - | - |
| | | Blocs de T.C. ou béton de granulats | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 34,7% | 27,9% | 49,1% | 26,4% | 41,5% | 27,9% | 47,4% | 31,9% | | | | |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 2 | 20,97 | 22,57 | 12,48 | 12,90 | 7,67 | 8,80 | 5,69 | 6,42 | - | - | - | - |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 4 | 20,97 | 22,57 | 12,48 | 12,90 | 7,67 | 8,80 | 5,69 | 6,42 | - | - | - | - |
| BATIMENTS EN BETON ARME | | CLASSE C 16/20 | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 30,8% | 25,0% | 36,1% | 32,0% | 46,0% | 40,9% | 55,0% | 40,9% | 57,1% | 41,6% | 57,2% | 39,4% |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 3 | 19,34 | 18,45 | 10,05 | 10,04 | 6,12 | 5,93 | 4,55 | 4,27 | 3,51 | 3,13 | 2,55 | 2,19 |
| | | CLASSE C 25/30 | | | | | | | | | | | |
| Ecart au niveau moyen = | | 30,8% | 25,0% | 36,1% | 32,0% | 46,0% | 40,9% | 55,0% | 40,9% | 57,1% | 41,6% | - | - |
| NIVEAU MOYEN | Type n° 5 | 19,34 | 18,45 | 10,05 | 10,04 | 6,12 | 5,93 | 4,55 | 4,27 | 3,51 | 3,13 | - | - |

Nota :F_x : Fréquence fondamentale (Hz) dans la direction de l'axe X-XF_y : Fréquence fondamentale (Hz) dans la direction de l'axe Y-Y

Source : [Eurocode 8.1 – articles 4.3.3.2.2 – Equations 4.6 ; 4.7 et 4.8 ; Relations classiques de la résistance des matériaux]

Plus précisément, ces caractéristiques dépendent du poids, de la conception architecturale et de la hauteur des bâtiments. L'analyse des plans consiste à extraire les dimensions et la position des murs et poteaux composant l'ouvrage. Un Bâtiment Élémentaire Représentatif ne se compose pas uniquement de caractéristiques mécaniques. Les matériaux constituant l'ouvrage comportent également des propriétés de résistance mécanique que nous allons envisager.

Caractéristiques mécaniques des matériaux – Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont des grandeurs caractérisant leur capacité de résistance. Celles-ci définissent notamment les propriétés de résistance à l'écrasement et au cisaillement. A Mulhouse et à Bâle, l'habitat collectif est principalement composé de maçonneries et de structures en béton armé. L'identification des matériaux de construction a été réalisée uniquement sur l'observation visuelle extérieure du bâti.

Les matériaux existants montrent de fortes variations de résistance à la compression. A titre d'exemple, d'un type de pierre calcaire à l'autre la résistance varie d'un facteur 100 [COLLECTIF, 1976]. La résistance des différents blocs de terre cuites oscille d'un facteur 4 et les blocs de béton de granulats d'un facteur 2,5 [LAGIER 2006]. Pour les matériaux plus

récents comme le béton des années 1970 et le béton des années 1990, il convient de noter des différences de 35% pour la compression et de 25% pour le cisaillement entre le béton des années 1970 et le béton des années 1990, ainsi que de 20% pour les armatures dédiées aux constructions en béton des années 1970 et des années 1990.

Nous proposons pour les immeubles en maçonneries, de déterminer la résistance caractéristique à la compression des matériaux par un calcul de vérification d'auto portance des bâtiments par l'application du DTU 20.1. Il s'agit en réalité de calculer la contrainte de compression (supposée constante) (C) par la relation suivante et de la comparer à la contrainte due à la charge en situation hors sismique (poids du bâti).

$$N_{ed} = 1,35 G + 1,50 Q \quad [\text{Eq}^\circ \text{n}^\circ 4]$$

$$C = R / N \geq N_{ed} \quad [\text{Eq}^\circ \text{n}^\circ 5]$$

Avec : G : Charges permanentes
 Q : Charges exploitations
 C : Contrainte de compression
 R : Résistance nominale à l'écrasement du matériau
 N : Coefficient global de réduction variant suivant le type de maçonnerie, le cas de chargement mais également selon la valeur de l'élanement
 N = 8 pour murs extérieurs avec $\lambda \leq 15$
 N = 6 Pour murs de refends avec $\lambda \leq 15$
 λ = Elancement du mur

Figure n° 58 : Résistance caractéristiques à la compression des matériaux
 Source : [LAGIER 2006].

La résistance caractéristique au cisaillement des maçonneries construites en pierres naturelles, en blocs de terre cuite ou de béton de granulats en joint remplis est déterminée selon les Eurocodes EC6.1 - NF EN 1996.1.1/NA, déc. 2009 - Clause 3.6.2 (3) + Tableau 3.4, et EC8.3 - NF EN 1998-3, déc. 2005 - Art. 2.2.1 (5)P.

Pour déterminer les caractéristiques des matériaux des bâtiments en béton armé, nous nous sommes référés aux préconisations de la réglementation. Les caractéristiques mécaniques des matériaux pour les structures en bétons armées sont déterminées en fonction de l'Eurocode EC2 et les règlements parasismiques PS92 et l'Eurocode 8. Les bâtiments en béton armé des années 1970 de type 3 sont construits en béton de classe C16/20 ou de classe C20/25, avec des armatures de type Fe400 ou de type Fe500. Les immeubles en béton armé des années 1990 à 2000 de type 5 sont constitués de béton de classe C20/25 ou de classe C25/30. Les armatures sont de type Fe500. Les caractéristiques des matériaux sont détaillées en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.B]

La détermination des caractéristiques mécaniques du bâti et des matériaux réalisées à partir d'une inspection visuelle, appuyée sur des fiches techniques, des normes et réglementations génèrent des incertitudes dans l'identification de ces caractéristiques.

Incertitudes liées aux caractéristiques mécaniques du bâti et des matériaux– La prise en compte des incertitudes va nous permettre de définir trois niveaux de résistance sismique des ouvrages : faible, moyen et élevé dans l'étude mécanique déterministe. Dans une étude de la résistance sismique du bâti, il existe plusieurs types d'incertitudes, incertitudes liées aux modèles mécaniques et les incertitudes liées à la mise en œuvre des matériaux et au respect des dispositions constructives. Il vient également s'ajouter les incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux, ainsi que les incertitudes liées à la conception architecturale des bâtiments et à l'application de la réglementation.

Les incertitudes liées aux modèles mécaniques ainsi qu'à la mise en œuvre des matériaux et au respect des dispositions constructives n'entrent pas dans le champ de cette étude. La vérification des dispositions constructives implique des examens non destructifs d'auscultation au radar de type " *Ferroskan* ". Ce type d'examen permet de détecter la présence d'armatures, d'estimer leurs positions, leur diamètre ainsi que leurs enrobages dans le béton.

Les incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux ont été déterminée par un coefficient de confiance CF_{KL} préconisé par l'article 3.3.1.(1), de l'Eurocode 8.3. Cet article 3.3.1(1) impose que soit réalisé des prélèvements pour des essais de résistance des matériaux. L'absence d'inspection à l'intérieur du bâti et de prélèvement d'échantillon de matériaux constitue une perte capitale d'informations. Les articles 3.3.2 à 3.3.4 qui définissent les différents niveaux de connaissance permettent de déterminer le coefficient de confiance à appliquer aux données caractéristiques de résistance des matériaux. Ce coefficient CF_{KLF} sera défini plus après dans l'étude mécanique déterministe.

Les incertitudes relatives à la conception architecturale des bâtiments dépendent de la position, de la dimension et du nombre de murs et poteaux composant les structures. Ces incertitudes tiennent également à la réglementation. L'évolution et l'application de la réglementation font varier les incertitudes relatives aux caractéristiques mécaniques des matériaux. Par exemple, dans les bâtiments en béton armé de type 3 des années 1950 à 1960, nous n'avons pas la certitude que les recommandations du règlement AS55 ont réellement été appliquées, ce qui peut être différent pour un bâtiment datant des années 1960-1970. Les incertitudes relatives à la position, à la dimension et au nombre de murs et poteaux ont été définies précédemment par un écart type des masses, des rigidités (inerties) et des fréquences fondamentales du bâti suite à une étude statistique d'un échantillon de bâtiments.

Les incertitudes liées à l'application de la réglementation parasismique ont été évaluées par des simulations numériques utilisant des valeurs fourchettes des caractéristiques de résistance des matériaux en rapport à la réglementation non parasismique et parasismique applicable à la date des constructions. Ces valeurs caractéristiques ainsi que les différentes réglementations, utilisés sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.B].

L'introduction de l'ensemble des incertitudes décrites précédemment conduit à envisager des combinaisons entre ces différents types d'incertitudes. Pour réaliser les calculs de vérification de la résistance sismique de l'habitat de la conurbation de Mulhouse – Bâle, nous retenons les trois combinaisons suivantes.

Tableau n° 33 : Combinaison de l'ensemble des niveaux d'incertitudes

| $I_2 \backslash I_1$ | Faible | Moyen | Elevé |
|----------------------|--------|-------|-------|
| Faible | X | - | - |
| Moyen | - | X | - |
| Elevé | - | - | X |

X : Combinaisons utilisées dans le modèle mécanique déterministe
 - : Combinaisons non utilisées dans le modèle mécanique déterministe
 I1 : Incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux
 I2 : Incertitudes relatives à la conception architecturale et au respect de l'application de la réglementation

Le coefficient de confiance spécifique aux incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux est introduit dans les calculs de vérification de résistance sismique des bâtiments. A l'opposé, les incertitudes liées à la conception architecturale des bâtiments et à l'application de la réglementation sont intégrées à différentes étapes de calcul de vérification de la résistance sismique des bâtiments. Ainsi, ce type d'incertitude qui est liée à la masse, à la rigidité et à la fréquence fondamentale des ouvrages entrent en jeu dans les calculs de l'effort tranchant (F_b) et moment fléchissant (M_b) en situation sismique. Les incertitudes liées à la masse des ouvrages sont également intégrées dans le calcul des charges gravitaires (charges hors situation sismique).

Les trois niveaux de résistance sismique des ouvrages (faible, moyen et élevé) vont constituer les données d'entrées dans l'analyse mécanique probabiliste. La résistance sismique des cinq types de Bâtiments Elémentaires Représentatifs doit permettre de déterminer un modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti.

1-3 Résistance mécanique déterministe du bâti

Mulhouse est une zone sismique modérée et l'habitat collectif à usage d'habitation est de catégorie II. En comparant le règlement parasismique Suisse et l'Eurocode, au chapitre 2, on a pu constater la proximité de ces deux règlements avec néanmoins quelques différences. Nous proposerons quelques adaptations afin de pouvoir appliquer l'Eurocode à la ville de Bâle. Nous envisageons ici d'utiliser l'Eurocode 8 (EC8.1 et EC8.3) ainsi que les exemples d'application développés par le groupe de travail de l'Association du Génie Parasismique [Groupe de travail AFPS-CSTB, 2013] et de Pierroni Lestuzzi et Marc Badoux [LESTUZZI et BADOUX 2013], pour concevoir un modèle d'évaluation de la vulnérabilité physique du bâti collectif à usage d'habitation. Cependant, il convient tout de même de souligner que dans son article 4.1(2)P ce règlement précise que :

" La présente norme est destinée à l'évaluation de bâtiments individuels, afin de décider de la nécessité d'une intervention sur la structure et d'élaborer les mesures de mise à niveau pouvant se révéler nécessaires. Elle n'est toutefois pas destinée à l'évaluation de la vulnérabilité de populations ou de groupes de bâtiments pour une évaluation des risques sismiques dans le cadre d'objectifs variés (par exemple pour déterminer le risque en termes d'assurance, pour établir les priorités en termes de réduction du risque, etc.) "

Il faut comprendre que chaque bâtiment est particulier et par conséquent, que l'évaluation de la résistance sismique doit faire l'objet d'une étude particulière pour chaque bâtiment. En réalité, ce règlement a été développé pour une démarche de protection. Dans le cadre de ce travail nous proposons d'utiliser ce règlement pour une démarche de prévention. En effet, nous respectons l'application de celui-ci en concevant notre modèle d'évaluation à partir d'un bâtiment pris individuellement que nous extrapolons à un groupe d'immeubles. L'Eurocode propose plusieurs méthodologies d'analyse pour réaliser la vérification d'un ouvrage en situation sismique. Deux approches sont fondées sur une analyse linéaire. Il s'agit d'une analyse par la méthode des forces latérales pour les bâtiments réguliers en élévation et d'une analyse modale applicable pour tout type de bâtiments (réguliers ou irréguliers). Les deux autres méthodes sont basées sur une analyse non linéaire. (Poussée progressive) et une analyse dynamique temporelle non linéaire destinées à réaliser des analyses plus approfondies. La figure suivante synthétise ces différentes approches.

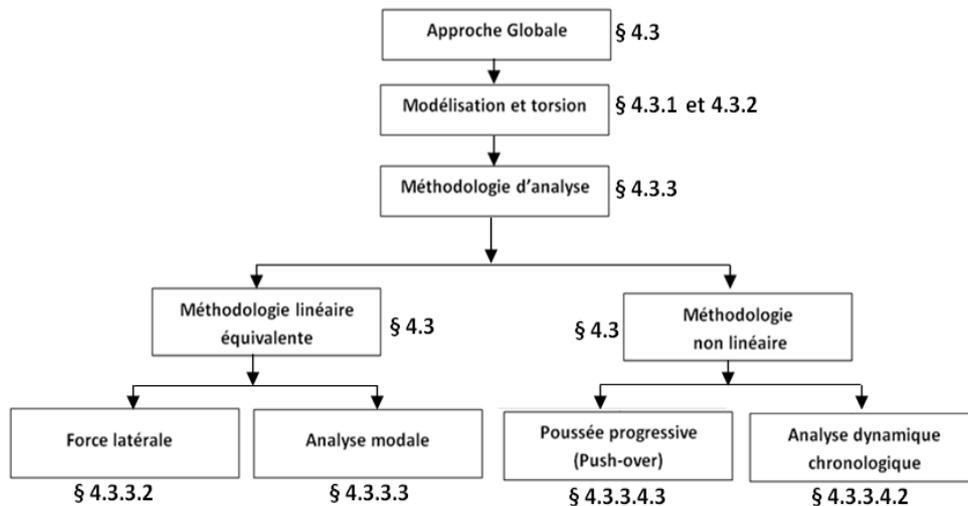


Figure n° 59 : Différentes approches préconisées par l'Eurocode 8 – norme NF EN 1998-1
 Source : [Eurocode 8 - Norme NF EN 1998-1 – Articles 4.3.3.1 à 4.3.3.3]

L'Eurocode permet notamment de sélectionner la méthode en fonction de la régularité en plan et en élévation du bâtiment. A Mulhouse et à Bâle nous utiliserons la méthode des forces latérales grâce à un modèle plan en deux dimensions (un modèle pour la direction X et un modèle pour la direction Y). La méthode des forces latérales est une méthode simplifiée de la méthode d'analyse modale, que nous allons présenter.

Analyse par la méthode modale – Dans le cas des structures irrégulières, la vérification de la résistance sismique se réalise par la méthode d'analyse modale [BISCH 2013 ; OSMANI 2013]. Cette dernière revient à modéliser un bâtiment réel en un modèle discret par éléments finis par exemple. Il est possible de simplifier la modélisation en utilisant un modèle dit "modèle brochette". La méthode se poursuit par un calcul des périodes propres, et l'évaluation des déplacements de la structure intégrant plusieurs modes prenant en compte 90% des masses sismiques. Le calcul des déplacements par le principe fondamental de la dynamique conduit en dernier lieu à l'évaluation des sollicitations. Cependant, L'Eurocode permet d'utiliser une méthode simplifiée dite " *Méthode des forces latérales* " pour des bâtiments dits réguliers tel que nous les avons déterminés précédemment lors de la définition des Bâtiments Elémentaires Représentatifs. Dans l'analyse par la méthode des forces latérales, les effets d'un séisme appliqués sur les bâtiments sont évalués à partir du principe fondamental de la dynamique (PFD) des structures. C'est ainsi qu'entre en jeu la mécanique déterministe par une analyse modale. Tout d'abord, il convient de considérer et modéliser les Bâtiments Elémentaires Représentatifs avec leurs caractéristiques mécaniques qui ont été définies précédemment.

Dans le cas d'un modèle brochette, il s'agit de concentrer les masses en un ensemble de points correspondant à chaque étage et de les relier par des éléments de poutres sans masse. Ce couple masses concentrées – poutres ont les mêmes propriétés d'inertie qu'un étage courant du bâtiment réel. En d'autres termes ces 2 modèles (continue et discret) ont même masse, même inertie, même amortissement et même raideur. Dans le cas présent d'une évaluation à grande échelle d'un groupe de bâtiments, l'interaction sol – structure est négligée, ainsi les fondations au contact du sol sont modélisées par un lien d'encastrement. Si cette interaction était intégrée au modèle, il faudrait modéliser l'interaction sol-structure dont les caractéristiques élastiques et d'amortissement sont décrites par des impédances. Un modèle est notamment proposé par Gazetas [GAZETAS, 1991]. La figure suivante (figure n° 60) illustre la modélisation des bâtiments selon le modèle " Brochette ".

Modélisation des ouvrages

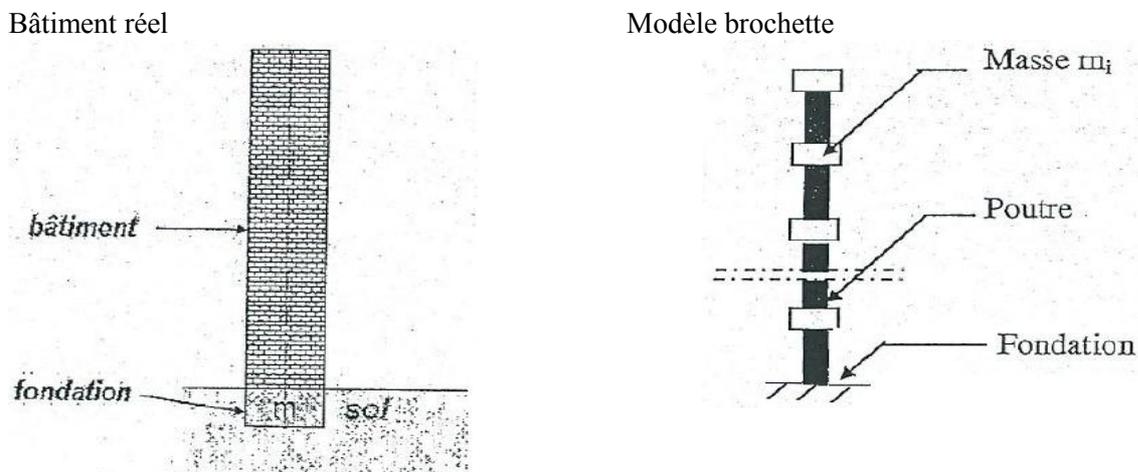


Figure n° 60 : Modélisation mécanique des Bâtiments Elémentaires Représentatifs par un modèle brochette

Le modèle mécanique défini est établi à partir du principe fondamental de la dynamique. Ce principe est développé physiquement à partir de l'équation du mouvement de la dynamique des structures. Cette équation a pour objectif d'exprimer l'équilibre des forces associées à chaque degré de liberté (DDL). Les degrés de liberté (déplacements et rotations des étages) correspondent aux effets de tractions/compressions, aux effets de cisaillements et également aux effets de flexions et de torsion sur le bâtiment étudié. Cette équation du mouvement est ainsi composée.

| | |
|-----------------------|--|
| Force appliquée : | $P_i(t)$ (Force sismique à l'instant t dû au déplacement du sol) |
| Force d'inertie | $M\ddot{u}_i$ (Masse et accélération du sol) |
| Force d'amortissement | $C\dot{u}_i$ (Amortissement et vitesse de déplacement du sol) |
| Force élastique | Ku_i (Raideur et déplacement) |
| Equation du mouvement | $[M]\ddot{u}_i + [C]\dot{u}_i + [K]u_i = p_i(t)$ [Eq° n° 6] |
| Avec : | $p_i(t) = [M]\ddot{u}_g$ |
| | (\ddot{u}_g : Accélération du sol dû au séisme) |

Figure n° 61 : Equation du principe fondamental de la dynamique des structures

Le développement de cette équation différentielle du second ordre en un système d'équations différentielles à résoudre est associé au modèle brochette. Cette résolution consiste à évaluer dans un premier temps les fréquences fondamentales de la structure étudiée lorsque celle-ci est en vibration libre et non amortie soit $P_i(t) = 0$ et $C = 0$. Cette équation a permis également d'utiliser une formule simplifiée que l'Eurocode préconise et que nous détaillerons. Dans un second temps, lorsque la structure est en vibration forcée et amortie soit $P_i(t) \neq 0$ et $C \neq 0$, la résolution du système d'équation précédent permet de calculer les déplacements, puis les sollicitations de traction/compression, de cisaillement et de flexion et de torsion de la structure. Ce sont ces derniers résultats qui nous intéressent pour vérifier la résistance des ouvrages. Cependant, en présence de bâtiments à étages périodiques (répétition successive des étages identiques), c'est-à-dire régulier en plan et en élévation, ce qui est le cas des Bâtiments Elémentaires Représentatifs de Mulhouse et Bâle, l'Eurocode nous affranchit de la méthode d'analyse modale en proposant une méthode de calcul simplifiée dite "*Méthode des forces latérales*". Parmi les simplifications admises, il y a d'une part l'action sismique (utilisation de spectre élastique) et d'autre part le calcul des périodes fondamentales, ainsi que l'intégration des effets de torsion du bâti par l'utilisation d'équations simplifiées. Le mouvement dû au séisme en un point donné de la surface du sol est représenté par un spectre de réponse élastique $S_e(t)$, en accélération. Les périodes fondamentales sont évaluées par des équations simplifiées. Les effets de torsions sont définis forfaitairement en intégrant les caractéristiques architecturales. Nous nous intéressons plus particulièrement à la méthode des forces latérales.

Analyse par la méthode des forces latérales – les simplifications permettent en premier lieu d'estimer l'effort tranchant en pied des ouvrages par un calcul direct. En deuxième lieu, il s'agit de répartir cet effort en élévation, puis réaliser une distribution sur les éléments verticaux. En dernier lieu, il suffit de comparer la capacité sismique et la demande sismique. La

démarche de vérification de la résistance du bâti se réfère au contrôle de résistance sismique à l'état initial (sans renforcement), d'un bâtiment pris individuellement et considéré comme étant représentatif d'un groupe de bâtiments. Cette dernière démarche permet de définir le niveau de vulnérabilité d'un groupe de bâtiments. En d'autres termes, nous allons analyser si le bâti collectif à usage d'habitation de Mulhouse et Bâle résiste à l'action sismique. La méthode d'analyse par les forces latérales peut être utilisée autant pour le bâti neuf que pour le bâti plus ancien. La méthode se compose de trois étapes dont la première consiste à définir les exigences de performance. Dans la deuxième étape, il faut estimer les efforts dans la structure que nous venons d'évoquer, et la troisième étape consiste à vérifier la sécurité initiale du bâti. Nous allons voir que certaines étapes de calculs sont similaires entre le bâti neuf et le bâti existant. Nous ferons ponctuellement référence à l'Eurocode (EC8.1) notamment à l'EC8.3 avec renvois à l'Eurocode (EC8.1).

Tableau n° 34 : Renvois de l'Eurocode 8.3 (bâti existants) à l'Eurocode 8.1 (bâti neuf)

| (*) | DESCRIPTION | REFERENCE | RENOIS |
|-----|--|---|--|
| 1 | Niveau d'exigence de performance | EC8.3 – EN 1998.3 – § 2 | Pas de renvoi |
| | Reconnaissance de la structure | EC8.3 – EN 1998.3 – § 3 | Pas de renvoi |
| 2 | Estimation des efforts dans la structure | EC8.3 – EN 1998.3 – § 4.1 à 4.4 | EC8.1 – EN 1998.1 – § 3 (Conditions de sol et actions sismiques), § 4 (Dimensionnement des bâtiments) § 5 (Règles particulières pour les bâtiments en béton) |
| 3 | Vérification du niveau de sécurité initial | - | - |
| 3.1 | Estimation au niveau global | EC8.3 – EN 1998.3 – § 4.5.1 et 4.6.(1)P | Pas de renvoi |
| 3.2 | Estimation au niveau local | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes C (maçonnerie et Annexes A (béton)) | Pas de renvoi |

Source : [Eurocode 8 – partie 1 et Partie 3] ; [CHENAF et TAILLEFERT 2011]

Au regard de l'Eurocode 8.3, les constructions doivent répondre à des exigences de performances. Le règlement impose de retenir le niveau d'exigence de " *Quasi-effondrement* " défini par l'Eurocode 8.3 (EC8.3) – article 2.1.(1)P. Ce niveau d'exigence de performance associé au critère de conformité d'état limite de " *Quasi-effondrement* " (NC) EC8.3 – article 2.2.2 permet de juger si le niveau de performance visé est atteint. C'est le cas si l'ouvrage est encore " *debout* " pour laisser le temps aux occupants d'évacuer les lieux.

Le choix de l'état limite à prendre en compte est fixé par les autorités nationales en fonction de l'importance du bâti. En France, pour l'habitat collectif c'est l'état limite (NC) non effondrement. En Suisse le règlement parasismique, bien qu'il soit fondé sur le rapport coût/bénéfice, est, comme nous l'avons vu au chapitre 2, très proche de l'Eurocode. Cela nous permet de retenir les préconisations de l'Eurocode 8.3. Avant de détailler le calcul des efforts dans les structures de la deuxième étape, il est nécessaire de définir les données sismiques. Nous avons vu au chapitre 2, selon l'Eurocode, que Mulhouse est classé en zone de sismicité Z3, qui correspond à une accélération de sol $a_g = 1,10 \text{ m/s}^2$ et Bâle est situé en zone Z4 qui correspond à une accélération de sol $a_g = 1,30 \text{ m/s}^2$. Nous proposons de retenir une valeur de $a_g = 1,10 \text{ m/s}^2$, pour être cohérent en zone frontalière et sachant que nous allons introduire une accélération de sol égale à a_g avec $\pm 20\%$ dans l'étude probabiliste pour intégrer les incertitudes. Le coefficient d'importance du bâti à usage d'habitation à Mulhouse comme à Bâle vaut $Y_1 = 1,00$. Ici, nous considérons provisoirement un sol de type rocheux (sol de classe A) dont le paramètre vaut $S = 1,00$. En définitive, il suffira d'appliquer aux résultats obtenus, les coefficients (S) réglementaires caractérisant le type de sol, identifié par le micro zonage du territoire de Mulhouse et Bâle.

L'Eurocode 8.3 impose dans ses paragraphes 3.3.1 à 3.3.4 de définir un niveau de connaissance des données d'entrées. Dans ses paragraphes 3.4.1 à 3.4.4 l'Eurocode 8.3 définit l'identification du niveau de connaissance de la géométrie des structures, des caractéristiques des matériaux et des dispositions constructives. Cette identification a pour objectif d'envisager les niveaux d'inspections à réaliser sur le bâti selon l'article 3.4.4. Ces niveaux permettent de définir un niveau de confiance exprimé par un coefficient de confiance de niveau 1 CF_{KL1} , de niveau 2 CF_{KL2} ou de niveau 3 CF_{KL3} , selon l'article 3.5. Ce coefficient a pour objectif d'intégrer les incertitudes relatives à la connaissance des bâtiments lorsqu'ils sont analysés individuellement pour un besoin éventuel de renforcement. L'identification des dispositions constructives et les quantités d'armatures sont définies dans ce qui suit à partir de références bibliographiques, de l'Eurocode 8.1 et de propositions de calcul. Pour les bâtiments en maçonnerie, l'Eurocode 8.3 – paragraphes C.2.3 imposent que les données recueillies comprennent notamment les données suivantes.

- Classification des murs en tant que murs non armés, armés ou confinés
- Pour les murs en maçonnerie armée, les quantités d'armatures horizontales et verticales.
- Identification du type et de l'état des liaisons entre les murs et les planchers ou les toitures

Pour les maçonneries de type 1, les liaisons entre planchers et murs sont considérées non ancrées, les murs sont non armés. Pour les maçonneries de type 2 et de type 4, les liaisons entre planchers et murs sont considérées comme ancrées. Les murs des ma-

çonneries de type 2 sont armés. Les murs des maçonneries de type 4 sont confinés. Les maçonneries de type 1 non armées bâties en pierres naturelles ne comportent généralement pas d'armature dans les lits de pose des pierres ni de chaînage horizontal et verticaux. Les maçonneries armées de type 2 construites en blocs de terre cuite des années 50 comportent des armatures de type Fe400 disposées dans les lits de poses des blocs et des chaînages horizontaux au niveau des planchers. Pour définir les dispositions constructives et les quantités d'armatures, nous nous proposons de se référer à l'EC8.1 – article 9.5.4. Il s'agit de retenir les quantités minimales d'armatures imposées par cet article.

Art. 9.5.4(1) : Il convient de placer des armatures horizontales dans les joints horizontaux ou dans des gorges créées à cet effet dans les blocs, l'espacement vertical ne dépassant pas 600 mm (c'est-à-dire tous les 3 rangs de "parpaing").

Art. 9.5.4(3) : Il y a lieu d'utiliser des armatures en acier d'un diamètre au moins égal à 4 mm pour encadrer les barres verticales aux extrémités du mur.

Art. 9.5.4(4) : Il convient que le pourcentage minimal d'armatures horizontales dans les murs, rapporté à la section brute, ne soit pas inférieur à 0,05 %, c'est-à-dire pour un mur de 20 cm de largeur la section minimale d'acier est de 1,00cm². Nous proposons de disposer 4 barres de diamètre 8mm = 2,00cm²

Art. 9.5.4(8) : Il convient de disposer des armatures verticales avec une section transversale au moins égale à 200 mm²

- Aux deux bords libres de chaque élément de mur ;
- A chaque intersection de mur ;
- A l'intérieur du mur, de manière à ne pas dépasser un espacement de 5 m entre les armatures.

La figure suivante illustre les dispositions constructives placées dans les maçonneries armées.

Maçonnerie armée

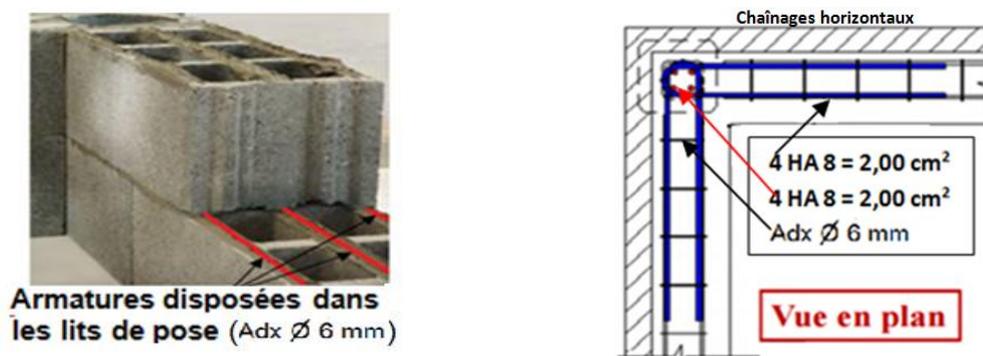


Figure n° 62 : Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les maçonneries armées

Source : D'après [JURASZEK et al. 2011] (modifié)

L'article 9.5.3 de l'EC8.1 spécifique aux maçonneries chaînées exige des dispositions constructives relatives aux chaînages horizontaux et verticaux. Les maçonneries de type 4 chaînées en blocs de béton de granulats des années 80 se composent aussi d'armatures dans les lits de poses des blocs et de chaînages horizontaux au niveau des planchers. Des chaînages verticaux sont disposés en renforcement au pourtour des murs et des baies. Les aciers sont de type Fe500. Les bétons de remplissages considérés sont de classe C12/16 ou de classe C16/20. Nous proposons de nous référer à l'EC8.1 – article 9.5.3 pour retenir les quantités minimales d'armatures.

Art. 9.5.3(4) : Il convient de placer les chaînages verticaux

- aux bords libres de chaque élément de mur de la structure
- de chaque côté des ouvertures pratiquées dans les murs, dont la surface est supérieure à 1,5 m²
- si nécessaire à l'intérieur du mur pour que l'espacement entre les chaînages ne dépassent pas 5 m
- à chaque intersection entre les murs de structure, lorsque les chaînages imposés par les règles ci-dessus sont distants de plus 1,5 m.

Art. 9.5.3(5) : Les chaînages horizontaux doivent être placés dans le plan du mur, au niveau de chaque plancher, et en aucun cas avec un espacement vertical supérieur à 4 m.

Art. 9.5.3(6) : La section transversale des armatures longitudinales des chaînages ne doit pas être inférieure à 3,00 cm² ni représenter moins de 1 % de la section transversale du chaînage.

Art. 9.5.3(8) : Il convient que l'acier de béton armé appartienne aux classes B ou C conformément à l'EN 1992-1-1 :2004, Tableau C.1.

La figure n° 63 illustre les dispositions constructives placées dans les maçonneries chaînées.

Maçonnerie chaînée

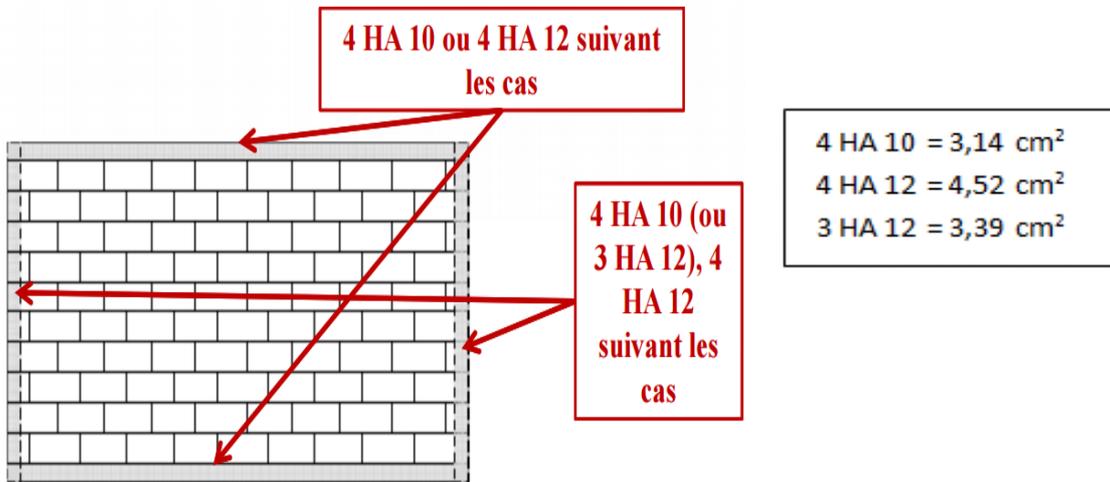


Figure n° 63 : Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les maçonneries chaînées

Source : D'après [JURASZEK et al. 2011] (modifié)

Pour les bâtiments en béton armé, l'Eurocode 8.3 – paragraphes A.2.3 imposent que les données recueillies comprennent notamment les éléments suivants.

- Quantité d'armatures longitudinales dans les poutres, poteaux et murs

Dans les constructions en béton armé, des chaînages sont disposés en about de planchers et des murs ainsi qu'aux pourtours des baies. La figure suivante illustre le principe général des dispositions constructives. La figure n° 64 illustre les dispositions constructives placées dans les constructions en béton armé.

Construction en béton armé

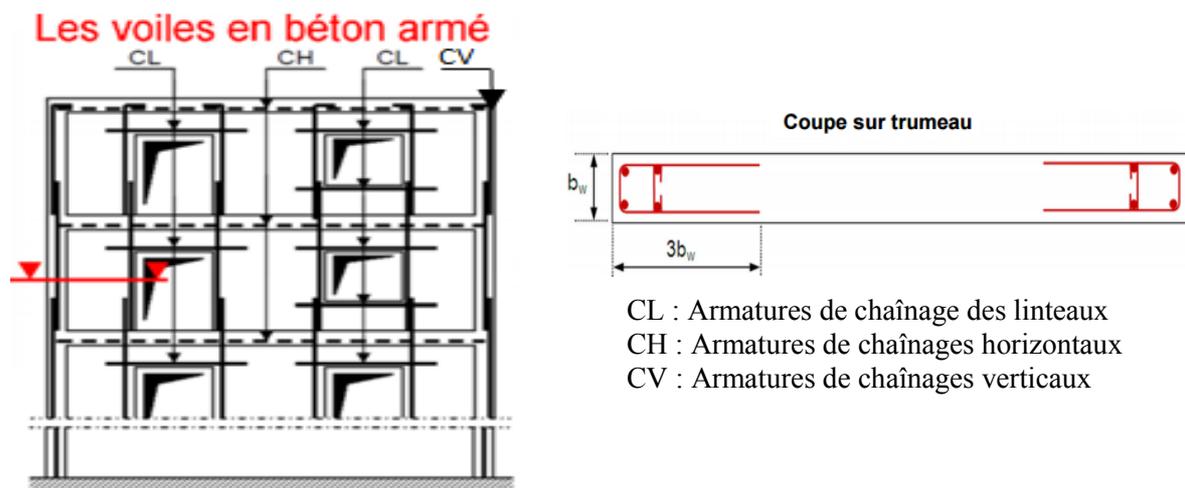


Figure n° 64 : Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les constructions en béton armé

Source : d'après [JURASZEK et al. 2011] (modifié)

Les quantités d'armatures ont été déterminées à partir de quelques exemples de notes de calculs [PAÏS 2013] ayant fait référence au règlement de L'Eurocode 2, [YAM-KOUDOUGOU H., 2010] au regard du PS92 et [HAREMZA 2011] pour l'Eurocode 8.1 ainsi que des fiches techniques [ZACEK 2010, Fiche B] de dimensionnement des murs. On a comparé les sollicitations de compression/traction, de cisaillement et de moments fléchissant. Ces calculs couvrent la majeure partie des bâtiments envisagés soit près de 90% des murs analysés. Les quantités d'armatures vont nous permettre de calculer les différents niveaux de résistance sismiques ainsi que les grandeurs relatives aux confinements des aciers. Ces grandeurs, que nous appellerons " *Grandeurs intermédiaires* " sont évaluées selon les classiques de calculs en béton armé [JALIL 2013 ; CHENAF 2013]. Ces résultats seront utilisés dans l'étape de vérification de la résistance des ouvrages. Détaillons les quantités d'armatures et la comparaison des sollicitations des bâtiments construits en béton armé selon les différents règlements.

Tableau n° 35 : Valeurs moyennes des dans les bâtiments en béton armé

| | REGLEMENTS | | |
|-----------------------------------|---|--|---|
| | EC2.1.1 | PS 92 | EC 8.1 |
| Armatures flexion composée | | | |
| Acers aux ELU | 8 HA \varnothing 16 e = 15 cm |  |  |
| Armature de confinement | | | |
| Aciers verticaux |  | 6 HA \varnothing 16 e = 15 cm | 10 HA \varnothing 32 e = 15 cm |
| Cadres Agrafes | 6 HA \varnothing 6 s _h = 15 cm | 8 HA \varnothing 6 s _h = 15 cm |  |
| Cadres Epingles |  |  | 8 HA \varnothing 16 s _h = 15 cm |
| Treillis soudé (TS) | ST ₅₀ \varnothing 8 mm 5,03 cm ² /ml/face 10 files/ml [Horizontal] 6 files/ml [Vertical] 5 Mailles 30*15 cm | ST ₄₀ \varnothing 7 mm 3,85 cm ² /ml/face 10 files/ml [Horizontal] 10 files/ml [Vertical] 5 Mailles 10*10 cm | TS \varnothing 10 mm 3,85 cm ² /ml/face 7 files/ml [Horizontal] 7 files/ml [Vertical] 5 Mailles 20*20 cm |
| Sollicitations | N_{ed} | V_{ed} | M_{ed} |
| EC 2.1.1 | 0,588 MN/ml | 0,186 MN/ml | 1,569 MN.m/ml |
| PS 92 | 0,251 MN/ml | 0,298 MN/ml | 1,050 MN.m/ml |
| Bâtiments (en B.A) de type n° 3 | | | 0,900 MN.m/ml |
| Niveau moyen | 0,910 MN/ml | 0,260 MN/ml | |
| Niveau élevé | 0,900 MN/ml | 0,370 MN/ml | 1,300 MN.m/ml |
| Sollicitations | N_{ed} | V_{ed} | M_{ed} |
| PS 92 | 0,251 MN/ml | 0,298 MN/ml | 1,050 MN.m/ml |
| EC 8.1 | 1,584 MN/ml | 1,370 MN/ml | 4,503 MN.m/ml |
| Bâtiments (en B.A) de type n° 5 | | | |
| Niveau moyen | 3,920 MN/ml | 0,690 MN/ml | 2,420 MN.m/ml |
| Niveau élevé | 0,790 MN/ml | 0,910 MN/ml | 3,200 MN.m/ml |

Source : [PAÏS 2013 ; YAMKOUDOUGOU ; HAREMZA ; ZACEK 2010, Fiche B]

Nous venons de déterminer le niveau de connaissance des données d'entrées et d'identifier le niveau de connaissance de la géométrie des structures, des caractéristiques des matériaux et des dispositions constructives. Il est donc possible d'envisager le niveau de confiance au regard du paragraphe 3.4 de l'EC8.3.

