

MINISTÈRE DE LA CULTURE, DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONSEIL DE L'EUROPE

Cahiers
du Centre Européen
de Géodynamique
et de Séismologie

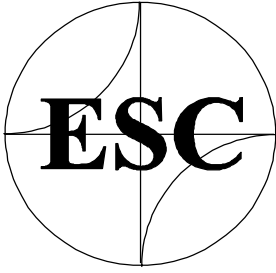
Volume 19



L'Echelle Macrosismique Européenne 1998 European Macroseismic Scale 1998

sous la direction de
G. GRÜNTAL
édition française
A. LEVRET

Luxembourg 2001



European Seismological Commission

Subcommission on Engineering Seismology

Working Group Macroseismic Scales

L'Echelle Macrosismique Européenne

European Macroseismic Scale 1998

(EMS-98)

sous la direction de

G. Grünthal

Coordinateur de la groupe de travail CES "Echelles macrosismique",

GeoForschungsZentrum Potsdam, Allemagne

édition française

A. Levret

l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France

Editeurs associés:

R. M. W. Musson, British Geological Survey, Edimbourg, Grande Bretagne

J. Schwarz, Bauhaus Universität Weimar, Allemagne

M. Stucchi, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milan, Italie

LUXEMBOURG 2001

ACCORD PARTIEL OUVERT
en matière de prévention, de protection et
d'organisation des secours contre les risques naturels et technologiques majeurs du
CONSEIL DE L'EUROPE

Cahiers
du Centre Européen
de Géodynamique
et de Séismologie
Volume 19
L'échelle macrosismique européenne 1998
sous la direction de
G. GRÜNTAL
édition française
A. LEVRET

ISBN N° ...

Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie
Musée National d'Histoire Naturelle, Luxembourg
Section Géophysique et Astrophysique

PREFACE A L'EDITION FRANÇAISE

La seule prévention valable en zone sismique est la construction parasismique, c'est-à-dire l'art de construire de manière telle que les bâtiments, même endommagés, ne s'effondrent pas. Le but premier est d'éviter les pertes humaines, mais aussi d'empêcher une catastrophe technologique que des dégâts incontrôlés risqueraient de provoquer. Cela implique de maintenir la stabilité, l'intégrité ou la fonctionnalité d'installations sensibles, stratégiques ou potentiellement dangereuses. Dans cet esprit, la conception parasismique menée dans la perspective de limiter les désordres tient compte a fortiori de la sauvegarde des vies humaines, tandis que celle qui envisage d'abord la sauvegarde des vies humaines, - minimum exigé par les règles parasismiques -, ne prend pas nécessairement en compte la limitation des désordres. Dans tous les cas, la meilleure façon de construire parasismique consiste à formuler des critères économiquement justifiés et techniquement cohérents. Le génie parasismique implique une approche globale qui intègre tous les facteurs pouvant avoir une incidence sur le comportement du bâtiment.

Le 20^{ème} siècle a vu apparaître une grande diversité d'échelles d'intensité macrosismique qui visaient, par une classification des désordres observés en un lieu donné, à exprimer le degré de sévérité de la secousse sismique en ce lieu. Ces échelles ont beaucoup évoluées pour s'adapter et intégrer les enseignements relatifs aux techniques de construction introduites au cours de ce siècle. L'échelle MSK publiée en 1964 par Medvedev, Sponheuer et Karnik fut la première à apporter des précisions sur les ouvrages. L'enrichissement considérable qu'apporte tout séisme majeur à la connaissance que nous avons de ce phénomène, et le renouvellement des règles applicables aux bâtiments ont rendu nécessaire une redéfinition de l'échelle macrosismique prenant en compte l'évolution récente des techniques de construction.

En étroite collaboration, sismologues et ingénieurs du génie civile se sont mis à l'œuvre. Après plus de douze années de travail soutenu, une nouvelle échelle est mise aujourd'hui à la disposition de tous. L'échelle macrosismique européenne (EMS) dans sa présentation actuelle s'intéresse aussi bien au site, aux fondations, à la forme architecturale, à la structure porteuse, qu'aux éléments non structuraux et aux façades. Elle prend aussi en compte les répercussions de la dégradation des éléments d'une partie du bâtiment sur son comportement d'ensemble. Etre ingénieur, c'est justement choisir cette démarche pragmatique. Ainsi, on peut affirmer que le vœux formulé par Peter Suhadolc, dans sa préface de la 2^{ème} édition, que cette échelle puisse «...encourager la coopération entre ingénieurs et sismologues...» est parfaitement atteint par la présente édition. En tant qu'ingénieur, je remercie tous ceux qui ont œuvrés pour réaliser ce travail de longue haleine qui devrait être d'un grand secours pour l'appréciation des conséquences des tremblements de terre.

Pour finir, je suis convaincu que l'échelle macrosismique européenne nous aidera dans la lutte que nous menons pour prévenir le risque sismique qui devrait décroître avec le temps, si des mesures techniquement cohérentes sont appliquées sur l'ensemble des constructions en zone sismique. Il est de notre devoir de rester vigilant, et de ne pas céder à la tentation naturelle d'oublier au plus vite les ravages des séismes.

Paris, le 28 mars 2001

Victor Davidovici

Président d'Honneur de l'Association Française de Génie Parasismique
Dynamique Concept - Consultant

PREFACE A LA PREMIERE EDITION

C'est un honneur et un plaisir tout particulier pour moi de préfacier cette monographie consacrée à la «Nouvelle échelle macrosismique européenne 1992» et achevée lors de la XXIIIe Assemblée générale de la Commission européenne de sismologie (ESC) qui s'est tenue à Prague en 1992.

Il est légitime de dire que l'ESC s'est toujours intéressée à la classification des tremblements de terre selon leur intensité. En 1964, l'échelle MSK-64, à laquelle ses auteurs V. Medvedev, W. Sponheuer et V. Karnik ont donné leurs initiales, a été recommandée par l'ESC et couramment utilisée pendant près de trente ans sous sa forme d'origine. Toutefois, une version modifiée de cette échelle a été introduite en 1981.

Aujourd'hui, après plus de cinq années de travail intense, nous disposons d'une Echelle macrosismique européenne qui renferme toutes les améliorations intervenues. Elle est recommandée par l'Assemblée générale 1992 de l'ESC afin d'être utilisée sur une période probatoire de trois ans; cette procédure semble utile et correcte pour l'introduction d'une norme internationale par l'ESC.

Il convient de noter que c'est principalement l'utilisation des méthodes informatiques servant à l'évaluation des données macrosismiques qui a conduit finalement à une meilleure définition de l'échelle. Autrement dit, l'échelle des intensités ne peut être améliorée que par une discussion continue et par son utilisation pratique, mais de nouvelles idées ne devraient pas en modifier les principes de base. La nouvelle échelle présentée ici illustre bien la manière de réaliser cette tâche difficile.

Que les membres du groupe de travail de l'ESC «Echelles macrosismiques» voient ici l'expression de ma reconnaissance, ainsi que tous les autres collègues qui ont contribué à la version actuelle. C'est le résultat réussi de l'un de ces projets internationaux à long terme qui sont soutenus en premier lieu par l'ESC. Je souhaite remercier de leurs efforts considérables tout particulièrement l'éditeur et le président du Groupe de travail, Dr. G. Grünthal, de Potsdam, ainsi que les autres éditeurs, Dr. R. M. W. Musson, d'Edimbourg, Dr. J. Schwarz de Weimar et Dr. M. Stucchi, de Milan.

L'ESC est reconnaissante du soutien apporté par le Conseil de l'Europe par l'intermédiaire du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie de Luxembourg, de la Société de réassurance suisse de Zürich et de la Société bavaroise d'assurance de Munich, qui ont accueilli des symposiums. Nos remerciements s'adressent également au comité des «Cahiers» pour l'édition de ce volume.

Prague, le 8 mars 1993

Ludvik Wanieck

Président de l'ESC

PREFACE A LA SECONDE EDITION

Voilà maintenant cinq ans que notre très estimé collègue, Ludvik Wanick, a écrit la préface de la première édition de l'Echelle macrosismique européenne. Les cinq dernières années ont été marquées par la mise en place de l'échelle. La période d'essai de trois ans recommandée comprenait l'utilisation de la nouvelle échelle, dans un contexte non seulement européen, mais aussi international, concernant la plupart des tremblements de terre les plus importants de la période: Maharashtra 1993, Nortridge 1994 et Kobé 1995, pour n'en citer que trois.

En 1996, la onzième Conférence mondiale sur l'ingénierie en matière de tremblement de terre, qui s'est tenue à Acapulco, comportait une session thématique spéciale sur l'échelle ainsi que sur ses essais et sa mise en œuvre. C'est un élément significatif, étant donné que l'EMS est la première échelle d'intensité conçue pour encourager la coopération entre ingénieurs et sismologues, plutôt que pour être utilisée par les seuls sismologues. Par la suite, la XXVe Assemblée générale de l'ESC à Reykjavik a voté une résolution recommandant l'adoption de la nouvelle échelle à l'intérieur des pays membres de l'ESC.

Après des travaux intenses visant à intégrer les enseignements acquis au cours de la période probatoire, la nouvelle échelle est maintenant terminée et j'ai le grand plaisir de la présenter à la communauté des sismologues, en espérant qu'elle sera adoptée dans toute l'Europe en vue de recherches ultérieures sur la macrosismologie.

Il ne me reste qu'à remercier de leur excellente participation, Dr. Gottfried Grünthal, responsable du groupe de travail de l'ESC «Echelles macrosismiques», le comité éditorial et tous les autres collègues qui ont contribué à cette tâche importante. J'aimerais également remercier le Comité des Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie grâce auquel la publication de ce volume a été possible.

Trieste, le 6 avril 1998

Peter Suhadolc

Secrétaire général de l'ESC

Table des matières

COLLABORATEURS AYANT PARTICIPE A LA MISE EN PLACE DE L'ECHELLE MACROSISMIQUE EUROPEENNE

INTRODUCTION

L'ECHELLE MACROSISMIQUE EUROPEENNE (EMS-98)

DIRECTIVES ET DOCUMENTATION

- 1 Attribution d'une intensité
 - 1.1 Nature de l'intensité
 - 1.2 Structure de l'échelle d'intensité EMS-98
 - 1.2.1 Types de bâtiment et classes de vulnérabilité
 - 1.2.2 Degrés de dégâts
 - 1.2.3 Quantités
 - 1.3 Intensité et emplacement
 - 1.4 Définition du degré
 - 1.5 Utilisation des informations négatives
 - 1.6 Déductions incorrectes
 - 1.7 Bâtiments élevés et autres cas particuliers
 - 1.8 Effets de l'état du sol
 - 1.9 Notation

- 2 Vulnérabilité
 - 2.1 Vulnérabilité des bâtiments dans les échelles d'intensité – une vision historique
 - 2.2 Types de bâtiments et tableau de vulnérabilité
 - 2.2.1 Remarques générales sur la résistance aux tremblements de terre
 - 2.2.2 Structures en maçonnerie
 - 2.2.2.1 Moellons bruts/pierres brutes
 - 2.2.2.2 Brique crue (adobe)/brique d'argile non cuite
 - 2.2.2.3 Pierres brutes
 - 2.2.2.4 Pierres massives
 - 2.2.2.5 Maçonnerie de briques non renforcée/blocs de bétons
 - 2.2.2.6 Maçonnerie de briques non renforcée avec des planchers en béton armé
 - 2.2.2.7 Maçonnerie de briques renforcée et maçonnerie confinée
 - 2.2.3 Structures en béton armé
 - 2.2.3.1 Structures à ossature en béton armé
 - 2.2.3.2 Structures avec des murs en béton armé
 - 2.2.4 Structures en charpente métallique
 - 2.2.5 Structures en bois

- 2.3 Facteurs influant sur la vulnérabilité sismique des bâtiments
 - 2.3.1 Qualité d'exécution
 - 2.3.2 Etat d'entretien
 - 2.3.3 Régularité
 - 2.3.4 Ductilité
 - 2.3.5 Position
 - 2.3.6 Renforcement
 - 2.3.7 Conception parasismique
 - 2.3.7.1 Conception parasismique conforme à la réglementation
 - 2.3.7.2 Importance des ouvrages
 - 2.3.7.3 Niveau final (réel) de conception parasismique et classe de vulnérabilité
- 2.4 Attribution de la classe de vulnérabilité
- 2.5 Remarques sur l'introduction de nouveaux types de bâtiments

- 3 Evaluation des intensités à partir des documents historiques
 - 3.1 Données historiques et données extraites de documents
 - 3.2 Types de bâtiments (classes de vulnérabilité) dans les documents historiques
 - 3.3 Nombre total de bâtiments
 - 3.4 Qualité des descriptions
 - 3.5 Dégâts subis par les monuments

- 4 Utilisation des échelles d'intensité
 - 4.1 Intensités observées et intensités extrapolées
 - 4.2 Corrélations avec les paramètres de déplacement du sol
 - 4.3 Corrélation avec d'autres échelles
 - 4.4 Qualité de l'évaluation de l'intensité et échantillons de données
 - 4.5 Qualité et incertitude
 - 4.6 Courbes de dégâts
 - 4.7 Limitation des échelles à douze degrés
 - 4.8 L'hypothétique degré "manquant" de l'échelle MSK

- 5 Exemples illustrant la classification des dégâts selon les types de bâtiments

- 6 Exemples d'attribution d'intensité

- 7 Effets sur l'environnement naturel

- 8 Forme abrégée de l'échelle EMS-98

COLLABORATEURS AYANT PARTICIPE A LA MISE EN PLACE DE L'ECHELLE MACROSISMIQUE EUROPEENNE (EMS)

Les activités du Groupe de travail «Echelle macrosismique» de la Commission européenne de sismologie ESC sur «l'échelle macrosismique» ont débuté avec la diffusion de l'appel à contributions pour la mise à jour de l'Echelle des intensités MSK (qui fait partie du Bulletin ESC N° 3, mars 1989), puis de la brochure «Idées et propositions pour la mise à jour de l'échelle d'intensité MSK (éd. par le président du Groupe de travail, **G. Grünthal** de Potsdam, décembre 1989) où, en plus des participants des réunions du Groupe de travail mentionnés ci-dessous, des contributions ont été apportées par **P. Albini** (Milan), **N. N. Ambraseys** (Londres) et **A. Moroni** (Milan).

Personnes ayant participé à au moins l'une des réunions du Groupe de travail «Echelle macrosismique» (Zürich 7 - 8 juin 1990; Munich 14 - 16 mai 1991; Walferdange, Luxembourg, 16 - 18 mars 1992): **G. Grünthal**, **V. Kárník** (Prague), **E. Kenjebaev** (Alma-Ata), **A. Levret** (Fontenay-aux-Roses), **D. Mayer-Rosa** (Zürich), **R. M. W. Musson** (Edimbourg), **O. Novotny** (Prague), **D. Postpischl** (Bologne), **A. A. Roman** (Kishinev), **H. Sandi** (Bucarest), **V. Schenk** (Prague), **Z. Schenková** (Prague), **J. Schwarz** (Weimar), **V. I. Shumila** (Kishinev), **M. Stucchi** (Milan), **H. Tiedemann** (Zürich), **J. Vogt** (Strasbourg), **J. Zahradník** (Prague), **I. Zsíros** (Budapest).

Des contributions supplémentaires aux réunions du Groupe de travail ont été apportées par **R. Glacheva** (Sofia), **R. Gutdeutsch** (Vienne), **A. S. Taubaev** (Almaty). La version finale principale de l'Echelle macrosismique européenne EMS-92 a été rédigée par **G. Grünthal**, **R. M. W. Musson**, **J. Schwarz** et **M. Stucchi** au cours d'une réunion qui s'est tenue à Potsdam du 17 au 21 juin 1992 (pour plus de précisions voir l'Introduction de la version précédente EMS-92). Des remarques concernant la version probatoire publiée EMS-92 ont été soumises par **J. A. van Bodegraven** (de Bilt), **J. Dewey** (Denver), **J. Grases** (Caracas), **R. Gutdeutsch**, **V. Kárník**, **D. Mayer-Rosa**, **A. A. Nikonov** (Moscou), **J. Rynn** (Indooroopilly), **H.-G. Schmidt** (Weimar), **L. Serva** (Rome), **N. V. Shebalin** (Moscou), **S. Sherman** (Irkutsk), **P. Stahl** (Pau), **J. Vogt**. La onzième conférence mondiale sur l'ingénierie des tremblements de terre, qui s'est tenue du 23 au 28 juin 1996, comportait une session thématique spéciale sur l'échelle, notamment sur ses aspects d'ingénierie, ses essais et sa mise en place, avec des exposés de **J. Dewey**, **G. Grünthal**, **C. Gutierrez** (Mexico), **R.M.W. Musson**, **J. Schwarz** et **M. Stucchi**.

L'intégration des enseignements acquis lors des applications de l'EMS-92 à l'échelle mondiale a été réalisée dès 1996 par le comité éditorial de l'EMS-98, c'est-à-dire **G. Grünthal**, **R. M. W. Musson**, **J. Schwarz** et **M. Stucchi**. Deux réunions du comité ont eu lieu à ce propos (7 - 9 novembre 1996 à Edimbourg, 26 janvier - 1er février 1998 à Potsdam). En vue de la réunion d'Edimbourg, **M. Dolce** (Potenza), **C. Carocci** (Rome) et **A. Giuffré** (Rome) ont apporté leur collaboration concernant les aspects d'ingénierie. L'étape finale du travail a été réalisée avec le concours de **D. Molin** (Rome), **A. Tertulliani** (Rome), **Th. Wenk** (Zürich), **H. Charlier** (Stuttgart) et des photographies illustrant les degrés des dégâts, ainsi qu'avec le concours de **Th. Wenk** pour les efforts conjoints avec le comité éditorial sur les aspects d'ingénierie intégrés dans la présente édition. Une aide technique a été fournie par **Ch. Bosse** (Potsdam).

INTRODUCTION

L'objectif de cette édition du Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie est la présentation de la mise à jour relative à la première édition de l'Echelle macrosismique européenne (EMS-92) par le Groupe de travail sur les échelles macrosismiques de la Commission européenne de sismologie (ESC) travail publiée dans le volume 7 du Cahier au printemps 1993.

Cette nouvelle échelle a été recommandée par la XXIII^e Assemblée générale de l'ESC en 1992 qui préconisait son utilisation en parallèle avec celle des échelles existantes pendant une période de trois ans, en vue d'accumuler une expérience dans des conditions concrètes, notamment en ce qui concerne les parties expérimentales de l'échelle: classes de vulnérabilité et structures calculées. Cet essai ne se limitait pas à l'Europe. Mentionnons plusieurs principaux tremblements de terre dont l'analyse a été utilisée pour la mise à jour de l'échelle EMS-92: Roermond (Pays-Bas 1992), Kilari (Inde 1993), Northridge (Etats-Unis 1994), Kobe (Japon 1995), Aegion (Grèce 1995), Cariaco (Venezuela 1997) et Italie du centre (1997-1998).

Les étapes menant à la création de la première version de l'EMS éditée en 1992 ont été résumées dans l'Introduction de cette version, et les principaux objectifs pour mettre en place une nouvelle échelle macrosismique ont été présentés ici en liaison avec un panorama des principales innovations introduites dans l'EMS-98 par rapport à la version probatoire EMS-92.

L'échelle MSK a servi de point de départ à la définition de l'EMS. Rappelons qu'il s'agissait d'une mise à jour fondée sur les expériences disponibles dès les années 1960 à partir de l'application de l'échelle Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), de l'échelle Mercalli modifiée (MM-31 et MM-56) et l'échelle Medvedev, connue également en tant qu'échelle GEOFIAN dès 1953. De légères modifications à peine perceptibles apportées à l'échelle MSK-64 ont été proposées par Medvedev en 1976 et 1978. Il était alors évident pour de nombreux utilisateurs que l'échelle nécessitait plusieurs améliorations, plus de clarté et des ajustements pour pouvoir intégrer les résultats relatifs aux techniques de construction récemment introduites. Une analyse des problèmes découlant de l'application de l'échelle MSK-64 a été réalisée par un groupe d'experts ad-hoc lors de la réunion de Iéna en mars 1980 (publiée dans Gerlands Beitr. Geophys. 1981, où les dernières propositions de S. V. Medvedev ont été intégrées). Les recommandations de modifications de l'échelle données par ce groupe d'experts étaient essentiellement d'ordre mineur. Cette version a servi de plate-forme de départ aux activités du groupe de travail.

L'un des principaux objectifs liés à la création de la nouvelle échelle était de ne pas modifier la cohérence interne de l'échelle. Il en aurait résulté des évaluations d'intensités différentes des applications antérieures des échelles à douze degrés couramment utilisées et une reclassification de toutes les estimations d'intensité précédentes. Il fallait l'éviter à tout prix car

c'était apporter une confusion totale dans toutes les études sur la sismicité et les risques sismiques qui sont fortement dépendantes des données macrosismiques.

D'autres aspects ont été considérés comme fondamentaux pour la mise à jour:

- la robustesse de l'échelle, c'est-à-dire que des différences de diagnostic mineures, ne devraient pas entraîner de différences majeures dans l'intensité évaluée; par ailleurs, l'échelle devrait être comprise et utilisée comme solution de compromis puisqu'aucune échelle d'intensité ne peut prétendre englober toutes les incohérences possibles entre les diagnostics qui peuvent intervenir en pratique;
- des incohérences peuvent également refléter des différences de conditions culturelles dans les régions où l'échelle est utilisée;
- la simplicité d'utilisation;
- le refus de quelconques corrections d'intensité en fonction de l'état du sol ou des effets géomorphologiques, car des observations macrosismiques détaillées ne devraient être qu'un outil destiné à découvrir et à élaborer de tels effets d'amplification;
- la compréhension du fait que les valeurs d'intensité sont représentatives de tout village, ville ou partie d'une plus grande ville au lieu d'être affectées à un point (pour une maison donnée, etc.).

Les aspects précédents étant pris en compte, les problèmes spécifiques que devait résoudre le Groupe de travail sur les échelles macrosismiques, étaient les suivants:

- inclure de nouveaux types de constructions, notamment celles intégrant des caractéristiques de conception parasismique qui n'étaient pas prévues par les versions existantes de l'échelle;
- aborder un problème perçu de non-linéarité dans la disposition de l'échelle à la jonction des degrés VI et VII (qui s'est avéré illusoire après une discussion approfondie lors de la préparation de l'EMS-92 comme de l'EMS-98);
- apporter des améliorations générales à la clarté de la terminologie de l'échelle;
- décider quelle dérogation apporter pour intégrer les édifices très élevés dans les évaluations d'intensité;
- inclure ou non des directives relatives à la correspondance des intensités aux paramètres physiques des mouvements forts du sol, notamment à leurs représentations spectrales;
- concevoir une échelle ne répondant pas aux besoins des seuls sismologues, mais aussi à ceux des ingénieurs du génie civil et autres utilisateurs possibles;
- concevoir une échelle qui soit également appropriée à l'évaluation des tremblements de terre historiques;
- procéder à une révision critique de l'utilisation des effets macrosismiques visibles dans le sol (chutes de pierres, fissures, etc.) et de l'exposition des structures souterraines aux secousses sismiques.

Le terme d'«intensité macrosismique» est utilisé ici au sens de classification de sévérité de secousse du sol en fonction des effets observés dans une zone donnée.

Les membres du Groupe de travail sont conscients du fait que les échelles macrosismiques à douze degrés sont en réalité des échelles à dix degrés; autrement dit, l'intensité I (1) indique que rien n'était observable et les intensités XI et XII sont, en dehors de leur importance pratique très limitée, difficiles à différencier. Si l'on prend en compte la rare utilisation dans la pratique des intensités II et XI tout comme le fait que l'intensité XII définit les effets maximaux que l'on ne s'attend pas à voir dans la réalité, le résultat peut même donner une échelle à huit degrés. Mais, comme nous l'avons mentionné ci-dessus, pour éviter toute confusion, la numérotation classique a été conservée.

Des problèmes sérieux sont apparus lors du traitement des structures calculées ou parasismiques en vue de l'évaluation de l'intensité. Les raisons en étaient les suivantes:

- le manque actuel de connaissance et d'expérience dans la systématisation des modèles de dégâts dus aux tremblements de terre pour cette catégorie de constructions;
- la grande variété des systèmes de classification des structures calculées dans les codes sismiques;
- les différences selon qu'il s'agit d'un ingénieur ou d'un sismologue dans la manière d'utiliser l'intensité et les sujets de recherche apparentés (c'est-à-dire la tendance parmi les ingénieurs à surestimer l'importance des données instrumentales en relation avec l'intensité et, par suite, le risque de surcharger le concept d'intensité);
- le fréquent manque de précision dans l'approche sismologique d'attribution de l'intensité pour les types de constructions précédemment utilisées dans les échelles MSK-64 ou MM-56, c'est-à-dire généralement la non prise en compte de la qualité de la main-d'œuvre, de la régularité structurelle, de la solidité des matériaux, de l'état d'entretien, etc., ainsi que la nécessité de considérer ces caractéristiques comme conditions de définition de l'échelle.

EMS-92 prévoyait déjà que les structures calculées pouvaient être utilisées pour l'attribution d'intensité uniquement sur la base de principes de conception parasismique. Un pas décisif pour résoudre ces problèmes a été accompli avec l'introduction du Tableau de vulnérabilité qui permet de traiter en un schéma unique différents types de constructions et leurs domaines réels de vulnérabilité. Dans des versions d'échelle antérieures, les types de constructions étaient définis de manière plutôt rigoureuse, par type de construction uniquement. Ce tableau de vulnérabilité, en tant que partie essentielle de l'EMS, intègre des structures calculées ou non dans un seul cadre. Il était clair dès le départ que la version EMS-92 avec les compromis adoptés devait être considérée comme une solution expérimentale ou une tentative dans le cadre d'une collecte plus importante d'informations et de données expérimentales sur ce thème, pour permettre l'introduction des améliorations nécessaires. Une période de trois ans a été préconisée à cette fin. Les utilisateurs de cette version furent invités à soumettre au président du Groupe de travail «Echelles macrosismiques» leurs remarques concernant des améliorations à apporter.

Au terme de la période prévue de trois ans où l'EMS-92 était testée et après des applications dans le monde entier, il était clair que l'intervention d'un jugement personnel lors de l'attribution d'une intensité diminuait avec la nouvelle échelle. Cela ne signifie pas que l'évaluation

de l'intensité avec la nouvelle échelle soit plus facile dans chaque cas, mais les utilisateurs sont plus directement conscients des cas sensibles. L'introduction du tableau de vulnérabilité fut largement acceptée, tout comme celle de nouvelles définitions de degrés de dégâts et, en particulier, le Guide d'utilisation de l'échelle d'intensité et les différentes annexes. De nouveaux types de constructions ou ceux qui ne sont pas prévus par la présente table de vulnérabilité peuvent être ajoutés d'une manière appropriée. En règle générale, les aspects d'ingénierie intégrés dans la nouvelle échelle ont été appréciés par les ingénieurs. Ils représentaient le thème des sessions aux conférences internationales sur l'ingénierie des tremblements de terre et même une session thématique spéciale sur l'EMS-92 à la Conférence mondiale sur l'ingénierie des séismes à Acapulco en 1996. Les nouveaux éléments de l'EMS sous la forme du tableau de vulnérabilité* et des degrés de dégâts ont facilité l'utilisation de l'échelle par les assurances, les planificateurs et les décideurs pour déduire les dégâts ou les scénarios à risques concernant des intensités données. Les critiques concernaient essentiellement le fait que le rôle des effets sur l'environnement naturel dans l'attribution de l'intensité était minimisé. Les applications de l'EMS-92 faisaient ressortir clairement que seules ses parties expérimentales, c'est-à-dire l'utilisation des constructions calculées, nécessitaient des modifications importantes.

La XXVe Assemblée générale de l'ESC qui s'est tenue en 1996 à Reykjavik a voté une résolution recommandant l'adoption de la nouvelle échelle macrosismique dans les pays membres de la Commission européenne de sismologie, estimant qu'il fallait fournir des efforts supplémentaires pour éliminer plusieurs incohérences dans l'utilisation des structures calculées.