Tableau n° 36 : Niveaux de connaissance et données d'entrée

| Niveau de connaissance | Connaissance limitée KL1 | | | Connaissance normale KL2 | | | Connaissance intégrale KL3 | | |
|--|--------------------------|----------------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------|-----------|---------------------------------|----------------------------|-----------|
| | Géométrie | Dispositions constructives | Matériaux | Géométrie | Dispositions constructives | Matériaux | Géométrie | Dispositions constructives | Matériaux |
| Plans d'ensemble | b | | | b | | | b | | |
| Plans de construction détaillés | | | | | b | b | b | b | |
| Examen <i>in situ</i> visuel | a | | | a | | | a | | |
| Examen intégral | | | | | | | | | |
| Echantillonnage | b | | | b | | | b | | |
| Dimensionnement simulé | | a | a | | | | | | |
| Inspection <i>in situ</i> limitée : 20 % d'éléments soumis à vérification | | a | | | b | | | b | |
| Inspection <i>in situ</i> étendue : 50 % d'éléments soumis à vérification | | b | | | a | | | | |
| Inspection <i>in situ</i> complète : 80 % d'éléments soumis à vérification | | | | | | | | a | |
| Essais destructifs et non destructifs limités : un essai par niveau | | | a | | | b | | | b |
| Essais destructifs et non destructifs étendus : deux essais par niveau | | | | | | a | | | |
| Essais destructifs et non destructifs complets : trois essais par niveau | | | | | | | | | a |
| Rapports d'essais d'origine | | | | | | | | | b |
| Vérifications de capacité locale | modèle linéaire | | | modèle linéaire ou non linéaire | | | modèle linéaire ou non linéaire | | |

Source : [CHENAF et TAILLEFERT 2011; Eurocode 8.3 – § 3.4]

Le niveau de connaissance du bâti tel que nous venons de l'envisager est qualifié de niveau limité. En effet, nous n'avons pas réalisé 20% d'essais des éléments soumis à vérification ni d'essais destructifs et non destructifs comme le préconise la réglementation. Selon

l'article 3.3.1 (4) – Tableau 3.1 de l'EC8.3, cela implique un niveau de connaissance peu élevé, soit de niveau 1 qui correspond à un coefficient de confiance CF_{KL1} égal à 1,35.

Le calcul des efforts dans les structures, relatifs à la deuxième étape implique d'évaluer les charges gravitaires et la forces sismiques horizontale appliquées à la base du bâtiment étudié. Nous retiendrons les efforts maximaux appliqués dans les deux directions. Les charges verticales permettent de calculer la demande sismique en compression dans les murs. Les forces sismiques horizontales ont pour objectif d'évaluer la demande sismique en cisaillement des murs de contreventement. Les charges gravitaires sont évaluées selon un calcul de descente de charge classique qui revient à combiner ces charges à un coefficient de combinaison d'action $\Psi_2 = 0,30$. Ce coefficient est défini par la norme NF EN 1990 : 2003 – § 6.4.3.4. Les principes de calcul et les efforts gravitaires à la base de l'ouvrage sont récapitulés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.C]. La combinaison relative aux calculs sismiques définie par l'Eurocode 8.1 – art. 3.2.4(1)P), les accélérations de sol (spectre élastique des accélérations de sol) et principe de calcul de l'effort sismique à la base des ouvrages ainsi que les résultats sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.D]. L'effort tranchant à la base de l'ouvrage (F_b) résulte de la combinaison du spectre élastique, de la masse sismique de l'ouvrage et d'un coefficient (λ) de correction de la structure. L'Eurocode préconise d'utiliser le spectre élastique dans la détermination de l'accélération de sol qui nous affranchit du coefficient de comportement de la structure. Le calcul du spectre élastique $S_e(T_1)$ de type 1, détaillé en annexe dépend de l'accélération du sol (a_g) intégrant la catégorie des bâtiments (Y), le type de sol (Y), la période fondamentale du bâti (T_1). Le spectre élastique dépend aussi de la correction d'amortissement (η) de la structure. L'effort tranchant sismique à la base de l'ouvrage (F_b) doit être déterminé, pour chaque direction principale dans laquelle le bâtiment est analysé, au moyen de l'expression suivante.

$$F_b = S_e(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

S_e : Spectre élastique
 T_1 : Période fondamentale de la structure
 m : Masses sismique
 λ : Coefficient de correction de la structure

[Eq° n° 7]

Figure n° 65 : Equation simplifiée du calcul de l'effort tranchant à la base des bâtiments
 Source : [Eurocode 8.1 – NF EN1998.1– art 4.3.3.2.1(1)P]

Les efforts sismiques sont répartis en élévation, sur la hauteur des bâtiments. Pour réaliser la répartition des forces sismiques horizontales sur la hauteur des bâtiments, le règlement permet de supposer que les déplacements horizontaux des masses croissent linéairement suivant la hauteur du bâtiment, puisque dans la méthode des forces latérales le

mode fondamental est déterminé de manière approximative. L'exemple du bâtiment de type 1 (maçonnerie en pierres naturelles) est détaillé en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.E] pour illustrer l'organisation des calculs. La totalité des résultats sera utilisée dans la troisième étape de calcul. La répartition des forces sismiques horizontales F_i est déterminée par l'expression.

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 8]$$

m_i, m_j sont les masses des niveaux calculées conformément à 3.2.4(2).

z_i, z_j sont les hauteurs des masses m_i, m_j au-dessus du niveau d'application de l'action sismique (fondations ou sommet d'un soubassement rigide)

Figure n° 66 : Equation simplifiée du calcul de la répartition des forces sismiques sur la hauteur des bâtiments

Source : [Eurocode 8.1 – NF EN1998.1– art 4.3.3.2.3(3)]

Les efforts sismiques et gravitaires sont distribués à chaque étage sur les murs porteurs. Ces efforts sont distribués au prorata des raideurs, c'est-à-dire au prorata des inerties des éléments verticaux de contreventements (murs porteurs). Nous n'intégrerons pas les raideurs des poteaux qui ont une contribution négligeable pour le type de bâtiments étudiés où il y a des murs porteurs. Les inerties sont calculées en tenant compte de la déformation de cisaillement du fait de la hauteur des bâtiments au regard des longueurs de murs. La prise en compte des déformations de cisaillement est faite en calculant pour chaque mur une inertie équivalente restituant les déformations totales (flexion + cisaillement). L'inertie équivalente (I_v) est déterminée en additionnant la déformées de l'effort de flexion et la déformée de l'effort tranchant. Ce calcul est détaillé dans le support pédagogique " *Ponts Formation Conseil* " [CHENAF 2013]. Cette inertie est notée I_v et vaut.

$$I_v = \frac{I}{1 + \frac{36 I (1+\nu)}{5 L_t H^2}} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 9]$$

I : Moment d'inertie de flexion
 ν : Coefficient de poisson
 L : Longueur des murs
 t : Epaisseur des murs
 H : Hauteur des murs

Figure n° 67 : Equation de calcul de l'inertie intégrant la déformées de flexion et la déformée de tranchant

Source : [CHENAF 2013, Support pédagogiques " *Ponts Formation Conseil*"]

Les effets de torsion sont intégrés par un coefficient amplificateur (δ) défini préliminairement par l'équation suivante, l'analyse étant réalisée à l'aide de deux modèles plans, un pour chaque direction horizontale principale.

$$\delta = 1 + 1,2 \cdot \frac{x}{L_e} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 10]$$

x est la distance en plan de l'élément considéré au centre de masse du bâtiment en plan, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée

L_e est la distance entre les deux éléments de contreventement extrêmes, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

Figure n° 68 : Equation simplifiée de calcul de la torsion dans les bâtiments
Source : [Eurocode 8.1 – NF EN1998.1 – art. 4.3.3.2.4(1) et art. 4.3.3.2.4(2)]

Les efforts sismiques horizontaux distribués sur les murs porteurs sont évalués selon les deux équations suivantes. L'exemple du bâtiment de type 1 (maçonnerie en pierres naturelles) est détaillé en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.F].

$$F_{X_i, Y_i} = F_b \cdot \delta \cdot \frac{I_v}{\sum I_v} \quad \begin{array}{l} F_{X_i, Y_i} : \text{Force sismiques distribués dans les murs} \\ F_b : \text{Force sismique appliquée à l'étage} \\ I_v : \text{Inertie équivalente (flexion + cisaillement)} \\ \sum I_v : \text{Somme des Inerties équivalentes (flexion + cisaillement)} \\ \delta : \text{Coefficient majorateur de torsion} \end{array} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 11]$$

$$M_{X_i, Y_i} = M_b \cdot \delta \cdot \frac{I_v}{\sum I_v}$$

Figure n° 69 : Equation simplifiée de calcul de la distribution des forces sismiques sur les murs porteurs
Source : [CHENAF 2013, Support pédagogiques " Ponts Formation Conseil "]

Les charges gravitaires sont réparties en évaluant les surfaces de plancher reprises par chacun des murs, additionnés du poids propres des murs eux-mêmes. Nous proposons de calculer un coefficient de répartition des charges par un rapport entre la surface de plancher reprises par les murs et la surface enveloppe du bâtiment. Ainsi, ce coefficient de répartition est déterminé pour chaque mur. Cette démarche répartit l'ensemble des charges gravitaires sur les murs. Nous détaillons à titre d'exemple en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.G] les résultats du bâtiment en maçonnerie de type 1 (pierres naturelles). L'ensemble de ces résultats est reporté et utilisé dans la troisième étape de vérification de la résistance des murs à la compression. La répartition charges gravitaires ($p_{inf,j}$) est déterminée par l'expression suivante.

$$p_{inf,j} = [G \cdot K_{Gj}] + [\Psi_2 \cdot Q \cdot K_{Qj}]$$

G : Charges permanentes
 Q : Charges d'exploitations
 K_{Gj} : Coefficient de répartition des Charges permanentes
 K_{Qj} : Coefficient de répartition des Charges d'exploitations
 Ψ_2 : Coefficient de combinaison d'action

[Eq° n° 12]

Figure n° 70 : Equation simplifiée de calcul de la distribution des charges gravitaires sur les murs porteurs

Il est désormais nécessaire de vérifier la résistance des éléments primaires que sont les murs de contreventement et les murs et poteaux porteurs. Le principe de vérification de la résistance du bâti est de contrôler si la demande sismique des structures est inférieure à la capacité résistante [Eurocode 8.3.]. La demande sismique est l'action sismique appliquée à la structure. La capacité résistante est la résistance maximale à laquelle l'ouvrage est capable de résister. La procédure de vérification porte sur la structure globale, c'est-à-dire sur le cumul de résistance de l'ensemble des éléments primaires (éléments porteurs) et sur les éléments primaires pris individuellement. Concrètement, le rapport de la demande sur la capacité doit être inférieur ou égal à 1. Dans l'Eurocode l'annexe C pour les maçonneries et l'annexe A pour le béton armé, proposent pour évaluer la résistance initiale des murs, de prendre en compte différents éléments indiqués dans le tableau n° 37.

Tableau n° 37 : Méthodes et réglementation relative à la vérification de la résistance sismique du bâti

| CONSTRUCTION EN MACONNERIE | | |
|--|---|--|
| Type d'action | Méthode | Référence |
| Tous types d'action | Méthode linéaire d'analyse de la structure (notamment les forces latérales) | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes C - § C.3.1 et § C.3.2 |
| Flexion simple ou composée ou action normale | Limitation du cisaillement | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes C - § C.4.2 |
| Effort tranchant | Limitation du cisaillement | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes C - § C.4.3 |
| CONSTRUCTION EN BETON ARME | | |
| Flexion simple ou composée | Limitation de corde | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes A - § A.3.2 |
| Effort tranchant | Méthode générale de la partie 1 | EC8.3 – EN 1998.3 – Annexes A - § A.3.3 |

Source : Extrait [CHENAF et TAILLEFERT 2011]

Notre objectif dans cette troisième étape est de déterminer trois niveaux de résistance sismique du bâti à partir des bâtiments élémentaires représentatifs un niveau faible, un niveau moyen et un niveau élevé de résistance. Il est proposé dans un premier temps de développer la démarche de vérification de la résistance sismique identique aux maçonneries et aux constructions en béton armé, puis de poursuivre en développant la démarche particulière relative aux maçonneries et en dernier lieu la vérification spécifique aux bâtiments en béton armé. Nous détaillons en annexe les règlements ainsi que l'organisation des calculs dont nous avons fait usage pour réaliser cette troisième étape de calcul.

La procédure de vérification similaire aux deux types de construction revient à contrôler que le rapport entre la demande sismique et la capacité est inférieur à 1, car la demande doit être inférieure à la capacité. Cette vérification est réalisée localement pour chaque mur examiné individuellement et globalement par un cumul de chaque mur selon les équations suivantes.

Global :

$$\rho = \frac{\sum_i^N D_i}{\sum_i^N C_i}$$

Di : Demande sismique de chaque mur [Eq° n° 13]
 Ci : Capacité sismique de chaque mur
 N : Nombre de murs

Local :

$$\rho_i = \frac{D_i}{C_i}$$

Di : Demande sismique [Eq° n° 14]
 Ci : Capacité sismique

Figure n° 71 : Equation simplifiée de la vérification de la résistance des bâtiments
 Source : EC8.3 – Article 4.4.2(1)P

Les murs en maçonnerie sont considérés dans cette présente étude comme fragiles. La rotation est possible en pied des murs. Dans les constructions en béton armé, les murs sont considérés ductiles. En résistance des matériaux, la ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.

Résistance à la compression des murs en maçonnerie

L'article 9.6.(1)P de l'Eurocode 8.1 impose qu'une vérification soit effectuée. Cela revient à contrôler que les bâtiments ne s'effondrent pas sous les charges gravitaires. L'article 9.6.(2)P de l'Eurocode 8.1 renvoi à l'Eurocode 6 – NF EN 1996 1.1 pour déterminer la capacité de résistance sismique des murs. La demande sismique est évaluée selon la méthode classique de calcul des charges gravitaires. Les charges gravitaires sont le poids des matériaux, le poids des habitants. La comparaison de la capacité et de la demande sismique est réalisée selon l'équation suivante.

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

N_{Rd} : Capacité résistante en compression [Eq° n° 15]
 N_{Ed} : Demande en compression (évalué selon la méthode classique des calculs de descente de charge)

Nota : Le détail de calcul de la longueur comprimée des murs (l_c) et de N_{Ed} et de N_{Rd} sont développés en annexe [Annexe n° 5 – annexe 5.]

Figure n° 72 : Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie soumis aux efforts de compression/traction
 Source : EC6 – Article 6.1.2.1 (1)P – Eq° 6.1 et 6.2

Cette équation s'applique pour les maçonneries non armées, armées et chaînées. Elle doit être vérifiée pour chacun des murs. Pour la vérification globale des bâtiments, il suffit de réaliser le rapport de la somme de la demande (N_{ed}) et de la capacité (N_{Rd}) tel que défini par l'équation évoquée précédemment.

Résistance au cisaillement des murs en maçonnerie

L'annexe C de l'Eurocode 8.3 fournit une méthode pour évaluer la résistance au cisaillement des murs. Le cisaillement des murs provient des forces sismiques. Dans le cas de l'état limite de non effondrement (NC), le paragraphe C.4.2.1 s'applique. La capacité de résistance au cisaillement est vérifiée en suivant les articles C.4.2.2 (3) et C.4.3.1 (3). Ces deux articles signifient que la résistance au cisaillement est contrôlée soit par la flexion ou soit par l'effort tranchant.

Murs en maçonneries non armée et maçonnerie armée

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \text{Min} \begin{cases} V_f = \frac{DN}{2H_0}(1 - 1,15v_d) & \text{Contrôle par flexion} & \text{Contrôle par flexion} \\ V_f = f_{vd}D't & \text{Contrôle par tranchant} & \text{Contrôle par tranchant} \end{cases} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 16]$$

V_{ed} : Demande sismique au cisaillement (évalué selon la méthode classique de la résistance des matériaux)

V_{Rd} : Capacité de résistance sismique au cisaillement

Nota : Le détail de calcul de V_{ed} et V_{Rd} sont développés en annexe [Annexe n° 5 – annexe 5.I]

Figure n° 73 : Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie soumis aux efforts de cisaillement

Source : EC8.3 – Articles C.4.2.1 (3) et C.4.3.1 (3)

Pour les maçonneries chaînées, il y a lieu de tenir compte des armatures qui se trouvent dans les chaînages verticaux en béton armé pour calculer la capacité de résistance sismique des murs soumis au cisaillement.

Murs en maçonneries chaînées

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = f_{vd} \cdot t \cdot l_{maç.} + \sum A_c \cdot [f_{cvk} / \gamma_c] \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 17]$$

V_{Ed} : Demande sismique à au cisaillement

V_{Rd} : Capacité de résistance sismique au cisaillement

f_{vd} : est la résistance de calcul au cisaillement de la maçonnerie

t : est l'épaisseur du mur

$l_{maç.}$: est la longueur maçonnée du mur

$\sum A_c$: est la somme des sections de béton des chaînages verticaux

γ_c : est le coefficient partiel de sécurité du béton = 1,5 à l'ELU fondamental et 1,2 en situation accidentelle

f_{cvk} : est la résistance caractéristique au cisaillement du béton.

Nota : Le détail de calcul de V_{ed} et V_{Rd} sont développés en annexe [Annexe n° 5 – annexe 5.I]

Figure n° 74 : Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie chaînée soumis aux efforts de cisaillement

Source : EC8.3 – Articles C.4.2.2 (3) et C.4.3.1 (3)

S'agissant de la résistance sismique des constructions en béton armé, on applique les articles A3.2 et A3.3 de l'annexe A de l'Eurocode 8.3 pour l'état limite de non effondrement (NC). Ces deux articles donnent une méthode de calcul pour évaluer la résistance à la flexion des murs et à l'effort tranchant. Elles consistent à vérifier la capacité en rotation de corde. Une rotation de corde correspond à la courbure des bâtiments suite à leur balancement dû aux séismes.

Résistance à la flexion des murs en béton armé

La capacité de résistance sismique des murs en béton armé soumis à un effort de flexion est évaluée par la relation suivante.

Murs en béton armé

DEMANDE

| | |
|---|--|
| $N_{ed,m} = G + \psi_{2i} * Q$ | EC0.1 - Art. 6.4.3.4 (1)P - Eq. 6.12(a) |
| $V_{ed,m} = \max [F_{Xl} ; 0,3 * F_{Yl}]$ Pour la direction X | EC8.1 - Art 4.3.3.5.1 (3) - Eq. 4.18 et 4.19 CISAILEMENT |
| $M_{ed,m}$ | Calculs selon répartition des forces sismiques |
| D : Déplacement relatif imposé par les planchers | Calcul de la déformée des bâtiments |

CAPACITE

Rotation de corde ultime

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{oi}} 0.016 \cdot (0.3)^{\omega} \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.36} \frac{1}{25} \left(\frac{\sigma_{max}}{f_c} \right)^{0.25} (1.25^{100/\mu_s})$$

EC8.3 - Art 3.2.2 (1) et Art 3.2.2 (3) - Eq. A1 - Annexe A (informative)
Structure béton armé

$L_v = M_{ed} / V_{ed}$
EC8.3 - Art. 3.2.2 (1)P

$V = N_{ed} / [L * \lg * f_c]$
EC8.3 - Art. 3.2.2 (1)P

Rotation de corde plastique

$$\theta_{um}^p = \theta_{um} - \theta_y = \frac{1}{\gamma_{oi}} 0.0145 \cdot (0.25)^{\omega} \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} \right]^{0.3} f_c^{0.2} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} \frac{1}{25} \left(\frac{\sigma_{max}}{f_c} \right)^{0.25} (1.275^{100/\mu_s})$$

EC8.3 - Art 3.2.2 (1) et Art 3.2.2 (3) - Eq. A1 - Annexe A (informative)
Structure béton armé

| | |
|--|-------------|
| $C_i = \theta_{um} * Ht$ Capacité en rotation de corde | [Eq° n° 18] |
|--|-------------|

Figure n° 75 : Equation de calcul de la résistance des murs en béton armé soumis aux efforts de compression/traction
Source : Eurocodes EC0 – EC8.1 - EC8.3

La demande de résistance sismique des murs en béton armé soumis à un effort de flexion est évaluée par un calcul classique en résistance des matériaux de la déformée d'une poutre encastree. Il suffit de calculer la déformée de la poutre en décomposant une à une les forces sismiques horizontales disposées au niveau de chaque plancher. La figure n° 76 illustre la démarche de calcul.

Murs en béton armé

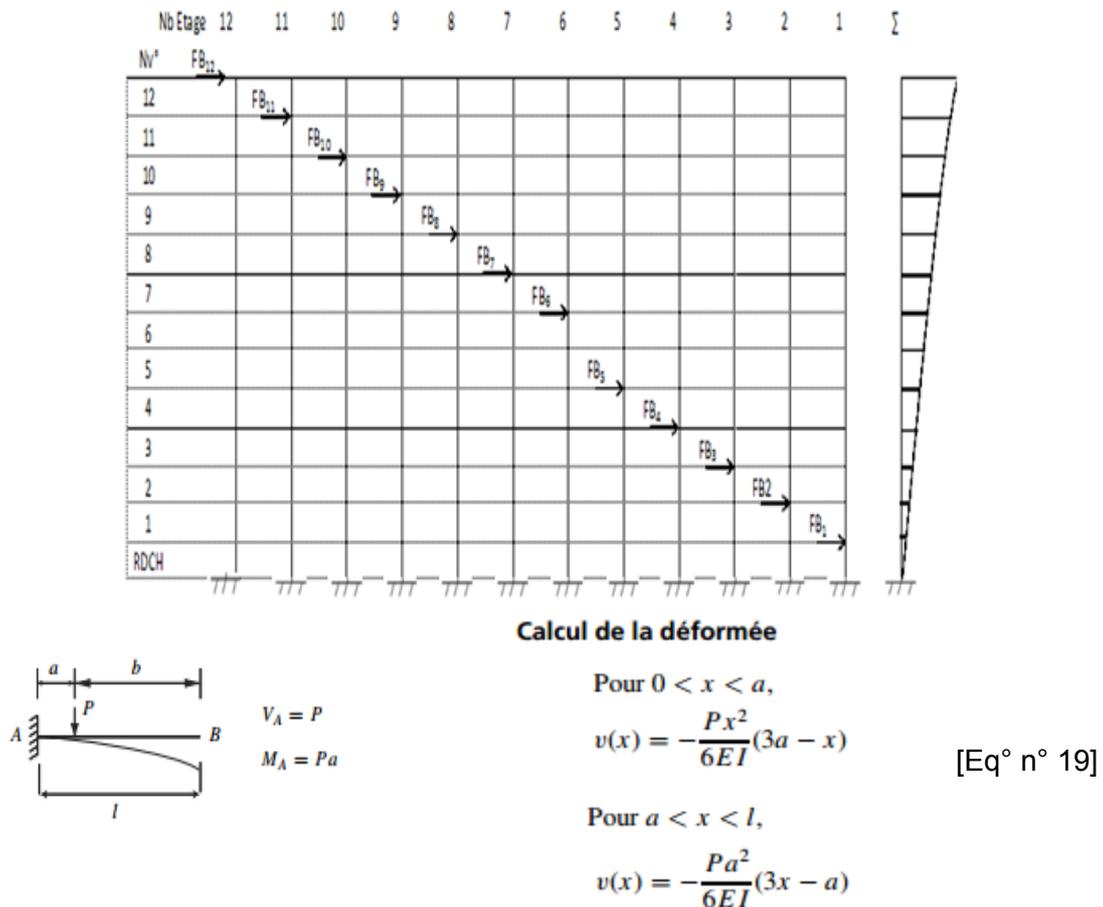


Figure n° 76 : Méthode de calcul de la déformée des bâtiments et des murs en béton armé
 Source : [DEPLACE et al. 2008 (Résistance des matériaux)]

Lorsque la déformée D_i est inférieure à la déformée ultime, le mur est suffisamment résistant à la flexion.

Résistance au cisaillement des murs en béton armé

Il est également nécessaire de réaliser la vérification de la résistance à l'effort tranchant. La vérification au cisaillement s'effectue à l'effort tranchant par écrasement et à l'effort tranchant cyclique.

Murs en béton armé

Murs soumis à un effort tranchant**DEMANDE** $V_{ed, m} = \max [F_{Xl} ; 0,3 \cdot F_{Yl}]$ Pour la direction X EC8.1 - Art 4.3.3.5.1 (3) - Eq. 4.18 et 4.19 **CISAILLEMENT****Capacité de résistance**

Résistance à l'effort tranchant

$$V^1_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-X}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left(1 - 0,05 \min\left(5; \mu_{\Delta}^p\right) \right) \cdot \left[0,6 \max(0,5; 100 \rho_{ot}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} \rho_w + V_w \right] \right]$$

EC8.3 - Art. A.3.3.1 (1)

Résistance à l'effort tranchant

$$V^2_{Rd} = 0,85 \left(\frac{1 - 0,06 \min\left(5; \mu_{\Delta}^p\right)}{\gamma_{el}} \right) \left(1 + 1,0 \min\left(0,15; \frac{N}{A_c f_c}\right) \right) \left(1 + 0,25 \max\left(1,75; 100 \rho_{ot}\right) \right) \left(1 - 0,2 \min\left(2; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} b_w z$$

EC8.3 - Art. A.3.3.1 (2)

RESISTANCE $\rho_{global} = D_{global} / C_{global}$

Cisaillement

EC8.3 - Art. 4.4.2 (1)P

 $\rho_{global} = D_{global} / C_{global}$

Flexion

EC8.3 - Art. 4.4.2 (1)P

$$V_{Ed} \leq V_{Rd_{max}} = \text{Min} \left| \begin{array}{l} V^1_{Rd} \\ V^2_{Rd} \end{array} \right.$$

[Eq° n° 20]

 V^1_{Rd} : Effort tranchant par écrasement V^2_{Rd} : Effort tranchant sous charges cycliques

Figure n° 77 : Equation de la vérification de la résistance des murs en béton armé soumis aux efforts de cisaillement

Source : Eurocodes EC8.1 - EC8.3

L'expression V^1_{Rd} est utilisée pour la résistance à l'effort tranchant lorsqu'elle est contrôlée par les cadres (armatures). La résistance à l'effort tranchant d'un mur en béton, ne peut être prise au-delà de la valeur correspondant à une rupture par écrasement des âmes, $V_{R,max}$ qui sous l'application de charges cycliques, peut être calculée à partir de l'expression V^2_{Rd} .

Les réglementations utilisées et les principes de calculs de la résistance sismique du bâti sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.I]. Les résultats de la troisième étape de calcul (résistance sismique du bâti) sont récapitulés dans les figures n° 78, 79 et 80.

Résultats mécanique déterministe (valeurs moyennes au cisaillement)

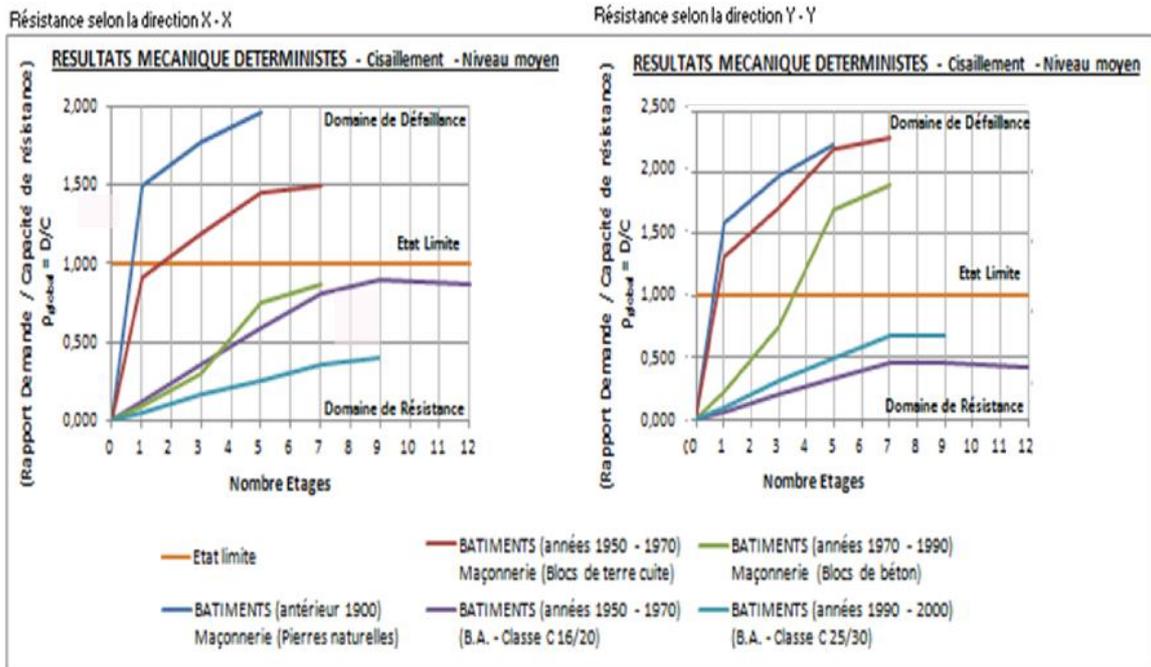


Figure n° 78 : Résistance sismique du bâti reposant sur un sol de type rocheux (classe A) soumis aux efforts de cisaillements selon l'étude mécanique déterministe

Résultats mécanique déterministe (valeurs moyennes à la compression)

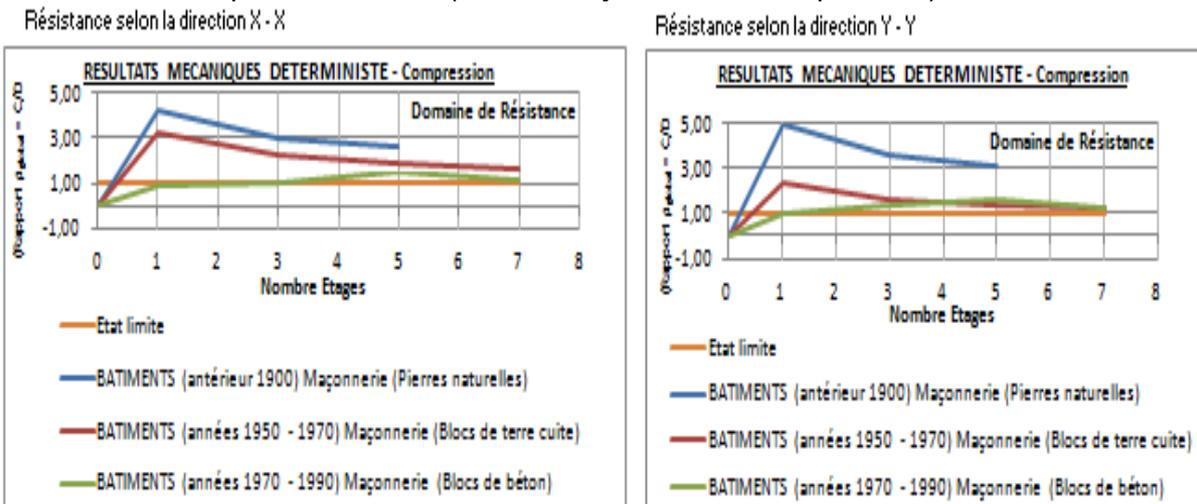


Figure n° 79 : Résistance sismique du bâti reposant sur un sol de type rocheux (classe A) soumis aux efforts de traction/compression selon l'étude mécanique déterministe

Résultats mécanique déterministe (valeurs moyennes à la flexion)

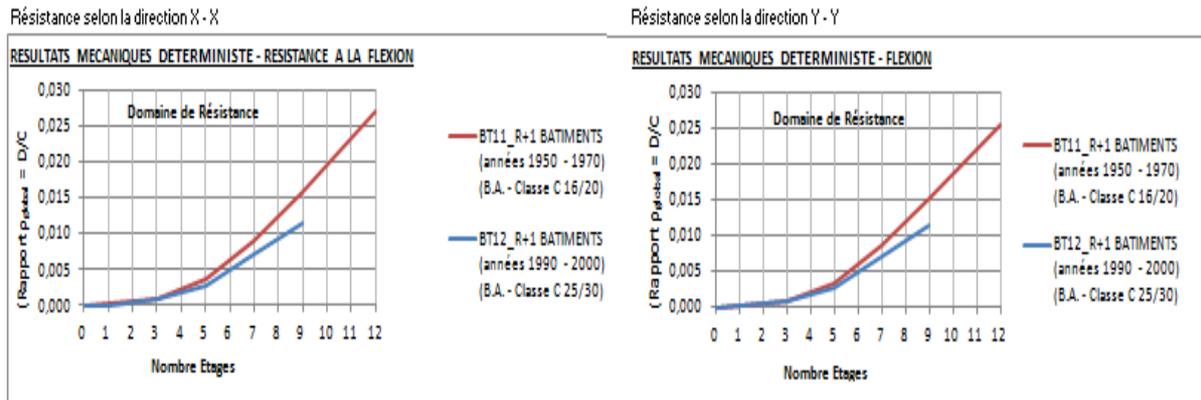


Figure n° 80 : Résistance sismique du bâti reposant sur un sol de type rocheux (classe A) soumis aux efforts de flexion selon l'étude mécanique déterministe

En définitive il est possible d'observer à travers ce graphique qu'aux sollicitations de cisaillement, les bâtiments construits en béton armé sont plus résistants que les constructions en maçonnerie. Il nous paraît également important de souligner que les chaînages disposés dans les maçonneries constituent un renfort non négligeable. Les bâtiments anciens construits en pierres naturelles au-delà de 3 étages sont plus vulnérables que les maçonneries armées des années 1950. En revanche, l'ensemble des structures maçonnerie paraissent résister aux sollicitations de compression. Les bâtiments construits en béton armé résistent aux sollicitations de flexion. Cette première conclusion est valide pour les constructions assises sur des sols rocheux. Nous avons constaté (chapitre 3) que les substrats de Mulhouse et de Bâle ne sont pas de type rocheux. Néanmoins, à partir d'un sol de classe A (rocheux), nous avons conçu un modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti. Les caractéristiques du substrat de notre terrain d'étude vont être prises en compte par application d'un coefficient préconisé par l'Eurocode dans notre étude de cas développée au chapitre 6.

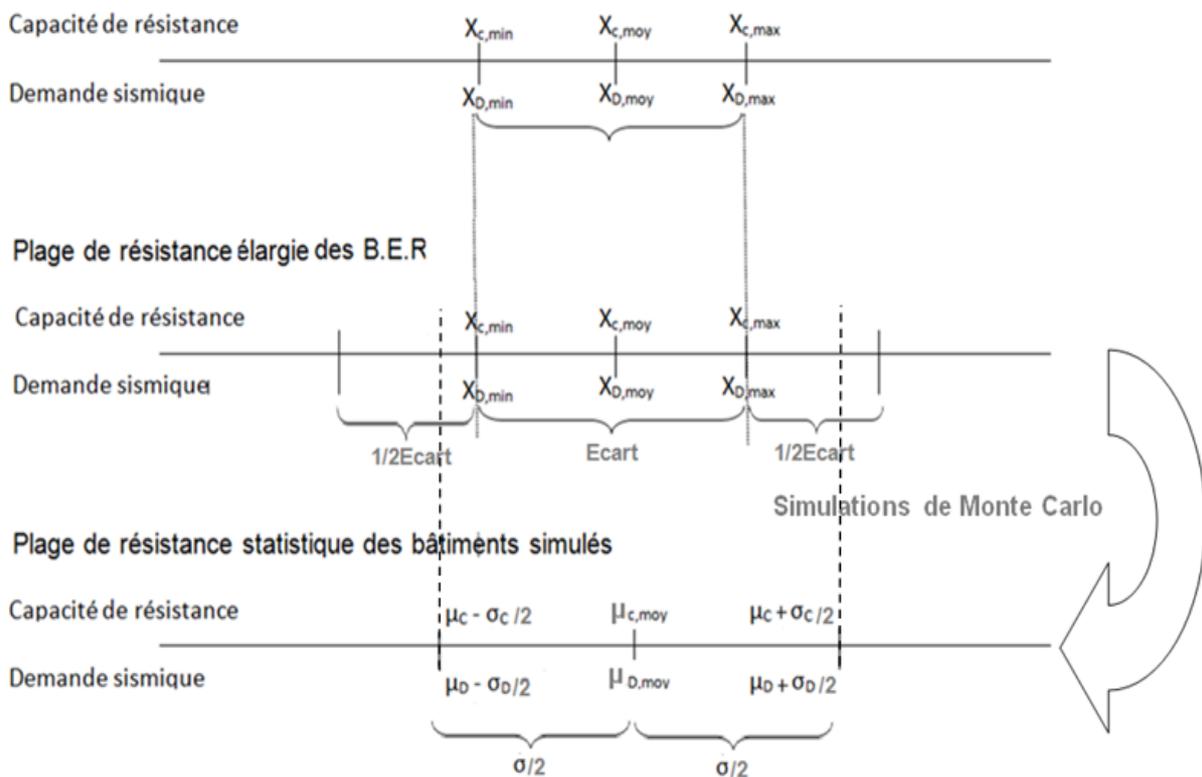
Ce modèle demande à être affiné par une analyse statistique afin d'intégrer un plus grand nombre de bâtiments dans l'étude de la résistance mécanique déterministe.

1-4 Résistance mécanique statistique déterministe du bâti

Nous avons élargi l'information disponible initiale par la génération d'une campagne de mesure de la demande et de la capacité sismique des bâtiments à l'aide de simulations de Monte Carlo. Nous pourrions ainsi définir une nouvelle plage de résistance (demande – capacité sismique), composée d'une valeur moyenne et d'un écart type (figure n° 81). Sachant que les bâtiments sont résistants à la compression/traction et à la flexion, l'analyse est

développée au regard de la sollicitation prépondérante qui est la sollicitation au cisaillement. Nous partons de la plage de résistance initiale des Bâtiments Élémentaires Représentatifs, des valeurs minimum et maximum ainsi que de la valeur moyenne de résistance. Cette plage est ensuite élargie d'un demi-écart à la moyenne. Nous réalisons ensuite des simulations numériques de Monte Carlo pour déterminer la capacité et la demande sismique d'un grand nombre de structures (350 bâtiments). Les simulations numériques des 350 bâtiments permettent de définir la plage de résistance correspondant aux 350 bâtiments. La figure suivante (figure n° 81) illustre notre démarche.

Plage de résistance initiale des B.E.R



B.E.R. : Bâtiments Élémentaires Représentatifs

Figure n° 81 : Démarche pour élargir l'information du bâti de Mulhouse et de Bâle collectée sur le terrain

Nous avons réalisé artificiellement des évaluations de la demande et de la capacité de résistance sismique à partir des niveaux de résistance des Bâtiments Élémentaires Représentatifs définis par l'étude mécanique déterministe. Ces simulations se composent de 350 tirages aléatoires pour chaque type de bâtiments identifiés. Cela revient à dire que nous avons "évalué" la demande – capacité de résistance sismique de 350 immeubles. Il convient également de préciser que nous avons augmenté la plage de résistance initiale (demande – capacité) d'un demi-écart afin d'intégrer les incertitudes des valeurs extrêmes définies initialement par l'étude mécanique déterministe. Cette étude mécanique statistique nous a permis d'affiner les niveaux (faible, moyen et élevé) de capacité et résistance sismique du bâti. Le principe de calcul des simulations de Monte Carlo sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.J]. Les résultats de la résistance sismique des bâtiments soumis aux efforts de cisaillement apparaissent dans la figure suivante (figure n° 82).