Alors que des études sur le schéma de réponse des structures affectées par plusieurs tremblements de terre étaient en cours (Northridge aux Etats-Unis en 1994, Kobe au Japon en 1995, Aegion en Grèce en 1995), plusieurs autres catastrophes comme Dinar en Turquie en 1996, Cariaco au Venezuela en 1997 et l'Italie du centre en 1997/1998, ont fourni davantage d'informations et de données expérimentales. Elles ont conduit finalement, même sans accord total, à des modifications du tableau de vulnérabilité concernant les structures en béton armé, leur niveau de conception parasismique et à la différenciation entre structure à murs en béton armé et structure à charpente en béton armé, ainsi qu'à l'introduction de structures en acier. La formulation des classifications de degrés de dégâts a été en partie restructurée. Les dégâts aux bâtiments qui servent dans la définition des degrés d'intensité ont été mieux précisés.

Les précédentes Annexes de l'EMS-92 ont été intégrées dans la nouvelle section de l'EMS-98 intitulée Directives et Documentation. Les éditeurs ont été conscients des différences de nature parfois importantes dans plusieurs de ses sous-sections. L'ancienne Annexe B sur les structures calculées a fait l'objet de modifications fondamentales. Ces aspects sont maintenant essentiellement traités dans la sous-section Vulnérabilité, et mieux intégrés dans l'échelle comme ensemble. Des parties de l'ancien Guide ont été modifiées, complétées et réorganisées. La plupart des photographies de l'ancienne Annexe A illustrant la classification des degrés de vulnérabilité et de dégâts ont été remplacées par d'autres exemples provenant

* la définition du terme « vulnérabilité » dans l'acception propre à ce document est donné au chapitre 2.

d'Europe et du Japon. Les commentaires sont maintenant réservés à des types de structures et de degrés de dégâts, puisqu'il faudrait une série séparée d'exemples pour illustrer la vulnérabilité. Les précédents exemples (ancienne Annexe D) ont été complétés d'une présentation attribuant une intensité à partir des documents historiques les plus anciens. Les restrictions et les arguments relatifs à la manière dont les effets sur l'environnement (ancienne Annexe C) peuvent être intégrés dans la pratique macrosismique ont été revus à la lumière de la nouvelle étude. Conformément à des souhaits souvent émis, une forme résumée de l'EMS-98 a été rédigée (sous-section 8). Comme indiqué au début de la forme résumée, celle-ci ne convient pas pour les attributions d'intensité où un risque de mauvaise utilisation est possible. Cette forme résumée est incluse à des fins éducatives, par exemple dans les écoles ou par le canal des médias, ou sinon pour donner une brève explication de la signification des numéros de l'échelle à un public ne pouvant assimiler la version complète.

Traiter des «si» et des «mais» qui ont surgi inévitablement au cours de la mise à jour de l'EMS-92 comme de l'EMS-98 dépasse le cadre de l'introduction. Il était indispensable à chaque étape de l'étude de trouver un juste équilibre entre la cohérence de la version mise à jour avec l'échelle initiale et plusieurs idées évidemment judicieuses pour améliorer l'échelle qui dépassaient l'objectif assigné aux activités du Groupe de travail. Quelques-uns des points sont mentionnés dans la section Directives et Documentation (par exemple, le problème de la corrélation des intensités avec les paramètres de déplacement important du sol). D'autres pourraient faire l'objet d'activités ultérieures. L'un d'eux servira sans doute d'introduction aux procédures formalisées (algorithmes) pour l'évaluation informatisée de l'intensité macrosismique. Il convient de souligner qu'il n'entrait pas dans les objectifs du Groupe de travail de trouver ces algorithmes; il se proposait seulement d'en définir le fondement, c'est-à-dire de présenter des définitions qualitatives et descriptives à jour, aussi claires que possible, de ce que sont réellement les différentes intensités.

L'ensemble du processus de définition, d'abord de l'EMS-92 et enfin de l'EMS-98, a duré près de dix ans, compte tenu de plusieurs longues pauses qui visaient essentiellement à collecter des données expérimentales supplémentaires. La version de l'EMS présentée devrait être l'étape finale de ces activités de mise à jour de l'échelle. La pratique macrosismique ultérieure permettra d'avoir une vision approfondie des problèmes complexes posés par l'attribution d'une intensité. Des applications ou des besoins à venir pourraient constituer le point de départ d'améliorations futures de ce nouvel outil dans la pratique sismologique et technique pour classer les effets des tremblements de terre sur la population, les objets de l'environnement ou les constructions en tant qu'élément essentiel de la société humaine.

ECHELLE D'INTENSITE MACROSISMIQUE

Classifications utilisées dans l'Echelle Macrosismique Européenne (EMS)

Différenciation des structures (bâtiments) en classes de vulnérabilité (Tableau de vulnérabilité)

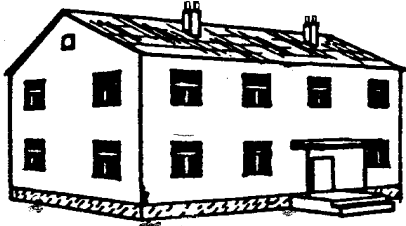
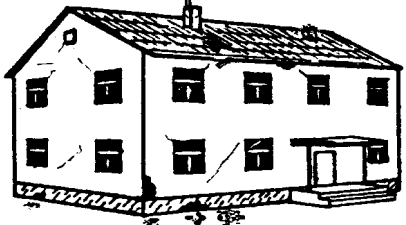
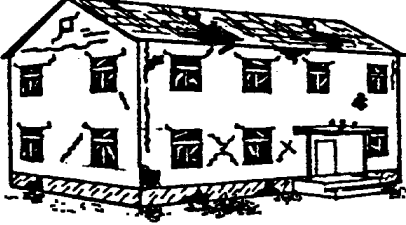

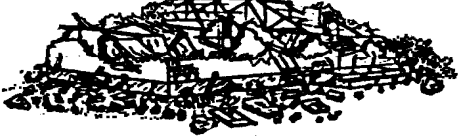
Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○—				
	Pierre brute	—○				
	Pierre massive		—○—			
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués		—○—			
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé		—○—			
	Renforcée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

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;
 Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

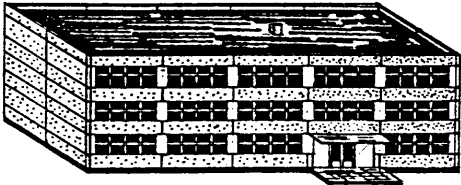
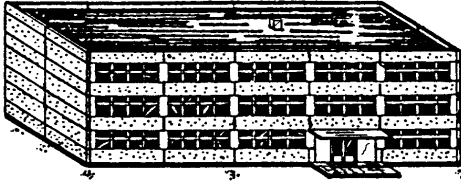
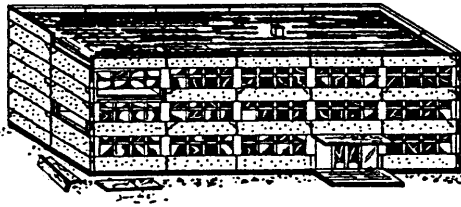
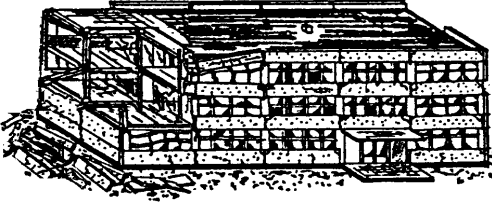

Il faut comprendre par type de structures en maçonnerie, par exemple, de la maçonnerie de pierres brutes, et par type de structures en béton armé par exemple, une structure ou des murs en béton armé. Pour plus de détails, voir section 2 des Directives et Documentation, notamment en ce qui concerne l'utilisation des structures avec une conception parasismique.

Classification des dégâts

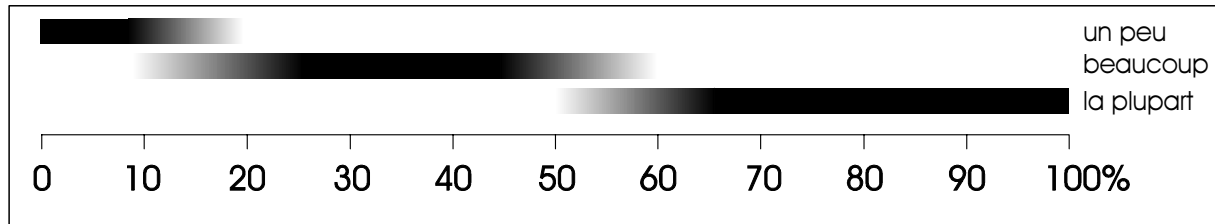
Remarque: la manière dont un bâtiment se déforme sous la charge d'un tremblement de terre dépend de sa nature. Pour une classification grossière, on peut regrouper les bâtiments en maçonnerie ainsi que les bâtiments en béton armé.

Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<p>Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.</p>
	<p>Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total ou presque total.</p>

Classification des dégâts aux bâtiments en béton armé

	<p>Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structurels)</p> <p>Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages.</p>
	<p>Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans les structures de types portiques (poteaux et poutres) et dans structures avec murs. Fissures dans les cloisons et les murs de remplissage; chute des revêtements friables et du plâtre. Chute du mortier aux jonctions entre les panneaux des murs.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures dans les poteaux et dans les nœuds à la base de l'ossature et aux extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. Ecaillage du revêtement de béton, flambement des barres d'armature longitudinale. Fissures importantes dans les cloisons et les murs de remplissage, défaillance de certains panneaux de remplissage.</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Fissures importantes dans les éléments structuraux avec défaillance en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence; perte de l'adhérence barres-béton; basculement des poteaux. Eroulement de quelques poteaux ou d'un étage supérieur.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total du rez-de-chaussée ou de parties de bâtiments.</p>

Définitions des quantités



Définition des degrés d'intensité

Disposition de l'échelle:

- effets sur les humains
- effets sur les objets et sur la nature (les effets sur le sol et les désordres du sol sont traités plus particulièrement à la section 7)
- dégâts sur les bâtiments

Remarque préalable:

Les différents degrés d'intensité peuvent également comprendre les effets de degré(s) respectif(s) d'intensité plus faible, lorsque ces effets ne sont pas mentionnés explicitement.

I. Secousse imperceptible

- Non ressentie, même dans les circonstances les plus favorables.
- Sans effet.
- Aucun dégât.

II. Rarement perceptible

- La secousse n'est ressentie que dans des cas isolés (<1%) par des personnes au repos dans des positions particulièrement réceptives, à l'intérieur des habitations.
- Sans effet.
- Pas de dégâts.

III. Faible

- a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
- b) Les objets suspendus oscillent légèrement.
- c) Aucun dégât.

IV. Largement observée

- a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes et n'est ressentie à l'extérieur que par un petit nombre. Quelques dormeurs sont réveillés. Le niveau des vibrations n'est pas effrayant. Les vibrations sont modérées. Les observateurs ressentent un léger tremblement ou une légère oscillation du bâtiment, de la pièce ou du lit, de la chaise, etc.
- b) La porcelaine, les verres, les fenêtres et les portes vibrent. Balancement des objets suspendus. Dans quelques cas, secousses visibles du mobilier léger. Les menuiseries craquent dans quelques cas.
- c) Aucun dégât.

V. Fort

- a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par la plupart des personnes et à l'extérieur par quelques personnes. Quelques personnes effrayées se précipitent dehors. Réveil de la plupart des dormeurs. Les observateurs ressentent une forte secousse ou une forte oscillation de l'ensemble du bâtiment de la pièce ou du mobilier.
- b) Balancement important des objets suspendus. La porcelaine et les verres s'entrechoquent. De petits objets, des objets dont le centre de gravité est élevé et/ou qui sont mal posés peuvent se déplacer ou tomber. Des portes ou des fenêtres s'ouvrent ou se ferment. Dans quelques cas, des vitres se brisent. Les liquides oscillent et peuvent être projetés hors des récipients pleins. Les animaux deviennent nerveux à l'intérieur.
- c) Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B.

VI. Dégâts légers

- a) Secousse ressentie par la plupart des personnes à l'intérieur des habitations et par de nombreuses personnes à l'extérieur. Quelques personnes perdent leur sang-froid. De nombreuses personnes effrayées se précipitent dehors.
- b) De petits objets de stabilité moyenne peuvent tomber et le mobilier peut être déplacé. Dans certains cas, bris de vaisselle et de verres. Les animaux d'élevage (même à l'extérieur) peuvent s'affoler.

- c) De nombreux bâtiments des classes de vulnérabilité A et B subissent des dégâts de degré 1, quelques uns de classes A et B subissent des dégâts de degré 2; quelques uns de classe C subissent des dégâts de degré 1.

VII. Dégâts

- a) La plupart des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors. De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.
- b) Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner. Les objets tombent des étagères en grand nombre. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.
- c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1.

VIII. Dégâts importants

- a) La plupart des personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, même dehors.
- b) Les meubles peuvent se renverser. Des objets comme les téléviseurs, les machines à écrire, etc. tombent par terre. Possibilité de déplacement, de rotation ou de renversement des pierres tombales. On peut observer des vagues sur un terrain très mou.
- c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2.

IX. Destructures

- a) Panique générale. Des personnes peuvent être projetées au sol.
- b) De nombreux monuments et colonnes tombent ou sont vrillés. On peut observer des vagues sur un terrain mou.

- c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2.

X. Destructures importantes

- c) La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2.

XI. Catastrophe

- c) La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5.
La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, beaucoup de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3.

XII. Catastrophe généralisée

- c) Tous les bâtiments des classes de vulnérabilité A, B et pratiquement tous ceux de la classe de vulnérabilité C sont détruits. La plupart des bâtiments des classes de vulnérabilité D, E et F sont détruits. Les effets du tremblement de terre ont atteint le maximum concevable.

DIRECTIVES ET DOCUMENTATION

1 Attribution d'une intensité

1.1 Nature de l'intensité

Comme indiqué dans l'introduction de cette échelle, l'intensité est ici considérée comme une classification de la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans une zone limitée. Les échelles d'intensité et le concept d'intensité lui-même ont évolué au cours de ce siècle. On a essayé de plus en plus, à partir d'une classification purement hiérarchique des effets, de mettre au point la notion d'intensité comme instrument sommaire de mesure des tremblements de terre; tout du moins, l'intensité a été utilisée comme telle.

Il s'ensuit qu'une échelle d'intensité est d'une certaine manière similaire à une abréviation, car elle permet la compression d'une description littérale des effets d'un tremblement de terre sous forme d'un symbole unique (en général un nombre). Décrire comme telle l'intensité facilite la compréhension des limites de ce concept. L'intensité est descriptive comme un compte-rendu en prose et n'est pas analytique à la manière d'une mesure instrumentale. Elle peut être analysée et interprétée, c'est un paramètre très utile et son utilisation va au-delà d'une simple compilation de descriptions. Mais l'utilisateur ne doit pas perdre de vue sa nature fondamentale et surcharger le concept d'attentes auxquelles celui-ci ne peut pas répondre.

Toute échelle d'intensité est constituée d'une série de descriptions des effets des différents degrés de secousses sismiques sur un certain nombre d'éléments que l'on peut trouver dans l'environnement quotidien. Ces éléments peuvent être considérées comme des indicateurs, car leur réponse à la secousse sert à en mesurer la force. Mais il ne s'agit pas d'équipements spéciaux qui doivent être mis en place par l'enquêteur – ces indicateurs, sont extrêmement courants car ils font partie de l'environnement normal. C'est l'un des grands avantages de l'intensité en tant qu'outil: sa mesure ne nécessite pas d'instruments. Les indicateurs, utilisés historiquement dans les échelles d'intensité peuvent être scindés en quatre groupes:

Etres vivants – personnes et animaux. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité, une proportion de plus en plus importante de personnes ou d'animaux a) remarquent la secousse et b) sont effrayés par celle-ci.

Objets ordinaires. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité, un nombre de plus en plus important d'objets de la vie quotidienne (vaisselle, livres) commencent à se déplacer, puis à se renverser ou à tomber.

Bâtiments. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité, les bâtiments sont de plus en plus gravement endommagés.

Environnement naturel. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité, la probabilité d'effets comme des fissures dans les digues, des chutes de rochers, etc. augmente.

L'Echelle Macrosismique Européenne (EMS-98) privilégie les trois premiers de ces quatre groupes. Le quatrième groupe est considéré comme moins fiable, comme nous l'expliquons dans la section 7.

Tout effet particulier sur l'un de ces indicateurs, peut être considéré comme un diagnostic. Par exemple, "quelques personnes ont été effrayées et ont essayé de se précipiter dehors" est une réaction particulière de l'un des indicateurs possibles (personnes), et elle est considérée par l'échelle d'intensité comme un diagnostic d'une secousse de degré 5. La description d'un des degrés d'intensité est constituée de plusieurs de ces diagnostics qui sont considérés par les auteurs de l'échelle comme représentatifs de la même force de secousse.

Lorsque l'utilisateur a réuni toutes les données descriptives disponibles pour un endroit particulier et un tremblement de terre donné, afin d'évaluer l'intensité subie à cet endroit, il doit comparer les données aux groupes de diagnostic et prendre une décision en choisissant celui qui correspond le mieux. Ceci explique de manière simple comment on utilise l'échelle d'intensité pour attribuer une intensité.

L'échelle EMS-98 prend en compte le caractère statistique de l'intensité, c'est-à-dire le fait qu'en tout lieu, certains effets ne se produiront vraisemblablement que dans une certaine proportion des cas et le fait que cette proportion soit faible ou importante est en elle-même un indicateur de la force de la secousse. Les échelles précédentes ne décrivaient souvent que des effets, sans valeurs quantitatives, impliquant que le même effet était universel sur tous les indicateurs lorsque l'intensité atteignait cette valeur.

1.2 Structure de l'échelle d'intensité EMS-98

L'échelle d'intensité EMS-98, comme l'échelle MSK qui l'a précédée, appartient à la famille d'échelles d'intensité qui a trouvé son origine dans l'échelle simple à dix degrés largement utilisée de Rossi et Forel; celle-ci a été révisée par Mercalli, puis étendue à douze degrés par Cancani et définie intégralement par Sieberg sous le nom d'échelle de Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS). C'est cette échelle qui sert de point de départ non seulement à l'échelle MSK/EMS-98, mais également aux nombreuses versions de l'échelle de "Mercalli modifiée". La plupart de ces échelles à douze degrés sont pratiquement équivalentes les unes aux autres en termes de valeurs réelles. Elles varient par le degré de sophistication utilisé dans leur formulation.

La différence principale entre l'échelle EMS-98 et d'autres échelles d'intensité est le degré de détail avec lequel les différents termes sont définis dès le début, en particulier, les types de bâtiments, les degrés de dégâts, les quantités et ces termes sont maintenant pris en considération séparément. L'Echelle Macrosismique Européenne est également la première échelle d'intensité à être illustrée. Des dessins représentent graphiquement avec précision ce que l'on entend par degrés différents de dégâts, et les photographies données en exemple dans la section 5 peuvent être utilisées pour une comparaison avec des cas réels de dégâts aux structures. Le recours à ces illustrations devrait améliorer le degré de normalisation entre les différents utilisateurs de l'échelle. De même, l'adjonction à l'échelle de ces directives (autre innovation) devrait réduire les ambiguïtés et préciser les intentions sous-jacentes à la construction de l'échelle.

1.2.1 Types de bâtiment et classes de vulnérabilité

Dans une échelle d'intensité très simple, tous les dégâts aux bâtiments d'un type particulier devraient être regroupés indépendamment de la résistance du bâtiment endommagé. Cette échelle serait facile à utiliser, mais pourrait conduire à des résultats trompeurs dans des zones où l'on trouve des types de bâtiments contrastés. A l'autre extrême, on pourrait imaginer une échelle d'intensité dans laquelle il serait nécessaire de connaître les paramètres techniques détaillés d'un bâtiment avant d'évaluer la secousse qui a produit les dégâts observés. Cette échelle serait précise, mais inutilisable en pratique.

L'Echelle Macrosismique Européenne intègre une solution de compromis où l'on utilise une différenciation simple de la résistance des bâtiments aux séismes générés par une vibration (vulnérabilité) permettant de différencier nettement les réponses des bâtiments aux secousses sismiques. Le tableau de vulnérabilité est une tentative de classification pratique des résistances des structures, prenant en compte à la fois le type du bâtiment et d'autres facteurs. C'est une évolution par rapport aux échelles précédentes qui considéraient le type de construction comme seul critère de la vulnérabilité.

L'utilisation de lettres pour représenter différents types de bâtiments trouve son origine dans la version de Richter 1956 de l'échelle de Mercalli modifiée et cette notation est également employée dans l'échelle MSK de 1964. Cette subdivision n'offre pas d'intérêt architectural, elle représente de manière rudimentaire différents niveaux de vulnérabilité. Le même degré de secousse détruira une construction de briques crues mais aura beaucoup moins d'effets sur un immeuble de bureaux moderne correctement construit. Il est également clair que l'état du bâtiment ainsi que des facteurs autres que le type de construction du bâtiment ont eux aussi des effets sur la vulnérabilité.

De l'avis des auteurs de l'échelle EMS-98, les sismologues et les ingénieurs expérimentés utilisant l'échelle MSK adoptaient déjà dans la pratique des modifications non officielles pour prendre en compte des aspects de la vulnérabilité allant au-delà de la simple considération du type de construction. Certaines modifications nécessaires dans le traitement de la vulnérabilité ont donc été introduites dans l'échelle EMS-98 pour rendre explicites celles déjà utilisées dans les applications les plus évoluées.

Ceci est réalisé graphiquement dans le tableau de vulnérabilité. Pour chacun des types de bâtiment, ce tableau présente une ligne indiquant la classe ou les classes de vulnérabilité les plus vraisemblables pour ce type ainsi que l'intervalle probable (indiqué par une ligne pointillée en cas d'incertitude). On peut trouver la position sur la ligne en prenant en compte d'autres facteurs comme l'état de vétusté, la qualité de la construction, l'irrégularité de la forme du bâtiment, le niveau de conception parasismique et ainsi de suite. Ces points sont discutés de manière plus détaillée dans la section 2.

1.2.2 Degrés de dégâts

Les degrés de dégâts représentent également un compromis. Les degrés de 1 à 5 devraient théoriquement représenter une augmentation linéaire de la force de la secousse. Ils ne le font que de manière approximative et sont largement influencés par la nécessité de décrire des classes de dégâts faciles à distinguer par l'utilisateur. On notera également que toutes les combinaisons possibles de classes de vulnérabilité et de nature de dégâts ne sont pas mentionnées pour chacun des degrés de l'échelle; on ne mentionne généralement que les deux degrés de dégâts les plus élevés pour une classe de vulnérabilité particulière; on suppose qu'un nombre proportionnel de bâtiments subiront des dégâts de degré plus faible (voir section 4.6).

Un élément non pris en compte dans les versions précédentes de l'échelle est le fait que différents types de bâtiments réagissent de façon variée et présentent des défaillances diverses; cet élément a été traité dans la version actuelle grâce à des prises en compte séparées et illustrées des dégâts aux bâtiments en maçonnerie et aux bâtiments en béton armé. La localisation des dégâts et leurs types peuvent également être différentes selon que les structures sont calculées ou non.

On devra noter la différence entre les dégâts structuraux et non structuraux et bien faire la distinction entre les dégâts des systèmes primaires (porteurs/structuraux) et les dégâts d'éléments secondaires (non structuraux, comme les remplissages ou les façades-rideaux. Dans le cas particulier des bâtiments avec une conception parasismique, on doit également faire la distinction entre les dégâts dans les zones des rotules plastiques (et donc prévues), tels que les linteaux dans les murs des structures, nœuds d'assemblage des éléments de murs préfabriqués ou les nœuds d'assemblage de l'ossature des structures.

Il est conseillé d'examiner les bâtiments de l'intérieur et de l'extérieur, car l'apparence extérieure peut être trompeuse (même s'il est parfois difficile de le faire pour des raisons de sécurité).

On ne doit pas prendre en compte les dégâts causés par des phénomènes liés au tremblement de terre autres que la forte vibration elle-même. Ces phénomènes comprennent l'entrechoquement de bâtiments adjacents insuffisamment séparés, les glissements de terrain, les ruptures de talus et la liquéfaction.

Inversement, des dégâts plus importants que ceux attendus, du fait de facteurs comme les conditions de résonance ou le niveau de l'action sismique qui dépasse le seuil prévu par le niveau de conception parasismiques sont néanmoins des conséquences directes de la vibration sismique et ils peuvent être pris en considération comme tels.

Dans le cas particulier des structures avec une conception parasismiques, la progression des dégâts en fonction de la secousse peut ne pas être linéairement croissante. Ceci peut s'expliquer compte tenu des principes modernes de conception qui sont relatifs aux performances des structures calculées aux différents niveaux d'intensité du séisme de dimensionnement. En particulier:

- a) les structures conçues pour des séismes de faible intensité pouvant se produire avec une probabilité d'occurrence élevée doivent résister à un événement de ce type sans qu'il y ait de dégâts structuraux ni de dégâts mineurs qui puisse affecter le fonctionnement.
- b) les structures conçues pour des séismes d'intensité moyenne ayant une probabilité d'occurrence faible peuvent explicitement réagir au séisme de conception avec des dégâts non structuraux légers, mais elles doivent résister sans perte des propriétés de fonctionnement.
- c) les structures conçues pour des séismes de forte intensité doivent supporter des dégâts structuraux sans perte d'intégrité ou de stabilité. Pour ce niveau de séisme de conception les dégâts sont autorisés, mais ne doivent pas dépasser le degré 3.

Il peut donc se produire une saturation des dégâts aux niveaux 2 et 3. Selon les résultats des études des dégâts, cette saturation peut conduire dans certains cas à une différenciation des classes de vulnérabilité en fonction de l'intensité; les structures faisant l'objet d'une conception parasismique ont tendance à appartenir à des classes de vulnérabilité plus élevées lorsque l'intensité augmente.

Il faut être vigilant lors de l'étude des dégâts causés par une réplique sur des bâtiments qui peuvent avoir été beaucoup plus vulnérables du fait des dégâts (éventuellement peu visibles) provoqués par la secousse principale. Ce facteur doit être pris en considération lors de l'évaluation de la vulnérabilité.

1.2.3 Quantités

L'utilisation des termes quantitatifs ("quelques", "beaucoup", "la plupart") apporte un élément statistique important dans l'échelle. Il est nécessaire de limiter ces éléments statistiques à des termes assez larges, car toute tentative visant à présenter l'échelle comme une série de graphiques avec des pourcentages exacts serait impossible à utiliser en pratique et aurait un effet négatif sur la robustesse de l'échelle. Mais donner une définition numérique de ces termes n'est pas très facile. Si l'on définit «quelques», «beaucoup» et «la plupart» sous la forme d'intervalles de pourcentages contigus (par exemple, 0 - 20 %, 20 - 60 %; 60 - 100 %), un effet indésirable se produit car une augmentation faible du pourcentage pour certaines des observations peut, dans certains cas, aboutir au franchissement d'un seuil et donc augmenter l'intensité d'un degré, tandis que dans d'autres cas, la même augmentation n'aboutira pas au franchissement d'un seuil et n'aura donc pas le même effet. Des définitions avec un fort recouvrement (0 - 35 %, 15 - 65 %, 50 - 100 %) présentent des problèmes d'ambiguïté pour une valeur observée (par exemple, 25%) qui se trouve dans la zone de recouvrement, et des définitions avec des séparations importantes (0 - 20 %, 40 - 60 %, 80 - 100 %) peuvent engendrer des problèmes similaires, avec des valeurs non définies. On a trouvé une solution de compromis dans cette version de l'échelle grâce à des définitions avec un faible recouvrement, mais cette solution n'est pas idéale. L'objectif ici est de tenter de maximiser la robustesse de l'échelle et les définitions des quantités données doivent être utilisées dans cette optique. Les quantités sont délibérément représentées sous une forme graphique de façon à souligner que ces catégories numériques sont définies de manière floue et non pas de manière nette.