RESULTATS STATISTIQUE DETERMINISTE (Valeurs moyennes)

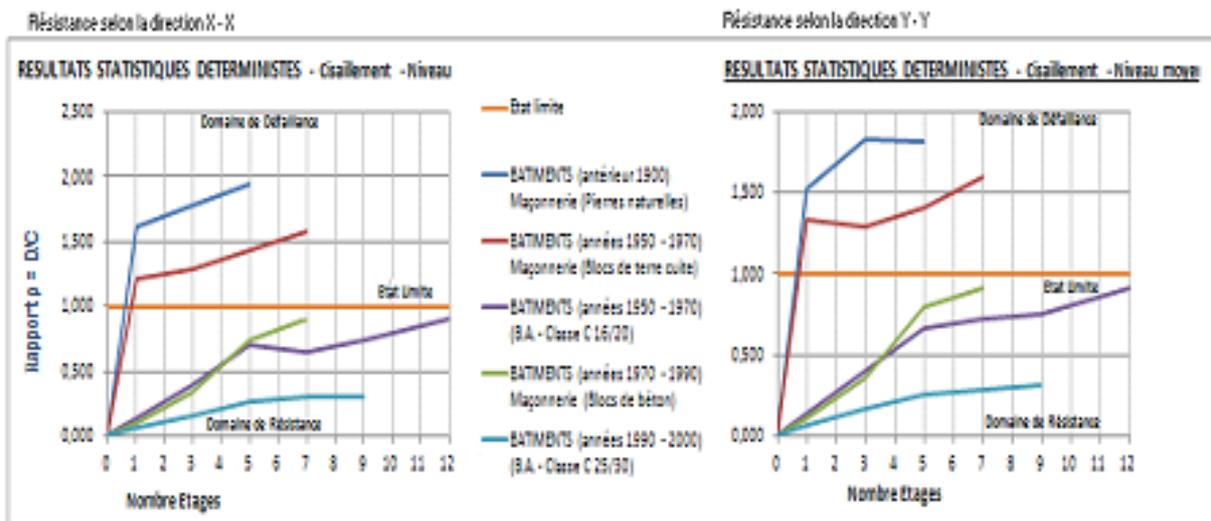


Figure n° 82 : Résistance sismique du bâti reposant sur un sol de type rocheux (classe A) soumis au cisaillement, selon l'étude mécanique statistique déterministe

En comparant les deux graphiques précédents aux courbes de résultats de la résistance (p) définis par la mécanique déterministe, on constate beaucoup de ressemblances. Les résultats graphiques détaillés dans les figures n° 78 et 82 permettent d'observer que la demande de même que la capacité sismique entre l'analyse mécanique déterministe initiale et l'analyse statistique déterministe sont très similaires. Ainsi, les Bâtiments Élémentaires Représentatifs sont fidèles aux groupes de bâtiments de notre territoire d'étude. Cependant, les écarts à la moyenne (écarts types) correspondent aux incertitudes des caractéristiques du

bâti et des matériaux que nous avons détaillés précédemment. L'analyse statistique déterministe comporte un double intérêt. Celui tout d'abord de générer une évaluation de la demande sismique et de la capacité de résistance sismique d'un grand nombre de bâtiments. Ensuite, cette analyse permet d'estimer par un calcul statistique, une valeur moyenne et un écart type de la demande et de la capacité de résistance sismique du bâti. Ces deux éléments vont constituer les données d'entrées de base dans l'analyse mécanique probabiliste pour évaluer la probabilité de défaillance des structures.

2- Etude mécanique probabiliste : Une évaluation complémentaire de l'analyse déterministe

Une meilleure connaissance des données relatives aux structures ainsi que le développement d'outils probabilistes et statistiques plus performants ont conduit à l'amélioration progressive des méthodes d'estimation de la fiabilité, passant du contexte déterministe, au contexte probabiliste [MADSEN et al. 1986]. Dans ce qui précède, on a évalué la résistance du bâti collectif à usage d'habitation en intégrant les différentes incertitudes liées à la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux et à la conception architecturale des bâtiments. Ces incertitudes ont été caractérisées par une plage de résistance. Les bâtiments en fonctionnement normal sont sollicités par les charges permanentes (poids des matériaux, équipement, etc.) et les charges d'exploitation (poids des habitants, du mobilier, etc.), ainsi que par les charges climatiques (neige et vent). En cas d'évènement sismique, les structures subissent des sollicitations supplémentaires aux sollicitations dites " *normales* ". Les incertitudes évoquées peuvent contribuer à l'effondrement des ouvrages. Dans une étude probabiliste, il s'agit notamment d'évaluer une probabilité de défaillance, c'est-à-dire une probabilité d'effondrement des bâtiments collectifs à usage d'habitation [LEMAIRE 1992] ; [DEVICTOR 1996]. Cette approche intègre les paramètres incertains précités que nous avons identifiés dans l'étude mécanique déterministe ainsi que les incertitudes relatives aux actions sismiques appliquées aux ouvrages. Dans notre étude, ce calcul est réalisé selon trois techniques différentes. Un calcul par un comptage direct des probabilités de défaillance, un calcul par une séparation des variables aléatoires et un calcul par comptage direct combiné à un tirage conditionné des variables aléatoires. Utiliser trois techniques différentes permet de valider nos résultats. Le premier point commun de ces techniques est la réalisation des simulations numériques de Monte Carlo permettant de déterminer une probabilité de défaillance des ouvrages. Le deuxième point commun résulte de l'intégration des incertitudes déjà évoquées précédemment et de celles relatives à l'action sismique. En effet l'action sismique réglementaire (Eurocode) est réalisée à partir d'une analyse probabiliste,

qui comporte donc des incertitudes. Dans le cadre de cette étude, nous proposerons d'évaluer l'accélération de sol (A_{gr}) en calculant la moyenne des accélérations préconisées par le zonage sismique français et suisse, puis d'intégrer une incertitude forfaitaire de $\pm 20\%$. La procédure d'analyse dans les trois techniques de calcul se compose d'une étape mécanique, d'une étape statistique et d'une étape numérique. En dernier lieu, nous réaliserons une moyenne des trois techniques de calcul pour déterminer la probabilité de défaillance. Cette dernière va constituer la donnée d'entrée dans notre étude de cas du territoire de Mulhouse et de Bâle que nous envisageons de développer au chapitre 6.

2-1 Modèle de calcul de la probabilité de ruine du bâti selon trois techniques différentes

Quelle que soit la technique précitée du calcul de probabilité de défaillance utilisée, celles-ci ont toutes les mêmes exigences de sécurité et le même contexte aléatoire des structures.

Selon les caractéristiques géométriques et mécaniques du bâti et des matériaux et selon les actions sismiques, les exigences de sécurité des structures sont satisfaites si la sécurité est préservée contre une défaillance acceptable susceptible de se produire. Cela revient à dire que les dommages et dégâts doivent être limités. Ou bien encore en d'autres termes, le bâti endommagé doit rester encore "*debout*" pour permettre aux occupants d'évacuer les lieux. Pour toutes structures de génie civil, le contexte aléatoire est similaire. Il y a des écarts entre la résistance sismique de calcul provenant de la phase de conception des ouvrages et la résistance sismique réellement observée. Ces écarts varient dans l'espace : caractéristiques physiques et mécaniques du bâti et des matériaux et varie également dans le temps : vieillissement et maturation des matériaux.

Ainsi que nous l'avons précisé précédemment, le processus d'évaluation de la probabilité d'effondrement des ouvrages peut être réalisé en trois étapes successives. Nous ne reviendrons pas en détail sur l'étape mécanique qui fait référence à la méthode des forces latérales développée dans l'étude mécanique déterministe. L'étape statistique consiste à évaluer une résistance moyenne (Demande – Capacité sismique) et un écart type. A cet effet, deux méthodes peuvent être envisagées. La première consiste en une campagne de mesures, puis de traitement statistique, voire par modélisation pure, et confrontation aux constatations expérimentales lorsque disponible. Il n'est également pas nécessaire de revenir en détail sur cette étape qui a été développée dans l'analyse mécanique statistique complétant l'étude mécanique déterministe, mais on peut rappeler que la méthode utilisée est un mixte. En effet, dans un premier temps, une campagne de mesures visuelle de terrain complétée d'une analyse de documents graphiques et techniques a permis de constituer

l'information disponible de quelques bâtiments. Nous avons ensuite élargi cette information à partir d'une modélisation pure, par simulations de Monte Carlo permettant de calculer une résistance moyenne et un écart type. Dans l'étape numérique à venir, l'expression théorique de calcul de la probabilité de défaillance des structures est définie par la formule qui suit, dans le cas de variables aléatoires indépendantes du temps et indépendantes entre elles.

$$P_f = \int_{D_f} f_{\underline{X}}(\underline{X}) * d\underline{X} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 21]$$

\underline{X} : Variables de base

D_f : Domaine de défaillance

Figure n° 83 : Expression théorique de la probabilité de défaillance du bâti

Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

Ainsi, si l'on suppose que R représente la résistance de la structure et S la sollicitation appliquée, les variables de base R et $S \rightarrow E = E(\underline{X}) = E(x_1, x_2 \dots, x_n)$ sont représentées par le vecteur noté \underline{X} . Une réalisation de ce vecteur aléatoire est notée $\hat{\underline{X}}^{(k)}$. Les composantes de ce vecteur présentent une densité conjointe de probabilité $f_{\underline{X}}(\underline{X})$ qui intègre les éventuelles dépendances stochastiques entre les variables. Pour chaque mode de défaillance de la structure, une fonction d'état limite (ou fonction de défaillance) $E(X) = R - S$ est définie dans l'espace des variables aléatoires. La fonction $E(X)$ est une fonction déterministe dont les variables sont aléatoires. L'ensemble des variables pour lequel $E(X) > 0$ représente le domaine de sûreté. L'ensemble des variables pour lequel $E(X) \leq 0$ représente le domaine de défaillance. La frontière $E(X) = 0$ est la surface d'état limite (ou la surface de défaillance). Ainsi, lorsque R représente la résistance de la structure et S la sollicitation appliquée, l'expression de la probabilité de défaillance de la structure devient.

$$P_f = \int_{R-S \leq 0} (f_r(r)).dr * (f_s(s)).ds \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 22]$$

P_f : Probabilité de défaillance

$f_r(r)$: Densité de probabilité (Capacité sismique)

$f_s(s)$: Densité de probabilité de la sollicitation
(Demande sismique)

R et S : Variables aléatoires

Figure n° 84 : Expression développée de la probabilité de défaillance du bâti

Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

Pour évaluer la probabilité de défaillance, les simulations de Monte Carlo sont utilisées. La simulation de Monte-Carlo directe [RUBINSTEIN 1981], [MELCHERS 1999] est la technique la plus simple pour estimer une espérance ou une intégrale mathématique. Elle

est basée sur l'application de la loi des grands nombres. Pour évaluer la probabilité de défaillance, on simule chacune des deux variables aléatoires V.A pour déduire à chaque simulation la valeur correspondante de la fonction d'état limite $E=R-S$. L'histogramme obtenu pour un nombre choisi de simulations permet ensuite d'en déduire une distribution théorique de la variable aléatoire E .

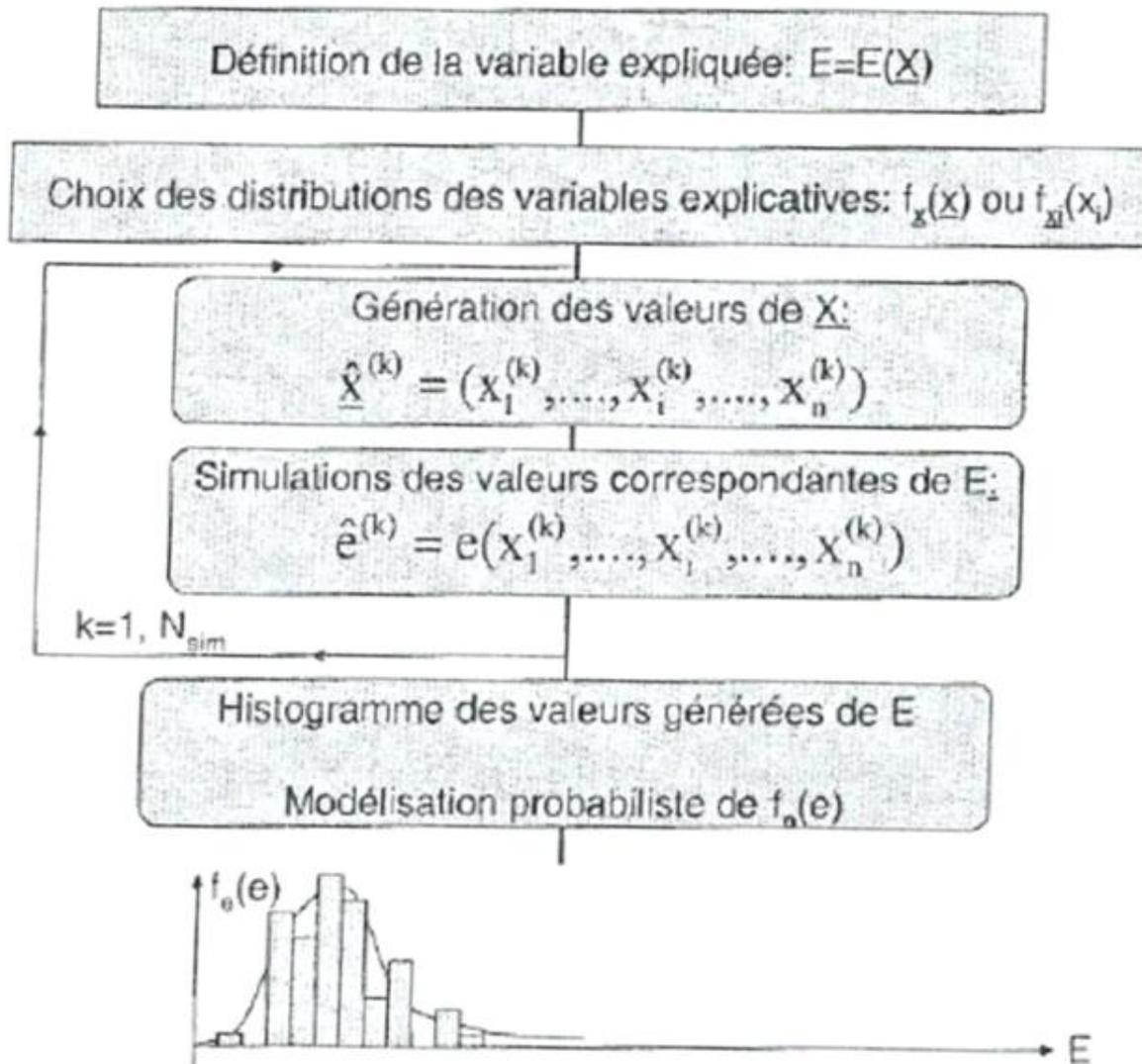


Figure n° 85 : Organigramme de simulation de Monte Carlo

Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

La définition de la variable expliquée $E = E(\underline{X})$ correspond à la variable aléatoire (X) qui est définie par la résistance (R) de la structure et la sollicitation (S) appliquée. On génère « numériquement » des valeurs « artificielles » $\hat{\underline{X}}$ du vecteur \underline{X} pour établir l'histogramme des valeurs générées de E , pour ajuster une distribution théorique, selon la loi normale dans notre cas d'étude, dont la densité de probabilité obtenue permet d'évaluer la probabilité de défaillance recherchée.

Ces distributions ne peuvent être calculées analytiquement que pour un nombre restreint de distributions. Dans le cas où R et S sont des fonctions de variables aléatoires, le domaine de défaillance $E=R-S \leq 0$ n'est pas aisément connu et par conséquent l'intégration multidimensionnelle est approchée numériquement par les expressions suivantes.

TECHNIQUES DE CALCUL

EXPRESSIONS DE CALCUL

Comptage direct
(Simulation de Monte Carlo)

$$\hat{P}_f = \sum_{k=1}^{N_{sim}} \frac{1_{\hat{e}^{(k)} \leq 0}}{N_{sim}} = \sum_{k=1}^{N_{sim}} \frac{1_{(\hat{r}^{(k)} - \hat{s}^{(k)}) \leq 0}}{N_{sim}} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 23]$$

Séparation de V.A.
(Simulation de Monte Carlo)

$$\hat{P}_f = \sum_{k=1}^{N_{sim}} (F_r(\hat{s}^{(k)})) \cdot \left(\frac{1}{N_{sim}} \right) \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 24]$$

Comptage direct
Tirage conditionnés
(Simulation de Monte Carlo)

$$\hat{P}_f = \sum_{k=1}^{N_{sim}} \frac{1_{\hat{e}^{(k)} \leq 0}}{N_{sim}} \cdot \frac{f_r(r^{(k)})}{h_r(r^{(k)})} \cdot \frac{f_s(s^{(k)})}{h_s(s^{(k)})} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 25]$$

Figure n° 86 : Les trois techniques de calcul des probabilités de défaillance des bâtiments
Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

Nous allons donc évaluer concrètement la probabilité de défaillance des ouvrages selon les équations précédentes en intégrant les spécificités de chacune des techniques de calcul. Quelle que soit la technique utilisée, chaque simulation donne une valeur \hat{x} du vecteur \underline{X} . La spécificité de cette technique par comptage direct permet d'évaluer l'état de la structure à partir de la valeur de la fonction d'état limite générée par un comptage du nombre de cas des états défaillants.

$$\underline{\hat{e}} = E(\hat{X}) : \quad \hat{e}^{(k)} = \begin{cases} > 0 : \text{Sécurité} \\ = 0 : \text{Etat limite (EL)} \\ < 0 : \text{Défaillance (ruine)} \end{cases} \quad [\text{comptage du nombre de cas}]$$

Figure n° 87 : Fonction d'état limite de défaillance des bâtiments
Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

Le principe fondamental de la technique de séparation des variables aléatoires consiste à exprimer la probabilité de défaillance en produit de deux probabilités.

$$\hat{P}_f = \hat{P}_1 * \hat{P}_2 \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 26]$$

où : \hat{P}_1 Probabilité calculée analytiquement ou numériquement
 \hat{P}_2 probabilité approchée par simulations. Elle est inférieure ou égale à \hat{P}_f donc elle requiert moins de simulations pour une bonne approche

Figure n° 88 : Technique de calcul des probabilités de défaillance des bâtiments par séparation des variables aléatoires

Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

Nous retenons les résultats de la probabilité simulée avec la variable S, bien que nous ayons également évalué la probabilité de défaillance en simulant la variable R, qui, précisons-le, aboutit à un résultat équivalent.

Pour diminuer les temps de calcul requis par simulations, la spécificité de la technique de calcul par comptage direct combiné à un tirage conditionné des variables aléatoires consiste à choisir un conditionnement des distributions utilisées pour simuler les valeurs de R et de S. On exploite l'existence de la zone d'importance autour du point P* afin de conditionner et favoriser les réalisations autour de ce point (figure n° 89).

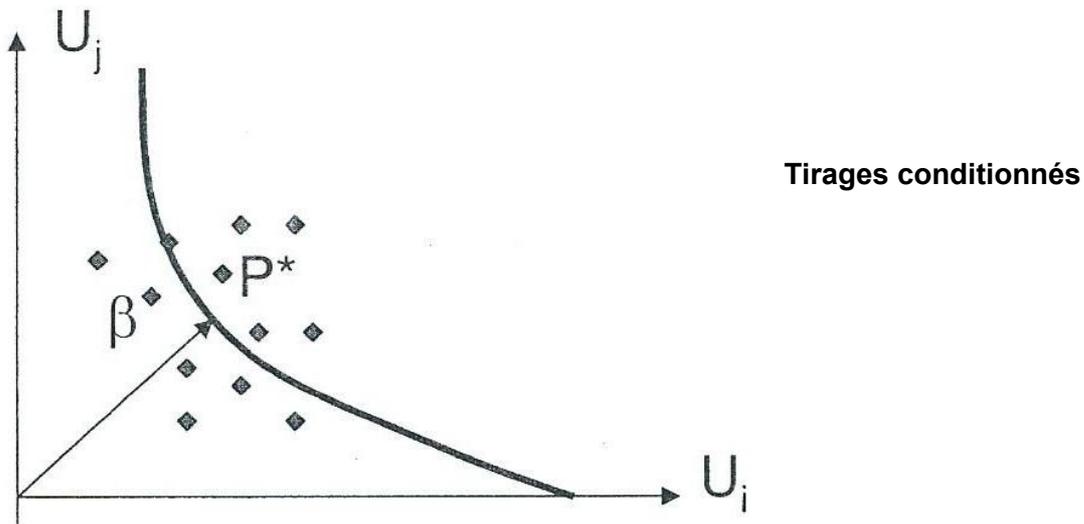


Figure n° 89 : Illustration des simulations conditionnées se concentrant autour du point P*

Source : [MEBARKI 2005-2006, Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux]

L'organisation des calculs ainsi que le détail des résultats ayant permis de déterminer la probabilité de défaillance des différents types de bâtiments collectifs sont présentés en annexe [Annexe – Chapitre n° 5 – annexe 5.K]

2-1 Evaluation de la probabilité de ruine du bâti selon trois techniques différentes

A partir de la démarche théorique développée précédemment et de l'organisation des calculs détaillés dans l'annexe précitée, la probabilité de défaillance des ouvrages peut se lire comme suit (Tableau n° 38).

Tableau n° 38 : Probabilités de défaillance de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle

| ANALYSE STATISTIQUE PROBABILISTE | | PROBABILITE DE DEFAILLANCE / RESISTANCE | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|---|------------------|--------|--------|--------|-------|--------|------------------|--------|--------|--------|-------|----|
| | | Nb ETAGE | Murs direction X | | | | | | Murs direction Y | | | | | |
| | | | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 12 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 12 |
| BT3_RDCH | Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 31,2% | 80,6% | 87,1% | - | - | - | 61,4% | 80,3% | 84,0% | - | - | - | |
| BATIMENTS (antérieur 1900) | 1- Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 68,8% | 19,4% | 12,9% | - | - | - | 38,6% | 19,7% | 16,0% | - | - | - | |
| Maçonnerie (Pierres naturelles) | Nb Sim | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | - | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | - | |
| BT11_R+1 | Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 63,1% | 69,4% | 64,3% | 74,1% | - | - | 58,3% | 74,1% | 66,8% | 70,1% | - | - | |
| BATIMENTS (années 1950 - 1970) | 1- Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 36,9% | 30,6% | 35,7% | 25,9% | - | - | 41,7% | 25,9% | 33,2% | 29,9% | - | - | |
| Maçonnerie (Blocs de terre cuite) | Nb Sim | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | |
| BT11_R+1 | Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 0,003% | 0,74% | 19,4% | 18,9% | 27,8% | 36,4% | 0,000% | 0,34% | 14,6% | 18,6% | 19,0% | 43,1% | |
| BATIMENTS (années 1950 - 1970) | 1- Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 100,0% | 99,3% | 80,6% | 81,1% | 72,2% | 63,6% | 100,0% | 99,7% | 85,4% | 81,4% | 81,0% | 56,9% | |
| (B.A. - Classe C 16/20) | Nb Sim | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | | | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | | | |
| BT9_RDCH | Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 0,70% | 2,4% | 27,8% | 41,9% | - | - | 0,4% | 2,6% | 27,9% | 45,4% | - | - | |
| BATIMENTS (années 1970 - 1990) | 1- Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 99,3% | 97,6% | 72,2% | 58,1% | - | - | 99,6% | 97,4% | 72,1% | 54,6% | - | - | |
| Maçonnerie (Blocs de béton) | Nb Sim | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | - | |
| BT12_R+1 | Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 0,01% | 0,01% | 0,48% | 0,01% | 0,003% | - | 0,003% | 0,01% | 0,48% | 0,01% | 0,003% | - | |
| BATIMENTS (années 1990 - 2000) | 1- Pf ₍₂₀₀₀₀₎ | 100,0% | 99,99% | 99,5% | 99,99% | 100,0% | - | 100,0% | 100,0% | 99,5% | 100,0% | 100,0% | - | |
| (B.A. - Classe C 25/30) | Nb Sim | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | 20 000 | - | |

La convergence est obtenue lorsque le résultat de la probabilité de défaillance est stationnaire. Pour illustrer l'obtention des résultats stationnaires, nous avons détaillé le cas

des maçonneries construites en pierres naturelles composées de un étage. Dans la technique de calcul par comptage direct, la convergence est généralement obtenue avec 16 000 simulations. Dans la technique de calcul par séparation des variables aléatoires et dans la technique de calcul par comptage direct combinée de simulations conditionnées la convergence est plus rapide. En définitive 20 000 simulations pour chacune des techniques de calculs ont été réalisées afin d'améliorer la précision des résultats retenus. La figure n° 90 montre la convergence des résultats obtenus, c'est-à-dire que dans chacune des trois réalisées, on peut observer que le résultat des simulations numériques est stationnaire (peu de variations).

Exemple de vérification de convergence vers une moyenne stationnaire

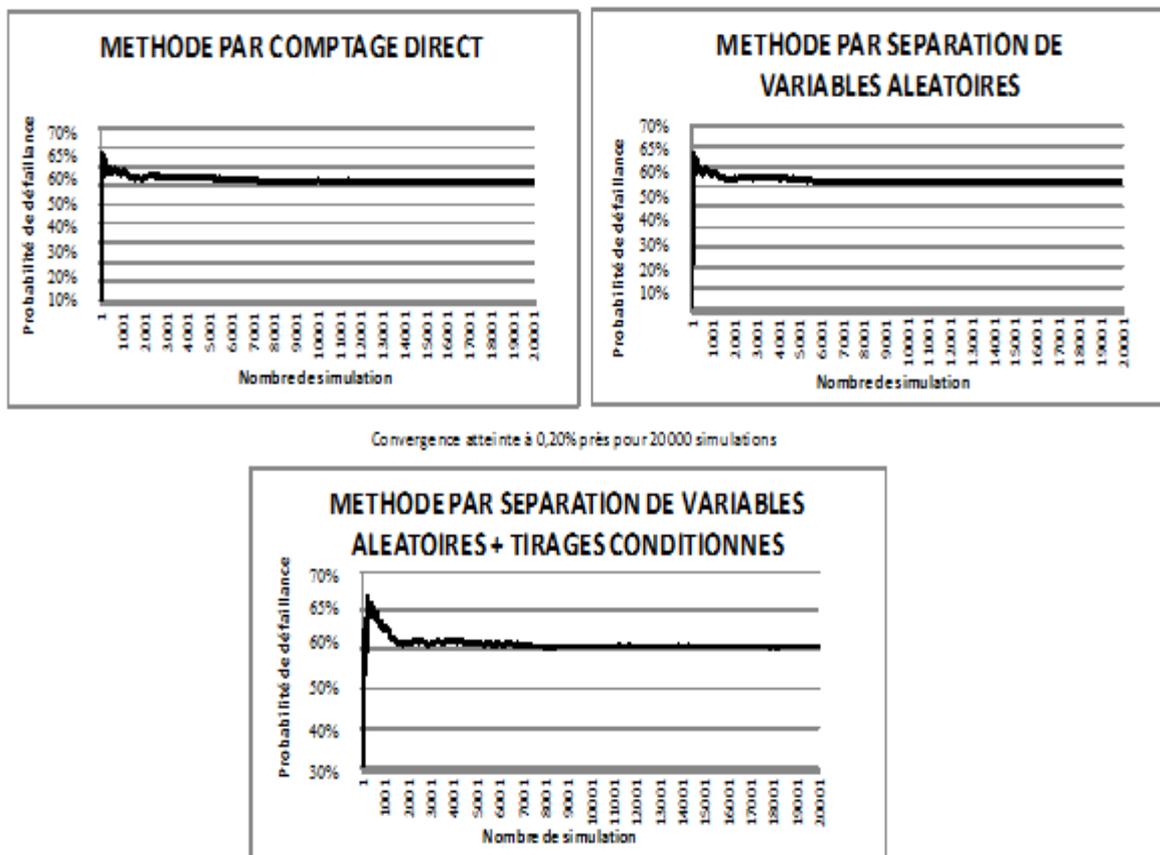


Figure n° 90 : Vérification de la convergence des probabilités de défaillance de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle – Exemple Bâtiment BT3_RCH antérieur 1900 Maçonnerie en pierres naturelles – 1^{er} étage d'un bâtiment composé de 5 étages

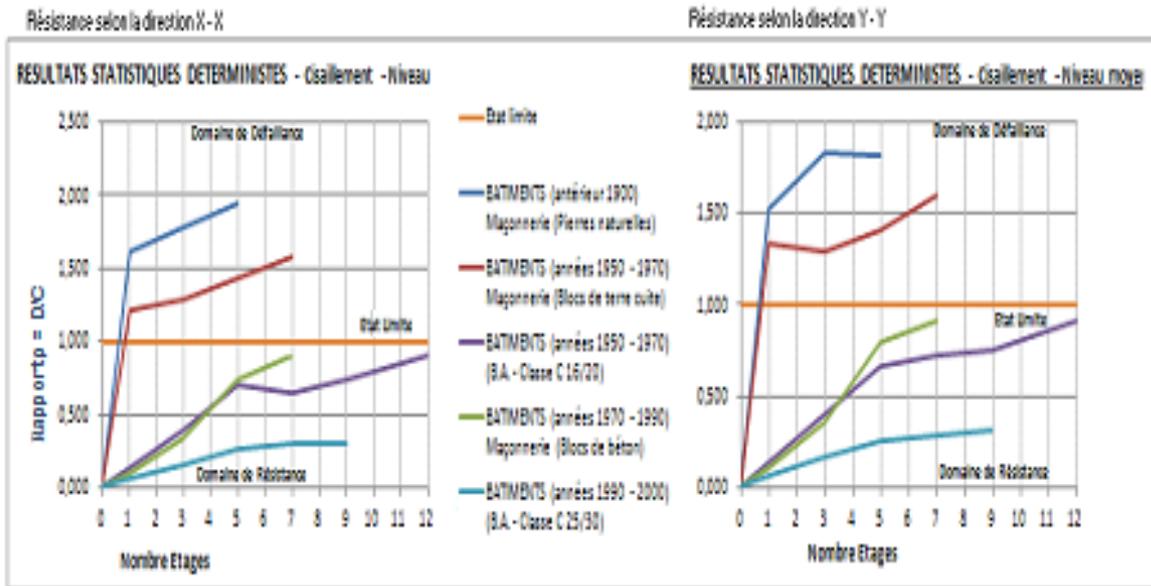
Ces différents résultats permettent maintenant de proposer un modèle opérationnel complet d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti collectif à usage d'habitation.

3- Un modèle opérationnel d'évaluation de la vulnérabilité sismique

La conception du modèle d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti consiste tout d'abord à définir une valeur moyenne et deux valeurs extrêmes de la demande et de la capacité sismique des bâtiments élémentaires représentatifs. Ces résultats vont ensuite constituer les données d'entrées pour l'étude mécanique statistique déterministe dont cette dernière va nous permettre d'estimer une valeur moyenne et une valeur écart type toujours de la demande et de la capacité sismique. En dernier lieu, ces résultats vont composer les données d'entrées pour l'étude mécanique probabiliste (voir étapes successives de la conception du modèle d'évaluation en annexe 5.K). Ce modèle sera également complété en introduisant les préconisations réglementaires de l'Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2 relatives aux caractéristiques des différents types de sols. En effet, il convient de rappeler que l'étude mécanique déterministe – probabiliste a été réalisée avec un sol de classe A “ *type rocheux* ”. Or, les bâtiments de Mulhouse et Bâle ne reposent pas sur des sols de type rocheux.

Ce modèle qui a pour objectif essentiel d'évaluer la vulnérabilité du bâti sans réaliser nécessairement des calculs mécaniques, peut être envisagé à partir du graphique suivant (figure n° 91) afin de déterminer si les bâtiments analysés résistent aux actions sismiques préconisées par la réglementation. Il faut aussi multiplier le résultat (rapport $\rho = D/C$) par le paramètre caractérisant le type de sol sur lequel l'ouvrage repose et en dernier lieu, associer à ce dernier la probabilité de défaillance identifiée.

RESULTATS STATISTIQUE DETERMINISTE (Valeurs moyennes)



| Sol de classe (A) | Sol de classe (B) | Sol de classe (C) |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| Coefficient = 1,00 | Coefficient = 1,35 | Coefficient = 1,50 |

Nota : "Ces coefficients à appliquer à l'accélération de sol ont été définis afin de respecter l'Eurocode et le règlement parasismique Suisse – Norme SIA 261 pour l'étude de cas de Mulhouse - Bâle (Voir tableau n° 14) ".

PROBABILITE DE DEFAILLANCE DE L'HABITAT COLLECTIF

| | | Critère de l'âge du bâti et des matériaux de construction | | | | |
|---|------------------------------|--|---|---|--|---|
| | | ● : Type 1 T1 < 1900 Constructions en pierres naturelles | ● : Type 2 1950 < T2 < 1970 Constructions en blocs de T.C | ● : Type 3 1950 < T3 < 1970 Constructions en béton armé | ● : Type 4 1970 < T4 < 1990 Constructions en blocs BBM | ● : Type 5 1990 < T5 < 2000 Constructions en béton armé |
| Critère de la hauteur du bâti | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages | 61,4% | 63,1% | 0,003% | 0,7% | 0,01% |
| | ■ : Bâtiment de 3 étages | 80,6% | 74,1% | 0,74% | 2,6% | 0,01% |
| | ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages | 87,1% | 66,8% | 19,4% | 27,9% | 0,48% |
| | ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages | - | 74,1% | 18,9% | 45,4% | 0,01% |
| | ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages | - | - | 27,8% | - | 0,003% |
| | ■ : > 9 étages | - | - | 43,1% | - | - |
| ● : Type 1 T1 < 1900 Constructions en pierres naturelles ● : Type 2 1950 < T2 < 1970 Constructions en blocs de T.C ● : Type 3 1950 < T3 < 1970 Constructions en béton armé ● : Type 4 1970 < T4 < 1990 Constructions en blocs béton ● : Type 5 1990 < T5 < 2000 Constructions en béton armé | | ■ : Bâtiment de 1 à 2 étages ■ : Bâtiment de 3 étages ■ : Bâtiment de 4 à 5 étages ■ : Bâtiment de 6 à 7 étages ■ : Bâtiment de 8 à 9 étages ■ : > 9 étages | | | | |

Figure n° 91 : - Résistance sismique du bâti sur sol rocheux (classe A)
 - Coefficients permettant d'intégrer les amplifications des ondes sismiques
 - Probabilités de défaillance spécifique au cas de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle

A titre d'exemple, prenons un cas fictif, celui des bâtiments en maçonnerie construits en pierre naturelles et composés de un étage, reposant sur un sol de classe C. Ce type de bâtiments a un rapport de résistance sismique (sur un sol rocheux) $\rho = 1,50$ (graphique figure n° (91) que nous multiplions par le paramètre de sol (S) = 1,50 (tableau figure n° (91)). En réalité, ce type de bâtiments avec un rapport $\rho = 2,25 > 1$ s'effondre avec une probabilité de défaillance de 61,4% dans la direction Y ((tableau figure n° (91)). Cet immeuble se révèle très vulnérable à la différence des maçonneries chaînées. A partir de ce modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti, il est possible au chapitre suivant de réaliser l'évaluation du risque d'endommagement du bâti collectif à usage d'habitation de Mulhouse et de Bâle.

Conclusion du chapitre 5

Pour construire le modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti, nous avons intégré les différentes spécificités de ce bâti en découpant le territoire de Mulhouse et de Bâle en 6 secteurs historico-géographiques dont le bâti dominant diffère d'un secteur à l'autre. Un modèle d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti collectif à usage d'habitation a été proposé grâce à une étude mécanique déterministe – probabiliste. L'étude mécanique a permis d'évaluer la résistance sismique des différents types d'immeubles en respectant l'Eurocode parasismique. Grâce à la mécanique probabiliste l'intégration des incertitudes liées aux critères physiques a été réalisée. Ainsi, comme on pouvait s'y attendre, le bâti très ancien des années 1900 est apparu comme le plus vulnérable, la probabilité de défaillance étant la plus élevée. Le bâti en béton armé des années 1990 à 2000 est le moins vulnérable associé à une probabilité d'effondrement très faible de l'ordre de 0,003%.

CHAPITRE 6 : Evaluation du risque sismique : l'échelle de la conurbation Mulhouse – Bâle

L'étude de cas de la conurbation de Mulhouse – Bâle envisagée dans ce chapitre va impliquer l'application du modèle d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti établi au chapitre précédent. Le risque de perte en vies humaines des territoires de Mulhouse et de Bâle et le risque d'effondrement du bâti à l'échelle du découpage des secteurs historico-géographiques retenus initialement constituent le fondement de ce chapitre au long duquel une analyse plus approfondie du risque d'effondrement des différents types de bâtiments à l'intérieur de chaque secteur sera aussi proposée.

Le constat doit conduire à envisager plusieurs cas de priorité d'intervention pour effectuer des études plus localisées de renforcement parasismique du bâti dans le but de chercher à réduire le risque de perte en vie humaine et le risques des dégâts matériels du bâti collectif à usage d'habitation.

1- De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique

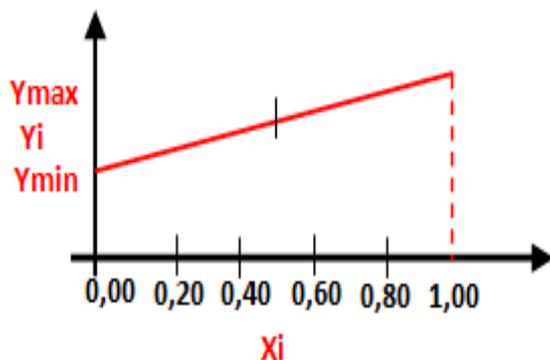
La procédure de la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique de Mulhouse et de Bâle dans notre étude de cas est réalisée en trois étapes. La première étape consiste à déterminer les résultats quantitatifs réels, suivie de la deuxième étape qui a pour intérêt de transformer les résultats quantitatifs réels en résultats quantitatifs normalisés sur une échelle allant de [0 à 1]. Cette transformation va nous permettre dans la troisième étape d'attribuer un niveau qualitatif de risque pour réaliser une cartographie du risque sismique de la conurbation de Mulhouse – Bâle. La procédure d'évaluation du risque sismique implique d'évaluer les deux composantes du risque, l'aléa et la vulnérabilité. Les cartographies que nous envisageons se composeront de résultats quantitatifs et de résultats qualitatifs. Les résultats quantitatifs ont pour objectif de nous informer des accélérations de sol pour l'aléa, de la densité de population et de la quantité de bâtiments qui s'effondrent pour la vulnérabilité sismique. Les résultats qualitatifs vont nous permettre de hiérarchiser les différentes zones (secteurs historico-géographiques) pour proposer trois cas de priorité d'intervention pour effectuer des études plus localisées de renforcement parasismique du bâti.

Etape 1 – Nous avons vu au chapitre n° 2 que la réglementation (décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010) préconise des accélérations de sol correspondant à la probabilité qu'un séisme d'une force donnée se produise en un temps donné et en un lieu donné. Ainsi, pour définir l'aléa sismique du territoire de Mulhouse et de Bâle, l'Eurocode préconise de retenir une accélération de sol égale à $1,10\text{m/s}^2$ (résultats quantitatifs réels) (Tableau n° 14). Pour intégrer les effets d'amplifications sismiques, l'Eurocode et la réglementation Suisse préconisent des coefficients amplificateurs selon les différentes classes de sols. Nous verrons plus en détail que la géologie superficielle de Mulhouse et de Bâle est de classe B dans certaines zones et de classe C dans d'autres zones. Les coefficients amplificateurs des sols de classe B et de classe C sont égaux à 1,485 et 1,650 (figure n° 91).

La vulnérabilité de la population correspond à l'exposition aux séismes des habitants. Il s'agit simplement de la densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif (résultats quantitatifs réels) déterminée au chapitre n° 4 (figures n° 48 et 49). La vulnérabilité du bâti correspond à la densité des bâtiments (résultats quantitatifs réels) qui s'effondrent. Les différents types de bâtiments qui s'effondrent ont été identifiés à partir du modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti établi au chapitre n° 5. Ces différents types de bâtiments sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 12].

Le risque de perte en vie humaine due à l'effondrement du bâti et le risque d'effondrement des bâtiments sont évalués par le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

Etape 2 – Les résultats quantitatifs réels (accélération de sol, densité de population et du bâti) sont normalisés par l'équation suivante. Il s'agit simplement de ramener les résultats quantitatifs réels sur une échelle allant de [0 à 1] pour obtenir des résultats normalisés que nous appellerons "*Indice d'aléa, Indice de vulnérabilité et Indice de risque sismique*" (figure n° 92).



$$X_i = \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad [\text{Eq}^\circ \text{ n}^\circ 27]$$

Y_{\max}, \min : Résultats extrêmes déterminés au chapitre 3 et dans ce chapitre (aléa, vulnérabilité, risque)

Y_i : Résultats déterminés au chapitre 3 et dans ce chapitre (aléa, vulnérabilité, risque)

X_i : Résultat normalisé

Figure n° 92 : Procédure de normalisation des résultats quantitatifs

Étape 3 – Les indices d'aléa, de vulnérabilité et de risque sismique que nous allons obtenir dans notre étude de cas sont des valeurs quantitatives. Les cartographies que nous envisageons de réaliser sont effectuées à partir de valeurs qualitatives. Ce choix d'échelle ordinale³⁰ permet de conserver une adéquation au regard de la cartographie de l'aléa préconisé par la réglementation parasismique Européenne que nous avons utilisée (l'Eurocode 8). Ce choix a également l'avantage de garantir une cohérence pour envisager à Mulhouse et à Bâle plusieurs cas de priorité d'intervention pour des études plus localisées de renforcement parasismique du bâti. Pour passer de l'échelle quantitative à l'échelle qualitative, Il suffit d'attribuer à ces indices normalisés un niveau qualitatif : très faible, faible, modéré, moyen ou fort. Un niveau qualitatif est défini pour l'aléa, la vulnérabilité et le risque sismique.

Le passage des valeurs quantitatives normalisées comprises entre [0 et 1] aux valeurs qualitatives se réalise à partir d'une base de règles cohérentes qui doit vérifier trois propriétés [BEAUDOIN (EDF R & D) et BOUREL DE LA RONCIERE (CEA), 2015].

- i. Respect de la propriété de complétude
 - Tout élément (aléa, vulnérabilité, risque) doit être affecté à au moins une catégorie (Fort, moyen, modéré, faible ou très faible)
- ii. Respect de la propriété d'exclusivité
 - Tout élément (aléa, vulnérabilité, risque) doit être affecté à au plus à une catégorie
- iii. Respect de la propriété de dominance
 - Etant donné deux éléments V et V', si V' a des valeurs plus élevées que V sur tous les critères, V' ne peut pas se voir attribuer une catégorie plus faible que celle de V. Ex : si le risque d'effondrement du bâti du secteur Sud-ouest de Mulhouse a une valeur supérieure à celle du secteur Nord, le secteur Sud-ouest ne peut se voir attribuer un niveau de vulnérabilité sismique inférieur à celle du secteur Nord.

Il convient d'apporter quelques détails explicatifs de la définition de l'échelle qualitative. Elle a été choisie arbitrairement mais de manière cohérente avec l'échelle qualitative de l'aléa préconisée par la réglementation parasismique. C'est-à-dire une échelle à cinq niveaux (fort, moyen, modéré, faible et très faible). L'échelle quantitative normalisée est découpée en cinq niveaux différents de [0 à 1].

Le processus de la mise en application du modèle d'évaluation à la réalisation de la cartographie du risque sismique fondé à partir des sciences de l'aide à la décision est simple à mettre en œuvre [BEAUDOIN (EDF R & D) et BOUREL DE LA RONCIERE (CEA), 2015]. Ce processus présente l'avantage d'une démarche participative (avis de collègues d'experts), d'une démarche dynamique (intervenants pluridisciplinaires) et itérative (raisonnement en

³⁰ Ordinale : Classement par ordre d'importance

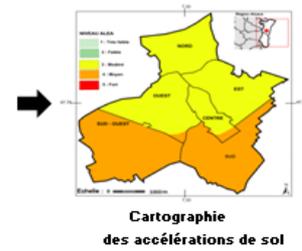
boucle) qui facilite l'amélioration ainsi que l'adaptation continue à différents territoires et à différentes échelles.

Afin d'être explicite dans la présentation de la méthode de la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique que nous venons de présenter, nous proposons de développer le cas de la population et du bâti à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse et de Bâle (figures n° 93 et 94).

ALEA SISMIQUE - Sol de classe A ou B ou C ou D

Bornes extrêmes Max = 1,980
Min = 1,100

| Classe de sol | B | B | C | C | B | B | E* |
|---|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|---------------|
| E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | |
| 1,000 | | | | | | | FORT : 5 |
| 0,800 | | | | | | | MOYEN 4 |
| 0,600 | | | 0,625 | 0,625 | | | MODERE 3 |
| 0,400 | 0,438 | 0,438 | | | 0,438 | 0,438 | FAIBLE 2 |
| 0,200 | | | | | | | TRES FAIBLE 1 |
| 0,000 | | | | | | | |
| Accélération de sol (m/s ²) | 1,485 | 1,485 | 1,650 | 1,650 | 1,485 | 1,485 | |
| Indice Aléa (Normé) | 0,438 | 0,438 | 0,625 | 0,625 | 0,438 | 0,438 | |
| Niveau d'aléa | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | |



X

VULNERABILITE DE LA POPULATION

Bornes extrêmes Max = 25 000
Min = 5 000

| Classe de sol | B | B | C | C | B | B | E* |
|--|-------|--------|-----------|-------|--------|--------|---------------|
| E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | |
| 1,000 | | | | | | | FORT : 5 |
| 0,800 | | | | | | | MOYEN 4 |
| 0,600 | | 0,621 | | | | | MODERE 3 |
| 0,400 | | | 0,477 | | 0,495 | 0,483 | FAIBLE 2 |
| 0,200 | | | | | | | TRES FAIBLE 1 |
| 0,000 | 0,188 | | | 0,025 | | | |
| Vuln. Résultat réel (hab/Km ²) | 8 765 | 17 415 | 14 538 | 5 492 | 14 898 | 14 655 | |
| Indice Vuln. (Normé) | 0,188 | 0,621 | 0,477 | 0,025 | 0,495 | 0,483 | |
| Niveau d'exp. de la population | 1 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | |



=

RISQUE SISMIQUE DE LA POPULATION

Bornes extrêmes n Max = 3,500 6,768
Min = 0,900 0,906

| Classe de sol | B | B | C | C | B | B | E* |
|--|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|---------------|
| E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | |
| 1,000 | | | | | | | FORT : 5 |
| 0,800 | | | | | | | MOYEN 4 |
| 0,600 | | 0,649 | | | | | MODERE 3 |
| 0,400 | | | 0,576 | | 0,505 | 0,491 | FAIBLE 2 |
| 0,200 | | | | | | | TRES FAIBLE 1 |
| 0,000 | 0,154 | | | 0,002 | | | |
| Risque sismique réel (m/s ²) | 1,302 | 2,586 | 2,399 | 0,906 | 2,212 | 2,176 | |
| Indice de risque (Normé) | 0,154 | 0,649 | 0,576 | 0,002 | 0,505 | 0,491 | |
| Niveau de risque | 1 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | |

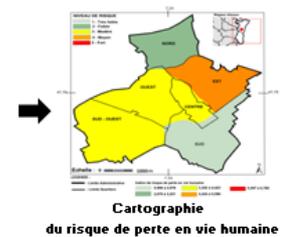
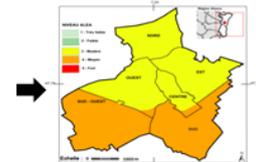


Figure n° 93 : De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique : Cas de la vulnérabilité de la population des secteurs historico-géographiques de Mulhouse.

| Classe de sol | B | B | C | C | B | B | | |
|---|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|---------------|
| | E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | E* |
| 1,000 | | | | | | | | |
| 0,800 | | | | | | | | FORT : 5 |
| 0,600 | | | 0,625 | 0,625 | | | | MOYEN 4 |
| 0,400 | 0,438 | 0,438 | | | 0,438 | 0,438 | | MODERE 3 |
| 0,200 | | | | | | | | FAIBLE 2 |
| 0,000 | | | | | | | | TRES FAIBLE 1 |
| Accélération de sol (m/s ²) | 1,485 | 1,485 | 1,650 | 1,650 | 1,485 | 1,485 | | |
| Indice Aléa (Normé) | 0,438 | 0,438 | 0,625 | 0,625 | 0,438 | 0,438 | | |
| Niveau d'aléa | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | | |

X

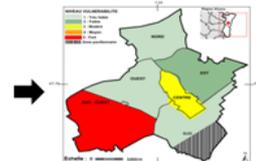


VULNERABILITE SISMIQUE DU BATI

Bornes extrêmes Max = 0,430
Min = 0,000

| | E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | E* |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|---------------|
| 1,000 | | | | | | | | |
| 0,800 | | | 0,998 | | | | | FORT : 5 |
| 0,600 | | | | | | | | MOYEN 4 |
| 0,400 | | | | | | 0,443 | | MODERE 3 |
| 0,200 | | 0,368 | | | | | | FAIBLE 2 |
| 0,000 | 0,184 | | | 0,061 | 0,184 | | | TRES FAIBLE 1 |
| Vuln. Résultat réel (sans Uté) | 0,079 | 0,158 | 0,429 | 0,026 | 0,079 | 0,191 | | |
| Indice Vuln. (Normé) | 0,184 | 0,368 | 0,998 | 0,061 | 0,184 | 0,443 | | |
| Niveau d'exp. de la population | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 3 | | |

=



RISQUE SISMIQUE DU BATI

Bornes extrêmes Max = 0,600 0,708
Min = 0,020 0,029

| Classe de sol | B | B | C | C | B | B | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|---------------|
| | E | NORD | EST | SUD-OUEST | SUD | OUEST | C.H. | E* |
| 1,000 | | | 1,186 | | | | | |
| 0,800 | | | | | | | | FORT : 5 |
| 0,600 | | | | | | | | MOYEN 4 |
| 0,400 | | | | | | 0,453 | | MODERE 3 |
| 0,200 | | 0,371 | | | | | | FAIBLE 2 |
| 0,000 | 0,168 | | | 0,040 | 0,168 | | | TRES FAIBLE 1 |
| Risque sismique réel (sans Uté) | 0,118 | 0,235 | 0,708 | 0,043 | 0,117 | 0,283 | | |
| Indice de risque (Normé) | 0,168 | 0,371 | 1,186 | 0,040 | 0,168 | 0,453 | | |
| Niveau de risque | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 2 | | |

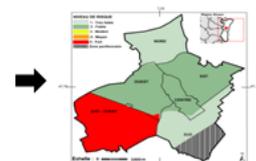


Figure n° 94 : De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique : Cas de la vulnérabilité du bâti des secteurs historico-géographiques de Mulhouse.

Le détail de la méthode de calcul de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sismique sont développés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 13] à partir du cas du centre-ville de Mulhouse. La méthode de la mise en application du modèle d'évaluation à la réalisation de la cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité ainsi que du risque sismique est réalisé

dans notre étude de cas de manière identique quel que soit l'échelle utilisée (échelle territoriale – échelle des secteurs historico-géographique). Par conséquent, pour chacune des cartes réalisées nous ferons référence à cette méthode que nous venons de détailler.

2- L'analyse spatiale du risque sismique dans la conurbation de Mulhouse et de Bâle

Notre étude de cas est envisagée à l'échelle du territoire de Mulhouse et de Bâle. Cette étude a pour objectif de définir le niveau de risque de perte en vie humaine et le niveau de risque d'effondrement du bâti implanté dans les deux territoires de Mulhouse et de Bâle selon le découpage retenu au chapitre n° 4. Ce découpage est composé de différents secteurs historico-géographiques. En premier lieu, cette démarche implique de cartographier l'aléa y compris les zones susceptibles d'amplifications des ondes sismiques, puis dans un second temps la vulnérabilité sismique. Dans un troisième temps, la combinaison des deux composantes du risque va nous permettre de cartographier celui-ci afin d'envisager trois cas d'intervention pour réaliser des études plus approfondies de résistance et de renforcement parasismique du bâti afin de réduire le risque de perte en vie humaine et les dégâts matériels de l'habitat collectif.

L'accélération de sol égale à $1,10 \text{ m/s}^2$ pour les territoires de Mulhouse et de Bâle est déterminée à partir des préconisations de la réglementation Européenne. Les coefficients d'amplification des ondes sismiques relatifs aux effets de site sont définis aussi au regard de la réglementation et de l'identification des différentes classes de sol. Roullé et *al.* [ROULLÉ et *al.* 2007] ont réalisé une identification des différentes classes de sol dans la région du Haut-Rhin. Les auteurs concluent notamment dans leur étude que le territoire de Mulhouse est composé d'une part de zones dont les alluvions anciennes et les alluvions récentes sont de classe B et d'autre part que ce territoire comporte des zones dont le sol constitué de Löss et lehms du Würm est de classe C (figure n° 95).

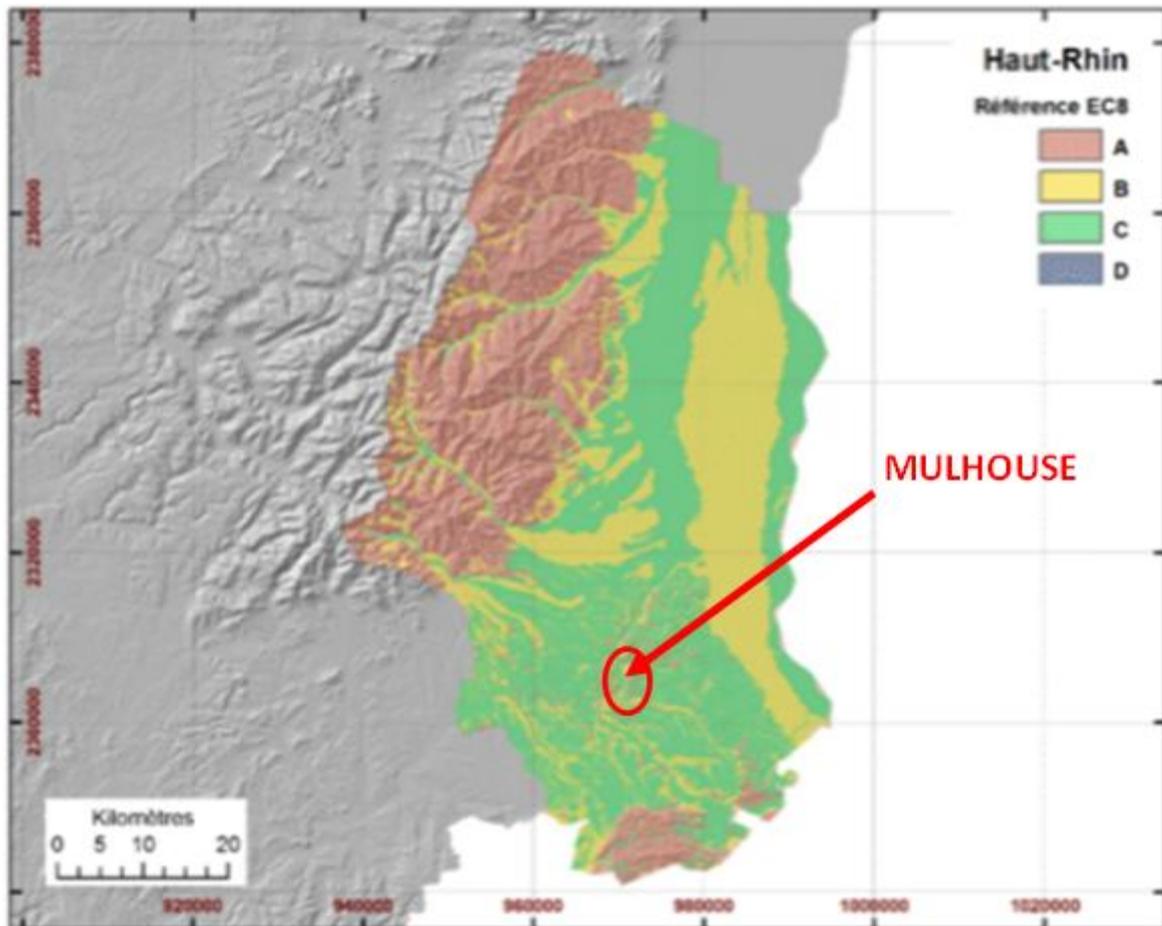
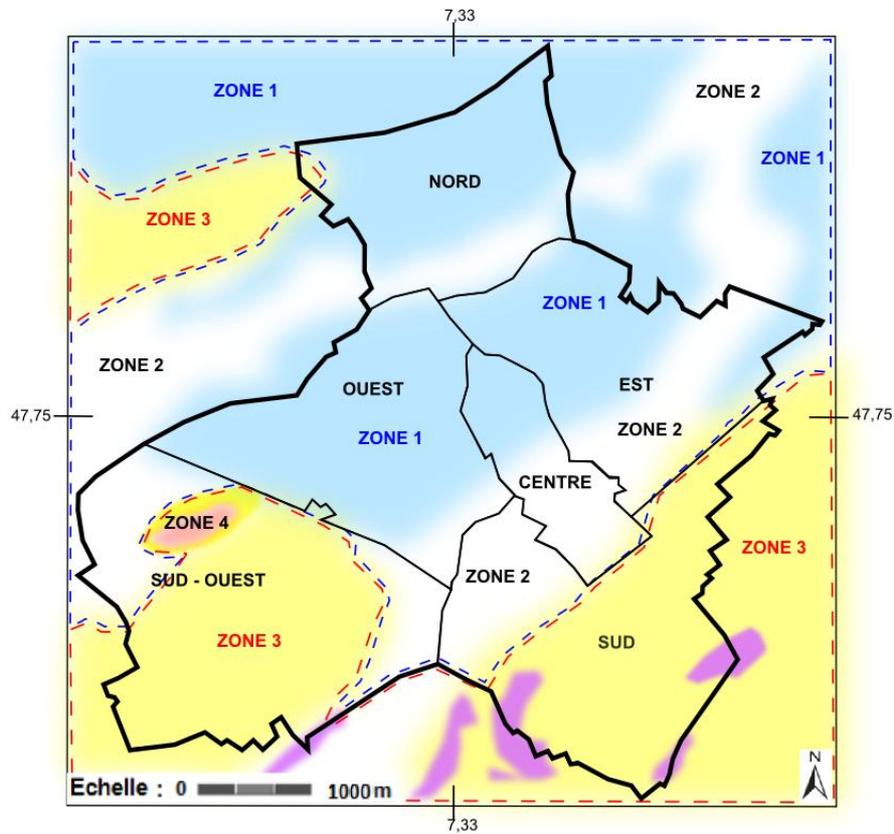


Figure n° 95 : Carte de référence des classes de sols du Haut-Rhin selon la réglementation Européenne
Source : [ROULLÉ et al. 2007]

A partir de cartographie réalisée par le Bureau des Recherches Minières et Géologiques [BD Carto, IGN, Carte géologique de France à 1/50 000 – BRGM 2001- Autorisation n° 2004/039] identifiant les différents types de sols dans le territoire de Mulhouse et de la classification des sols effectuée par Roullé et al. et de l'Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2, il nous a été possible d'envisager pour notre étude de cas les zones d'amplifications sismiques suivantes (figure n° 96).



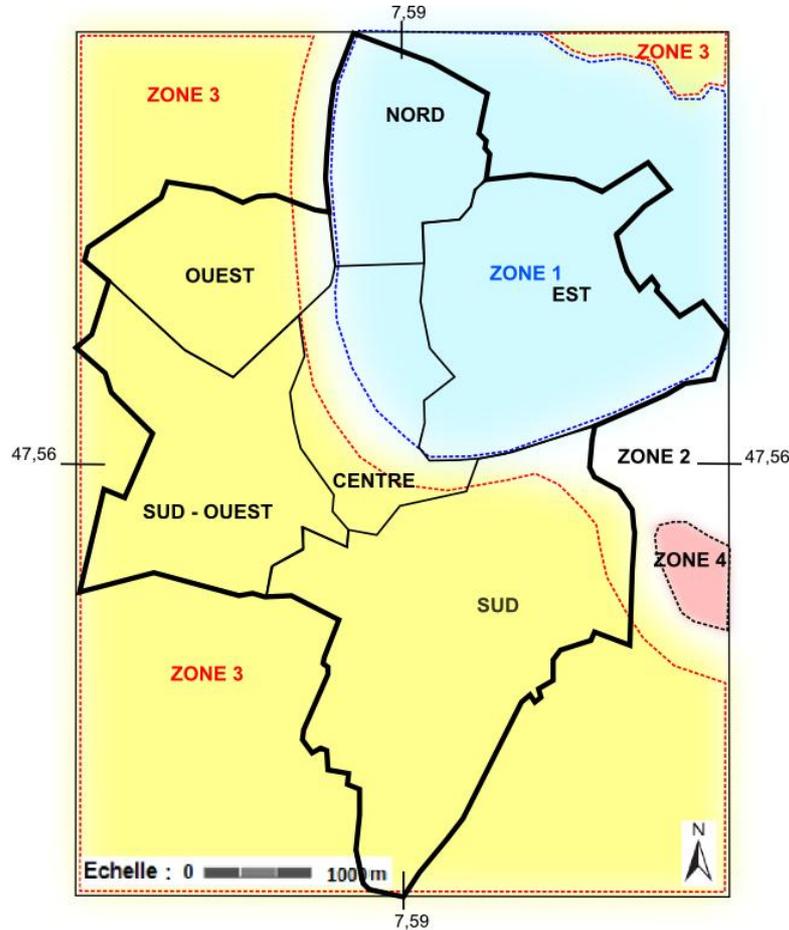
LEGENDE

| Classes de sols | Types sols | Coef. | Zones amplifications sismiques |
|-----------------|--|-------|--------------------------------|
| Classe A | sol de référence (sol rocheux) | 1,00 | - |
| Classe B |  F _{yL} : Alluvions récentes | 1,35 | ZONE 1 |
| Classe B |  C _J : Alluvions anciennes | 1,35 | ZONE 2 |
| Classe C |  O _E : Loess et lehms du Würm | 1,50 | ZONE 3 |
| Classe C |  e _{71b} : Calcaire à mélanies du Latdorfien | 1,50 | ZONE 3 |
| Classe C |  g _{3a} : Éboulis | 1,50 | ZONE 4 |
| Classe C |  E : Molasse alsacienne du Chattien | 1,50 | ZONE 4 |

Figure n° 96 : Carte des classes de sols, des accélérations de sol et des zones d'amplifications sismiques de Mulhouse selon la réglementation parasismique Européenne

Sources : [BD Carto, IGN, Carte géologique de France à 1/50 000 – BRGM 2001- Autorisation n° 2004/039 ; ROULLÉ et al. 2007, BECK 2006, Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Les zones d'amplifications sismiques du territoire de Bâle ont été réalisées à l'aide de l'étude géologique de Wittmann et *al.* [WITTMANN et *al.* 1969] et de la nouvelle réglementation parasismique, [Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2] (figure n° 97).



LEGENDE

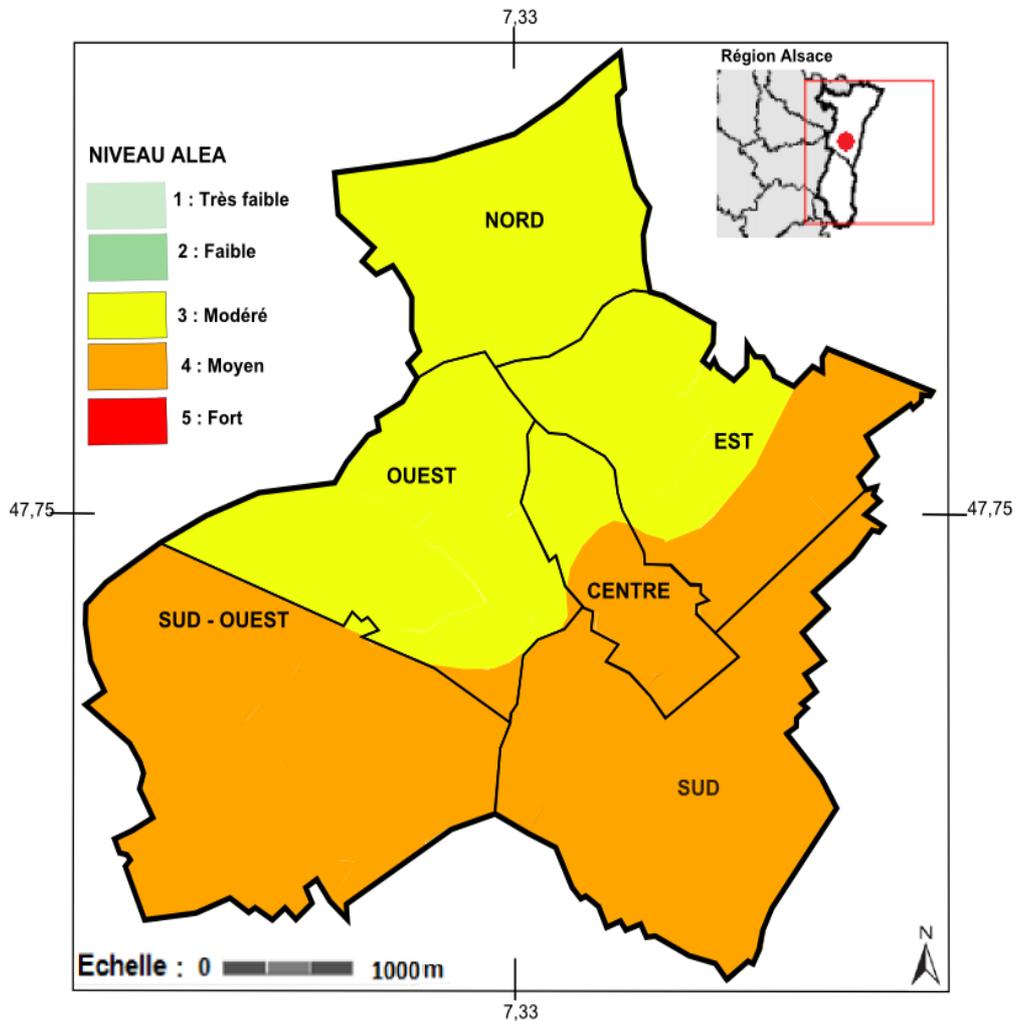
| Classes de sols | Types sols | Coef. | Zones amplifications sismiques |
|-----------------|--|-------|--------------------------------|
| Classe A | Sol de référence (sol rocheux) | 1,00 | - |
| Classe B |  F_{yL} : Alluvions récentes | 1,35 | ZONE 1 |
| Classe B |  CJ : Alluvions anciennes | 1,35 | ZONE 2 |
| Classe C |  OE : Löss et lehms du Würm | 1,50 | ZONE 3 |
| Classe C |  E : Molasse alsacienne du Chattien | 1,50 | ZONE 4 |

Figure n° 97 : Carte des classes de sols, des accélérations de sol et des zones d'amplifications sismiques de Bâle selon la réglementation parasismique Européenne

Sources : [WITTMANN et al. 1969, Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

L'accélération de sol préconisée par l'Eurocode et Les études réalisées par les auteurs précédemment évoqués sur les différents types de sols présent dans les territoires de Mulhouse et de Bâle nous a permis de réaliser les cartographies des niveaux d'aléa (figure n° 98 et 99). Ces deux cartographies ont été réalisées en poursuivant la méthode décrite .au paragraphe n° 1 (voir pages 184 à 189) L'exemple de calcul détaillé en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 13] nous a permis d'obtenir les résultats quantitatifs normalisés

(indices d'aléa) ainsi que les résultats qualitatifs (niveaux d'aléa). Ces résultats sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 14].



LEGENDE

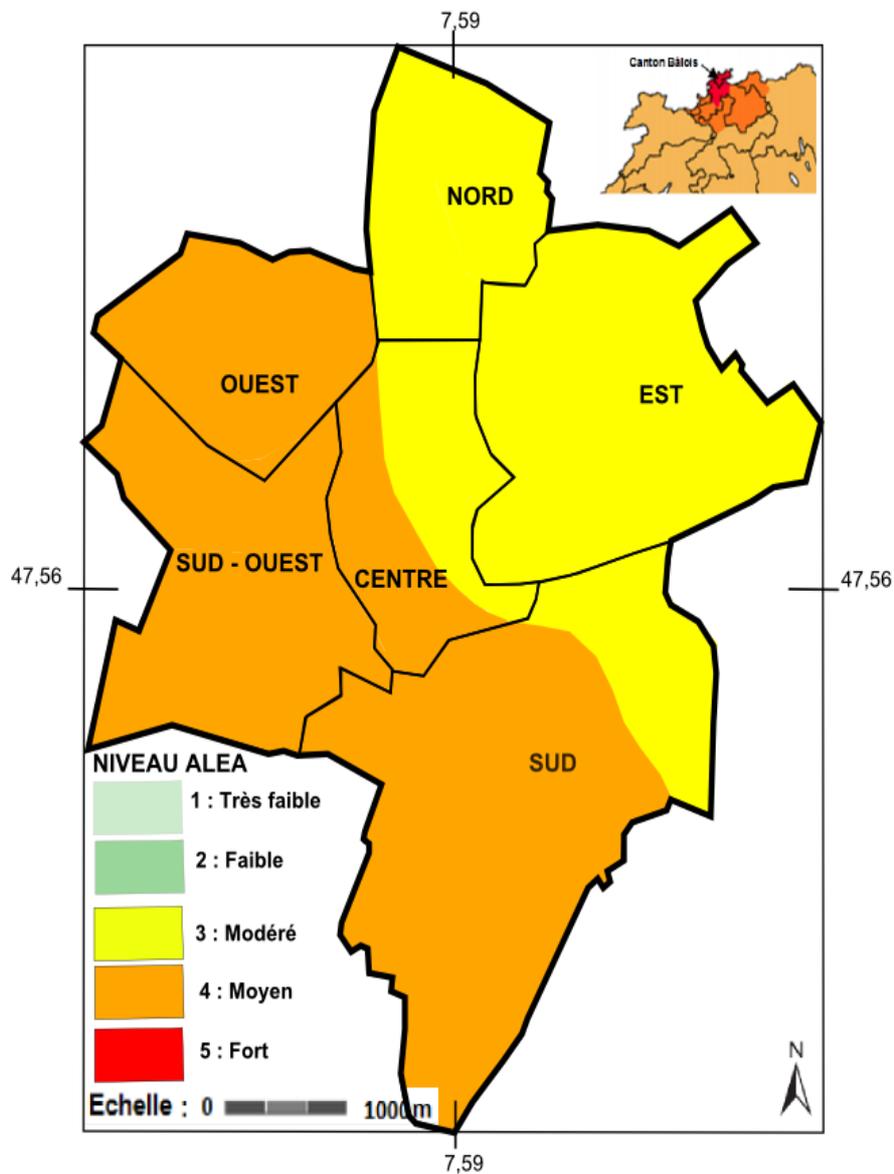
| | Niveau aléa | Accélération de sol |
|---|--|----------------------------|
|  : Limites Administratives |  : Modéré | $Ag = 1,485 \text{ m/s}^2$ |
|  : Limite des secteurs historico-géographiques |  : Moyen | $Ag = 1,650 \text{ m/s}^2$ |

« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 98 : Cartographie des niveaux d'aléa et des accélérations de sol du territoire Mulhousien défini selon la réglementation Européenne

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN ; ROULLÉ et al. 2007, BECK 2006, Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2]

(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



LEGENDE

| | Niveau aléa | Accélération de sol |
|---|--|-----------------------------|
|  : | Limites Administratives | |
|  : | Limite des secteurs historico-géographiques | |
| |  : Modéré | Ag = 1,485 m/s ² |
| |  : Moyen | Ag = 1,650 m/s ² |

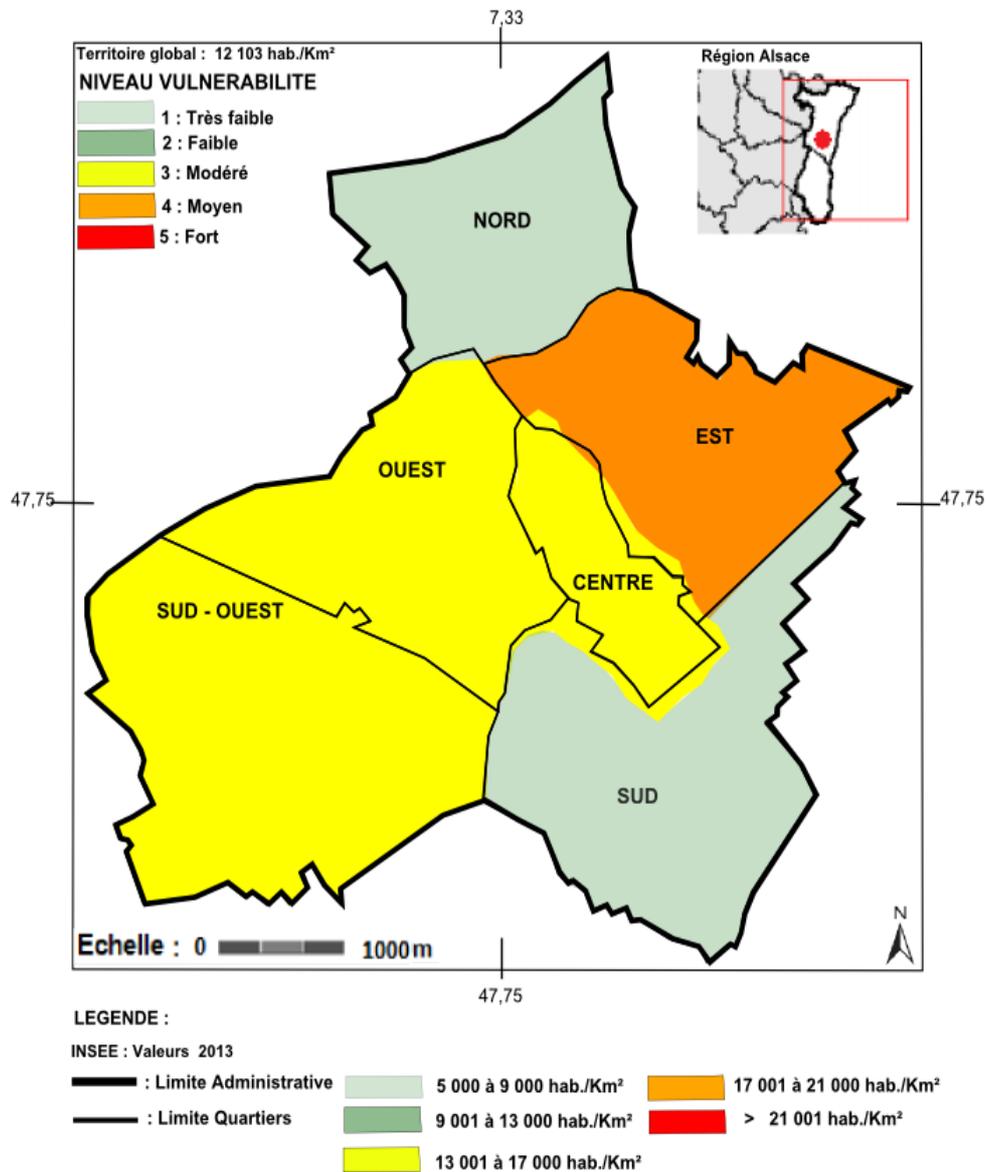
« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 99 : Cartographie des niveaux d'aléa et des accélérations de sol du territoire bâlois défini selon la réglementation Européenne

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel ; WITTMANN et al. 1969, Eurocode 8.1 – Article 3.2.2.2] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

La comparaison des deux cartes précédentes (figures n° 98 et n° 99), montrent que l'accélération du sol de la zone urbaine de Mulhouse et de Bâle est équivalente et varie du niveau modéré à moyen. Si nous observons indépendamment ces deux territoires, l'accélération de sol n'est pas uniforme dans l'ensemble de ces deux territoires. L'accélération de sol de niveau moyen dans la zone située au sud de Mulhouse est plus élevée que dans la zone localisée au nord de la ville dont le niveau est modéré. On peut observer la même chose dans le territoire de Bâle entre l'Ouest et l'Est. Cela provient essentiellement des phénomènes d'amplification des ondes sismiques dus à la géologie superficielle. A Mulhouse, le centre-ville et le secteur historico-géographique situé à l'Est de la ville sont caractérisés par deux valeurs d'accélération de sol différentes. On peut également constater cette même différence d'accélération de sol dans le centre-ville et dans le secteur historico-géographique localisé au Sud de Bâle.

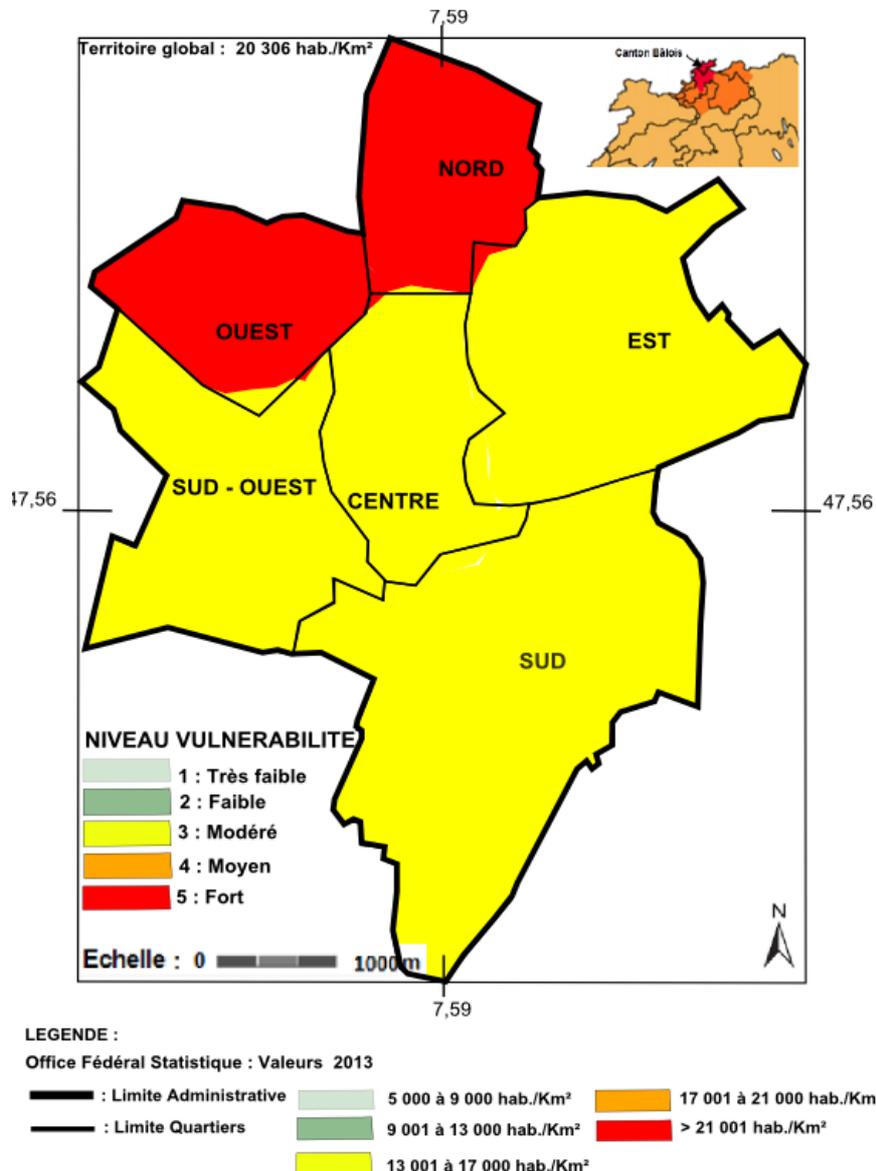
Le processus de réalisation de la cartographie de la vulnérabilité de la population ainsi que la cartographie de la vulnérabilité du bâti renvoient à la méthode décrite au paragraphe n° 1 (voir pages 184 à 189) (résultats quantitatifs réels, normalisés et résultats qualitatifs). Les résultats quantitatifs réels de densité de population (données INSEE 2013) et les résultats quantitatifs réels du bâti qui s'effondre (données collectées sur le terrain) ont été définis au chapitre n° 4. Les résultats quantitatifs normalisés ont été déterminés par un calcul similaire au calcul développé en annexe relatif à l'exemple du centre-ville de Mulhouse [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 13]. Le processus de conversion des résultats normalisés (indice de vulnérabilité) aux résultats qualitatifs nous renvoie aux figures n° 93 et n° 94 (étude de cas de la vulnérabilité de la population et du bâti). L'ensemble de ces résultats quantitatifs (sous forme d'indices) et qualitatifs sous forme de niveaux d'aléa, de vulnérabilité et de risque) sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 14]. Les résultats qualitatifs sont cartographiés dans les figures suivantes (figures n° 100 et n° 101) pour la vulnérabilité de la population et dans les figures n° 102 et n° 103 pour la vulnérabilité du bâti.