Dans le cas où une quantité déterminée de manière précise tombe dans une zone de recouvrement, l'utilisateur doit étudier les conséquences du classement dans une catégorie plutôt que dans l'autre, sous l'angle de la cohérence avec toute autre donnée disponible au même endroit.

1.3 *Intensité et emplacement*

L'intensité est essentiellement liée à un lieu et normalement, elle ne doit être prise en considération qu'avec une référence à un endroit spécifié, par exemple "l'intensité à Pienza était de 5", (où plus correctement, "l'intensité à Pienza a été évaluée à une valeur de 5"). Dire, "l'intensité du tremblement de terre était de 8", sans indication du lieu est un usage impropre. (même si l'on peut dire que "l'intensité observée la plus élevée du tremblement de terre était de 8").

Il est donc nécessaire de trier les données par lieu avant de commencer à affecter des intensités. On doit être sûr a) que toutes les données à utiliser lors d'une attribution d'intensité

donnée proviennent du même endroit et que b) toutes les données disponibles pour ce lieu ont été regroupées. Lorsque les données sont constituées de questionnaires provenant d'individus ou d'observations individuelles sur le terrain, on doit combiner les données en chaque endroit pour déterminer le nombre de cas où un diagnostic a été observé ou non.

Le concept d'intensité provient de l'idée que, pour un lieu particulière affecté par un séisme donné, un certain niveau de sévérité de la secousse est représentatif de ce qui a été observé. Ceci implique, en premier lieu, que le lieu est suffisamment grand pour que l'on puisse obtenir des échantillons ayant une valeur statistique sans être affectés outre mesure par des spécificités locales à petite échelle et en second lieu, qu'il n'est pas trop grand pour que les véritables variations locales ne soient gommées.

Par conséquent, l'intensité ne sera pas affectée à un seul bâtiment ou à une seule rue; on n'affectera pas non plus une intensité unique à une métropole ou à une commune. En règle générale, le lieu le plus petit ne sera pas d'une taille inférieure à celle d'un village et le plus grand ne sera pas d'une taille supérieure à celle d'une ville européenne moyenne. Ainsi, il est raisonnable d'attribuer une valeur unique de l'intensité à une ville comme Le Pirée, mais pas à l'ensemble de l'Athènes moderne. Aucune règle rigide ne sera posée, car les circonstances particulières influenceront l'utilisateur en ce qui concerne les décisions à prendre dans les cas particuliers.

Il est également souhaitable d'affecter des valeurs à des lieux qui sont raisonnablement homogènes, en particulier du point de vue des types de sols, sinon il peut être observé une gamme très large d'effets dus à la secousse. Toutefois, ceci n'est pas toujours praticable selon la précision des données et la manière dont elles ont été recueillies. Dans le cas d'une zone urbaine où les conditions géotechniques sont très différentes (par exemple, une moitié de la ville se trouve sur un remblai alluvial et l'autre sur un plateau), on devra évaluer indépendamment des valeurs différentes de l'intensité pour les deux parties de la ville.

1.4 Détermination du degré

Les descriptions de chacun des degrés de l'échelle d'intensité sont des "descriptions imagées" idéalisées des effets auxquels on peut s'attendre pour chaque niveau d'intensité. Chacun des effets décrits dans l'échelle peut être considéré comme un diagnostic ou un test par rapport auquel les données peuvent être mesurées. La détermination du degré consiste donc à comparer les données aux descriptions idéalisées de l'échelle et à décider laquelle correspond le mieux.

On ne s'attend pas à ce que tous les diagnostics soient vérifiés par les données dans tous les cas; certains peuvent simplement être absents. Il est donc conseillé d'avoir une approche souple en cherchant la meilleure correspondance avec l'ensemble des données disponibles,

plutôt que de tenter de définir une formule rigide qui ne dépendrait que d'un ou deux paramètres clé.

Bien qu'il existe une part de subjectivité dans l'attribution d'une intensité, des enquêteurs expérimentés seront rarement en profond désaccord. Le plus souvent, l'évaluation de l'intensité est directe, mais on peut toujours trouver des cas posant des problèmes; ils sont en général exceptionnels. Il est impossible de définir des directives qui envisagent toutes les éventualités, mais les indications suivantes peuvent être utiles.

Dans la réalité, les données disponibles ne correspondront souvent pas aux descriptions des degrés d'intensité sous tous les aspects. Dans ces cas, l'enquêteur doit décider des degrés qui offrent la meilleure correspondance avec les données dont il dispose. Pour ce faire, il est important de rechercher un élément de cohérence dans l'ensemble des données plutôt que de se fier à l'un des diagnostics comme à un étalon. Il est nécessaire de veiller à ne pas donner trop d'importance à des observations occasionnelles extrêmes qui peuvent conduire à une surestimation de l'intensité dans le lieu en question. Par exemple, l'utilisation excessive des dégâts en tant que diagnostic a entraîné par le passé une surestimation des intensités lorsque des cas de dégâts isolés, voire anormaux, ont conduit à des évaluations d'intensité de 6 ou plus, même si l'ensemble des autres données suggérait une valeur plus faible.

Lorsque les données sont constituées de descriptions littéraires, les effets peuvent être décrits dans des termes très éloignés de ceux de l'échelle. Dans de tels cas, il peut être utile de voir si la teneur générale de la description est comparable au caractère général du degré de l'échelle d'intensité.

Dans les cas où toutes les constructions locales sont de la classe de vulnérabilité A et où la plupart ou la totalité des bâtiments sont détruits, il n'est pas possible de faire la distinction entre les intensités 10, 11 et 12. Il y a un effet de saturation que l'on ne peut pas réellement éviter dans la pratique.

Il est parfois impossible d'affecter de manière définitive une intensité et on ne peut donner qu'un intervalle de valeurs. Ce cas est discuté de manière plus détaillée dans la section 4.5.

Les photographies de la section 5 peuvent être utilisées pour faciliter l'évaluation des degrés de dégâts. De plus, plusieurs exemples d'attribution d'intensité sont présentés à la section 6, "à partir de données issues de documents" et "à partir de données issues de questionnaires". Ces exemples ne sont pas censés être des modèles à suivre de manière rigide, mais plutôt servir à illustrer des procédés d'évaluation.

1.5 Utilisation des informations négatives

Pour la détermination de l'intensité, les informations selon lesquelles un effet ne s'est en réalité pas produit sont souvent tout aussi importantes que les informations selon lesquelles un effet s'est produit, et ces données ne doivent pas être négligées. Par exemple, une description comme "le tremblement de terre a beaucoup effrayé les habitants de Slavonice, mais il n'y a eu aucun dégât d'aucune sorte" indique que l'intensité était inférieure à 6 sur l'échelle EMS. Toutefois, supposer automatiquement qu'un effet ne s'est pas produit simplement parce qu'il n'a pas été rapporté est dangereux et incorrect sauf s'il existe des raisons particulières justifiant une telle hypothèse. Si le rapport avait mentionné simplement, "un tremblement de terre très effrayant à Slavonice", l'incidence des dégâts serait inconnue à moins qu'il n'existe de très bonnes raisons de supposer que, s'il y avait eu des dégâts, l'auteur en aurait certainement eu connaissance et en aurait certainement fait mention.

1.6 Déductions incorrectes

La nature statistique de l'intensité a pour conséquence qu'un effet isolé ne peut à lui seul permettre une estimation de celle-ci. Ce point est important lorsque l'on tente d'émettre des conclusions négatives plutôt que positives. Par exemple, l'existence d'un certain nombre d'anciennes flèches (ou clochers) élançées dans une région particulière pourrait être utilisée pour suggérer que l'exposition globale de la région aux tremblements de terre par le passé était assez faible, mais il serait peu judicieux de conclure d'après l'existence d'une seule flèche qu'une certaine valeur de l'intensité n'a jamais été dépassée localement au cours de la vie du monument.

1.7 Bâtiments élevés et autres cas particuliers

Parfois, il n'est pas conseillé d'essayer d'utiliser certaines données pour l'attribution des intensités. Un cas particulier de ce type a trait aux observations provenant de bâtiments élevés. Il est bien connu que les personnes situées aux étages supérieurs observeront vraisemblablement des vibrations plus fortes en cas de tremblement de terre que les personnes situées aux étages inférieurs. Différentes pratiques, comme la réduction de un degré de l'intensité affectée pour un certain nombre d'étages ont été suggérées, mais elles n'ont jamais eu la faveur générale. De même, comme les bâtiments très élevés peuvent se comporter sous une charge sismique de manière particulière en fonction de la fréquence de la secousse et de la conception du bâtiment, l'augmentation de la sévérité de la secousse avec l'altitude peut être irrégulière. La pratique recommandée consiste à exclure tous les rapports provenant d'observateurs au-delà du cinquième étage lors de l'attribution d'une intensité, bien qu'en pratique, le comportement réel des différents bâtiments varie de manière considérable, notamment en fonction du caractère élançé du bâtiment. En règle générale, l'utilisateur doit

être plus soucieux des effets observés dans des circonstances normales que de ceux observés dans des circonstances exceptionnelles.

Un cas particulier est la situation où les seuls rapports sont ceux provenant d'immeubles élevés, car la secousse était si faible qu'elle n'était perceptible que dans les étages élevés de telles constructions. Ce type de données est typique de l'intensité 2.

Tout autant que la hauteur des bâtiments, leur symétrie et leur régularité ont une influence sur la manière dont ils se comportent au cours d'un tremblement de terre (voir section 2). Ce point est particulièrement vrai pour les dégâts et il s'applique à tous les types de bâtiments et non pas uniquement aux constructions modernes. Plus la structure est régulière et symétrique et plus le bâtiment résistera à la vibration sismique.

Les observations provenant de structures particulières comme les phares, les tours de radio, les ponts, etc. ne doivent pas être utilisées et il en va de même pour les bâtiments monumentaux, comme les cathédrales (voir section 3.5). Les données provenant d'observateurs en sous-sol qui ne sont également pas facilement comparables avec les observations faites en surface ne doivent pas être utilisées.

1.8 Effets de conditions de sol

On ne doit absolument pas tenter d'écarter ni de réduire des attributions d'intensité sous prétexte qu'elles ont été influencées par les conditions du sol. L'augmentation de l'ébranlement due à l'amplification par le sol ou par les conditions topographiques fait partie des effets que l'intensité traduit et des risques auxquels est exposé l'environnement bâti. Elle ne doit pas être dissimulée. Si des effets anormalement forts sont mentionnés dans des zones alluviales distantes d'autres zones où des effets importants ont été observés, la procédure correcte consiste à attribuer des intensités élevées comme les effets le justifient. Il est ensuite possible d'interpréter ces intensités élevées comme des effets de l'amplification par les sols (même s'il ne s'agit évidemment que de l'une des causes parmi plusieurs autres). Toute autre méthode est en contradiction avec la nature fondamentale de l'intensité comme mesure des effets observables d'un tremblement de terre.

1.9 Notation

On convenait généralement de noter les intensités en chiffres romains, à la fois pour les distinguer plus clairement des magnitudes et mettre l'accent sur le caractère entier des valeurs de l'échelle. Comme les chiffres romains sont difficiles à traiter sur ordinateur, cette convention a quelque peu disparu. L'utilisation de chiffres romains ou de chiffres arabes peut maintenant être considérée comme une affaire de goût.

Il existe également des jeux de symboles conventionnels pour tracer les intensités, fondés sur des cercles dont une partie de plus en plus grande est remplie en fonction de l'augmentation des valeurs de l'intensité.

2 Vulnérabilité

Le terme “vulnérabilité” est utilisé tout au long de cette échelle pour exprimer les différences de réaction des bâtiments aux secousses sismiques. Si deux groupes de bâtiments sont soumis exactement à la même secousse sismique et que l’un des groupes se comporte mieux que l’autre, alors on dira que les bâtiments qui ont été le moins endommagés avaient une vulnérabilité plus faible aux tremblements de terre que ceux qui ont été plus endommagés; on peut aussi déclarer que les bâtiments qui ont été moins endommagés étaient plus résistants aux tremblements de terre et vice-versa. Cette définition du mot “vulnérabilité” n’est pas forcément la même que celle utilisée dans d’autres contextes. La discussion qui suit illustre la manière dont le terme est appliqué dans l’échelle EM avec, pour objectif principal, de démontrer la manière dont la classe de vulnérabilité peut être évaluée.

2.1 *Vulnérabilité des bâtiments dans les échelles d’intensité – une vision historique*

Le concept de vulnérabilité est fondamental pour la construction des échelles modernes d’intensité. La violence de la secousse nécessaire à la destruction d’une chaumière en briques de pisé mal construite n’est pas la même que celle qui entraîne la destruction d’un immeuble de bureaux massif et ces distinctions doivent faire l’objet d’une différenciation. Ceci peut être comparé aux effets d’une secousse sismique sur des objets mobiles: un crayon sur un bureau pourra rouler même dans le cas d’une secousse de faible intensité, tandis que la violence de la secousse nécessaire pour faire tomber une machine à écrire sera beaucoup plus importante. Dire simplement que “des objets ont été déplacés”, sans indiquer leur nature ne fournira pas une bonne discrimination entre les différents niveaux de sévérité de l’ébranlement. Une différenciation similaire est nécessaire avec les bâtiments et les dégâts subis par les bâtiments.

Ce point avait été mis en évidence dès le début de la définition des échelles d’intensité. Les premières échelles qui n’établissaient pas de distinction entre les types de bâtiments étaient généralement celles qui étaient conçues pour être utilisées dans des zones géographiques limitées où il était possible de définir des “maisons moyennes”, sans distinction complémentaire. Ces échelles ne prenaient pas non plus en compte des zones avec de nombreuses constructions en béton armé et en acier comme les centres urbains modernes. Par contre, les échelles ultérieures qui étaient prévues pour s’appliquer à un environnement de bâtis modernes et être d’une application plus générale, comme l’échelle de Mercalli modifiée dans sa formulation de 1956 par Richter ou l’échelle MSK en 1964, avaient traité ce problème avec attention. Elles l’ont fait en divisant les bâtiments en différentes classes en fonction de leur type, c’est-à-dire des matériaux de construction utilisés pour résister au système de charges latérales. En cela, le classement par type de bâtiment était analogue au classement par vulnérabilité.