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 100 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN ; Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, INSEE, RP – 2013 – Découpage IRIS] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

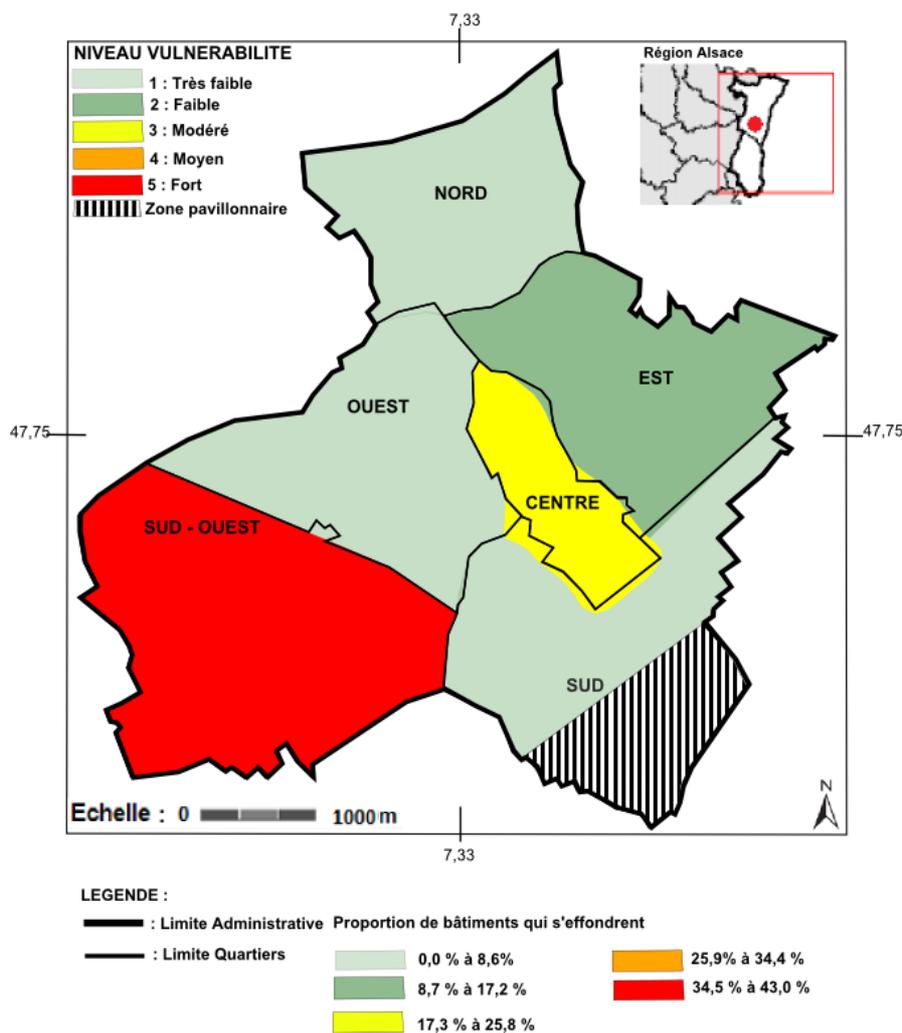
Figure n° 101 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle du territoire urbain de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel ; Office fédéral de la statistique (OFS) – 2013]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

L'examen des cartes précédentes montre que le niveau de vulnérabilité de la population bâloise est globalement plus élevé que le niveau de vulnérabilité de la population mulhousienne. Ce premier constat provient d'une part de la population bâloise (163 462 habitants – valeur 2013) qui est plus importante qu'à Mulhouse (113 766 habitants – valeur 2013) et d'autre part de la superficie d'emprise au sol du bâti bâlois qui est moins importante que sa ville voisine. En d'autres termes, il y a un plus grand nombre de bâlois concentré sur une plus petite superficie d'emprise au sol du bâti qu'à Mulhouse. A Mulhouse le secteur

situé à l'Est de la ville dont le nombre d'habitant est le plus important est de niveau de vulnérabilité le plus élevé. Les secteurs situés au Nord et au Sud sont d'un niveau de vulnérabilité de la population très faible. Le niveau de vulnérabilité modéré dans les secteurs localisés à l'Ouest et au Sud-ouest de Mulhouse se rapporte à un peu plus de 20 000 habitants. Le niveau fort de vulnérabilité dans les secteurs Nord et Ouest de Bâle concerne entre 10 000 et 20 000 habitants. Dans ces deux secteurs historico-géographiques la population est concentrée sur une superficie très réduite d'emprise au sol du bâti. Il y a peu d'immeubles collectifs à usage d'habitation. Dans les autres secteurs le niveau de vulnérabilité de la population est modéré.

Des différences de niveaux de vulnérabilité du bâti peuvent aussi être observées d'un secteur à l'autre. Les figures suivantes montrent ces différences (figures n° 102 et 103).

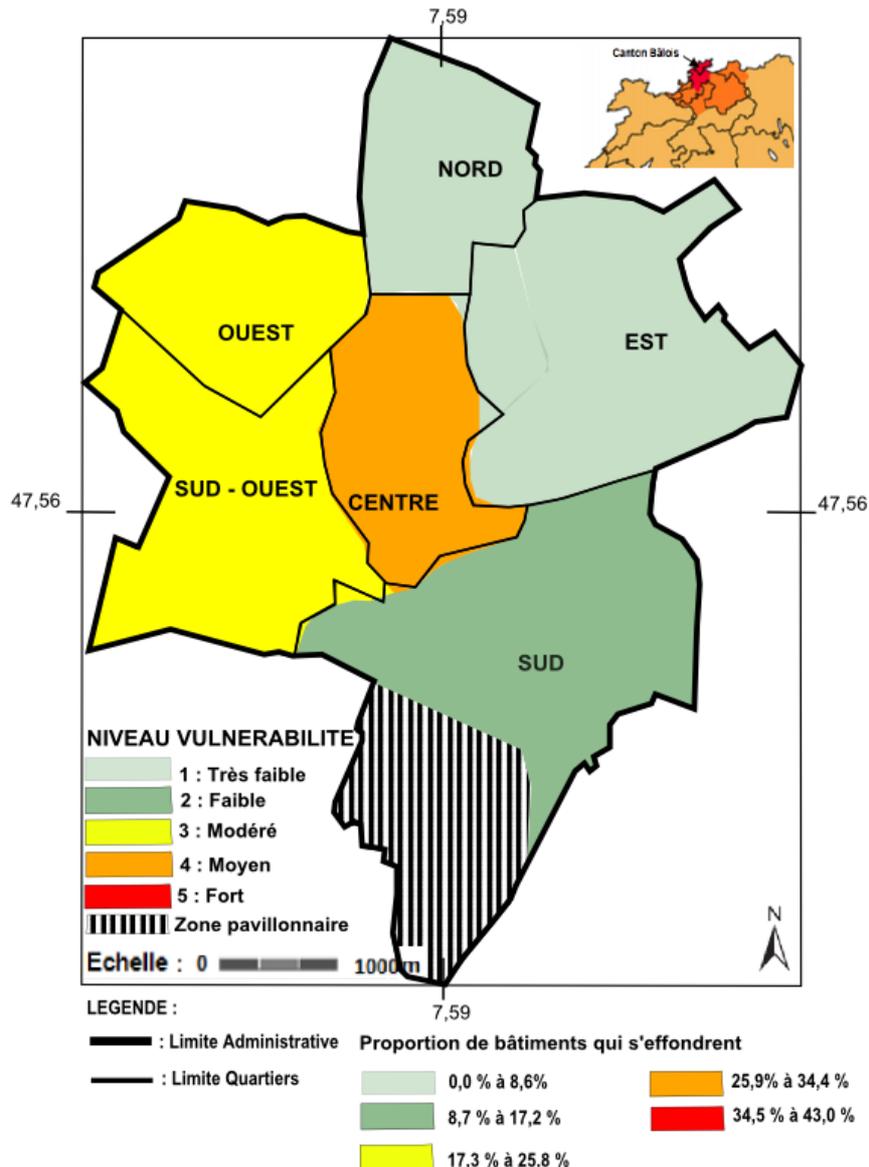


« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 102 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte ; Données collectées sur le terrain, mars 2013]

(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



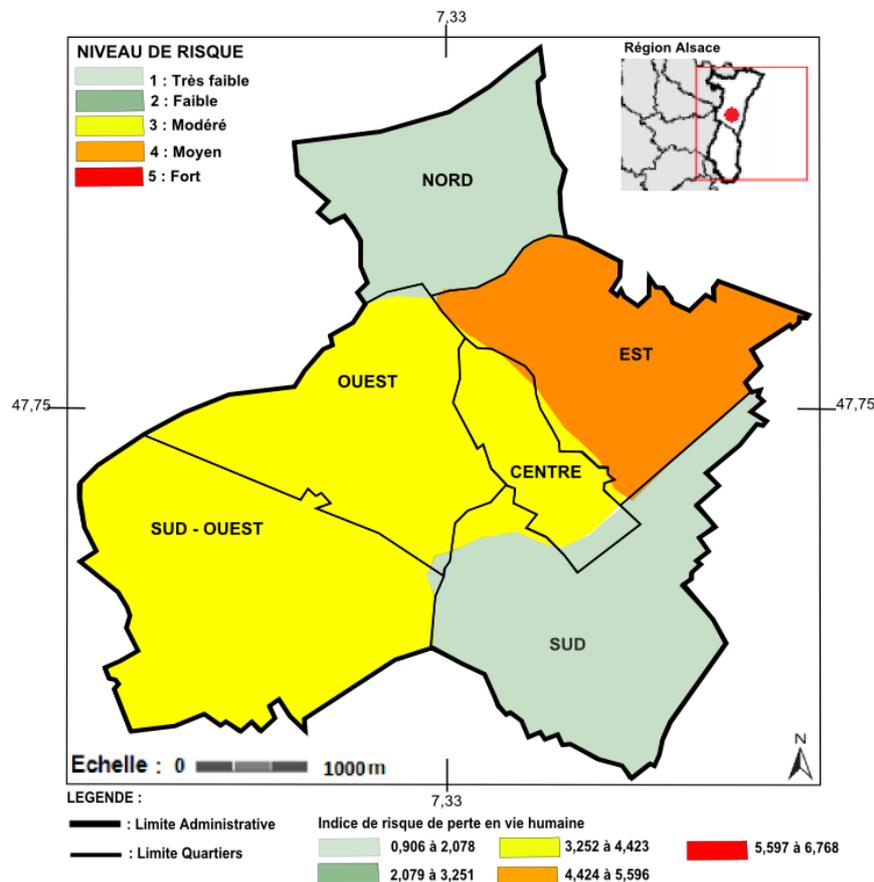
« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 103 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle du territoire urbain de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel ; Don-nées collectées sur le terrain, mars 2013]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

A Mulhouse, Le niveau de vulnérabilité du bâti le plus élevé (niveau fort) se situe à l'Ouest de la ville et dans le centre-ville. Les bâtiments en béton armé des années 1960 à 1970 situés dans le secteur Ouest de la cité des coteaux qui résistent au séisme réglementaire "dit de référence" ne sont pas majoritaires, il représente un peu plus de 1% de la totalité du bâti. Dans ce secteur et dans le centre-ville, le bâti dominant réalisé en pierres naturelles est très ancien et très vulnérable. Dans les autres secteurs historico-géographiques, le niveau de vulnérabilité du bâti varie de très faible à faible car les bâtiments en béton armé plus récents sont plus nombreux.

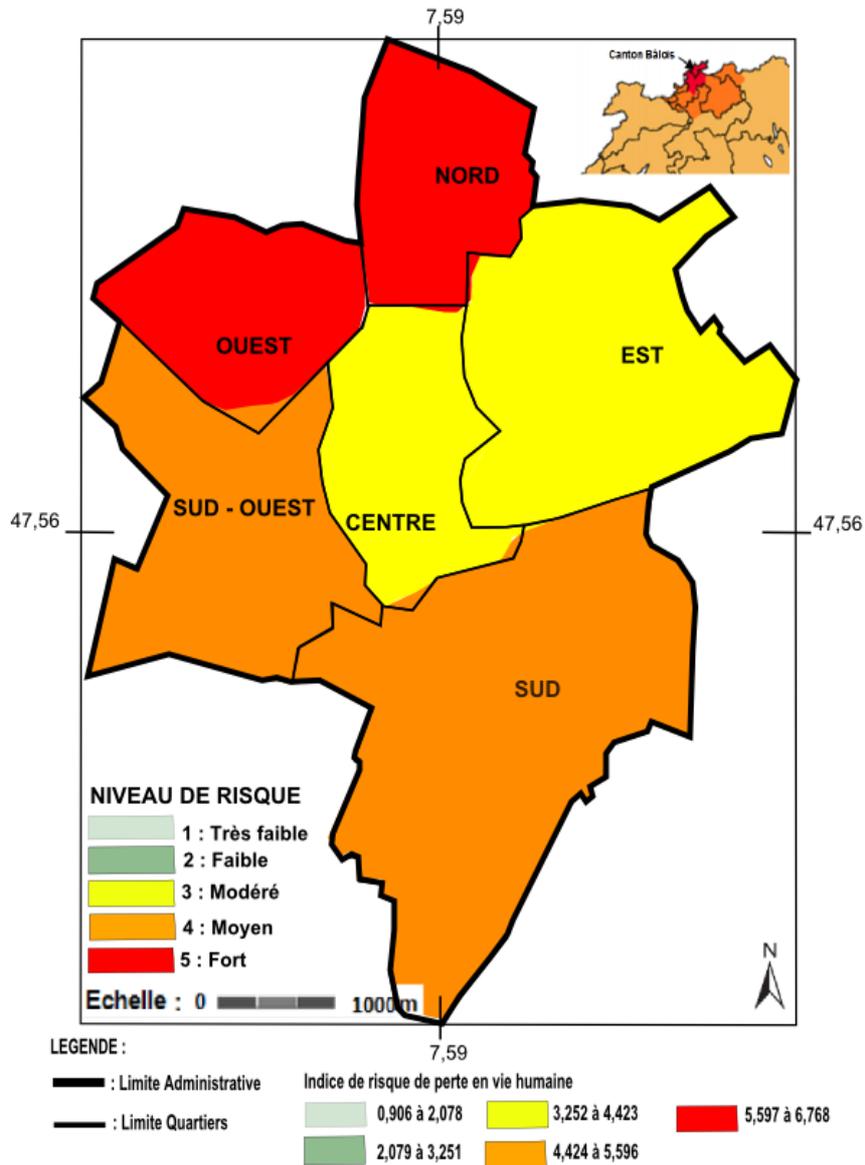
Evaluer le niveau de risque de perte en vie humaine et le niveau de risque d'effondrement du bâti dans les territoires de Mulhouse et de Bâle constitue donc la dernière étape. Cette démarche va nous permettre d'envisager dans notre cas d' 'étude trois cas de réduction de risque de perte en vie humaine et d'effondrement du bâti, du moins dangereux au plus dangereux. Toutes les cartes sont réalisées selon le processus décrit au paragraphe précédent (résultats quantitatifs réels, résultats quantitatifs normalisés et résultats qualitatifs) à une différence près. En effet, ici on fait le produit des résultats quantitatifs réels de l'aléa et de la vulnérabilité pour obtenir un indice de risque. Ensuite, on normalise les résultats obtenus comme dans la réalisation des cartes de l'aléa et de la vulnérabilité pour déterminer des résultats qualitatifs. Ces résultats détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 14] nous permettent de cartographier les différents niveaux de risques. Les figures suivantes (figure n° 104 à 107) hiérarchisent les niveaux de risque de perte en vie humaines et les niveaux de risque d'effondrement du bâti des différents secteurs historico-géographiques de Mulhouse et de Bâle.



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 104 : Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse

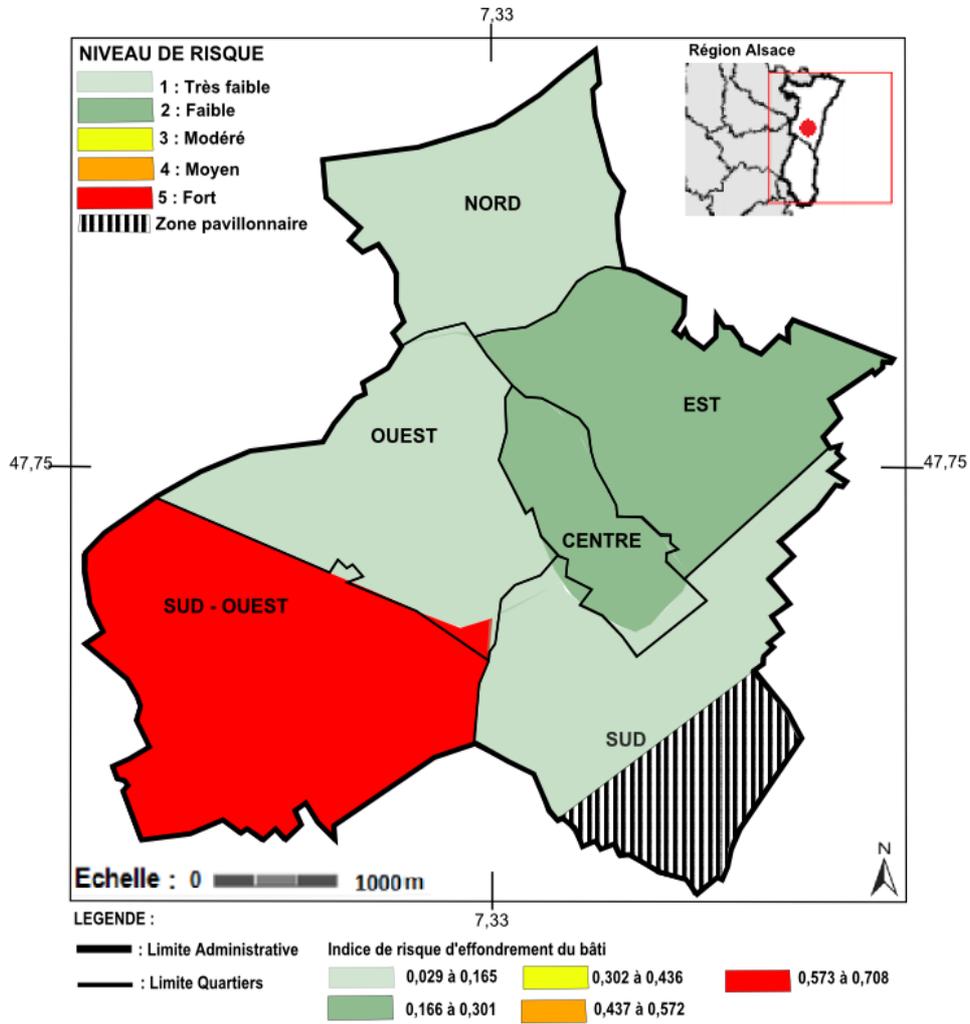
Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 105 : Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle du territoire urbain de Bâle

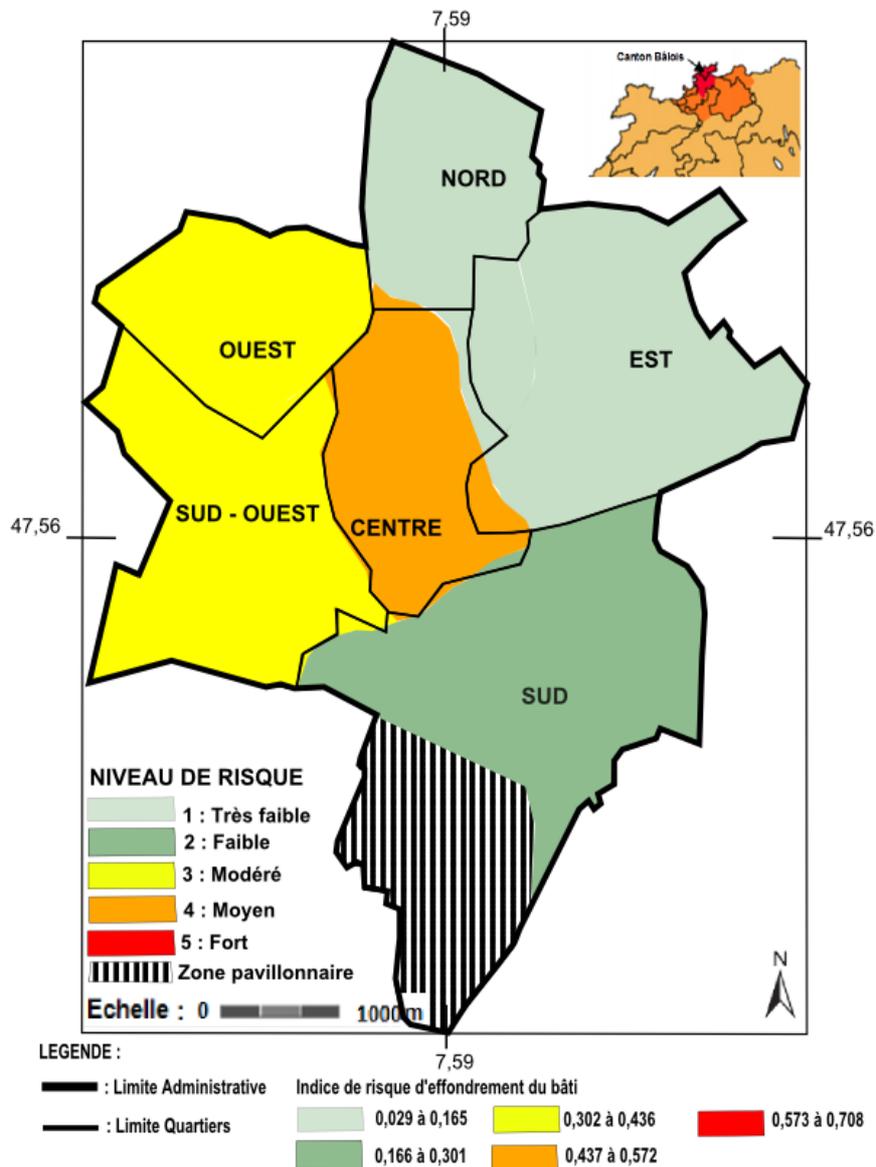
Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 106 : Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



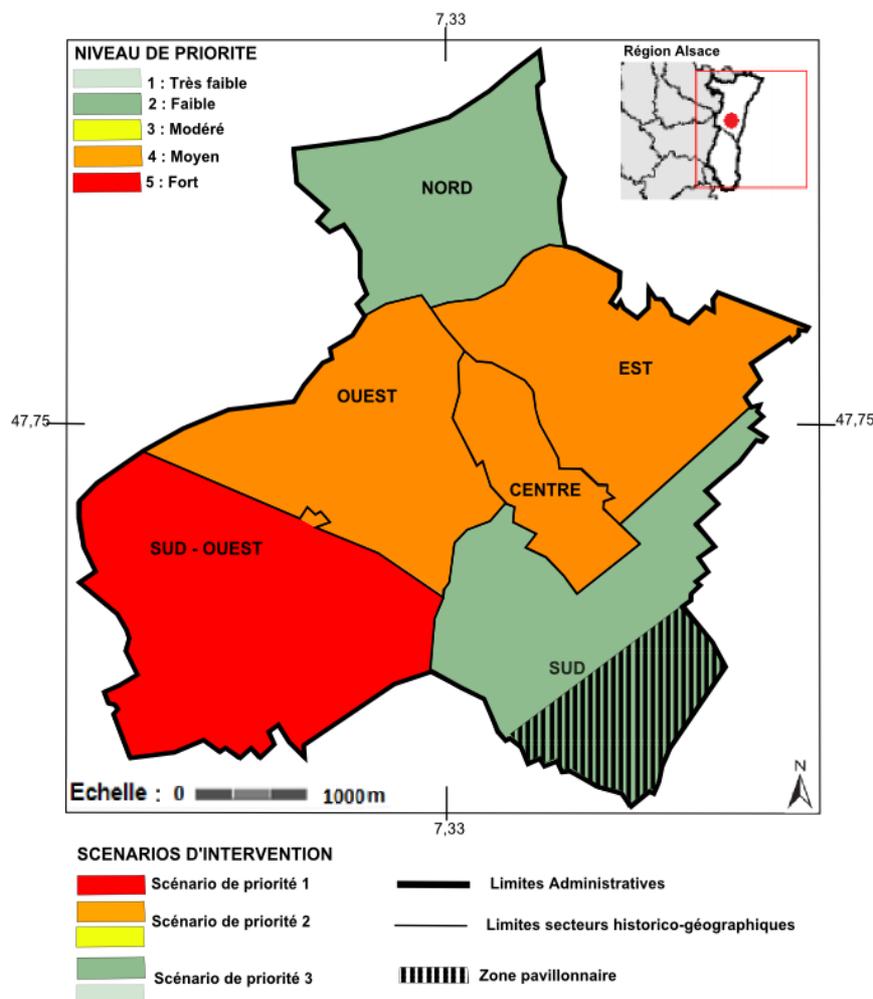
« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 107 : Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle du territoire urbain de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Les résultats quantitatifs du risque d'effondrement du bâti sont donnés à titre indicatif en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Figures n° A 10 et A 11]. L'examen des cartes précédentes nous permet de retenir trois cas d'intervention pour réduire le risque de perte en vie humaine et le risque d'effondrement du bâti. Ceux-ci sont développés sous la forme d'une matrice détaillée en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableaux n° A 15 et A 16]. Ces deux matrices ont été réalisées en croisant l'aléa et la vulnérabilité de la population et la vulnérabilité du bâti. Pour établir ces deux matrices, nous avons combiné le risque de perte en vie

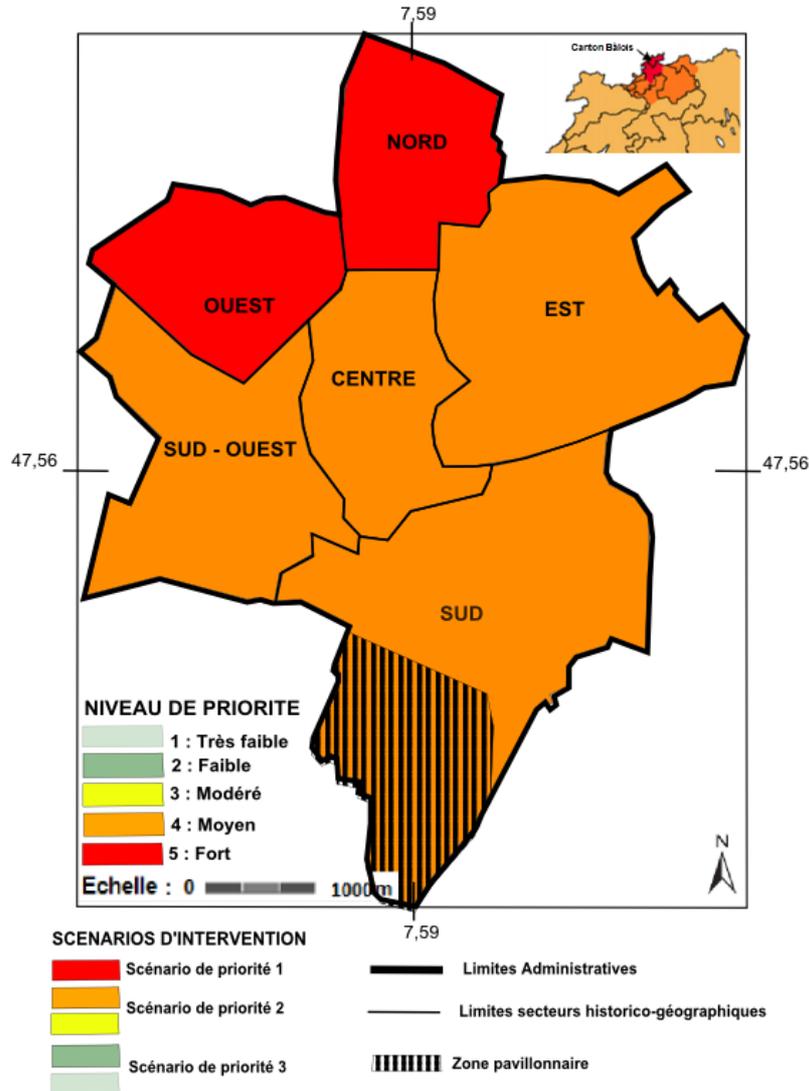
humaine et le risque d'effondrement du bâti et en utilisant la méthode de sur-classement afin d'identifier les zones les plus élevées au risque sismique, en attribuant autant d'importance au risque d'effondrement du bâti et au risque de perte en vie humaine. La méthode de sur-classement revient à retenir le niveau de risque le plus élevé. Par exemple dans le cas du secteur situé à l'Est de Mulhouse, le risque de perte en vie humaine est de niveau "Modéré" et le risque d'effondrement du bâti est de niveau "Faible". Ce secteur est classé dans le scénario de priorité de niveau 2. Nous avons retenu le niveau de risque "Modéré" pour identifier dans quel scénario appartient ce secteur. Les deux cartographies suivantes nous permettent de localiser les secteurs historico-géographiques prioritaires, dans lesquels il faut intervenir en priorité.



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 108 : Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle du territoire urbain de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 109 : Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle du territoire urbain de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Dans le scénario de priorité de niveau 1, il est nécessaire d'intervenir en premier lieu dans le secteur historico-géographique situés au Sud-ouest de Mulhouse. A Bâle, ce sont les secteurs localisés au Nord, à l'Ouest qui sont prioritaires. Dans le scénario de priorité de niveau 2, en plus des secteurs retenus dans le premier scénario il faut ajouter les secteurs Est et Ouest ainsi que le centre-ville de Mulhouse. A Bâle, il faut ajouter l'ensemble des autres secteurs historico-géographiques. Et enfin dans le troisième et dernier scénario il faut intervenir dans l'ensemble des secteurs historico-géographiques de Mulhouse et de Bâle. On peut en dernier lieu constater qu'à Bale, il n'y a aucun secteur classé dans le scénario de priorité de niveau 3. Cela démontre que le risque sismique est plus élevé dans la ville de Bâle. Cependant, en affinant notre étude, c'est-à-dire en examinant la population et le bâti à l'intérieur de

chaque secteur, les trois cas détaillés précédemment ont l'avantage d'être plus précis et mieux adaptés aux spécificités locales du territoire de Mulhouse et aux spécificités locales du territoire de Bâle.

3- Un inégal risque sismique à l'intérieur des différents secteurs historico-géographiques

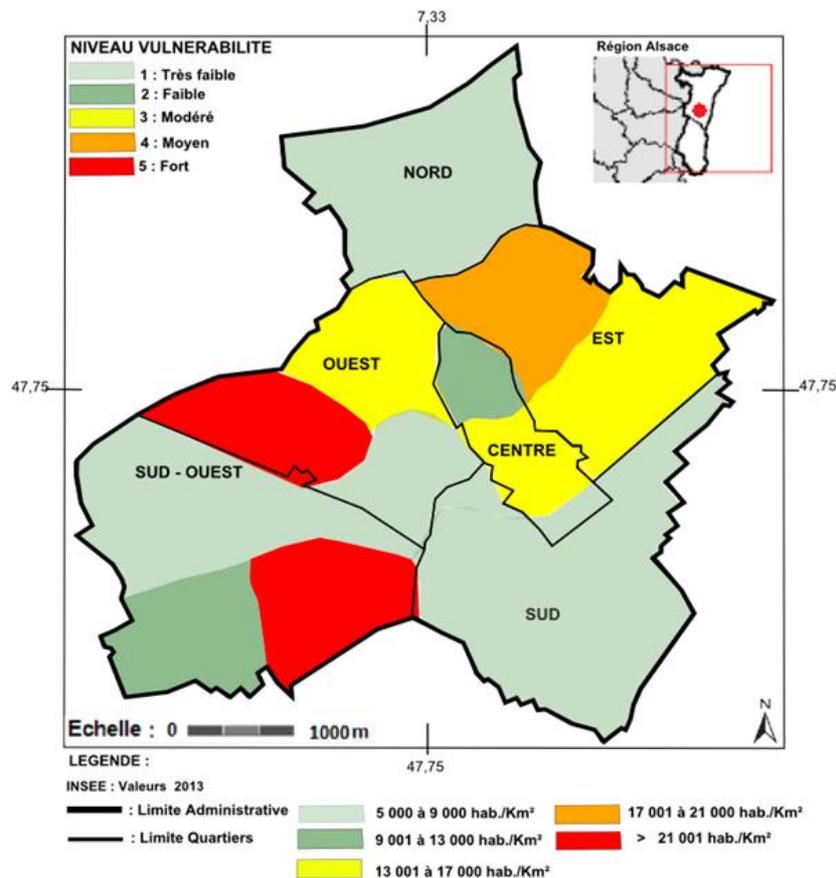
Il nous semble important de s'interroger si le risque de perte en vie humaine ainsi que le risque d'effondrement du bâti sont répartis de manière identique d'une zone à l'autre à l'intérieur de chaque secteur historico-géographique. Par exemple on s'intéresse d'identifier si dans le centre-ville de Mulhouse le risque de pertes en vie humaine est identique dans la zone Nord et dans la zone Sud du centre-ville. En effet, si le risque est inégalement réparti à l'intérieur de chacun des secteurs historico-géographiques les cas de priorité d'intervention de renforcement parasismique du bâti seront différents par rapport aux cas proposés au paragraphe précédent. Ici l'analyse des différents cas de priorité est plus fine puisque chaque secteur est découpé en deux voire trois zones selon les différents types de bâtiments dominants contenus dans chaque secteur que nous avons identifié et détaillé en annexe [Annexe – Chapitre n° 4 – Tableaux n° A 8 et n° A 9].

Notre objectif est aussi comme dans l'analyse précédente de proposer trois cas de priorité d'intervention pour réaliser des études de renforcement parasismique du bâti dans les zones les plus exposées au risque sismique. Ces études de renforcement parasismique ont l'intérêt de réduire les risques d'effondrement du bâti collectif à usage d'habitation et par conséquent, les risques de pertes en vie humaine. Dans cette analyse plus détaillée, les interventions sont plus ponctuelles mais plus nombreuses, elles ont l'avantage d'être mieux adaptées aux spécificités locales des territoires. En effet, par exemple, à Mulhouse dans l'étude de cas développée au paragraphe précédent, le scénario de niveau de priorité 1 préconise d'intervenir en premier lieu dans le secteur situé au Sud-ouest du territoire de Mulhouse. Dans cette étude de cas plus précise, ce même scénario préconise d'intervenir aussi dans ce même secteur, mais dans une zone plus réduite localisée au nord, aussi dans la zone Sud du secteur situé à l'Est de la ville et également dans la zone Sud du centre-ville.

Dans cette étude de cas plus approfondie, le processus de la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique et de ses composants est celui décrit en début de ce chapitre. Il est inutile de rappeler que ce processus se compose de la définition de résultats quantitatifs réels, que ces résultats sont normalisés pour être transformés en résultats qualitatifs pour être cartographiés. Il n'est pas non plus nécessaire de souligner que pour cartographier le risque sismique, il faut d'abord cartographier ses composantes : l'aléa et la vulnérabilité.

Dans cette étude détaillée, les cartographies de l'aléa sismique des territoires de Mulhouse et de Bâle sont identiques aux cartographies élaborées au paragraphe précédent. En effet, celles-ci sont identiques puisque les accélérations de sol ainsi que les zones d'amplification des ondes sismiques sont similaires aux précédentes (voir supra figure n° 101 et figure n° 102).

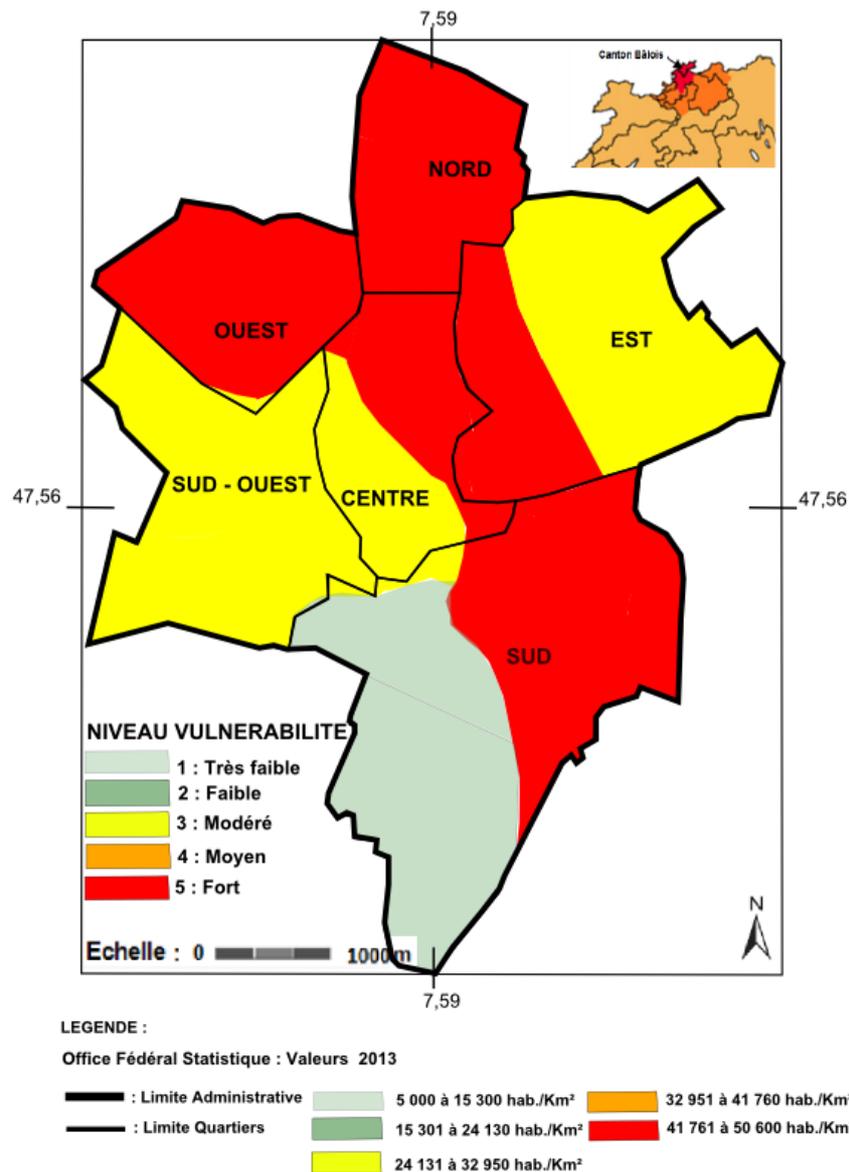
En revanche, nous avons vu au chapitre n° 4 qu'en approfondissant l'analyse de la répartition de la population [Annexe – Chapitre n° 4 – Tableaux n° A 5 et figures n° 46 et 47] et la composition des différents types de bâtiments ne sont pas homogène à l'intérieur de chaque secteur historico-géographique [Annexe – Chapitre n° 4 – Tableaux n° A 8 et n° A 9]. Les cartes n° 110 et 111 font apparaître une répartition de la vulnérabilité de population (figures n° 110 à 111) qui varie du niveau très faible au niveau fort.



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 110 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN ; Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques, INSEE, RP – 2013 – Découpage IRIS] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

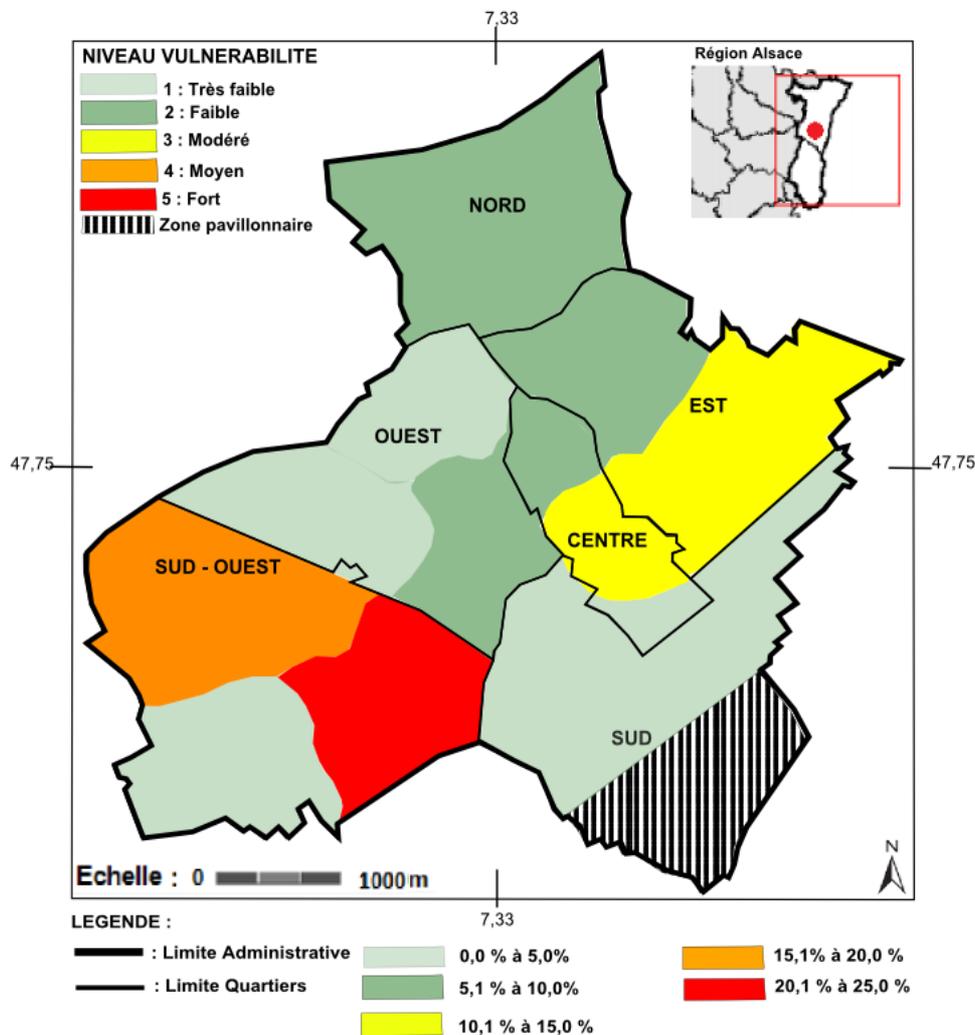
Figure n° 111 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel ; Office fédéral de la statistique (OFS) – 2013]

(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

A Mulhouse, on peut observer les zones dont le niveau de vulnérabilité de la population est élevé (en rouge et orange). Dans cette ville, le niveau fort de vulnérabilité de la population localisé dans la zone Sud-ouest du secteur Ouest provient essentiellement de la présence importante de bâtiments d'activités industriels. Dans la zone Sud-est du secteur situé au

Sud-ouest de la ville les causes d'un niveau élevé de vulnérabilité sont différentes. D'une part, la population est plus nombreuse et d'autre part l'habitat est davantage de type individuel. Le niveau de vulnérabilité dans tout le secteur Nord et Sud est très faible dû à l'industrie très présente au nord et aux constructions pavillonnaires dominantes au sud de la ville. Le niveau de vulnérabilité de la population très faible au Sud du territoire de Bâle est aussi dû aux zones pavillonnaires importantes. Les raisons d'un niveau élevé de vulnérabilité de la population dans les différentes zones du territoire de Bâle proviennent essentiellement d'une densité de population élevée. La vulnérabilité du bâti (figures n° 112 à 113) varie aussi du niveau très faible au niveau fort.

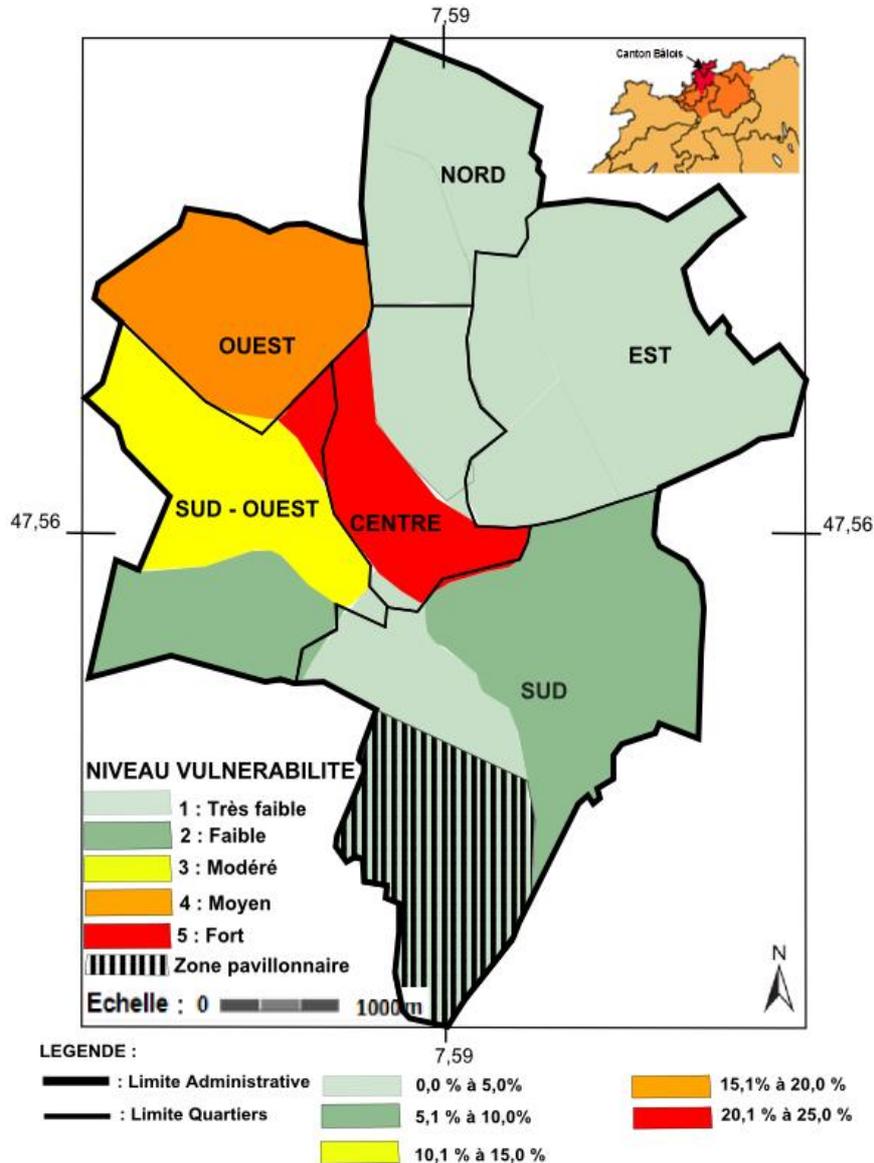


« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 112 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte ; Données collectées sur le terrain, mars 2013]

(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

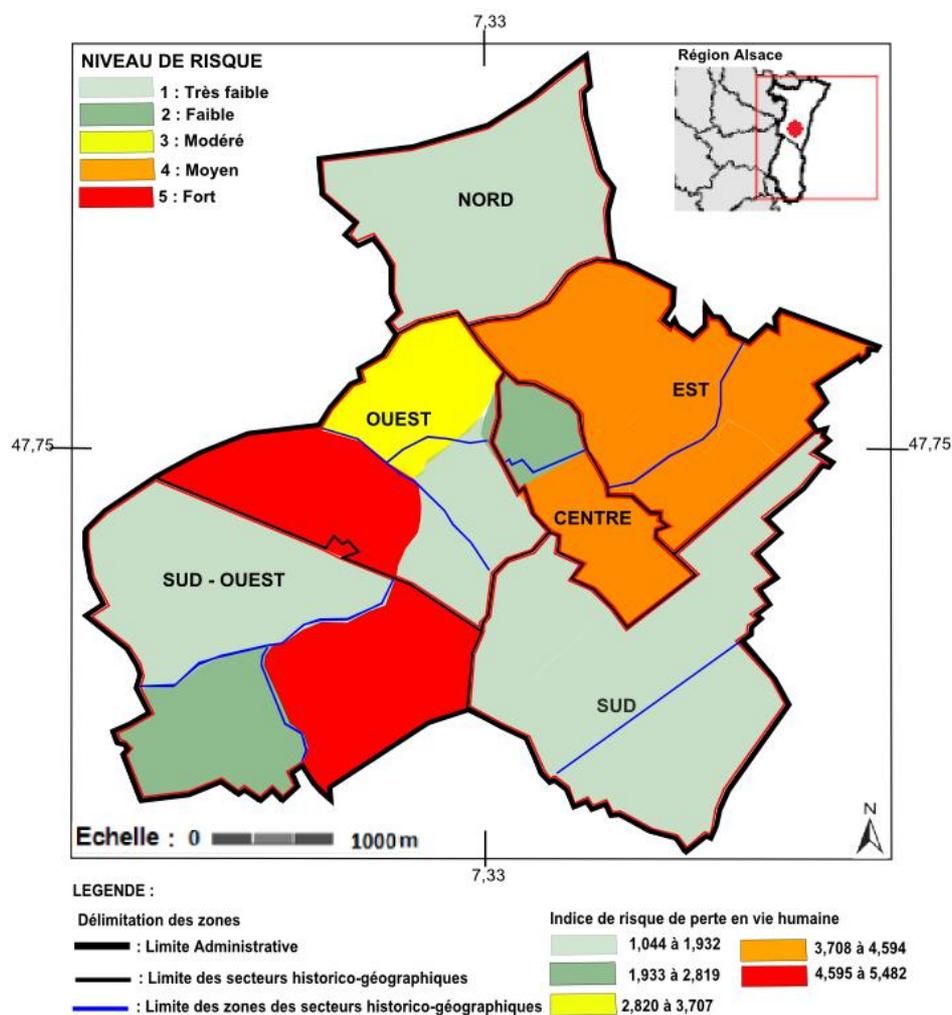
Figure n° 113 : Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel ; Don-nées collectées sur le terrain, mars 2013]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

A Mulhouse on peut observer trois zones (en vert clair, figure 112) dont la vulnérabilité est très faible. Cette faible vulnérabilité du bâti collectif à usage d'habitation est principalement due à la présence des bâtiments d'activités industrielles et à la gare de fret dans le secteur Ouest, à la présence des zones pavillonnaire dans le Sud de la ville. Dans la zone sud-ouest du secteur situé au Sud-ouest de Mulhouse, les bâtiments des années 1960 – 1970 réalisés en béton armé de "type Barre" résistants aux séismes rendent cette zone très peu vulnérable. Les zones dont la vulnérabilité du bâti est très élevée est relative à la présence du type de bâtiments très anciens construits en pierres naturelles sans normes parasismique. A

Bâle, nous avons vu au chapitre n° 4 que les différents types de bâtiments dominants sont similaires à ceux de Mulhouse. Dans les deux territoires de Mulhouse et de Bâle, on peut observer que le bâti du centre-ville est très vulnérable.

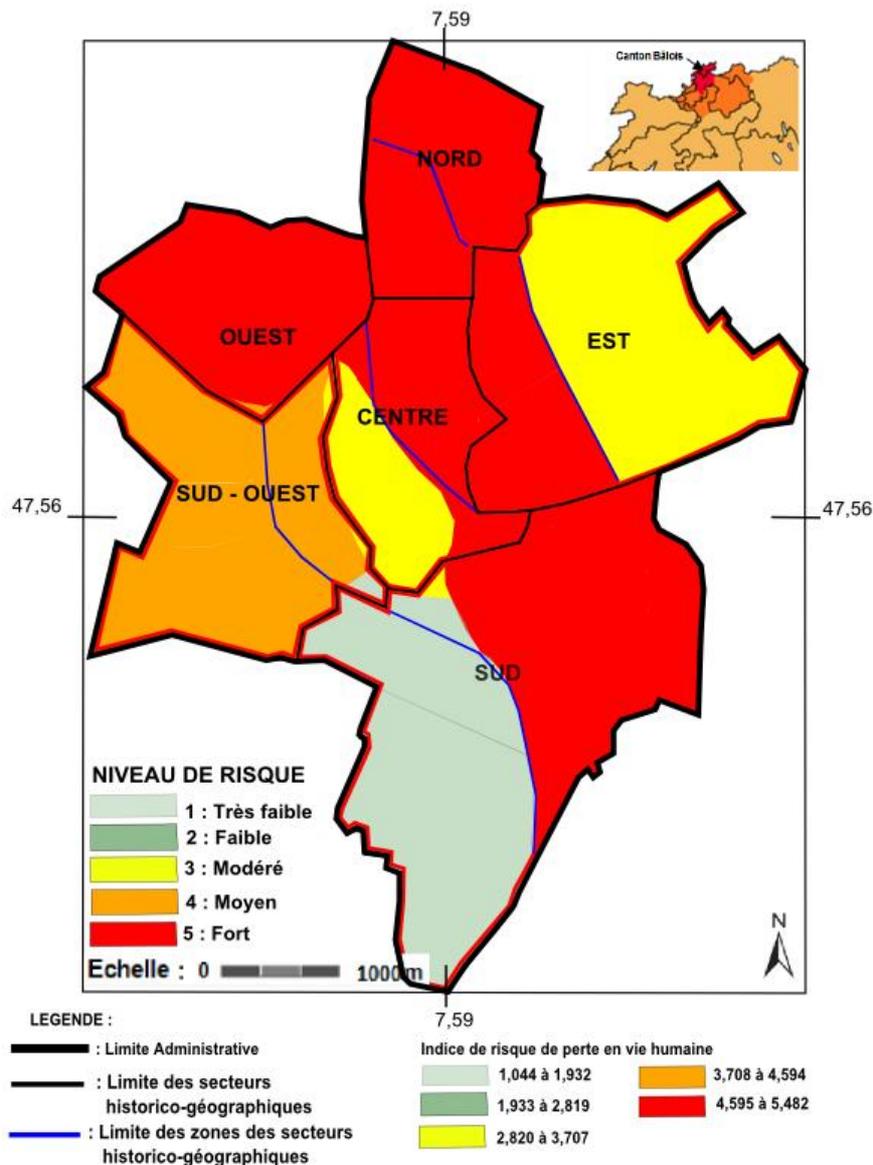
Les composantes du risque sismique étant évaluées et cartographiées, il est nécessaire de croiser ces deux composantes pour réaliser la cartographie du risque de perte en vie humaine et le risque d'effondrement de l'habitat collectif de notre terrain d'étude. Cette démarche nous renvoie au processus décrit en début de ce chapitre (résultats quantitatifs réels, résultats quantitatifs normalisés et résultats qualitatifs) et aux figures n° 96 et n° 97. Ces résultats sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableau n° A 17]. Ainsi, les cartes suivantes (figures n° 114 et 115) font apparaître le niveau de risque de pertes en vie humaine qui varie du niveau très faible au niveau le plus élevé (niveau fort).



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 114 : Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



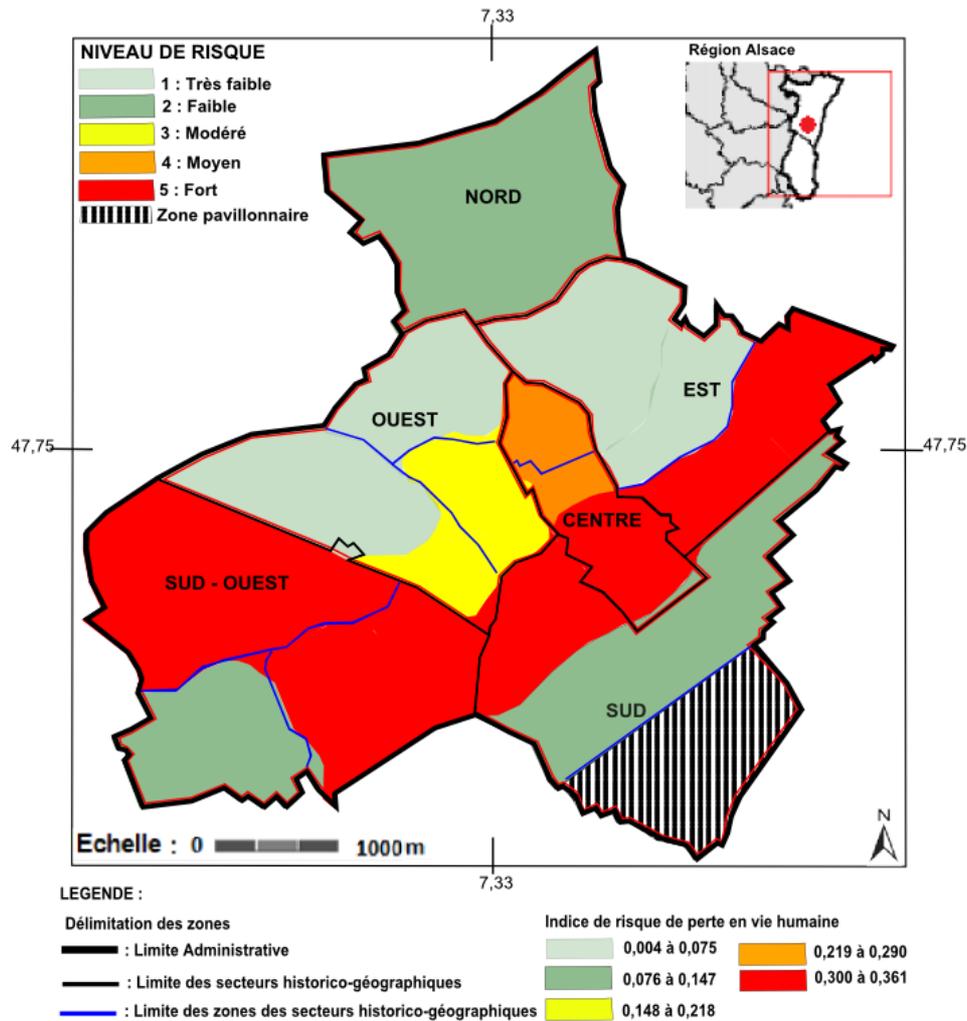
« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 115 : Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

A Mulhouse le niveau de risque de perte en vies humaines est globalement moins élevé qu'à Bâle. Rappelons qu'au chapitre n° 3, on a vu que la densité globale de population de la ville de Bâle est plus élevée qu'à Mulhouse. De plus, la superficie réelle totale d'emprise au sol du bâti est moins importante à Bâle [Annexe – Chapitre n° 4 – Tableau n° A 5]. Les niveaux de risque de perte en vie humaine constatés dans les différentes zones à Mulhouse comme à Bâle (figures n° 114 et n° 115) proviennent essentiellement de la répartition inégale de la population. Les cartes suivantes (figures n° 116 et 117) font apparaître un niveau de risque d'effondrement du bâti (résultats qualitatifs) qui varie lui aussi du niveau

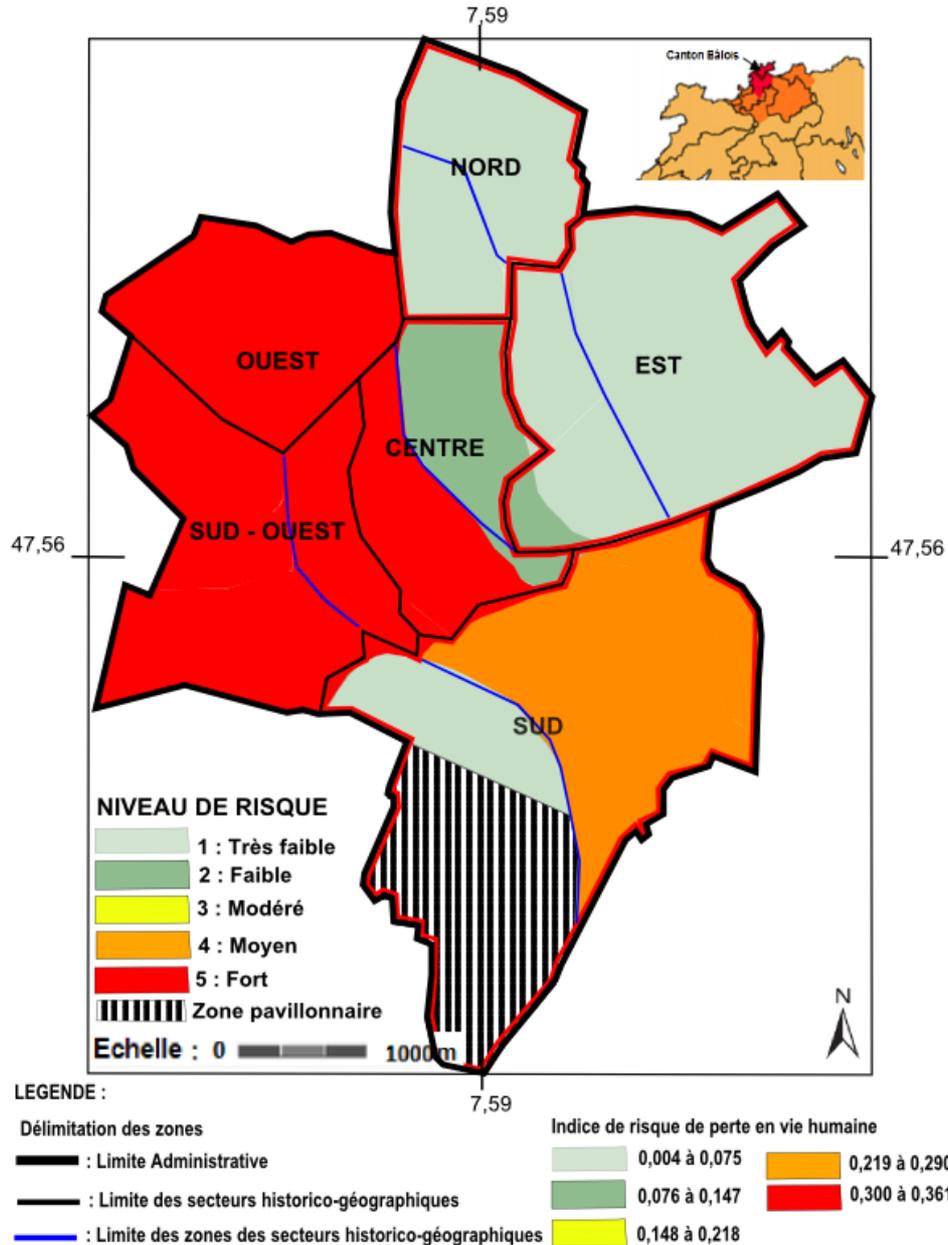
très faible au niveau le plus élevé (niveau fort). Les résultats quantitatifs du risque d'effondrement du bâti sont donnés à titre indicatif en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Figures n° A 3 et A 4].



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 116 : Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

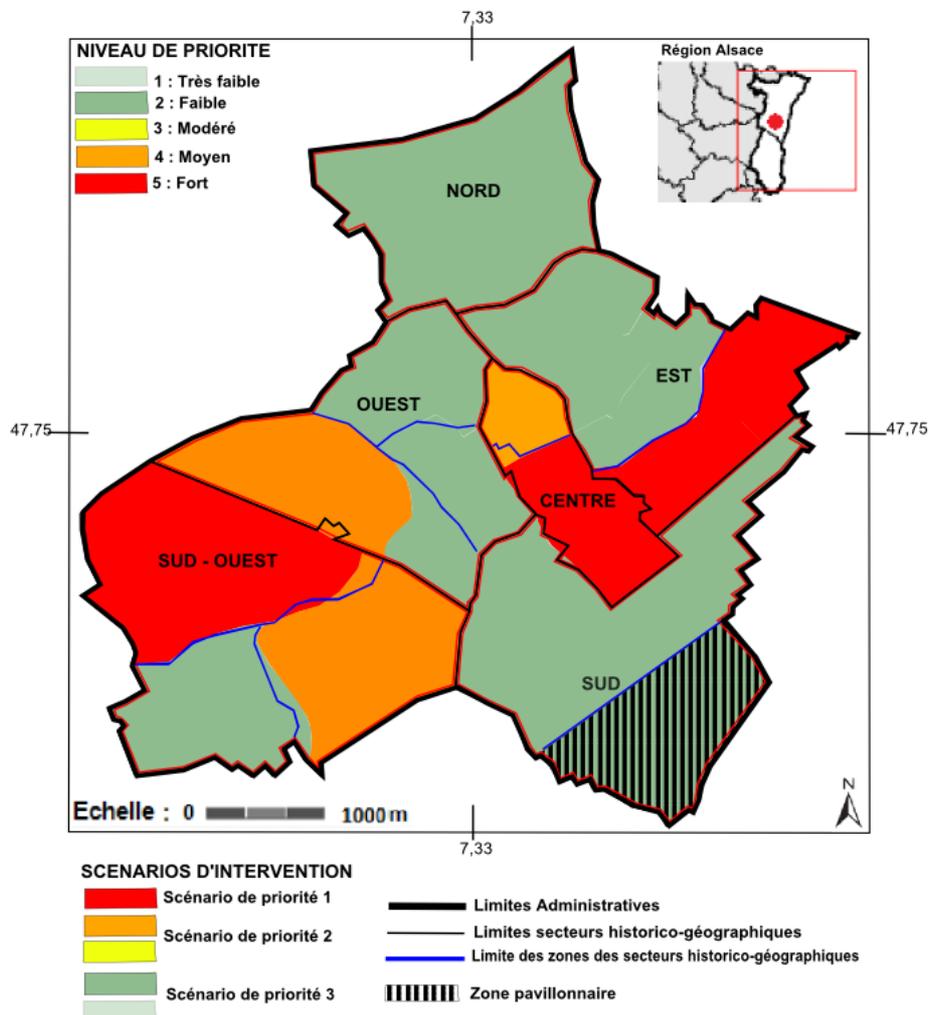
Figure n° 117 : Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

A Mulhouse comme à Bâle, on peut observer sur les deux cartes précédentes que le niveau de risque d'effondrement du bâti varie du niveau très faible au niveau fort. La cause essentielle de la variation du niveau de risque est principalement due à la composition des différents types de bâtiments d'une zone à l'autre. En effet, par exemple dans le secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse le niveau de risque d'effondrement du bâti varie du niveau faible au niveau fort. Nous avons constaté que la zone sud-ouest de ce sec-

teur est majoritairement composée d'un bâti en béton armé des années 1960 – 1970, résistant aux séismes. En dehors de cette zone, le niveau de risque très élevé est dû aux bâtiments très anciens et construit en pierres naturelles sans règle parasismique. Les résultats quantitatifs du risque d'effondrement du bâti sont donnés à titre indicatif en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Figures n° A 12 et A 13].

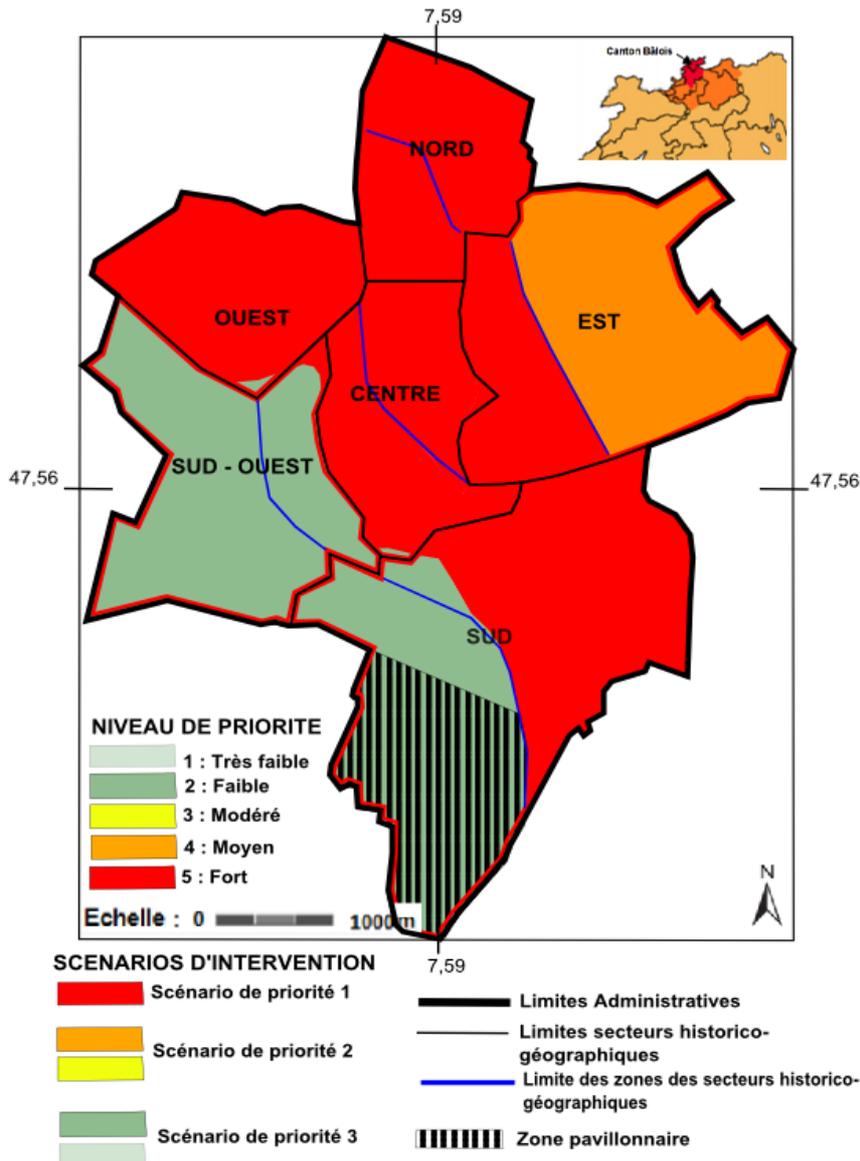
Les cartes précédentes (figures n° 114 à 117) que nous venons de réaliser vont nous permettre d'envisager trois cas de priorité des zones d'études de réduction de risque de perte en vie humaine et d'effondrement du bâti. Les résultats sont regroupés dans les deux cartographies suivantes (figures n° 118 et n° 119) et détaillés sous la forme d'une matrice en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableaux n° A 18 et A 19]. Ces deux matrices ont été réalisées en croisant d'une part l'aléa et la vulnérabilité de la population et d'autre part l'aléa et la vulnérabilité du bâti.



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 118 : Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse

Source : D'après [Fond de carte : GEO PORTAIL – Carte IGN]
(cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

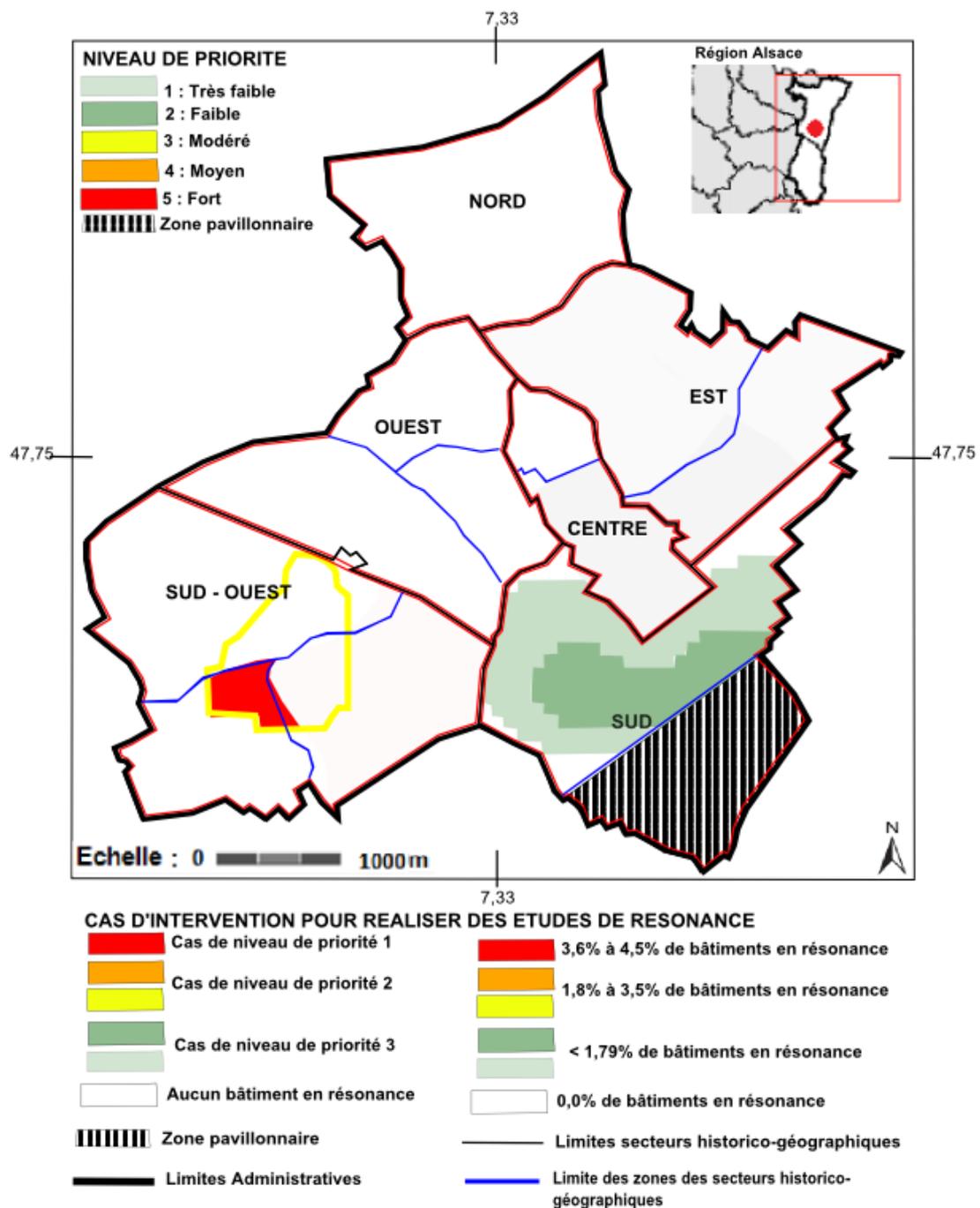
Figure n° 119 : Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle

Source : D'après [Fond de carte : GEOPORTAL, Geoviewer Canton de Basel] (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Comme nous l'avons fait remarquer au début de ce paragraphe, les zones d'intervention de renforcement parasismique selon les différents cas envisagés sont plus petites et plus nombreuses que dans l'étude réalisée à l'échelle urbaine. En d'autres termes, cette étude plus approfondie nous a permis de cibler les zones d'interventions selon les spécificités locales du risque sismique. Ainsi, à Mulhouse, dans le scénario de niveau de priorité 1 on peut dé-

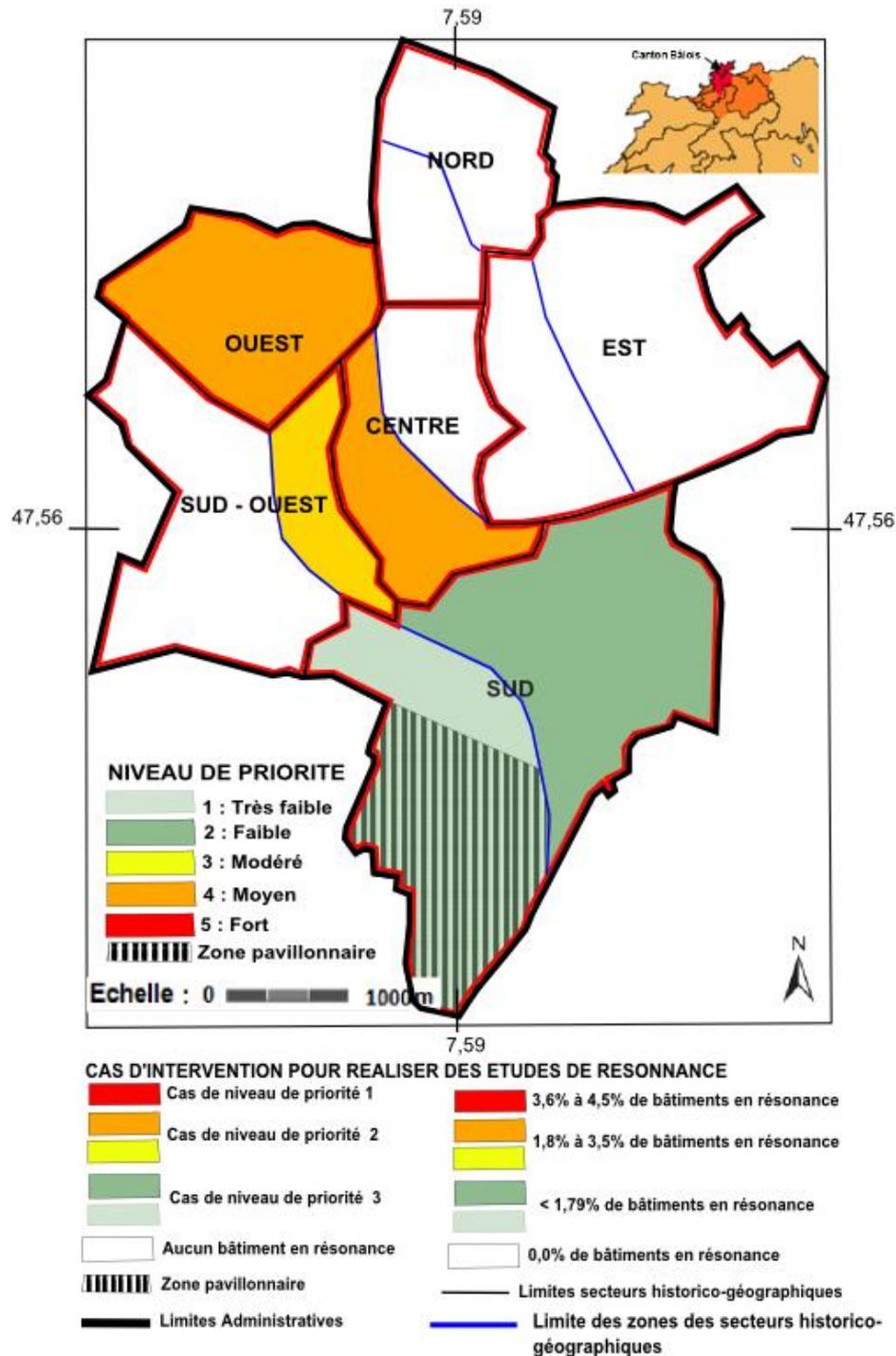
nombrer dans la figure précédente (figure n° 118) trois zones d'interventions. Le scénario de niveau de priorité 2 ajoute trois zones supplémentaires aux précédentes. A Bâle les choses sont un peu différentes. En examinant la figure précédente (figure n° 119), dans le scénario de niveau de priorité 1 il y a des secteurs entiers où il est nécessaire d'intervenir en premier lieu. La superficie d'intervention de ce scénario de niveau de priorité 1 est plus importante que dans le territoire de Mulhouse. Ce constat que nous avons déjà souligné dans l'analyse précédente (analyse à l'échelle urbaine) vient affirmer que le niveau de risque de perte en vie humaine et d'effondrement du bâti est globalement plus élevé à Bâle qu'à Mulhouse.