Ceci est une remarque importante. On pourrait penser que la prise en compte explicite de la vulnérabilité des bâtiments dans l'échelle EM représente une innovation substantielle. En fait, cette prise en compte est dans le droit fil des échelles MSK et MM. Les types de bâtiments n'étaient pas distingués dans ces échelles sur la base de considération esthétiques, mais parce qu'il s'agissait d'une manière facile de traiter le problème de la vulnérabilité, même si le terme n'était pas employé explicitement. Toutefois, il était évident, au moment où ces échelles ont été formulées, que la simple utilisation du type de bâtiment considéré comme analogue à la vulnérabilité était insuffisante. Dans le premier cas, les variations de résistance à l'intérieur d'un même type de bâtiment étaient souvent tout aussi importantes que les variations entre des types de bâtiment différents et ce point a été la source d'un certain nombre de difficultés lors de l'attribution d'intensités. Dans le second cas, un système de cette nature est relativement peu souple dès lors qu'il s'agit d'ajouter de nouveaux types de bâtiment.

2.2 Types de bâtiments et tableau de vulnérabilité

L'échelle MSK définissait des classes de bâtiments en fonction du type de construction, à titre de première tentative pour exprimer la vulnérabilité des bâtiments. Dans l'échelle EM, on a tenté de se rapprocher de classes représentant la vulnérabilité. On a ainsi proposé six classes de vulnérabilité décroissante (A - F) dont les trois premières représentent la résistance d'une maison «typique» en briques crues, d'un bâtiment de brique et d'une structure en béton armé; elles devraient donc être compatibles avec les classes de bâtiments A - C des échelles MSK-64 et MSK-81. Les classes D et E sont prévues pour représenter approximativement la décroissance linéaire de la vulnérabilité en fonction de l'amélioration du degré de conception parasismique et elles conviennent également pour les structures en bois, en maçonnerie renforcée ou chaînée et les structures en acier qui sont bien connues pour leur résistance à l'action sismique. La classe F est censée représenter la vulnérabilité d'une structure avec un bon degré de conception parasismique, c'est-à-dire la structure ayant le meilleur degré de résistance aux séismes grâce aux principes de conception pris en compte.

Lors de l'évaluation sur le terrain de la vulnérabilité d'une structure ordinaire, la première étape consiste évidemment à évaluer le type du bâtiment. Cette évaluation fournit la base de la classe de vulnérabilité. A chaque type de bâtiments les plus courants en Europe correspond une entrée dans le tableau de vulnérabilité représentant la classification la plus probable du point de vue de la classe de vulnérabilité ainsi que l'intervalle des valeurs que l'on peut rencontrer. Les types de bâtiments dans le Tableau de vulnérabilité sont classés en fonction de leurs groupes principaux: maçonnerie, béton armé, acier et bois et ils font l'objet d'une discussion plus détaillée ci-dessous.

Le tableau de vulnérabilité contient des entrées correspondant aux principaux types de bâtiments que l'on rencontre en Europe. Pour des raisons de place, la liste des types est

nécessairement simplifiée. Nous reconnaissons que le tableau est incomplet car certains des types de bâtiments (par exemple, brique crue, bois) devraient bénéficier d'une sous-classification. Certaines idées fondamentales sur l'introduction de nouveaux types de bâtiments sont mentionnées dans la section 2.5, mais ce n'est pas une tâche à entreprendre à la légère.

2.2.1 Remarques générales sur la résistance aux séismes

Dans la construction du tableau de vulnérabilité, la séparation principale est effectuée en fonction du type de construction. Toutefois, en considérant de manière générale le problème de la résistance aux séismes des bâtiments, on doit également prendre en compte une progression en fonction des caractéristiques de conception.

Au niveau le plus bas, on trouve des bâtiments sans conception parasismique. Ces bâtiments comprennent à la fois des structures calculées et des structures non calculées. Les bâtiments calculés de ce type se rencontrent en général dans les régions de faible activité sismique où la réglementation de conception parasismique est inexistante ou bien existe seulement à l'état de recommandation. Seuls les bâtiments de ce type étaient pris en compte dans les échelles d'intensité précédentes.

A un second niveau, on trouve des bâtiments dotés d'une conception parasismique, c'est-à-dire des bâtiments qui ont été conçus et construits dans le cadre de réglementations. Un certain principe de conception a été suivi, notamment dans les procédés d'évaluation du risque sismique et dans la construction d'une carte de division en zones, avec des paramètres décrivant l'action sismique attendue pour les différentes zones sismiques. On peut s'attendre à trouver des bâtiments de cette nature dans les régions sismiques où la conception des bâtiments doit prendre en compte des réglementations parasismiques. Ces bâtiments peuvent comporter des constructions en maçonnerie aussi bien que des structures en béton armé ou en charpente métallique. Les bâtiments de ce niveau sont pris en compte pour la première fois dans cette échelle.

Au niveau le plus élevé, on trouve des bâtiments avec des mesures parasismiques particulières, comme l'isolation de la base. Ces bâtiments se comportent d'une manière particulière en cas de secousse sismique, en ne présentant généralement aucun dégât sauf si le procédé d'isolation de la base montre une défaillance spécifique. Les bâtiments de ce niveau ne peuvent en aucune manière être utilisés pour l'attribution d'une intensité.

Les constructions calculées avec des systèmes structuraux modernes non conçus spécialement pour résister à des charges sismiques latérales, offrent toutefois un certain niveau de résistance aux séismes, comparable au niveau pris en compte dans des bâtiments ayant une conception parasismique. De même, les structures conçues pour résister à un niveau élevé de charge due au vent peuvent également être considérées comme offrant une résistance

intrinsèque aux séismes. Les structures en bois (sans calcul technique) ou en maçonnerie bien construites peuvent se comporter comme des bâtiments dotés d'une conception parasismique typique de la classe de vulnérabilité D et, exceptionnellement E. Cette remarque peut également s'appliquer aux bâtiments pour lesquels il a été pris des mesures de renforcement spéciales (rénovation). Dans de tels cas, même des structures en pierres brutes avec de bonnes mesures de renforcement peuvent résister bien au-delà de leur classe de vulnérabilité normale.

On peut noter que, pour des raisons de simplicité, les structures en béton armé sans conception parasismique et celles avec un faible niveau de conception parasismique sont résumées sous la forme d'un seul type de bâtiment; en effet, elles ont généralement le même comportement. La classe de vulnérabilité type (la plus probable) pour ce type de bâtiments est la classe C. Ceci n'a pas pour but de dévaluer complètement l'utilité d'un faible niveau de conception parasismique, qui est principalement présenté en réduisant les cas très mauvais. Les structures en béton armé avec un faible niveau de conception parasismique ne descendent en classe B que dans quelques cas exceptionnels, tandis que des structures similaires sans conception parasismique peuvent facilement correspondre à la classe B et, dans des cas exceptionnels, à la classe A.

L'importance des éléments horizontaux dans la détermination des performances des bâtiments soumis à une charge sismique a souvent été négligée par le passé, au moins pour ce qui concerne les structures en maçonnerie. La résistance des planchers d'un bâtiment ou des autres éléments de raidissement horizontaux joue souvent un rôle clé dans la décision relative à la vulnérabilité de la structure. On peut noter qu'il peut s'avérer difficile, voire impossible, de déterminer de l'extérieur d'un bâtiment la nature des planchers ou des éléments horizontaux présents; il est très important de pouvoir examiner également l'intérieur du bâtiment, si c'est possible, afin d'évaluer correctement la vulnérabilité sur le terrain.

2.2.2 Structures en maçonnerie

2.2.2.1 Moellon brut / pierre tout venant

Il s'agit de constructions traditionnelles dans lesquelles les pierres non préparées sont utilisées comme matériau de base du bâtiment, souvent avec un mortier de qualité médiocre, ce qui conduit à des bâtiments lourds et ayant une faible résistance aux charges latérales. Les planchers sont en général en bois et n'offrent aucune fonction de raidissement horizontal.

2.2.2.2 Adobe / brique crue

On peut trouver ce type de construction dans de nombreux endroits où il existe des argiles qui conviennent. Les constructions en briques crues varient considérablement et ce facteur peut

introduire certaines variations dans la résistance des maisons en adobe à une secousse sismique. Les murs constitués de couches d'argile sans utilisation de briques sont rigides et de faible résistance; les maisons de briques peuvent avoir un meilleur comportement en fonction de la qualité du mortier et, dans une moindre mesure, de la qualité des briques. Le poids du toit est l'un des facteurs les plus importants dans les performances de ces maisons, un toit lourd étant un inconvénient. Les maisons en briques crues avec des charpentes en bois présentent une meilleure résistance et se comportent beaucoup mieux. Ces bâtiments peuvent subir avec une grande facilité des dégâts des murs, tandis que la charpente en bois reste intacte grâce à sa ductilité plus élevée. On rencontre également des cas d'utilisation de poutres de bois et de poteaux non liés dans des maisons en briques crues; ces éléments apportent un effet de raidissement horizontal complémentaire et améliorent donc les performances, mais moins que ne le ferait une ossature avec des assemblages.

Le type d'habitat que l'on rencontre dans certaines parties de l'Europe, connu sous le nom de "crépi sur clayonnage", où une charpente en bois est remplie de lattes recouvertes d'argile, est similaire à une construction adobe/bois.

2.2.2.3 Pierre brute

Les constructions en pierres brutes présentent une différence par rapport aux constructions en pierres tout venant: les pierres à bâtir ont subi une certaine préparation avant leur utilisation. Ces pierres taillées sont disposées dans la construction selon certaines techniques qui améliorent la résistance de la structure, par exemple grâce à l'utilisation de pierres plus grandes pour relier les murs dans les angles. Dans le cas normal, de tels bâtiments sont considérés comme étant de la classe de vulnérabilité B, et ne sont traités comme étant de la classe de vulnérabilité A que s'ils sont en mauvais état ou particulièrement mal construits.

2.2.2.4 Pierre massive

Les constructions avec des pierres de très grandes dimensions sont généralement réservées à des constructions monumentales, châteaux, bâtiments publics importants, etc. Les constructions particulières de ce type comme les cathédrales ou les châteaux ne sont pas utilisés normalement dans les évaluations d'intensité pour les raisons invoquées dans la section 2.3.5. Toutefois, certaines villes contiennent des zones de bâtiments publics de ce type construits au XIXe siècle qui peuvent être utilisés pour l'attribution de l'intensité. Ces bâtiments possèdent en général une résistance élevée, qui contribue à une bonne classe de vulnérabilité (C et même D dans des cas de construction d'une qualité exceptionnelle).

2.2.2.5 Maçonnerie de briques non renforcée/blocs de béton

Ce type de construction extrêmement ordinaire est l'archétype du bâtiment de classe "B" dans l'échelle MSK originelle par rapport à laquelle on peut mesurer d'autres types de construction. Dans l'Eurocode 8, ces constructions sont désignées sous le titre d'"éléments préfabriqués". Son caractère très ordinaire signifie que l'on rencontrera des spécimens en si mauvais état qu'ils ne seront comptés que comme étant de la classe A. Il est moins fréquent de trouver des exemples de bâtiments suffisamment bien construits pour pouvoir être considérés comme étant de classe C, mais cela peut concerner de grandes maisons conçues luxueusement pour les nantis ou construites dans des emplacements où une résistance latérale est nécessaire pour la résistance au vent. Dans ce type de bâtiment, aucun effort n'a été apporté pour améliorer les éléments horizontaux de la structure, les planchers étant généralement en bois et donc souples.

En général, la vulnérabilité est influencée par le nombre, la taille et la position des ouvertures. Les grandes ouvertures, les trumeaux entre des ouvertures et des angles de la construction, ainsi que des murs longs sans raidissement perpendiculaire contribuent à accroître la vulnérabilité d'un bâtiment. Un problème à prendre en considération est celui de l'utilisation de murs creux avec des parois internes et externes qui, si elles ne sont pas raccordées de manière correcte créent des murs extrêmement faibles avec une résistance insuffisante aux tremblements de terre, et se comportant de manière très médiocre.

2.2.2.6 Maçonnerie de briques non renforcée avec des planchers en béton armé

Bien que les murs d'un bâtiment soient la partie la plus évidente pour un observateur, les éléments horizontaux peuvent en réalité être plus importants pour la détermination de la résistance d'une structure à des charges latérales. Même des constructions où les murs sont en briques non renforcées, mais où les planchers sont en béton armé, se comporteront nettement mieux que des constructions en briques normales. Lorsque les murs sont raccordés et liés ensemble par une dalle de plancher rigide avec des poutres formant chaînage, on crée un système de type boîte qui réduit efficacement le risque d'effondrement en dehors du plan des murs, ou de séparation et de décalage des murs perpendiculaires. Cette amélioration des performances n'est obtenue que si le plancher en béton armé est correctement raccordé à la structure, ce qui n'est pas toujours le cas. Lorsque la structure est bien raccordée, la vulnérabilité est très vraisemblablement de la classe C, sinon elle est de classe B.

2.2.2.7 Maçonnerie de briques renforcée et maçonnerie confinée

On trouve dans cette catégorie différents systèmes où des efforts importants ont été réalisés pour améliorer les performances et la ductilité de la construction en maçonnerie. Dans la

maçonnerie renforcée, des barres ou des grilles d'acier sont intégrées (dans le mortier ou le ciment) dans les orifices ou entre les couches de la maçonnerie en brique, créant un matériau composite qui se comporte comme un mur ou un système de murs très résistant et très ductile. Ces renforts peuvent exister à la fois dans les directions verticale et horizontale. La maçonnerie confinée est une maçonnerie bâtie de manière rigide entre les poteaux et les poutres de la structure sur les quatre côtés, et elle offre un degré de résistance similaire. Il n'est pas prévu dans de tels cas que les éléments de raccordement se comportent comme une structure à portiques à comportement spatial, où la maçonnerie dans la plupart des cas ne se comporterait que comme des remplissages. Dans certaines régions, des systèmes spéciaux d'éléments de construction ont été mis au point, où des éléments de construction de forme particulière (par exemple avec des inter-blocages) sont fabriqués en béton; cette méthode fonctionne également très bien. Un autre système efficace est connu sous le nom de maçonnerie bétonnée; il comporte des parois externes et internes en briques, raccordées par un chaînage en béton avec une armature verticale et horizontale. Dans ce cas, des problèmes peuvent se poser si la liaison est faible et/ou si les parois externes sont raccordées de manière incorrecte. La performance globale de tels systèmes devrait également être équivalente à celle de la maçonnerie renforcée, bien que l'expérience de ce type de construction soit jusqu'à présent limitée.