Il est envisagé d'établir trois cas de niveau de priorité du niveau 1 au niveau 3 pour définir les zones nécessitant une étude approfondie de la fréquence fondamentale des bâtiments. L'intérêt de cette étude est de vérifier s'il est nécessaire de modifier la fréquence fondamentale des immeubles pour éviter leur entrée en résonance avec les zones d'amplification des ondes sismiques. Les phénomènes de résonance sont des effets qui aggravent considérablement l'endommagement du bâti. Il s'agit de délimiter les zones dont le bâti est susceptible d'entrer en résonance avec le mouvement sismique des zones d'amplification des ondes sismiques. Par définition la fréquence (notée f) d'un phénomène périodique (balancement d'un bâtiment) est le nombre de répétitions de balancements pendant une seconde. La fréquence est simplement l'inverse de la période (T). Réaliser une cartographie des zones dont le bâti est susceptible d'entrer en résonance implique de comparer la fréquence fondamentale du bâti, définie au chapitre n° 5 (tableau n° 32) et la fréquence fondamentale du support géologique de notre terrain d'étude définie au chapitre n° 3 (figures n° 33 et n° 35). La méthode appliquée pour déterminer les résultats quantitatifs (quantité de bâtiments contenus dans le territoire d'étude) et les résultats qualitatifs (niveaux de priorité d'intervention pour réaliser des études de fréquence fondamentale du bâti) nous renvoie à la méthode décrite au début de ce chapitre. Les zones et les types de bâtiments susceptibles d'entrer en résonance sont détaillés en annexe [Annexe – Chapitre n° 6 – Tableaux n° A 20 et A 21]. Ces zones, ainsi que les cas des trois niveaux de priorité apparaissent dans les figures suivantes (figures n° 120 et n° 121).



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 120 : Cartographie des cas d'intervention pour une étude approfondie des phénomènes de résonance à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Mulhouse (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)



« Cartographie réalisée d'après les hypothèses et le modèle d'évaluation proposés dans le cadre de cette étude »

Figure n° 121 : Cartographie des cas d'intervention pour une étude approfondie des phénomènes de résonance à l'échelle des secteurs historico-géographiques de Bâle (cartographie réalisée avec le logiciel Inkscape)

Il convient tout d'abord de préciser que les phénomènes de résonance dépendent d'une part du type de sol et d'autre part du type de bâtiment. En effet ces phénomènes peuvent se produire sur des sols durs de type "rocheux" combinés à des bâtiments légers (en acier) avec

beaucoup d'étages ou sur des sols mous de type "tourbier" couplés à des bâtiments très lourds et anciens construits en maçonnerie de pierres naturelles. Prenons l'exemple du secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse. Ce secteur est délimité par trois zones dont une partie du sol (repéré en jaune sur la figure n° 123) a une fréquence fondamentale comprise entre 2 et 4 hertz. Les bâtiments localisés dans la zone Sud-ouest (repéré en rouge sur la figure n° 123) sont construits en béton armé des années 1950 à 1970 composés de 8 à 9 étages et plus. La fréquence fondamentale est d'environ de 2 à 3,5 hertz. La fréquence fondamentale du sol étant très proche, il y a un risque de phénomène de résonance. En revanche le bâti localisé dans les deux autres zones est majoritairement composé de bâtiments très anciens, avant 1900 réalisés en pierres naturelles avec 3 à 4 étages, dont la fréquence fondamentale d'environ égale à 0,05 hertz, le risque de résonance est peu probable. Cela revient à dire que dans ce secteur historico-géographique les phénomènes de résonances dépendent d'avantage des différents types de bâtiments. A Bâle, les zones de risques de phénomènes de résonances sont plus importantes qu'à Mulhouse. Dans cette ville, les phénomènes de résonances dépendent autant des différents types de sols que des différents types de bâtiments. Au regard des deux cartographies précédentes (figures n° 123 et n° 124) la vigilance aux risques de phénomènes de résonances doit être plus importante à Bâle qu'à Mulhouse.

Conclusion du chapitre 6

Dans ce chapitre nous avons réalisé une évaluation du risque sismique à l'échelle des territoires urbains de Mulhouse et de Bâle et à une échelle plus détaillée découpant les secteurs historico-géographiques en deux ou trois zones. Nous nous sommes intéressés au risque d'effondrement de l'habitat collectif et par conséquent au risque de pertes en vie humaine. Les composantes du risque (aléa et vulnérabilité) ont été évaluées à partir de la réglementation Européenne et des résultats du chapitre n° 3 pour l'aléa, puis complété des résultats du chapitre n° 4 pour la vulnérabilité de la population. Le modèle d'évaluation proposé au chapitre n° 5 nous a permis d'estimer la vulnérabilité des différents types de bâtiments.

Pour réaliser la mise en application du modèle d'évaluation à la réalisation de la cartographie du risque sismique et de ses composants, nous avons utilisé une échelle quantitative, puis une échelle qualitative. Les cartographies nous ont permis de hiérarchiser les secteurs historico-géographiques ainsi que les différentes zones à l'intérieur de chaque secteur au regard du risque sismique des pertes en vie humaine et d'effondrement du bâti.

Plus précisément, les cartographies du risque de perte en vie humaine et du risque d'effondrement du bâti nous ont permis de réaliser des matrices de risque pour déterminer des cas de niveau de priorité en utilisant la méthode de sur-classement. Enfin en dernier lieu, il convient de souligner que le niveau de risque de perte en vie humaine et le niveau de risque d'effondrement du bâti est globalement plus élevé à Bâle qu'à Mulhouse.

Conclusion de la deuxième partie

Le premier chapitre de cette deuxième partie est une étape préliminaire primordiale à l'évaluation du risque d'effondrement de l'habitat collectif. Ce chapitre a été l'occasion d'évaluer la résistance sismique des différents types de bâtiments répartis dans le territoire de Mulhouse et de Bâle.

Dans le cadre de notre étude pour intégrer la première composante du risque (l'aléa sismique), permettant d'évaluer la résistance sismique des immeubles, nous avons respecté l'application des recommandations de la norme parasismique. L'Eurocode préconise de prendre une accélération de sol maximale égale à $1,10 \text{ m/s}^2$. Les effets de site ont été intégrés par des coefficients amplificateurs.

Le deuxième chapitre est une étape finale d'évaluation du risque de pertes en vie humaines et du risque d'effondrement de l'habitat collectif implanté dans la conurbation de Mulhouse – Bâle.

Evaluer le risque de perte en vie humaine au moment où la population est la plus concentrée dans les lieux d'habitation revient à évaluer la densité de population durant la période de nuit de 18h00 à 6h00 du matin. A travers une étude plus approfondie de la concentration des habitants, nous avons pu observer que le risque de perte en vie humaine est inégalement réparti sur les territoires de Mulhouse et de Bâle.

Evaluer le risque d'effondrement du bâti implique nécessairement d'estimer la résistance sismique des différents types de Bâtiments. Notre principale démarche pour évaluer ce risque a été de combiner les résultats obtenus au chapitre n° 3 (les différents types de bâtiments et leur répartition dans le territoire d'étude) et les résultats obtenus au chapitre n° 5 (la résistance sismique des différents types de bâtiments). Cette évaluation nous a permis d'en déduire que le bâti très ancien, antérieur aux années 1900 construit en pierres naturelles est très vulnérable et que le bâti plus récent réalisé en béton armé est beaucoup plus

résistant aux effets d'un séisme. Nous avons aussi constaté que le risque d'effondrement des bâtiments est inégalement réparti à l'intérieur des territoires de Mulhouse et de Bâle.

Cette approche indispensable se montre néanmoins insuffisante pour déterminer des cas de niveau de priorité d'intervention pour réaliser des études locales de résistance sismique adaptées au contexte urbain de la conurbation de Mulhouse – Bâle. La spécificité de la répartition des habitants et la dispersion des différents types de bâtiments complexifient fortement l'évaluation du risque de pertes en vie humaine et le risque d'effondrement des bâtiments. C'est ainsi qu'une étude plus approfondie à l'intérieur de chacun des secteurs historico-géographiques a permis d'établir trois cas de niveau de priorité différents. Ces derniers constituent un outil d'aide à la décision destinée aux pouvoirs publics qui souhaitent réaliser une campagne de prévention et de protection sismique des habitants. Nous avons vu qu'à Mulhouse les phénomènes de risque de résonance concernent peu de bâtiments et qu'à Bâle ce risque est plus élevé.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

De plus en plus de spécialistes (Chercheurs, ingénieurs, géographes, assureurs, ...) travaillent sur la gestion et l'évaluation du risque sismique. L'urbanisation de la population toujours plus importante dans nos villes rend ces zones de plus en plus dangereuses surtout lorsque le risque sismique se trouve à proximité. Dans ce contexte, il est nécessaire de mettre en œuvre des outils pour évaluer ce risque à l'échelle de plusieurs bâtiments afin d'aider objectivement la prise de décision et cibler les zones les plus vulnérables de la ville étudiée. Ce travail de thèse montre l'intérêt des modèles d'évaluation du risque sismique à grande échelle. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes attachés à proposer un modèle d'évaluation du risque d'effondrement du bâti causé par un événement sismique ainsi que le risque de perte en vie humaine entraîné par l'effondrement des bâtiments.

La démarche envisagée dans le cadre de ce travail évalue dans un premier temps les différentes composantes du risque sismique, c'est-à-dire l'aléa et la vulnérabilité.

L'aléa sismique régional est tout d'abord évalué à partir de plusieurs études bibliographiques [MOUROUX et HERRERO 1990 ; MARÇOT et Arnal, 2004 ; MOUROUX et THIERRY 2003 ; BECK 2006 ; LESTUZZI et BADOUX 2008] dont la valeur de l'accélération de sol à Mulhouse comme à Bâle est égale à $1,10 \text{ m/s}^2$. Ces mêmes auteurs ont aussi étudié l'aléa sismique local qui ont localisé quatre zones d'amplification des mouvements sismiques aboutissant à une accélération de sol de $2,50 \text{ m/s}^2$ sur le territoire de Mulhouse et de $3,40 \text{ m/s}^2$ sur le territoire de Bâle. Ces valeurs d'accélération de sol sont obtenues à partir d'analyses du contexte géologique et sismotectonique du sud de l'Alsace et de la région bâloise. Une analyse de la réglementation parasismique nous a permis de comparer les préconisations de l'Eurocode 8, ainsi que celles de la norme Suisse SIA 260 à 267 aux résultats des études réalisées par les auteurs précités. Nous avons constaté que les accélérations de sol définies par les études sismologiques des auteurs peuvent dépasser les accélérations réglementaires. L'application de la norme Européenne au territoire bâlois a nécessité quelques adaptations afin de respecter les exigences de la norme Suisse. Une carte a permis de localiser les résultats ainsi que les zones susceptibles d'effets de site. L'évaluation du risque d'effondrement du bâti existant à usage d'habitation collective en terme probabiliste implique une évaluation probabiliste de l'aléa sismique et de la vulnérabilité.

Pour évaluer la vulnérabilité physique des lieux d'habitation collective, il nous a été possible d'envisager un modèle d'évaluation de la résistance sismique du bâti existant en

utilisant la réglementation parasismique Européenne. Ce modèle est essentiellement fondé sur une enquête de terrain visuelle et sur l'Eurocode 8. Pour ce faire, nous avons procédé en deux étapes. Une première étape déterministe utilisant l'Eurocode 8 a pour intérêt de déterminer si le bâti résiste à un événement sismique selon une intensité donnée. La deuxième étape d'évaluation de la vulnérabilité physique du bâti est fondée sur la mécanique probabiliste. Cette dernière consiste à calculer une probabilité de défaillance. Ces deux étapes complémentaires ont pour objectif de définir si les bâtiments s'effondrent et avec quelle probabilité ceux-ci risquent de s'écrouler. Le modèle opérationnel envisagé à l'avantage de fournir des résultats de résistance sismique du bâti existant sans que ce modèle implique de réaliser des calculs mécaniques. Ce modèle a aussi l'avantage d'intégrer l'âge et les matériaux du bâti en distinguant cinq types de bâtiments existants différents de la maçonnerie en pierres naturelles des années 1900 aux constructions en béton armé des années 1990 à 2005. Les bâtiments réalisés après 2005 respectant les normes parasismiques européennes et helvétiques n'ont pas été pris en compte dans notre étude. Ces ouvrages très peu présents dans le territoire de Mulhouse – Bâle résistent à la force des séismes préconisés par les nouvelles réglementations parasismiques respectives des deux pays. Ce modèle opérationnel intègre aussi la hauteur des bâtiments selon le nombre d'étage. Celui-ci se compose d'un graphique et des coefficients de majoration prenant en compte les effets de site ainsi qu'un récapitulatif des probabilités de défaillance. La composition de ce modèle permet d'évaluer la vulnérabilité du bâti existant à l'échelle de plusieurs bâtiments. Pour rendre ce modèle applicable au territoire bâlois, nous avons dû réaliser quelques adaptations. Par exemple, nous avons appliqué les obligations de renforcement parasismique à tous les bâtiments d'habitation collective sans faire de distinction des bâtiments publics – bâtiments privés et les cas de bâtiments faisant ou ne faisant pas l'objet de travaux lourds. Aussi, nous avons réduit l'accélération de sol préconisée par l'Eurocode pour le bâti neuf de 10% au lieu de 40% comme le préconise le règlement pour le bâti existant. Une autre catégorie d'élément exposé a été considérée dans ce travail : la population lorsque cette dernière est concentrée au maximum dans les lieux d'habitation, c'est-à-dire de 20h00 à 6h00. La vulnérabilité de la population est abordée par l'intermédiaire d'une approche quantitative. Cette approche considère la population répartie non pas sur la surface totale du territoire, mais sur la surface bâtie, prenant en compte uniquement la superficie d'emprise au sol des bâtiments à usage d'habitation collective. La vulnérabilité de la population est ensuite considérée par le biais d'un indice qui est tout simplement la densité de population afin que cette vulnérabilité soit convertie en valeurs qualitative pour les besoins de la cartographie.

Dans une deuxième partie, la simulation d'un séisme de magnitude 6,0 permet d'évaluer le risque sismique de la région mulhousienne – bâloise. L'accélération maximale

qui en découle égale à $1,10 \text{ m/s}^2$ correspond à l'accélération de sol de référence préconisée par la réglementation Européenne. Pour Mulhouse, ce séisme pourrait provenir de la faille active d'Illfurth, alors qu'à Bâle ce séisme pourrait provenir de la faille active d'Allschwil, localisé à proximité de Bâle. L'évaluation du risque d'effondrement du bâti et du risque de perte en vie humaine est réalisée par le croisement de l'aléa sismique et de la vulnérabilité du bâti pour le risque d'effondrement du bâti et par le croisement de l'aléa sismique et de la vulnérabilité de la population pour le risque de perte en vie humaine. La démarche que nous venons de rappeler a été appliquée au cas de la ville de Mulhouse et de la ville de Bâle. Ces deux zones urbaines constituent une région très "*vulnérable*" notamment par l'importance de la population et de son bassin économique tri-national.

En définitive, la procédure de la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique de Mulhouse et de Bâle a permis d'obtenir des résultats quantitatifs réels puis des résultats qualitatifs. Ces derniers nous ont permis de réaliser une cartographie du risque sismique de notre terrain d'étude. Ces résultats ont été déterminés en trois étapes. Les résultats quantitatifs réels que constitue la première étape sont normalisés en deuxième étape sur une échelle allant de [0 à 1] pour obtenir des "*Indices*" d'aléa, de vulnérabilité et de risque sismique. En troisième étape, ces indices sont identifiés sur une échelle qualitative à cinq niveaux du niveau très faible au niveau fort. Les résultats qualitatifs permettent de hiérarchiser par niveau de risque les différents secteurs historico-géographique dans le cas d'une analyse à l'échelle des deux villes. La hiérarchisation des différents secteurs historico-géographiques a permis d'envisager trois cas d'intervention de renforcement parasismique du bâti, du cas le plus urgent au cas le moins urgent. Ces différents cas ont été obtenus par la méthode de sur-classement entre le risque d'effondrement du bâti et le risque de perte en vie humaine. On peut retenir que le secteur historico-géographique situé au SUD-OUEST est prioritaire dans l'intervention de réduction du risque sismique à Mulhouse et que les secteurs historico-géographique NORD et OUEST à Bâle ont le niveau de risque le plus élevé. Dans le cas de l'analyse plus approfondie, on a hiérarchisé plusieurs zones à l'intérieur de chaque secteur historico-géographique. Rappelons qu'à Mulhouse, les zones dont le risque de perte en vie humaine le plus élevé se trouvent dans les secteurs historico-géographique OUEST et SUD-OUEST. A Bâle, ce sont les zones situées dans les secteurs historico-géographique NORD, OUEST, CENTRE et SUD. Le niveau de risque d'effondrement du bâti est localisé dans les secteurs historico-géographique SUD-OUEST, CENTRE, SUD et EST pour Mulhouse et dans les secteurs historico-géographique OUEST et SUD-OUEST à Bâle. Ainsi, les zones prioritaires d'intervention de réduction du risque sismique à Mulhouse se trouvent dans les secteurs historico-géographique SUD-OUEST, CENTRE et EST et à Bâle dans les secteurs historico-géographique NORD, OUEST,

CENTRE et SUD. L'étude du risque des effets de site révèle quelques zones dont les effets potentiels d'amplification des ondes sismiques peuvent se produire. A Mulhouse ces zones sont localisées dans le secteur historico-géographique situé au SUD-OUEST dont la fréquence fondamentale comprise entre 2 Hz et 4 Hz et au SUD avec une fréquence fondamentale comprise entre 4 Hz et 6 Hz. La fréquence fondamentale la plus élevée du bâti dans ces zones avoisine 0,15 à 0,45 Hz. Le risque d'entrée en résonance est peu élevé. A Bâle, ces zones se trouvent principalement dans les secteurs historico-géographique OUEST et CENTRE, SUD-OUEST et SUD avec une fréquence fondamentale variant de 0,7 Hz et 3 Hz. Le bâti bâlois quelque peu similaire au bâti mulhousien a un risque d'entrée en résonance peu élevé.

Finalement, cette étude à l'échelle urbaine possède l'avantage de donner une vision d'ensemble du risque sismique, bien qu'elle soit fondée sur un certain nombre de simplifications. On peut notamment citer dans l'évaluation de l'aléa, la négligence de la géologie profonde. On peut aussi préciser que le modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant envisagé comporte quelques simplifications. L'enquête de terrain est basée sur l'observation visuelle, les équations préconisées par l'Eurocode 8 correspondant à des bâtiments dits "régulier en plan et en élévation" sont simplifiées. Ces simplifications dégagent quelques perspectives de travail.

Tout d'abord, une étude locale sismologique de terrain plus complète prenant en compte la géologie profonde permettrait d'obtenir des résultats plus détaillés des zones de risque d'amplifications des ondes sismiques. Une étude statistique de la fréquence fondamentale du bâti réalisée sur le terrain par des relevés de bruits ambiants aboutirait à un relevé des fréquences fondamentales du bâti plus précises et par conséquent une localisation plus fine des zones de risques susceptibles de phénomènes de résonances.

Le modèle simplifié d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant que nous avons proposé à la suite de ce travail fait l'objet d'incertitudes. Nous avons intégré dans ce modèle d'évaluation les incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux ainsi que les incertitudes relatives à la conception architecturale des bâtiments et les incertitudes relatives à l'application de la réglementation. Toutes ces incertitudes proviennent de la méthodologie de l'enquête de terrain basée sur l'observation visuelle des bâtiments. Nous avons vu que pour intégrer les incertitudes liées aux connaissances des caractéristiques mécaniques des matériaux, la réglementation prévoit d'insérer aux calculs de résistance du bâti un coefficient de confiance (coefficient majorant les résultats). Il a été envisagé d'intégrer les incertitudes relatives à la conception architecturale des bâtiments par

des valeurs fourchettes de la masse, de la rigidité et de la période fondamentale du bâti. Les incertitudes relatives à l'application de la réglementation ont été aussi introduites par des valeurs fourchettes des caractéristiques de résistance mécanique des matériaux. Néanmoins, pour améliorer la fiabilité du modèle d'évaluation du risque sismique proposé, les quelques améliorations suivantes peuvent être envisagées.

- Étendre ce modèle d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti aux bâtiments en acier et en bois,
- Intégrer plusieurs niveaux d'aléa dans le graphique de résistance des bâtiments,
- Recueillir davantage de retour d'expérience qui permettrait de mieux connaître les phénomènes de ruine des bâtiments
- Augmenter le nombre de bâtiments dans l'étude pour construire un modèle brochette modélisant des bâtiments irréguliers en plan et en élévation,
- Réaliser des prélèvements in situ de matériaux pour effectuer des essais de résistance mécanique
- Synthétiser cette information dans un SIG, permettant d'élaborer des cartes de risque en vue d'aider la prise de décision.

Ces améliorations permettraient de réduire les incertitudes que nous avons intégrées au modèle d'évaluation de la vulnérabilité du bâti.

Dans le cadre de ce travail il a été possible d'utiliser la réglementation Européenne pour évaluer la vulnérabilité des habitations à usage collectifs à l'échelle de plusieurs bâtiments en adoptant quelques simplifications. Cependant, toutes intégrations des résultats obtenus à des fins gestionnaires doit faire l'objet d'une certaine précaution par rapport aux simplifications adoptées et aux incertitudes relevées par le modèle envisagé d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Cela revient à dire que pour connaître la résistance réelle de chaque bâtiment, il est nécessaire de réaliser une évaluation de la vulnérabilité sismique bâtiment par bâtiment. Ce travail a pour objectif de contribuer à l'élaboration d'une méthode intégrée d'évaluation des risques sismiques à grande échelle. Le modèle d'évaluation du risque sismique a pour intérêt d'assister l'aide à la décision des pouvoirs publics dans leur devoir de prévention et de protection de la population. Le cas pratique montre que la méthode globale d'évaluation de la vulnérabilité du bâti se révèle appropriée et peut être abordée par une approche mécanique, à défaut de données provenant de retours d'expérience et d'enquêtes de terrain plus précises. Cette méthode a l'avantage d'être rapidement opérationnelle et permet d'envisager plusieurs cas de risque ainsi que de quanti-

fier ce risque qualitativement et de faciliter la tâche de recueil d'informations disponibles. La possibilité de transférer la méthodologie proposée dans le cadre de ce travail, pourrait être utilisée par son application à d'autres villes de même taille, exposées au même danger sismique. Enfin, une perspective intéressante consisterait à élargir l'application de cette méthode d'évaluation à grande échelle à d'autres dangers naturels.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES - ARTICLES

ALEXENDRE P., – 1990, « *Les séismes en Europe occidentales de 394 à 1259 – Nouveau catalogue critique* », Observatoire Royale de Belgique, Bruxelles

AFPS – BRGM, décembre 2011, « Le séisme de LORCA (Espagne), Rapport de mission post-sismique, 152p.

AFPS-CSTB Groupe de travail, – 2013, « *Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme* », Guide de construction parasismique 77p et Annexes, 75p

AMBRASEYS N.N., – 1995, « *Prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe* », Earthquake Engineering and structure dynamic vol. 24, pp 467 – 490.

AMBRASEYS N.N., SIMPSON K.A. et BOMMER J.J. – 1996, « *Prediction of horizontal response spectra in Europe* », Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25 : pp 371-400

AMIET B. – 1952, « *Solothurnische Geschichte* », t.I, Solothurn

ANAGNOS, T., ROJAHN C. et KIREMIDJIAN A. – 1995, « *A. Joint study on fragility of building* », building. Tech. rep., National Center for Earthquake Engineering Research.

ANGELETTI P., BELLINA A., GUAGENTI E, MORETTI A et PETRINI V – 1988, « *Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results* », In *Proceedings of the 9 World Conference on Earthquake Engineering* (1988), EERI, pp.181-186.

Applied Technology Council (ATC – 13) – 1985, « *Earthquake damage evaluation data for California*», Report ATC – 13, Redwood city California: Federal Emergency Management Agency, 492p.

Applied Technology Council (ATC – 40) – 1996, « *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*», Report ATC – 40, Redwood city California 94065, Seismic safety commission, volume 1, rapport n° SSC 96-01, 254p

AUFRET Chloé (CETE Méditerranée), ROUSSILLON Pierre (BRGM), 2008, " *Comparaison de méthodes qualitatives d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes* ", Rapport d'étape CETE Méditerranée - Plan séisme - atelier 1.2 information, 164p

BAILLY A. – 1996, « *Risques naturels, risques de société* », Paris, Economica, p1, 103 p.

BARD P.-Y. – 2002, « *Les effets de site de la cuvette grenobloise* », Risques, Infos, n° 13.

BARTZ J. – 1974, « *Die Mächtigkeit des Quartärs im Oberrheingraben* », In: K. Fuchs and J.H. Illies (Editors), *Approaches to Taphrogenesis*. E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, pp. 78-87.

BEAUDOIN F. (EDF R & D) et BOUREL DE LA RONCIERE X. (CEA), 2015, « *Aide à la Décision pour la Gestion des Risques* », Formation – Institut pour la Maîtrise des Risques _ Tome 1, 141p

BECK U., 2002, « *La société du risque* », Coll. Alto, éd. Aubier, 2001, 521 p., 21,50 T

BENEDETTI D. et PETRINI V., – 1984, « *Sulla vulnerabilità sismica degli edificio in muratura : proposta di un metodo di valutazione* », L'industria della costruzioni 18, pp. 66-74.

BETBEDER-MATIBET J. – 2003, « *Génie parasismique* », Hermès Sciences Publications, 395p

BILLOT C., DURLER S. et WIDMER B. – 2003, « *Elaboration d'un outil d'estimation qualitative du risque naturel à moyenne échelle* », Article : Suisse – Lausanne, Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003, 14 p.]

BISCH Ph. – 2013, « *La modélisation et le calcul linéaire des actions sismiques* », Support pédagogique, Ecole des Ponts - ParisTech, 39p

BOUSQET B. et PECHOUX P-Y – 1997, « *La sismicité du bassin égéen pendant l'Antiquité, méthodologie et premiers résultats* », Bulletin de la Société géologique française 7, XIX. 3 pp 679-684

CAMPBELL K.W. – 1981, « *Near source attenuation of peak horizontal acceleration* », BSSA, Vol. 71 n° 6, pp 2039 – 2070.

CHARDON A-C. et THOURET J-C. – 1994, « *Cartographie de la vulnérabilité globale d'une population citadine face aux risques naturels : Le cas de Manizales (Andes de Colombie)* », Mappemonde, 4 : 3740. Numéro spécial Les risques naturels

CHENAF M. – 2013, « *Calcul des structures contreventées par des murs en maçonnerie* », Support pédagogique – Ecole des Ponts-ParisTech, 13p

CHENAF M., RAUX N. et LEBLOND Ph. – 2011, « *Effets du séisme sur les bâtiments contreventés par les murs en maçonnerie chaînées* », Ed ; CSTB, Coll. Guide Eurocode, 46p

CHENAF M. et TAILLEFER N., – 2011, « *Renforcement du bâti existant sous l'action du séisme* », Ed CSTB, Coll. Guide Eurocode, 92p

CLOSENER F., – 1362, « *in : Die Chroniken der oberrheinischen Städte Strasbourg* », Leipzig, 1870

CORNELL A. – 1968, « *Engineering Seismic Risk Analysis. Bull. Seismology* », Soc. Amer. 58, p. 1583-1606.

CORNELL A. & WINTERSTEIN S – R. – 1986, « *Applicability of the Poisson Earthquake occurrence Model Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States* », Vol. 1: Probabilistic Seismic Hazard Methodology, EPRI Research Report, Project P101-38, and May 1986.

COTTON F., FUKUSHIMA Y., BERGE-THIERRY C., VOLANT P. and GRIOT-POMMERA D. A. – 2003, « *Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California Japan and Turkey* », Journal. Earthquake Engineering 7 1-26.

CUTTER, S. L., MITCHELL J. K. et SCOTT M. S. – 2000, « *Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown, South Carolina* », Annals of the Association of American Geographers, vol. 90, no 4, p. 713-737.

CUTTER, S. L., BOURUFF B.J. et SHIRLEY W.L. – 2003, « *Social vulnerability to environmental hazards* », *Social science Quarterly* 84-(2): p. 242-261.

DAUPHINE A. – 2004, « Réflexion préliminaires sur les vulnérabilités analytiques et synthétiques », in Collectif, sous la direction de Veyret Y. — *Risques naturels et aménagement en Europe* — A. Colin, Paris, pp. 68-71.

DUBOIS-MAURY et CHALINE – 2002, « *Les risques urbains* », Paris Armand Colin (Coll. « U Géographie »). 208 p. (ISBN 2-200 26237-X)

DELAPLACE A., GATUINGT F. et RAGUENEAU F., 2008, « *Mécanique des structures* », Dunod, Paris, 2008 ISBN 978-2-10-053958-1

DESPAYROUX J. et GODEFROY P. – 1986, « *Nouveau zonage sismique de la France* », la Documentation française, Paris

DEVICTOR N., 1996, « *Utilisation des surfaces de réponse dans le calcul de la fiabilité des composants mécaniques* », R.F.M. Revue française de mécanique, ISSN 0373-6601, INIST-CNRS

DEZES P., SCHMID S and ZIEGLER P-A. – 2004, « *Evolution of the European Cenozoic Rift System; interaction of the Alpine and Tyrenean orogens with their foreland lithosphere* », *Tectonophysics*, 389p , pp. 1–33

DOEBL F. and OLBRECHT W. (1974), « *An isobath of the Tertiary Base in the Rhinegraben* », In: K. FUCHS and J.H. ILLIES (Editors), *Approaches to Taphogenesis*, Stuttgart, pp. 71-72.

DOMINIQUE P. – 1999, « *Evaluation probabiliste de l'aléa sismique : Etat de l'art* », Rap. », BRGM R39010, 73p, 14 fig.

DROUX J.-P., – 2013, « *L'habitat populaire construit à Mulhouse avant 1897* », (CCPM et Atelier de cartographie du CRESAT - fond de carte m2A,)

FABERT F. – 1488, (Chronique de F. Faber) publiée par W. WACKERNAGEL, in *Das Erdbeben von 1356*, in den Nachrichten der Zeit ... Bâle 1856

GHANEM A. – 2013, Mémoire Magister (Dir) DRIZI S. « *Analyse non linéaire des structures planes en béton armé en tenant compte du remplissage en maçonnerie* », 109p

GODEFROY P. et LEVRET A., – 1985, « *Nature et définition de l'aléa sismique* », in : Le Génie Parasismique, sous la direction de V. DAVIDIVICI, Presse de l'E.N.P.C., Paris

GOMEZ Ch., LAVIGNE F., PARIS R. et TABARLY S. – 2010, « *Séisme et tsunami à Sumatra, 2004 - 2010 : de la catastrophe environnementale et humaine de décembre 2004 à la reconstruction* », Géo-confluences, Ressources de géographie pour les enseignants

GNDDT. – 1993, Rischio sismico di edifici pubblici- parte i aspetti metodologici. consiglio nazionale delle ricerche. Tech. rep. Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.

GUEGUEN, Ph. et al, 2003, « Séismes dans la ville », Pour la science, no 310, p. 56-62.

GUTENBERG B. & RICHTER C. F. – 1944, « *Frequency of earthquakes in California* », *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34 :185–188

GUTENBERG B. & RICHTER C. F. – 1954, « *Seismicity of the Earth and associated phenomena* », Princeton University Press, New Jersey, 310p.

HAREMZA C. – 2011, « *Dimensionnement d'un bâtiment de 6 étages en béton armé avec murs de contreventements ductiles – Analyse dynamique simplifiée* », Article Université de Liège, 25p

HAIMBERGER R., HOPPE A. and SCHEFER A. – 2005, « *High-resolution seismic survey on the Rhine River in the norther Upper Rhine Graben* », *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch.)*, 94(4): 657-668

DRURY C. – 2000, « *Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States* », HAZUS®99, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY FEMA 366, , FEMA 500 C Street, SW Washington, DC 20472, 31p

HYENNE S.E., – 1876, « *Éphémérides des principales inondations du Doubs survenues à Besançon depuis le XIIIe siècle jusqu'à nos jours* », Paris 1876

ILLIESJ.H. – 1975b, « *Recent and paleo-intraplate tectonics in stable Europe and the Rhinegraben rift system* », *Tectonophysics*, 29, pp. 251-264.

JALIL W.; 2013, « *Bâtiments à murs – Méthode des forces latérales* », Support pédagogique – Ecole des Ponts-ParisTech, 18p

JOYNER W.B. et BOORE J.M. – 1981, « *Peak acceleration and velocity from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake* », *BSSA Vol. 71*, n° 6 pp. 2011 – 2038.

KARNIK V. et al, 1957, « *Le catalogue des tremblements de terre de la Tchécoslovaquie jusqu'en 1956* », *Travaux Institut Géophysique Académie Tchécoslovaquie Scientifique n° 69 (1957)*, 411p

KARNIK, V. 1996. « *Seismicity of Europe and the Mediterranean* », edited by Karel Klima, Academy of Sciences of the Czech Republic *Studia Geo s.s.r.o.* and Geophysical Institute Praha.

KOHLER C., 2000, « *Avenue Aristide Briand. SOMCO³¹ et Rue Franklin. Immeuble ancien réhabilité en 2012, parc privé* », Rapport photo

KRAMER S.L. – 1986, « *Geotechnical Earthquake Engineering, Civil Engineering and Engineering Mechanics* », Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

LAMBERT J. (sous la Dir.) – 1988 « *Evaluation de l'aléa sismique de la partie méridionale, Sismicité historique, Le tremblement de terre de la région de Bâle d'octobre 1356* », *Bilan des effets macrosismiques, Rapport n° 88 SGN 794 GEG*, 36p

LAMBERT J. (sous la Dir.) – 1988 « *Les tremblements de terre en France, hier, aujourd'hui, demain...* », Ed. BRGM, 196p.

LAMBERT J., WINTER T., DEWEZ T.J.B., SABOURAULT P. – 2005, « *New hypotheses on the maximum damage area of the 1356 Basel earthquake (Switzerland)* », *Quaternary Science Reviews*, 24, p. 383-401.

LANG K. et BACHMANN H. – 2004, « *On the Seismic Vulnerability of Existing Buildings: A*

³¹ SOMCO : Société Mulhousienne des Cités Ouvrières

Case Study of the City of Basel », Earthquake Spectra, Volume 20, No. 1, pages 43–66, February 2004, Earthquake Engineering Research Institute

LANGENBECK R. – 1892, «*Die Erdbebenercheinungen in der oberrheinischen Tiefebene und ihrer Umgebung* », Geographische Abhandlungen aus den Reichslanden Elsass-Lothringen, même référence 1895.

LEMAIRE M. – 1992, « *Evaluation des indices de fiabilité associés à des modèles de mécanique des structures* », Revue Française de Mécanique

LEONE F., – 1995, « *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* », Documents du BRGM n° 250. BRGM Ed. Orléans, 286p

LEONE F., ASTÈ J.-P., VELASQUEZ E. – 1995, « *Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain* », Bulletin Association Géographes Français 1995-4 : p.350-371

LESTUZZI P. et BADOUX M. – 2013, « *Evaluation parasismique des constructions existantes* », Bâtiments en maçonnerie et en béton armé, Ed Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Coll. Complément au traité de génie civil, 224p

LESTUZZI P. et BADOUX M., – 2008, « *Génie parasismique, conception et dimensionnement des bâtiments* », Ed Presses polytechniques et universitaires romande, 328p

LE TOULLEC R. – 2002, (Dir) SCHAEFFER Cl. " *Etude structurelle de l'impact des règles PS 92 et Euro code 8 sur des trames de bâtiments hospitaliers courants*", Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA Spécialité Génie Civil, 41p

LEVRET A. et COMBES P. – 1997, «*Autour d'un grand monument le Pont du Gard* », APD-CA, Sophia-Antipolis, 171pp.

LUTZ M. and CLEINTUAR M. – 1999, « *Geological results of a hydrocarbon exploitation campaign in the southern Upper Rhine Graben (Alsace Central, France)* », Bull.appl.Geol. 4(Suppl), pp3-80.

MADARIAGA R. et PERRIER G., – 1991, «*Les tremblements de terre* », *Presse du CNRS*, 210p.

MEBARKI A. – 2005-2006, « *Fiabilité des systèmes mécaniques* », Enseignement Mastère mécanique des structures et des matériaux, 59p

MADSEN H. O., KRENK S., LIND N. C. – 1986, « *Methods of Structural Safety*, Prentice - Hall.

MELCHERS R. E. – 1999, « *Structural reliability, analysis and prediction*, J. Wiley and Sons, Chichester ».

MEBARKI A. et al. « *Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risk and resilience at urban scale* ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 2012, 12 (5), pp.1799-1809.

MEGHRAOUI M. et al. – 2001, « *Active normal faulting in the Upper Rhine Graben and Paleoseismic Identification of the 1356 Basel Earthquake* », *Science*, vol. 293, p. 2070-2073.

MESCHINET de RICHEMONT N. – 2003, «*Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire des risques naturels* », *Edition du temps*, pp. 138-156.

MICHON L., van BALEN R-T., MERLE O and PAGNIER H. – 2003, « *The Cenozoic evolution of the Roer Valley rift system integrated at a European scale* », *Tectonophysics*, 367 , pp. 101–126

MOREAU A. – 1992, «*Recensement immeubles Monuments Historiques* », Ministère de la Culture (France) - Médiathèque de l'architecture et du patrimoine - diffusion RMN

MOULINIÉ C., NAUDIN-ADAM M. – 2005, «*Appréhender la densité* », Institut d'Aménagement d'Urbanisme de la Région d'Ile – de – France, article n° 382, 16p

MULLER E. – 1380, «*Jahrbuch des Ritters und Schultheissen von Zürich* », publié par Wackernagel, in : *Das Erdben von 1356...*, Bâle, 1856,

MUNSTER S. – 1544, « *Chronique illustrée de la destruction de la ville de Bâle* », Collection de la Suisse de Réassurance Zurich, Suisse
Münster, Sebastian: Cosmographie (p. 341), Bâle 1545.

MURPHY J.R. et O'BRIEN L.J. – 1977, « *The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters* », BSSA, Vol 67 n° 3, pp. 877 – 915.

NAKAMURA Y., – 1989, « *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface* », Quaterly Report of RTRI 30 [1] Japan.

NICHOLLS R. J., HOOZEMANS, F. M. J. et MARCHAND, M., 1999, « *Increasing Flood Risk and Wetland Losses Due to Global Sea-Level Rise: Regional and Global Analyses* », *Global Environmental Change*, p. S69-S87.

OSMANI E.; 2013, « *Evaluation et renforcement des bâtiments* », Support pédagogique – Ecole des Ponts-ParisTech, 59p

PAÏS J. – 2013, « *Béton armé – Chapitre 18 : Murs et voiles de contreventements* », Support pédagogique, Conservatoire National des Arts et Métiers, 74p

PAULAY T. et PARK R. – 1975, « *Reinforced Concrete Structures* », Departement of Civil Engineering, University of Canterbury Christchurch, New Zealand, A. WHLEY-INTERSCIENCE PUBLICATION JOHON WILEY et SON New 763p

PERREY A. – 1844, « *Mémoire sur les tremblements de terre ressentis, en France, en Belgique, en Suisse, en Hollande* », Le quatrième siècle de l'ère chrétienne jusqu'à nos jours, La faculté des sciences de Dijon, 110 p

PETERS – 2007, « *Active tectonics in the Upper Rhine Graben. Integration of Paleoseismology, geomorphology and geomechanical modelling* », (Base de données NEOPAL – Travaux des experts 2009), pp 2

PETIT E., – 1905, « *Histoire des Ducs de Bourgogne de la race capétienne. Règne de Philippe de Rouvre (1349-1361)* », in : Publication de la Société Bourguignonne de Géographie et d'Histoire, t IX, Dijon, 1905.

PRESS F. et SIEVER, 1974, « A Study Guide to Earth », Study Guide, Ed W. H. Freeman and Company (1974), 188p

PROPECK-ZIMMERMANN, – 2003, « *L'inscription des risques dans l'espace : difficultés d'appréhension et de représentation. L'exemple des risques industriels* », Edition du temps, p. 157-172.

REGHEZZA M. – 2006, (Dir) VEYRET Y., « *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale méditerranéennes* », Thèse doctorat de l'université PARIS X – NANTERRE, 377p.

REITER L. – 1990, « *Earthquake Hazard Analysis* », Issues and Insights. Columbia University Press, New York.

ROULLÉ A., BITRI A., MATHIEU F., RICHALET G., 2007, « *Micro zonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le BRGM* ». Rapport BRGM/RP-53712-FR.

RUBINSTEIN R. Y. – 1981, « Simulations and Monte-Carlo Method, Wiley Series in Probability and Mathematical » J. Wiley & Sons.