2.2.3 Structures en béton armé

Ce type de construction, si courant dans les villes modernes, présente des variations d'aspect, de conception et de résistance extrêmement importantes, qui rendent difficile leur présentation dans un guide simple. Dans le Tableau de Vulnérabilité, une division a été réalisée en fonction du degré de conception parasismique; nous aborderons dans la section 2.3.8 la manière de l'appliquer.

2.2.3.1 Structures à ossature en béton armé

Le système structural de base des ossatures en béton armé sont constitué de poteaux et de poutres qui forment des portiques et sont reliées par des nœuds résistants à la flexion et au cisaillement. Les structures avec ossature en béton armé résistent à la fois aux charges verticales et latérales. Le comportement des ossatures en béton armé dépend du rapport entre la hauteur des poteaux et la longueur des poutres ainsi que de la section des poteaux et des poutres. Des poteaux faibles et des poutres fortes constitue un système vulnérable à des charges latérales. Extrêmement courantes et répandues, les structures à ossature en béton armé doivent être considérées comme le type de bâtiment offrant la plus grande dispersion dans la résistance aux séismes. Dans certains cas, la vulnérabilité est comparable à celle des bâtiments en brique crue ou en pierre brute, ce qui conduit à l'attribution d'une intensité erronée (trop élevée) si l'on choisit pour classe de vulnérabilité la classe la plus vraisemblable

dans le Tableau de vulnérabilité, en négligeant l'intervalle de cas probables et les cas exceptionnels. La défaillance des bâtiments à ossature en béton armé conduit souvent à des cas de dégâts spectaculaires. Les dégâts observés lors des derniers tremblements de terre offrent une expérience sur les défauts de conception typiques et sur les raisons des exemples de dégâts présentés à maintes reprises. Les différences de rigidité et de résistance du système structural dans les directions longitudinale et transversale doivent être évitées. Comme indication d'une faiblesse dans l'une des direction (probablement la direction longitudinale), l'utilisateur devra prendre en compte le rapport entre la largeur et la hauteur des sections des poteaux ainsi que les jonctions entre les ossatures longitudinales et transversales.

Dans la plupart des cas pratiques, les systèmes structuraux peuvent être décrits comme des ossatures en béton armé avec des remplissages de maçonnerie. Les interactions possible entre les ossatures en béton armé et des remplissages friables peuvent contribuer à rendre le système plus vulnérable. A cause de cette interaction, les poteaux et les nœuds doivent réagir à une sollicitation supplémentaire pour laquelle ils n'ont généralement pas été conçus. Si le remplissage présente des ouvertures ou d'autres discontinuités, il se produit un effet de «poteau court» qui aboutit à une dégradation par cisaillement des poteaux (fissures en diagonale avec flambement de l'armature des poteaux). Ce point est une indication supplémentaire d'un type de bâtiment vulnérable et, même dans les cas où l'on aurait supposé un niveau de conception parasismique cohérent avec la réglementation, ceci indique que le niveau final (réel) de conception parasismique a tendance à être plus faible que le niveau le plus vraisemblable.

Pour les ossatures en béton armé (mais également pour les ossatures à charpente métallique ou en bois), la conception parasismique est liée à un type particulier de modèle de dégâts. Des zones dommageables doivent être envisagées aux joints d'extrémité des poutres, mais aucun dégât ne doit se produire sur les poteaux ou aux droit de nœuds entre poutres et poteaux. Néanmoins, les dégâts se concentrent en général sur les poteaux. Si l'enrobage de béton s'est détachée, on doit vérifier l'écartement des armatures transversales doit être limité dans toutes les zones critiques. Ces détails donnent une idée des caractéristiques intrinsèques de conception et du niveau final (réel) de conception parasismique.

La vulnérabilité sismique des ossatures en béton armé dépend de tous les facteurs mentionnés précédemment: régularité, ductilité, qualité d'exécution. Les ossatures en béton armé sont particulièrement vulnérables en cas de changement de la rigidité latérale sur la hauteur du bâtiment. Un rez-de-chaussée peu résistant peut provoquer l'effondrement complet d'un immeuble. Ces types de bâtiments sont particulièrement vulnérables aux charges latérales. Si les bâtiments présentent des irrégularités dans le plan du rez-de-chaussée, les dégâts se concentreront dans des endroits éloignés du centre de rigidité, par exemple un certain nombre poteaux extérieures seront endommagées; ce point doit être considéré comme une indication d'effets de torsion et d'une ossature vulnérable. Tous ces effets et les schémas de dégâts

décrits ne doivent pas être négligés lors de l'attribution de la classe de vulnérabilité la plus appropriée.

2.2.3.2 Structures avec des murs en béton armé

Les structures de murs en béton armé sont caractérisées en général par des éléments verticaux supportant d'autres éléments et ayant une section allongée avec un rapport longueur sur épaisseur supérieur à 4 et/ou un confinement des sections partielles. Si deux ou plusieurs murs sont liés suivant un schéma régulier par des poutres d'accouplement, le système structural est appelé structure à murs couplés, où les linteaux doivent offrir une ductilité suffisante et sont conçues comme des sièges de dissipation d'énergie, conformément aux principes récents de conception parasismique. La vulnérabilité est affectée par de larges ouvertures ou des discontinuités des murs et par leur forme géométrique sur l'ensemble de la hauteur du bâtiment ainsi que par les transparences au rez-de-chaussée (création d'un étage moins résistant).

Les structures à murs en béton armé sont caractérisées par une rigidité supérieure à celle des structures avec ossature en béton armé. Si les murs ne sont pas disposés de manière régulière et sur toutes les faces externes du bâtiment, des effets de torsion peuvent contribuer à une défaillance partielle de l'ensemble du système. Les irrégularités du plan ou les décrochements internes doivent être considérés comme des défauts majeurs même dans le cas d'une vue externe régulière, défauts qui peuvent contribuer à des cas de vulnérabilité exceptionnelle.

Contrairement aux ossatures en béton armé, les murs en béton armé ont tendance à avoir une gamme plus réduite de classes de vulnérabilité. Selon le Tableau de vulnérabilité, les cas exceptionnels se limitent à la classe de vulnérabilité B (sans conception parasismique) et à la classe de vulnérabilité C pour les murs avec conception parasismique. Il existe plusieurs systèmes structuraux composés d'ossatures ayant un comportement à trois dimensions et de murs structuraux (systèmes murs-portiques) ou d'un système d'ossatures souples combinées à des murs concentrés près du centre ou disposés symétriquement dans l'une des directions du bâtiment (appelés système à noyau). Les systèmes à noyau sont considérés comme ayant un comportement moins ductile que les systèmes à ossatures, à murs ou les systèmes murs-portiques.

2.2.4 Structures en charpente métallique

Sous cette rubrique sont traités les bâtiments dont le système structural principal est réalisé par une armature en acier. D'après les évaluations macrosismiques existantes, on ne dispose jusqu'à présent que de peu de données sur les structures à ossature en charpente métallique, mais ces données indiquent un degré élevé de résistance aux séismes. Les dégâts structuraux

peuvent toutefois être masqués par des éléments non structuraux comme les bardages ou les façades rideaux ou par les adjonctions de béton (servant à améliorer la résistance à l'incendie) dans les systèmes composites. Dans de tels cas, les dégâts aux points de jonction de l'ossature ne sont visibles qu'après enlèvement de l'enrobage de béton.

La décision sur le niveau de résistance aux séismes et donc sur la classe de vulnérabilité la plus appropriée doit prendre en compte le système de contreventement ainsi que le type d'assemblage au droit des noeuds. La ductilité du système global est déterminée par le système offrant un contreventement (c'est-à-dire par le type d'ossature et le type de treillis). Pour les bâtiments à ossature en charpente métallique sans mesures parasismiques particulières, la classe de vulnérabilité probable est D. Les treillis en K offrent une résistance aux séismes plus faible et doivent être représentés par la classe de vulnérabilité C. Dans la plupart des cas, les ossatures résistantes suivant les trois directions, les ossatures avec des murs ou un noyau en béton armé résistant au cisaillement ou les ossatures en charpente métallique avec des treillis en X ou en V offrent une résistance latérale et garantissent un comportement ductile. La classe de vulnérabilité E doit être considérée comme la classe de vulnérabilité la plus vraisemblable. Dans le cas d'un niveau amélioré de conception parasismique, la classe de vulnérabilité F doit être considérée comme probable. Les classes de vulnérabilité probables pour les structures à ossature en charpente métallique ayant une résistance spatiale dépendent du niveau de conception parasismique (voir section 2.3.7).

2.2.5 Structures en bois

Les bâtiments en bois ne recevront qu'une brève explication car on ne les rencontre pas fréquemment dans les parties de l'Europe les plus sismiquement actives. La souplesse intrinsèque des constructions en bois leur procure un niveau élevé de résistance aux dégâts, bien que cette résistance puisse varier considérablement en fonction de l'état. Des assemblages de mauvaise qualité ou des bois pourris peuvent rendre une maison en bois vulnérable à l'effondrement; il est à noter que dans le cas du tremblement de terre de Kobé en 1995, les maisons en bois traditionnelles dans des quartiers de la ville ont eu un très mauvais comportement du fait de leur état médiocre. C'est un parfait exemple de la manière dont la vulnérabilité dépend d'autres facteurs que du type de construction du bâtiment.

Le système structural apportant la résistance latérale doit être étudié de manière approfondie. Si les poutres et les poteaux sont assemblées à l'aide de plaques cloutées (formées de gypse ou d'autres matériaux friables) ou si ces assemblages sont insuffisants, la structure sera défaillante si les raccords le sont. Ce type de structure en bois est en général représenté dans la classe de vulnérabilité C et doit être distingué des structures à ossature de bois qui résistent aux charges latérales provoquées par l'action sismique. La ductilité des structures en bois dépend de la ductilité des assemblages.

Certaines améliorations devront être réalisées à l'avenir sur la manière dont les structures en bois sont prise en compte dans l'échelle. Celle-ci devrait inclure une certaine subdivision des structures en bois en groupes distincts et traiter de manière détaillée les différents niveaux de dégâts dans les constructions en bois non décrites dans la définition des degrés de dégâts de l'échelle, de la même manière que ce qui a été fait pour les structures en maçonnerie et béton armé.

2.3 Facteurs affectant la vulnérabilité sismique des bâtiments

En dehors du type de construction, différents facteurs influent sur le niveau global de vulnérabilité d'une structure. Ces facteurs s'appliquent de manière générale à tous les types de structures, qu'elles soient calculées ou non, de même que les structures avec ou sans conception parasismique.

2.3.1 Qualité d'exécution

Il va de soi qu'un bâtiment bien construit sera plus résistant qu'un bâtiment mal construit, mais ce point n'avait pas été pris auparavant en considération dans les échelles d'intensité, sans doute en partie parce qu'il est difficile de définir les éléments qui constituent ce "bien" et ce "mal". Mieux vaut cependant accepter une distinction subjective de ces conditions plutôt que de les ignorer. L'utilisation de matériaux de bonne qualité et de bonnes techniques de construction conduira à un bâtiment bien plus apte à résister à la vibration qu'un bâtiment mal construit à l'aide de matériaux médiocres. Dans le cas des matériaux, la qualité du mortier est particulièrement importante et même une maçonnerie de moellons bruts peut fournir un bâtiment de solidité raisonnable si le mortier est de haute qualité. Une mauvaise technique peut signifier à la fois des négligences et des mesures de réduction des coûts, comme le défaut d'assemblage correct entre les différentes parties de la structure. Dans le cas de structures bien calculées et mal construites, il se peut que la structure finie ne réponde pas réellement aux dispositions appropriées du code de construction parasismique.

2.3.2 Etat d'entretien

Un bâtiment qui a fait l'objet d'un entretien correct se comportera conformément à la résistance attendue du fait des autres facteurs. Un bâtiment que l'on a laissé se dégrader pourrait être significativement moins résistant, au point de diminuer d'une unité sa classe de vulnérabilité. C'est ce que l'on observe dans le cas de bâtiments abandonnés ou délaissés ainsi que dans les cas présentant un manque évident d'entretien. Un cas tout particulier à mentionner est celui des bâtiments déjà endommagés (le plus souvent par un séisme précédent lorsqu'il s'agit d'une série de secousses). Ces bâtiments peuvent se comporter de

manière extrêmement médiocre de telle sorte qu'une réplique relativement faible peut provoquer une quantité de dégâts disproportionnée (notamment un effondrement) sur des bâtiments endommagés par la secousse principale.

On doit noter qu'un bâtiment peut apparaître bien entretenu car une attention a été portée uniquement à la préservation de son apparence esthétique, par exemple, plâtre récent et belles peintures ne signifient pas nécessairement que le système structural du bâtiment est également en bon état.

2.3.3 Régularité

Concernant la résistance au séisme, le bâtiment idéal serait un cube dans lequel toutes les variations internes de rigidité (comme les cages d'escalier) seraient disposées de manière symétrique. Comme de tels bâtiments seraient inconfortables du point de vue fonctionnel et déplorablement du point de vue esthétique, on peut s'attendre à des variations plus ou moins importantes par rapport à ce plan idéal de la plupart des bâtiments que l'on peut rencontrer. Plus on s'éloigne de la régularité ou de la symétrie, plus grande est la vulnérabilité du bâtiment à la secousse sismique, et il est souvent possible d'observer sur des bâtiments endommagés la manière dont les irrégularités ont clairement contribué aux dégâts (par exemple lors de l'effondrement d'étages transparents).