SADIGH K. et al. – 1997, « *Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based of Californian strong motion data* », Seism Res. Lett., 68 (1) : pp 180 - 189

SAUTRET B. – 1988, « Cadre néotectonique du fossé Rhénan méridional. Implication pour l'évaluation de l'aléa sismique », Rapport d'avancement BRGM, 88 SNG 883 GNG, 65p, pp64

SEED H.B et IDRIS I.M. – 1982, « *Ground motions and soil liquefaction during earthquake* », EERI, Monograph series

SIMLER L. et THÉOBALD N. – 1970, « *La Quaternaire du département du haut Rhin* », Sc. Géol., Bull. 25, 2-3, pp 127-135.

SIMLER L. et THÉOBALD N. – 1970, « Les alluvions plio-quatémaies du Fossé rhénan »,

(secteur plaine d'Alsace). In : ILLIES J.H. et MUELLER S. - Graben Problems, p. 75-78, Schweizerbart éd., Stuttgart.

SITTLER C. – 1965. « *Le Paléogène des fossés Rhénan et Rhodanien. Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques* », Mém. Serv. Carte géol. Alsace. Lorraine., pp24, 392 p.

SITTLER C. – 1969, « *Le Paléogène des fossés Rhénan et Rhodanien. Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques* », Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 24, 392p

SITTLER C. – 1974, « *Le Fossé Rhénan, in Géologie de la France* », Doi, Paris, pp78 – 104

STARR C. – 1969, « Social Benefit versus Technological Risk », *Science*, no 165, pp. 1232-1238.

STUCCHI M. – 1993, « *Review of Historical Seismicity in Europe* » Through catalogues and historical records: an introduction to the project, In: M. Stucchi (Editor), Materials of the CEE project "Review of Historical Seismicity in Europe", 1, Milano, pp. 3-14

STUMPF J. – 1548, « *Gemeiner loblicher Endgenoschafft Stetten, Landen und Volkeren Chronik* », Zürich, Publié par Wackernagel, in : Das Erdbeben von 1356, Bâle 1856

C. TANNIER, G. VUIDEL et P. FRANHAUSER, – 2007, « *Délimitation d'ensembles morphologiques par une approche multi-échelle – Application à la délimitation morphologique des agglomérations*», Laboratoire ThéMA UMR 6049, CNRS/Université de Franche-Comté

TERRIER M., VERMEERSCH F., REY J. (avec la collaboration d'A. ROULLE et G. BERTRAND) – 2008, « *Dossiers de presse sur l'aléa sismique pour 6 régions françaises*», Rapport BRGM/RP-56448- FR, 150 p, 93 fig.

THEOBALD N. et HUDELEY H., 1976, « *Carte géologique de la France à 1:50 000. 413, Mulhouse* », Document cartographique BRGM

THOURET J-C., et LAFORGE Ch. – 1994, « *Hazard appraisal and hazard-zone mapping of flooding and debris flowage in the Rio Combeima valley and Ibagué City* », Tolima department, Colombia. *Geojournal* 34 (4): p. 407-413.

THOURET J-C., et LAFORGE Ch. – 1996, « *Vulnérabilité aux risques naturels en milieu ur-*

bain : effets, facteurs et réponses sociales », *Cahier des sciences humaines* 32 (2) 96 : p. 407 – 422

USTASZEWSKI K., SCHUMACHER M.E., SSHMID S.M. – 2005, « Simultaneous normal faulting and extensional flexuring during rifting: an example from the southernmost Upper Rhine Graben », *International Journal of Earth Sciences*, 94, p. 680-696.

VEYRET Y. (Dir), et al. – 2003, « *Les risques* », Ouvrage dirigé par Y. Veyret, Coll. Sedes/VUEF, Paris, 253p

VEYRET Y. – 2004, « *Géographie des risques naturels en France – De l'aléa à la gestion* », Ed. Hatier, Paris, 252p

VEYRET Y. – 2006, « *Risques naturels et géographie : Vulnérabilité et assurance* », Colloque : Géographie et Assureurs face aux risques naturels – acteurs complémentaires de la connaissance et de la prévention, Guyancourt, 6 avril 2006, Communication.

VEYRET Y., LAGANIER R., – 2012, « *Atlas des risques en France : prévenir les catastrophes naturelles et technologiques* », Ouvrage dirigé par Y. Veyret, Coll. Atlas/Monde, 95p

VEYRET Y., REGHEZZA M., – 2005, « *Aléas et risques dans l'analyse géographique* », *Annales des mines* n° 40, p. 61-69.

VIDAL P., « L'habitat populaire construit à Mulhouse avant 1897 », coll. photo Archives de Mulhouse

VILLEMIN, T., and BERGERAT F. – 1987, « *L'évolution structurale du fossé Rhénan au cours du Cénozoïque : un bilan de la déformation et des effets thermiques de l'extension* », *Bull. Géologie. Fr.* 8, pp. 245–255

VILLEMIN T. et COLETTA B. – 1990, « Subsidence in the Rhine Graben : a compilation of borehole data », *Symposium on Rhine-Rhone Rifts system, ICL-WG3 Symp.*, p.31, Geol. Ins. Univ. Basel.

VOGT J. – 1979, « *Les tremblements de terre en France* », Mémoire du BRGM n° 96, Ed. BRGM, Orléans, 220p

VOGT J. – 1981, « *Les tremblements de terre en Alsace* », Revue d'Alsace "Tremblements de terre". In: Encyclopédie de l'Alsace, t. 12.

VOGT J. – 1985, « *Tremblements de terre à Strasbourg à la fin du XVIIIe et au début du XIXe siècle* », Annuaire de la Société des amis du Vieux-Strasbourg, t.15, p.27-32.

VOGT J. – 1987, « *Problèmes méthodologiques de la sismicité historique, base des discussions de risque sismique* », Erdbeben = tremblements de terre : exposés présentés lors du symposium de Brigue, 7-10 avril 1986.

VOGT J. – 1987, « *L'activité sismique en 1650 aux confins de la Suisse, de la France et de l'Allemagne* », Bulletin historique de la ville de Mulhouse, t.3, p.343-349.

VOGT J. – 1991, « *Une crise sismique rhénane mal connue : fin septembre / début octobre 1669* », Annuaire de la Société des amis du Vieux-Strasbourg, t.21, p.59-61.

VOGT J. – 1995, « *Une crise sismique rhénane oubliée par les catalogues : 1763* », (Alsace d'Outre-Forêt et Sud du Palatinat). L'Outre-Forêt, n°91, p.35-36.

WACKERNAGEL W., – 1856, «*Das Erdbeben von 1356 in den Nachrichten der Zeit ...*», in Basel im 14 Jahrhundert, Bâle 1856, (Loc. cité par E. Wechsler.

WENK Th., 2008, «*Confortement parasismique de constructions - Stratégie et recueil d'exemples en Suisse* », Publié par l'Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, pp81, 83p

WISNER B., O'KEEFE Ph et WESTGATE K.et al, – 1976, «*Taking the Naturalness out of Natural Disasters* », *Nature*, pp 566-567.

WHITE G.F. – 1945, « *Human adjustment to floods* », Department of Geography research paper n°. 29. Chicago: University of Chicago.

WHITE G.F. – 1974, « *Natural hazards: local, national, global* Oxford », Oxford University

WITTMANN O. et al., 1969, « *GEOLOGISHER ATLAS DERSCHWEIZ* », Blatt 1047 Basel

YEPEZ F. et al. – 1996 « *Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones* », Earthquake Spectra 12, pp. 109 - 116.

YENIER E., ERDOGAN Ö and AKKAR S., – 2008, « *Empirical relationships for magnitude and source to site distance conversions using recently compiled Turkish strong-ground motion database* », The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China

ZACEK M. – 2010, « *Conception parasismique des bâtiments* », Fiche technique Mutuelle des Architectes Français assurances

ZIEGLER P.A. – 1992, « *European cenozoic rift system* », Tectonophysics, Vol. 208, pp. 91-111.

THESES

BEAUVAL C. – 2003, « *Analyse des incertitudes dans une estimation probabiliste de l'aléa sismique, Exemple de la France* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I – Spécialité Terre solide, 143p

BECK E., – 2006, « *Approche multirisques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)* », Thèse, université Louis Pasteur Strasbourg I.

BONETT DIAZ R., – 2003, « *Vulnerabilidad y riesgo sismico de edificio Aplicacion a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada* », Thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Barcelona.

BOUIFLANE M., 2008, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers Spécialité : géophysique 193p.

Khoa Van NGUYEN, 2005, « *Etude des effets de site dus aux conditions topographiques et géotechniques par une méthode hybride éléments finis/éléments frontières* », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, spécialité : Géotechnique, 211p, pp136 – 146

LEON F. – 1995, « *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* », université Joseph Fourier et BRGM, Grenoble, 286p.

PELTIER A., – 2005, « *La Gestion des Risques Naturels dans les Montagnes d'Europe Occidentales* », 564p.

TORTEROTO J-Ph., 1993, « *Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes* », 263p

VALENCIA DAVID N. – 2006, « *Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis à vis des séismes et inondations* », pp121-131, 177p

RAPPORTS

AURM (Agence d'Urbanisme de la Région Mulhousienne) – 2013, « *Fréquentation centre ville de Mulhouse* », Rapport annuel 2012, 62p

BALANDIER P., Juillet 2001, « *Eléments de conception parasismique à l'usage des techniciens du bâtiment*», Cours de conception parasismique – Volume 2, 57p, pp10-14

BALANDIER P., juillet 2001, «*Le séisme et les constructions en béton armé et en maçonnerie* », Document d'information à l'usage du constructeur, Vol n° 3, 31p

BALANDIER P., juillet 2001, " *Pourquoi il ne suffit pas qu'un bâtiment soit «costaud» pour résister aux séismes*", Document d'information à l'usage du constructeur, Vol n° 2, 19p

P. BALANDIER, 2001, «*Pourquoi avec la même quantité de matériaux on aura un bâtiment qui résiste ou non au séisme.* », Document d'information à l'usage du constructeur, 31p.

BELLIER O., BAIZE S., DUROUCHOUX Ch.et SÉBRIER M. – 2009, Compte rendu de mission du comité de pilotage NéoPal dans le fossé rhénan supérieur - 18 et 19 juin 2009 Base de données NEOPAL – Travaux des experts 2009

BELLIOT M., CUIILLIER F. et STARKMAN N. – 2006, « *Habitat, formes urbaines – Densités comparées et tendances d'évolution en France* », Rapport d'étude Fédération Nationale des agences d'urbanismes, 276 p

BERTIL D., LEMOINE A., REY J., AUCLAIR S., DOMINIQUE P., avec WINTER Th. – 2008, « *Evaluation probabiliste de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie* », Rapport final BRGM/RP-54935-FR, 85 p

Blès et al, – 1998, « *Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées* », document BRGM n°279.

BIRTLER C. – 2006, « *Région Alsace. Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan – Programme 2003-2006* », Rapport final BRGM/RP-54876-FR.

BRUN J-P., WENZEL F. et Ecors-Dekorp team – 1991, « *Crustal scale structure of the southern Rhine Graben from ECORS DEKORP seismic reflection data* », *Geology*, 19, p. 758-762

COLLECTIF, 1976, « *Essai de nomenclature des carrières françaises de roches de construction et de décoration* » Le Mausolée

GRÜNTAL G. et al, 2001, « *L'Echelle Macrosismique Européenne* », Conseil de l'Europe – Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie Vol 19, 103p

LAGIER F., janvier 2006, « les murs de maçonnerie », *Eléments de cours*, pp 11 – 15

MARÇOT N et ARNAL C., 2004, « *Méthodologie de réalisation d'un scénario de séisme sur la ville de Mulhouse (68)* », Rapport BRGM-RP52760

MARTIN C. et al, – 2002, « *Révision du zonage sismique de la France, Approche probabiliste* », Rapport BRGM GEO-TER n° GTR/MATE/07/01-150.

MENILLET F. – 1995, « *Les formations superficielles des Vosges et de l'Alsace. Identification, potentialités, contraintes* », Rapport final BRGM R 38640.

MOUROUX P. et HERRERO A. – 1990, « *Contribution à l'étude des dangers d'installations industrielles à haut risque du fossé Rhénan méridional évaluation déterministe de l'aléa sismique* », Rapport BRGM – Département environnement et risques, Vol n° 7, 69p.

MOUROUX P., et THIERRY P. – 2003, « *Micro zonage sismique du bassin de Mulhouse* »,

Rapport BRGM RP52754FR

Rapport du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (M.E.D.D.T.L) – 2003, « *La nouvelle RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE applicable aux bâtiments* », 8p

SIMONET F. et MARÇOT N., 2004 – Commune de Mulhouse (68) « *Vulnérabilité du bâti* », Rapport BRGM-RP52761

PERIODIQUES ET CONFERENCES

ABRAHAMSON N.A. – 2000, « *State of the practice of seismic hazard evaluation* », *Geo. Eng 2000 conference, Australia, 19-24 November 2000.*

Chronique – 1891, « *Die Chroniken der Stadt KONSTANZ* », Publié par RUPPERT Ph., Konstanz, 1891

Chronique. – 1600, « *Bertlin'sche Chronik* », Référence citée d'après les travaux suisses.

MOUROUX P. et al, - 2004, " *THE EUROPEAN RISK-UE PROJECT : AN ADVANCED APPROACH TO EARTHQUAKE RISK SCENARIOS* ", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 3329

NORMES

Association française de normalisation (AFNOR), Ministère de l'Industrie, Règlements Parasismique, Euro code 8 transformé en normes Françaises

Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin – 2015, Institution fondée en 1968 par le Canton du Valais et de la Municipalité de Sion, Règlements Parasismique, Normes SIA 260 à 267 – 2003

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Article D. 563-8-1 du code de l'environnement, Plan séisme, prévention du risque sismique

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Décret n°2010-1254 du 22 octobre

2010 et modifié par le décret n°2015-5 du 6 janvier 2015, Plan séisme, prévention du risque sismique, programme national de prévention du risque sismique

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 et modifié par le décret n°2015-5 du 6 janvier 2015, Plan séisme, prévention du risque sismique, programme national de prévention du risque sismique

Règlement Eurocodes EC6.1 - NF EN 1996.1.1/NA, déc. 2009

Règlement Eurocode 8.1 – Norme EN-1998-1, 2005, " *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes* ", Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments

Règlement Eurocode 8.3 – Norme EN-1998-1, 2005, " *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes* ", Partie 3 : Evaluation et renforcement des bâtiments

Norme SIA 260 à 267 – 2003, " *Structures porteuses* ", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2003

Cahier technique SIA 2018, 2004 " Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants", Documentation SIA D 0211

SUPPORTS ELECTRONIQUES

Association du Génie Parasismique AFPS www.afps-seisme.org/

Archive Nationale, " *L'historique des règles parasismiques* ", Article n° 5.2.1.2 – Prévention du risque sismique archive <http://www.assemblee-nationale.fr>

Archive Nationale, " *L'historique des règles parasismiques* ", Article n° 5.2.1.3 – Les règles D.T.U. PS69 et addenda 1982 archive <http://www.assemblee-nationale.fr>

Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
www.brgm.fr/

E.O.S.T Strasbourg, Document pédagogique, <http://eost.u-strasbourg.fr/pedago/Accueil.html>

GAZETAS G., 1991, « Foundation vibrations » in Foundation Engineering Handbook, chapitre 15, 2nd édition, pp 553-593 : Consulté le 23 octobre 2014
<https://fr.scribd.com/doc/67173350/Gazetas-1991-Foundation-Vibrations-Chap-15-of-Fang>

GEO PORTAIL – Carte IGN consulté 2011, <http://www.geoportail.gouv.fr>

GEOPORTAL – consulté 2011, Geoviewer Canton de Basel,
<http://www.stadtplan.bs.ch/geoviewer/>

GEORISK – 1999, " Risk Management Terminology ",
<http://www.georisk.com/terminol/termrisk.shtml>.

[Institut des Risques Majeurs de Grenoble (IRMa)]

http://www.irma-grenoble.com/PDF/mallettes/sismique/DOC_fiche01.pdf

Institut Nationale de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), RP - 2011,
www.insee.fr/

JURASZEK N. et al. – 2011, Présentation AFPS " *Risque sismique – les bonnes pratiques* " pour l'AQC

http://www.reunion.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/AFPS_Bonnes_pratiques_cle6f6141.pdf

Ministère des Travaux Publics, des Transports et des Communications (MTPTC - Haïti), 2012, " *Guide de renforcement parasismique et para cyclonique des bâtiments* ", 68p,
<http://mtptc.gouv.ht/media/upload/doc/publications/GUIDE-RENFORCEMENT.pdf>

Office fédéral de la statistique (OFS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

 <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index.html>

Prim.net : Portail de la prévention des Risques Majeurs www.prim.net/

PLAN SEISME " *Un programme national de prévention du risque sismique*"

<http://www.planseisme.fr/Le-risque-sismique-definition-et-exemples.html>

REITEL B.et TANNIER C., – 2003, "*Morphologie des villes émergentes en Europe à travers les analyses fractales*",

<http://thema.univ-fcomte.fr/IMG/pdf/II-3.2-Bale-reduit.pdf>

Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) – 2012 (consulté),

<http://renass.unistra.fr/informations/reseau-national-de-surveillance-sismique>

SERVICE SISMOLOGIE DE SUISSE, – 2009 – SED : Catalogue des tremblements de terre

http://hitseddb.ethz.ch:8080/ecos09/query_sum

TOUZELLIER F., (Dir) SCHAEFFER C., juin 2010, Projet de Fin d'Études – Génie parasismique, "*Etude structurelle de l'impact des règles PS 92 et Euro code 8 sur des trames de bâtiments hospitaliers courants*", INSA Strasbourg, http://eprints2.insa-strasbourg.fr/599/1/TOUZELLIER_PFE_Rapport.pdf

SisFrance, mise à jour 2012, <http://www.sisfrance.net/>

YAMKOUDOU GOU H., 2010, Tuteur G. KOVAL, Projet de Fin d'Études – Génie parasismique, "*L'Euro code 8 appliquée à un établissement d'enseignement à Strasbourg (Comparaison des grands principes avec le PS92)*", INSA Strasbourg, http://eprints2.insa-strasbourg.fr/848/1/RapportPFE_YAMKOUDOU GOU.pdf.

CORSINI Michel, 2008. « *Evaluation et gestion des risques naturels* », cours en ligne

<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/risques-naturels/html/1/11/111.html>

LISTE DES FIGURES

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|---------------|--|
| 1 | Les composantes d'un séisme |
| 2 | Définition du risque. Le risque est fonction de la combinaison de l'aléa sismique et des éléments vulnérables |
| 3 | Les catastrophes en chaîne |
| 4 | Exemple de matrice de probabilité pour une structure en béton armé |
| 5 | Indices de vulnérabilité proposés par Benedetti et Petrini |
| 6 | Exemple de la courbe de vulnérabilité (schéma cas de l'Espagne– Barcelone) |
| 7 | Exemple de la courbe de capacité (schéma RISK-UE, 2003) |
| 8 | Exemple de la courbe de fragilité (schéma RISK-UE, 2003) |
| 9 | Ancien et nouveau zonage sismique de la France |
| 10 | Exemple de rupture ductile – Exemple de rupture fragile |
| 11 | Carte des zones d'aléa sismique selon la norme SIA 261 |
| 12 | Zonage – Accélérations réglementaires bâti neuf – existant |
| 14 | Spectres élastique préconisés par l'Eurocode et la norme Suisse |
| 15 | Le tremblement de terre de Bâle en 1356 illustré par le peintre Suisse Karl Jauslin. (Collection Privée) |
| 16 | Sept siècles d'évènements sismiques majeurs |
| 17 | Cartographie isoséiste de l'évènement du 18 octobre 1356 |
| 18 | Localisation et répertoire des châteaux endommagés |
| 19 | Cartographie isoséiste du séisme de Bâle du 18 octobre 1356 |
| 20 | Schéma structural du fossé Rhénan montrant le système de failles bordières qui limite le fossé et les failles intra graben |
| 21 | Coupe transversale du champ de fracture du fossé Rhénan |
| 22 | Composition géologique du fossé rhénan et de ses bordures |
| 23 | Géologie de surface – extension des alluvions dans la plaine d'Alsace |
| 24 | Carte géologique de la ville de Mulhouse. |
| 25 | Carte géologique des formations quaternaires de la région de Bâle |
| 26 | Carte géologique de la ville de Bâle |
| 27 | Distribution des séismes enregistrés dans le fossé Rhénan entre 858 et 2007, selon la magnitude (ML) de Richter |
| 28 | Sismicité instrumentale sur la période de janvier 1980 à septembre 2000 |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|---------------|---|
| 29 | Sept siècles d'évènements sismiques |
| 30 | Localisation des failles tertiaires, failles de la région de Mulhouse |
| 31 | Micro zonage sismique de Mulhouse et sa région |
| 32 | Accélérations de sol et zones d'amplifications sismiques selon le premier scénario sismique – Mulhouse |
| 33 | Valeurs des fréquences fondamentales du sol de Mulhouse et de ses alentours estimées par la méthode de Nakamura |
| 34 | Accélérations de sol et zones d'amplifications sismiques – Bâle |
| 35 | Valeurs des fréquences fondamentales de Bâle et ses alentours |
| 36 | Répartition des bâtiments de Mulhouse par quartiers historiques |
| 37 | L'habitat populaire construit à Mulhouse avant 1897 |
| 38 | L'habitat populaire construit à Mulhouse de 1897 à 1977 |
| 39 | L'habitat populaire construit à Mulhouse depuis 1977 à 2012 |
| 40 | Découpage du territoire de Mulhouse par secteur historico-géographiques selon l'évolution de l'âge du bâti |
| 41 | Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1882 |
| 42 | Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1957 |
| 43 | Le tissu bâti de l'agglomération de Bâle en 1994 |
| 44 | Découpage du territoire de Bâle par secteur historico-géographiques selon l'évolution de l'âge du bâti |
| 45 | Densité de population ramenée à la surface bâtie à Mulhouse |
| 46 | Découpage par secteur du territoire de Mulhouse et données de population |
| 47 | Découpage par secteur du territoire de Bâle et données de population |
| 48 | Densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif mulhousien |
| 49 | Densité de population concentrée de nuit dans l'habitat collectif bâlois |
| 50 | MULHOUSE : Localisation et dimensions des zones dont le bâti va être examiné sur le terrain |
| 51 | BÂLE : Localisation et dimensions des zones dont le bâti va être examiné sur le terrain |
| 52 | Localisation du bâti de l'îlot n° 44 – Centre historique – ville de Mulhouse |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|---------------|--|
| 53 | Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique selon les critères de l'âge, des matériaux et de la hauteur des constructions du territoire mulhousien |
| 54 | Répartition du bâti dominant par secteur historico-géographique selon les critères de l'âge, des matériaux et de la hauteur des constructions du territoire bâlois |
| 55 | MULHOUSE – Secteur historico-géographique situé au Sud-ouest – Localisation de la zone dont le bâti va être examiné en détail |
| 56 | Phénomènes de ruine des bâtiments |
| 57 | Equations de calcul de la période fondamentale des bâtiments de Mulhouse et Bâle |
| 58 | Résistance caractéristiques à la compression des matériaux |
| 59 | Différentes approches préconisées par l'Eurocode 8 – norme NF EN 1998-1 |
| 60 | Modèle réel – Modèle mécanique des Bâtiments Élémentaires Représentatifs |
| 61 | Equation du principe fondamental de la dynamique. des structures |
| 62 | Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les maçonneries armées |
| 63 | Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les maçonneries chaînées |
| 64 | Dispositions constructives de renforcement parasismique dans les constructions en béton armé |
| 65 | Equation simplifiée du calcul de l'effort tranchant à la base des bâtiments |
| 66 | Equation simplifiée du calcul de la répartition des forces sismiques sur la hauteur des bâtiments |
| 67 | Equation de calcul de l'inertie intégrant la déformées de flexion et la déformée de tranchant |
| 68 | Equation simplifiée de calcul de la torsion dans les bâtiments |
| 69 | Equation simplifiée de calcul de la distribution des forces sismiques sur les murs porteurs |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|---------------|--|
| 70 | Equation simplifiée de calcul de la distribution des charges gravitaires sur les murs porteurs |
| 71 | Equation simplifiée de la vérification de la résistance des bâtiments |
| 72 | Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie soumis aux efforts de compression/traction |
| 73 | Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie soumis aux efforts de cisaillement |
| 74 | Equation de la vérification de la résistance des murs en maçonnerie chaînée soumis aux efforts de cisaillement |
| 75 | Equation de calcul de la résistance des murs en béton armé soumis aux efforts de compression/traction |
| 76 | Méthode de calcul de la déformée des bâtiments et des murs en béton armé |
| 77 | Equation de la vérification de la résistance des murs en béton armé soumis aux efforts de cisaillement |
| 78 | Résistance sismique du bâti soumis aux efforts de cisaillements selon l'étude mécanique déterministe |
| 79 | Résistance sismique du bâti soumis aux efforts de traction/compression selon l'étude mécanique déterministe |
| 80 | Résistance sismique du bâti soumis aux efforts de flexion selon l'étude mécanique déterministe |
| 81 | Démarche pour élargir l'information du bâti de Mulhouse et de Bâle collectée sur le terrain |
| 82 | Résistance sismique au cisaillement des bâtiments selon l'étude mécanique statistique déterministe |
| 83 | Expression théorique de la probabilité de défaillance du bâti |
| 84 | Expression développée de la probabilité de défaillance du bâti |
| 85 | Organigramme de simulation de Monte Carlo |
| 86 | Les trois techniques de calcul des probabilités de défaillance des bâtiments |
| 87 | Fonction d'état limite de défaillance des bâtiments |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|---------------|---|
| 88 | Technique de calcul des probabilités de défaillance des bâtiments par séparation des variables aléatoires |
| 89 | Illustration des simulations conditionnées se concentrant autour du point P* |
| 90 | Vérification de la convergence des probabilités de défaillance de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle |
| 91 | Résistance sismique du bâti, combinaison de la catégorie de bâtiment et des classes de sol et probabilités de défaillance spécifique au cas de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle |
| 92 | Procédure de normalisation des résultats quantitatifs |
| 93 | De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique : Cas de la population des secteurs historico-géographiques de Mulhouse |
| 94 | De la mise en application du modèle d'évaluation à la cartographie du risque sismique : Cas de la vulnérabilité du bâti des secteurs historico-géographiques de Mulhouse |
| 95 | Carte de référence des classes de sols du Haut-Rhin selon la réglementation Européenne |
| 96 | Carte des classes de sols, des accélérations de sol et des zones d'amplifications sismiques de Mulhouse selon la réglementation parasismique (Eurocode 8) |
| 97 | Carte des classes de sols, des accélérations de sol et des zones d'amplifications sismiques de Mulhouse selon la réglementation parasismique (Euro code 8) |
| 98 | Cartographie des niveaux d'aléa et des accélérations de sol du territoire Mulhousien défini selon la réglementation Européenne |
| 99 | Cartographie des niveaux d'aléa et des accélérations de sol du territoire bâlois défini selon la réglementation Eurocode 8.1 |
| 100 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle du territoire Mulhousien |
| 101 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle du territoire Bâlois |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|-----------------------|--|
| 102 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle du territoire Mulhousien |
| 103 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle du territoire Bâlois |
| 104 | Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle du territoire Mulhousien |
| 105 | Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle du territoire Bâlois |
| 106 | Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle du territoire Mulhousien |
| 107 | Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle du territoire Bâlois |
| 108 | Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle du territoire Mulhousien |
| 109 | Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle du territoire Bâlois |
| 110 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousien |
| 111 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité de la population à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |
| 112 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousien |
| 113 | Cartographie des niveaux de vulnérabilité du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |
| 114 | Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousien |
| 115 | Cartographie des niveaux de risque de perte en vie humaine à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |
| 116 | Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousien |

LISTE DES FIGURES (Suite)

| FIGURES N° | TITRE DES FIGURES |
|-----------------------|---|
| 117 | Cartographie des niveaux de risque d'effondrement du bâti à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |
| 118 | Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousiens |
| 119 | Cartographie des cas d'intervention de réduction du risque sismique à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |
| 120 | Cartographie des cas d'intervention pour une étude approfondie des phénomènes de résonance à l'échelle des secteurs historico-géographiques Mulhousiens |
| 121 | Cartographie des cas d'intervention pour une étude approfondie des phénomènes de résonance à l'échelle des secteurs historico-géographiques Bâlois |

LISTE DES TABLEAUX

| TABLEAUX N° | TITRE DES TABLEAUX |
|----------------|--|
| 1 | Echelle Macrosismique Européenne (EMS98) |
| 2 | Correspondance approximative entre l'intensité maximale et la magnitude pour les séismes superficiels |
| 3 | Différents " Outils " intégrés dans les modèles d'évaluation de la vulnérabilité du bâti |
| 4 | Ensemble des normes parasismiques composant le règlement de l'Eurocode8 |
| 5 | Correspondance de la classification des sols entre l'Euro code et le règlement parasismique PS92 |
| 6 | Comparaison des accélérations de sol entre règlement parasismique PS92 et l'Eurocode |
| 7 | Combinaisons accélération de sol et classes des bâtiments |
| 8 | Comparaison des deux règlements parasismiques |
| 9 | Évolution des paramètres utilisés dans les normes SIA pour déterminer l'action sismique |
| 10 | Normes parasismiques « Structures porteuses – SIA 260 à 267 » en remplacement des normes parasismiques SIA 160 à 167 de 1989 |
| 11 | Résultats des études des coûts de confortements parasismiques des bâtiments Suisse |
| 12 | Conditions d'application de l'Eurocode et du règlement parasismique Suisse |
| 13 | Paramètres principaux (accélération de sol, catégories des bâtiments et des classes de sols) pour le calcul de la résistance sismique des bâtiments par la méthode des forces latérales dans l'Eurocode et le règlement Suisse |
| 14 | Paramètres à retenir selon les préconisations de l'Eurocode et du règlement Suisse pour le calcul de la résistance sismique des bâtiments par la méthode des forces latérales |
| 15 | Épaisseurs des alluvions de Mulhouse et ses alentours |
| 16 | Evènements sismiques majeurs retenus pour l'étude |
| 17 | Valeurs des accélérations de sol minimum et maximum de Mulhouse et de Bâle et ses alentours |
| 18 | Différents types de constructions de l'agglomération de Mulhouse et Bâle |

LISTE DES TABLEAUX (Suite)

| TABLEAUX N° | TITRE DES TABLEAUX |
|----------------|--|
| 19 | Répartition de la population de jour et de nuit à Mulhouse |
| 20 | Comparaison de la densité de population entre les résultats de l'étude d'Elise Beck et les résultats de d'étude réalisée dans le cadre de ce travail |
| 21 | Mulhouse : Nombre d'habitants dans les quartiers du centre ville |
| 22 | Fiche type de collecte des caractéristiques du bâti |
| 23 | Fiche descriptive des caractéristiques du bâti |
| 24 | Fiche d'identification du bâti d'habitat collectif de Mulhouse |
| 25 | Fiche de collecte d'informations sur le terrain des caractéristiques du bâti situé dans l'îlot n° 44 – Centre historique – Mulhouse |
| 26 | Photographies du bâti d'habitat collectif de Mulhouse et Bâle |
| 27 | Combinaison des critères de l'Eurocode 8 définissant les différents types de bâtiments existants dans le territoire de Mulhouse et de Bâle |
| 28 | Extrait de l'analyse détaillée de la composition du bâti dominant à l'intérieur du secteur historico-géographique situé au Sud-ouest de Mulhouse |
| 29 | Relation entre Identification les facteurs de vulnérabilité, les critères physiques du bâti et les caractéristiques physiques du bâti |
| 30 | Différents types de bâtiments contenus dans le territoire de Mulhouse et de Bâle |
| 31 | Caractéristiques des Bâtiments Elémentaires Représentatifs de Mulhouse et Bâle |
| 32 | Caractéristiques mécaniques des Bâtiments Elémentaires Représentatifs de Mulhouse et Bâle |
| 33 | Combinaison de l'ensemble des incertitudes |
| 34 | Renvois de l'Euro code 8.3 (bâti existants) à l'Euro code 8.1 (bâti neuf) |
| 35 | Ratios d'armatures dans les bâtiments en béton armé |
| 36 | Niveaux de connaissance et données d'entrée |
| 37 | Méthodes et réglementation relative à la vérification de la résistance sismique du bâti |
| 38 | Probabilités de défaillance de l'habitat collectif de Mulhouse et de Bâle |

GLOSSAIRE

- Aléa** : Evènement possible qui peut être un processus naturel, technologique, social, économique et sa probabilité de réalisation. Si plusieurs évènements sont possibles, on parle d'ensemble d'aléas.
Y. Veyret (Dir), al. - 2003, « *Les risques* », p. 16
- Appréhender** : Le verbe appréhender signifie pour nous : représenter – modéliser, identifier, évaluer, maîtriser, gérer (gestion tactique) et manager (gestion stratégique).
- Catastrophe (du grec katastrophê, renversement)** : La catastrophe se définit en fonction de l'ampleur des dégâts aux personnes et aux biens. Il n'y a pas forcément de corrélation entre l'importance d'un aléa et l'importance des dommages.
Y. Veyret (Dir), et al. - 2003, « *Les risques* », p. 16
- Crise** : Réalisation concrète, matérielle de l'aléa dont l'ampleur excède les capacités de gestion spontanée de la société qui subit cet évènement (d'après la revue *Métropolis* n° 78/79, 1987)
Y. Veyret (Dir), et al. - 2003, « *Les risques* », p. 16
- Dangers naturels** : Ensemble de ce qui constitue une menace d'origine naturelle pour un système étudié.
- Effet** : Réaction d'une composante d'un système, par exemple, Environnementale ou sociale, causée par une action.
- Épicentre** : L'épicentre est le point de la surface terrestre situé ± la verticale du foyer d'un séisme
- Enfoncement progressif** : Enfoncement progressif, régulier ou saccadé, pendant une assez longue période, du fond d'un bassin sédimentaire, marin ou non
- Enjeux** : Eléments ou système qui sont sous la menace d'aléas de nature varié. Les enjeux sont des personnes, des biens, des équipements, l'environnement. Menacés par l'aléa, ces différents éléments sont susceptibles de subir des dommages et des préjudices.
Y. Veyret (Dir), F. BROST et al. - 2003, « *Les risques* », p. 16
- Eocène** : Groupe de terrains tertiaires, période de l'ère tertiaire du système paléogène
- Eocène-oligocène** : relatif à la période allant de l'éocène à l'oligocène, durant l'ère tertiaire

GLOSSAIRE (Suite)

| | |
|-------------|--|
| Estimation | : Analyse globale d'une catastrophe réelle ou potentielle permettant de fournir une approximation des dommages effectifs ou attendus. |
| Évaluation | : Détermination de l'importance des effets. L'exercice comporte une appréciation des valeurs touchées, du risque potentiel de l'effet et de son degré d'acceptabilité. |
| Evènement | : Ensemble de sinistres ayant une origine aléatoire commune. Dans le cadre du risque sismique, il s'agit d'un tremblement de terre. |
| Graben | : Structure géologique limitée des deux côtés par des failles découpant des compartiments de plus en plus abaissés en allant vers l'axe de la structure. Un graben peut se traduire dans la morphologie par un fossé, ou être comblé par des sédiments et des roches volcaniques. |
| Horst | En géologie, géomorphologie et géographie physique, un horst désigne un compartiment soulevé. Ce soulèvement résulte de la combinaison de failles normales conjuguées. |
| Impact | : Effet produit par une action ou l'influence qui en résulte. |
| Incertitude | : |
| Listrique | : Surface en forme de pelle (géologie) |
| Mitigation | : La mitigation des risques sismiques est l'action qui conduit à réduire la vulnérabilité des enjeux pour faire en sorte que le coût humain et matériel des dommages liés à la survenue de phénomènes telluriques soit supportable par notre société. |
| Modèle | : Représentation d'un phénomène, d'un objet, qui tient compte de ses caractéristiques connues pour tester des hypothèses sur son comportement lorsqu'il est soumis à des variations physico-chimiques (pression, température, injection de fluide, etc.). Les modèles réduits, ou physiques, sont réalisés avec des matériaux réels alors que les modèles numériques font appel à la résolution d'équations complexes par calculs informatiques. |

GLOSSAIRE (Suite)

- Néogène** : Désigne un minéral formé dans une roche déjà constituée, partie la plus récente de l'ère tertiaire, composée du miocène et du pliocène.
- Oligocène-miocène** : Relatif à un âge du milieu du tertiaire, il y a environ 25 millions d'années
- Rift** : Un rift est une région où la croûte terrestre constituant une plaque tectonique s'amincit en formant en surface un fossé d'effondrement (un graben)
- Risque** : Perception d'un danger possible, plus ou moins prévisible par un groupe social ou un individu qui y est exposé.
Y. Veyret (Dir), F. BROST et al.
- 2003, « *Les risques* », p. 16
Un joueur perçoit comme risque sa décision de jouer en connaissant les événements qui peuvent se produire, ainsi que leur probabilité.
- Subduction** : Lorsque deux plaques convergent, l'une s'enfonce sous l'autre, dans le manteau : c'est la subduction. Ce phénomène engendre séismes, volcanismes, et formation de chaînes de montagnes.
- Subsidence** : Mouvement d'enfoncement lent du fond d'un bassin marin ou lacustre permettant l'accumulation de kilomètres d'épaisseur de sédiments, même si ceux-ci se forment à faible profondeur.
- Systémique** : Une approche désigne tout ensemble de relations entre constituants formant un tout". Traiter un "ensemble" en tant que système consiste, en première analyse, à poser que la connaissance de cet ensemble est subordonnée à la connaissance des parties qui constituent le tout, des interactions entre les parties, des interactions avec l'environnement, des objectifs de l'observateur.
- Varisque** : Désigne l'axe sud sud-ouest vers nord nord-est des plis hercyniens en Europe en géologie
- Vulnérabilité** : Niveau de conséquences prévisibles d'un aléa sur les enjeux. La vulnérabilité mesure « les conséquences dommageables de l'évènement sur les enjeux concernés » (Dictionnaire de l'environnement, 1991). La vulnérabilité peut être humaine, socio-économique et environnementale.
Y. Veyret (Dir), F. BROST et al.
- 2003, « *Les risques* », p. 16

ACRONYMES

| | |
|-------------|--|
| AFNOR | : Association Française de Normalisation. |
| AURM | : Agence d'Urbanisme de la Région Mulhousienne |
| BRGM | : Bureau des Recherches Géologiques et Minières |
| BSS | : Banque de données du sous sol gérée par le BRGM |
| CCPM | : Conseil Consultatif du Patrimoine Mulhousien |
| CERTU | : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques |
| CORDIS | : Community Research and Development Information Service |
| DETEC | : Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et des communications |
| DPPR | : Direction de la Prévention de Pollutions et des Risques |
| DREAL | : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement |
| EDF | : Electricité de France |
| E.O.S.T | : École et observatoire des sciences de la Terre |
| EPM | : Entrepôt Pétrolier de Mulhouse |
| FNAU | : Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme |
| IRIS | : Ilots regroupés pour l'information statistique – Unité de découpage pour le recensement de toutes les communes urbaines de plus de 10 000 habitants et la plupart des communes de 5 000 à 10 000 habitants |
| IRSN | : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire |
| JORF | : Journal officiel République Française |
| MEDD | : Ministère de l'Écologie, du Développement Durables |
| M.E.D.D.T.L | : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. |
| METLTM | : Ministère de l'Équipement du Transport, du Logement, du Tourisme et de la Mer |
| M.S. M.T. | : Site du Musée de Sismologie et Magnétisme Terrestre de Strasbourg |
| OFEG | : Office fédéral de l'environnement |
| OPAM | : Ordonnance sur la Protection contre les Accidents Majeurs |

ACRONYMES (Suite)

| | | |
|----------|---|---|
| PAC | : | Plan d'aménagement Communaux |
| PLU | : | Plan Local d'urbanisme |
| PME | : | Petites et Moyennes Entreprises |
| PPR | : | Plan de Prévention des Risques |
| Prim.net | : | Site qui traite de la prévention des risques majeurs en France. Créé par le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement |
| RéNaSS | : | Réseau National de surveillance sismique |
| SAFE : | : | Slow Active Fault in Europe (2001 – 2004), 5 ^e PCRD ; Coordinateur scientifique : M. Sébrier, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI |
| SED | : | Service Sismologique Suisse |
| TYM | : | Transport Yvan Muller |

ANNEXES

Annexe – Chapitre 1

Annexe – Chapitre 2

Annexe – Chapitre 4

Annexe – Chapitre 5

Annexe – Chapitre 6