Dans le cadre des développements actuels de la réglementation (par exemple, Eurocode 8), les bâtiments calculés doivent être classifiés selon leur régularité géométrique sur la base à la fois de paramètres globaux (dimensions, rapports géométriques), et de variations globales et locales par rapport à un plan au sol régulier et à une forme verticale. Ces considérations s'appliquent de la même façon aux structures non calculées. La régularité doit être considérée globalement, c'est-à-dire qu'elle est plus qu'une simple symétrie externe en plan et en hauteur. La régularité au sens de cette échelle comprend à la fois les caractéristiques naturelles du bâtiment et, pour les structures calculées, les mesures prises pour garantir un comportement simple ou, plus modestement, contrôlé sous l'action sismique. Pour les structures calculées, on s'attend à ce que les mesures prises pour garantir la régularité correspondent aux règles de la conception parasismique.

Les irrégularités importantes sont faciles à identifier, par exemple des bâtiments avec un plan en L ou une forme similaire se rencontrent souvent et sont soumis à des effets de torsion qui peuvent accroître considérablement les dégâts subis. Il serait mal avisé de supposer qu'un bâtiment répond aux normes de régularité uniquement parce qu'il présente une symétrie dans ses dimensions extérieures. Même s'il y a une régularité en plan, des problèmes peuvent apparaître à cause d'asymétries notables dans la disposition d'éléments internes de rigidité différente. La position des cages d'ascenseur et des cages d'escalier est souvent importante de ce point de vue.

Il arrive fréquemment que l'un des étages d'un bâtiment (généralement l'étage inférieur) soit beaucoup plus faible que les autres, souvent avec une transparence partielle, avec des poteaux supportant les étages supérieurs mais pas de murs. Ces cas sont connus sous le nom d'étages transparents et ils sont fortement sujets à des effondrements. Les alignements continus de fenêtres sur la longueur d'un bâtiment peuvent introduire des effets similaires.

Dans certains cas, des bâtiments qui avaient auparavant un bon niveau de régularité peuvent être fragilisés par des modifications ultérieures. Par exemple, la conversion du rez-de-chaussée d'un bâtiment en garage ou centre commercial l'affaiblit (en créant un étage faible); la construction d'une extension rendra vraisemblablement le plan au sol plus irrégulier et introduira des irrégularités de rigidité et de période dans l'ensemble de la structure. D'anciens bâtiments de maçonnerie peuvent avoir subi des modifications importantes sur une longue période, ce qui conduit à des retraits d'étages de différents niveaux, à des fondations à différents niveaux sur une pente et ainsi de suite.

2.3.4 Ductilité

La ductilité est une mesure de la capacité d'un bâtiment à résister à des charges latérales dans un domaine post-élastique, c'est-à-dire en dissipant l'énergie du séisme et en créant des dégâts de manière contrôlée, largement répartie ou concentrée localement, selon le type de construction et de système structural. La ductilité peut être directement fonction du type de construction: les ossatures en charpente métallique bien construite présente une ductilité élevée et résiste donc bien à la secousse par rapport à des bâtiments de ductilité plus faible comme les maisons de briques. Dans les bâtiments conçus parasismiques, les paramètres du bâtiment déterminant ses caractéristiques dynamiques (rigidité et distribution des masses) sont maîtrisés et la qualité de la transformation et de la dissipation de l'énergie doit être assurée par l'interaction sol-structure, les fondations et les éléments structuraux, et en évitant les concentrations locales de dégradations.

2.3.5 Position

La position d'un bâtiment par rapport aux autres bâtiments de son voisinage peut avoir un effet sur son comportement au cours d'un tremblement de terre. Dans le cas des rangées de maisons d'un lotissement en ville, ce sont souvent les maisons situées à l'extrémité d'une rangée ou dans une position d'angle qui sont les plus gravement affectées. Un côté de la maison ancré à la voisine tandis que l'autre côté ne l'est pas, entraîne une irrégularité de la rigidité globale de la structure qui a tendance à aggraver les dégâts.

Des dégâts sévères peuvent se produire lorsque deux grands immeubles ayant des périodes propres distinctes sont situés trop près l'un de l'autre. Au cours d'un séisme, ils peuvent osciller à des fréquences différentes et se heurter, causant un effet de pilonnage. Ces dégâts ne sont pas une mesure de la violence de la secousse sismique et doivent être écartés lors de l'attribution d'une intensité.

2.3.6 Renforcement

Lorsque qu'une réhabilitation est envisagée pour modifier des bâtiments afin d'assurer un bon comportement à l'action sismique, il en résulte de nouveaux types de bâtiments «composites». Leurs performances peuvent être radicalement différentes de celles d'un bâtiment de base non modifié. Par exemple, si l'on prend des constructions anciennes en pierre tout venant et que l'on améliore les éléments horizontaux en remplaçant les planchers ou en insérant des éléments de liaisons, la performance peut être améliorée jusqu'à la classe B. Si en outre, on applique des injections de mortier ou d'époxy ou un chemisage de béton armé, les performances peuvent être améliorées et atteindre les classes attribuées aux bâtiments ayant une conception parasismique.

2.3.7 Conception parasismique

Il est impossible, pour les besoins d'une échelle macrosismique, de donner une classification complète des bâtiments calculés qui reflète les différences et les subtilités des codes parasismiques nationaux. Des corrélations entre les niveaux de résistance aux séismes selon les codes parasismiques en vigueur en Europe ou dans d'autres pays et les classes de vulnérabilité typiques mentionnées doivent être mise au point et elles exigent une discussion entre les spécialistes nationaux. Les fonctions de vulnérabilité pour les différents types de structures doivent être évaluées pour les structures calculées en fonction principalement du niveau de conception parasismique prévu (cohérent avec la réglementation). Ces niveaux peuvent varier en fonction des pays. Ils sont également non uniformes pour ce qui concerne le niveau et les objectifs des réglementations parasismiques nationales et peuvent changer avec le temps dans chacun des pays ou chacune des régions. La classe de vulnérabilité réelle sera attribuée en fonction du niveau final (réel) de conception parasismique qui peut être différent (même si cela ne représente pas la majorité des cas) du niveau conforme à la réglementation à cause d'autres facteurs.

2.3.7.1 Conception parasismique conforme à la réglementation

Si l'on suppose que les bâtiments dans une zone sismique "i" sont conçus et construits pour un dimensionnement sismique d'intensité (ou de mouvement du sol) correspondant aux

conditions du site et du sous-sol de la zone "i", les bâtiments calculés sont classés en fonction du niveau de conception parasismique intégré. La conception parasismique est régie par des codes sismiques nationaux.

Le niveau de conception parasismique peut être défini en fonction des paramètres de base du dimensionnement (intensité, mouvement maximal du sol, cisaillement à la base du bâtiment) qui sont en relation directe avec la zone sismique "i". Il est donc possible de prédire le niveau de conception parasismique conforme à la réglementation et à partir de celui-ci, d'évaluer le(s) type(s) de conception parasismique CPS-i des bâtiments calculés dans la zone à étudier en fonction de la zone sismique définie dans le code national de construction parasismique. On peut supposer que, pour ces bâtiments, le type CPS-i peut être spécifié, i étant une expression de l'intensité du séisme de conception prévue tout autant que le niveau de résistance sismique.

En règle générale, chaque région ou chaque ville est caractérisée par un seul type CPS-i; mais, pour l'attribution d'une intensité, il est nécessaire que l'information indiquant la distribution ou la position individuelle de ces bâtiments soit disponible. Une région ou une ville peut être caractérisée par différents types d'CPS-i lorsque l'on est en présence de bâtiments construits selon différentes réglementations sismiques.

Les trois types d'CPS-i peuvent être classés de la manière suivante:

Type CPS-L: Bâtiments calculés intégrant un niveau faible ou minimal de conception parasismique

Ce niveau se caractérise par la limitation des paramètres structuraux (et, dans certains cas, par une simplification de la méthode de calcul). En fonction de l'importance du bâtiment, il peut être permis d'ignorer certaines charges sismiques supplémentaires. Des mesures spéciales de conception détaillée (pour améliorer la ductilité) ne sont pas fréquentes dans ce type de bâtiment. Ce type est répandu dans des zones de sismicité faible ou modérée. (Généralement, les bâtiments de ce type sont conçus pour une intensité 7 ou un coefficient de cisaillement à la base de 2 à 4% de g.). Les bâtiments calculés intégrant (du fait de leur régularité et de la qualité de l'exécution) un niveau limité ou équivalent de conception parasismique sont comparables à ce type de conception parasismique. Ainsi, les structures en béton armé sans conception parasismique et les structures en béton armé de type CPS-L sont considérées comme appartenant à un seul groupe de bâtiments dans le Tableau de Vulnérabilité.

Type CPS-M: Bâtiments calculés intégrant un niveau moyen (amélioré) de conception parasismique

Ce niveau est caractérisé par le respect des règles de conception. Des dispositions spéciales de conception détaillée (pour améliorer la ductilité) sont mises en œuvre de manière partielle. On peut s'attendre à ce type de bâtiment dans des zones de sismicité moyenne à forte. (Géné-

ralement, les bâtiments de ce type sont conçus pour une intensité 8 ou un coefficient de cisaillement à la base (base shear) d'environ 5 - 7% de g.).

Type CPS-H: Bâtiments calculés intégrant un niveau élevé (qualifié) de conception parasismique

Ici, les charges sismiques sont calculées par des méthodes dynamiques. Des dispositions spéciales de conception détaillée sont mises en œuvre pour garantir un système ductile où l'énergie sismique est distribuée sur l'ensemble de la structure et dissipée essentiellement dans des articulations plastiques sans défaillance structurale. On peut s'attendre à ce type de bâtiments dans des zones de sismicité forte. (Généralement, les bâtiments de ce type sont conçus pour une intensité 9 ou un coefficient de cisaillement à la base (base shear) d'environ 8 - 12% de g.) Ce niveau n'est pas atteint ni couramment exigé dans les pays européens et il doit se caractériser par une amélioration de la ductilité des systèmes structuraux et des mécanismes de plastification contrôlés résultant de dispositions parasismiques particulières (capacity design).

Le niveau de conception parasismique devrait être relativement uniforme dans une région sismique pour laquelle on cherche à attribuer une intensité. Le niveau peut ne pas être uniforme lorsque les bâtiments dans la région sismique ont été conçus selon des réglementations différentes, par exemple, lorsqu'un ancien code a été mis à jour ou remplacé par un nouveau.

2.3.7.2 Importance des ouvrages

En ce qui concerne les évolutions de la réglementation, l'importance des ouvrages calculés doit être prise en compte car elle contribue aux différents niveaux de conception parasismique pour le même type de bâtiment. L'importance d'un bâtiment est déterminée par le nombre d'occupants ou de visiteurs, l'utilisation du bâtiment (ou les conséquences de l'interruption de son utilisation) ou par le danger pour le public ou pour l'environnement en cas de défaillance de l'ouvrage.

La classification de l'importance d'un ouvrage n'est pas harmonisée, et elle varie considérablement d'une réglementation parasismique européenne à l'autre; elle est liée à la définition des facteurs d'amplification des charges sismiques (facteurs d'importance). Dans certains cas, les bâtiments de la plus haute importance sont conçus pour des charges correspondant à une zone ou à une classe d'intensité supérieure. Les bâtiments de haute importance ou présentant un risque potentiel plus élevé doivent faire l'objet d'un traitement particulier du niveau de l'action sismique de projet. En règle générale, on doit faire l'hypothèse d'un niveau plus élevé de conception parasismique pour ce type de bâtiments.

2.3.7.3 Niveau final (réel) de conception parasismique et classe de vulnérabilité

Une fois déterminé le niveau conforme à la réglementation, il est nécessaire de trouver le niveau approprié (ou réel) de conception parasismique et de déterminer la classe de vulnérabilité. Ceci suppose la prise en compte du niveau de régularité ainsi que de la qualité ou de l'exécution des différents types d'ouvrages ou des systèmes structuraux, et la mise en œuvre des principes modernes de conception dans la zone étudiée. Il est en outre nécessaire de comparer les niveaux de conception des structures calculées dans la région sismique avec les caractéristiques idéalisées des types CPS-i exprimées en terme d'intensité de dimensionnement, ou à partir d'autres coefficients de conception relatifs à la zone. Il est probable que dans la majorité des cas, le niveau réel de conception parasismique sera le même que le niveau conforme à la réglementation; les structures spéciales (où le niveau sera plus élevé) et les cas où la réglementation n'a pas été correctement mise en œuvre (où le niveau sera plus faible) sont des exceptions.

L'intervalle de classes probables de vulnérabilité dans le Tableau de vulnérabilité est plus ou moins un indicateur du niveau de conception parasismique fourni. Les classes de vulnérabilité supérieures à C ou à D se limitent en pratique aux structures calculées avec un certain niveau de conception parasismique (ou à certaines structures en bois).

Sur cette base, on peut établir le niveau réel de conception parasismique dans l'intervalle prévu de l'échelle, de la manière suivante:

- Pour les bâtiments à ossature en béton armé de type CPS-L, les classes de vulnérabilité C à D sont probables, la classe C étant plus vraisemblable;
- Pour les bâtiments à ossature en béton armé de type CPS-M, les classes de vulnérabilité D à E sont probables, la classe D étant plus vraisemblable;
- Pour les bâtiments à ossature en béton armé de type CPS-H, les classes de vulnérabilité E à F sont probables, la classe E étant plus vraisemblable;
- Pour les structures à murs en béton armé de type CPS-L et à ossatures en charpente métallique (avec un comportement spatial), la classe de vulnérabilité D est probable;
- Pour les structures à murs en béton armé et à ossatures en charpente métallique (avec un comportement spatial) de type CPS-M, les classes de vulnérabilité D à E sont probables, la classe de vulnérabilité D étant la plus vraisemblable pour les structures à murs en béton armé et la classe de vulnérabilité E étant la plus vraisemblable pour les ossatures en charpente métallique.
- Pour les bâtiments à murs en béton armé et ossatures en charpente métallique (avec un comportement spatial) de type CPS-H, les classes de vulnérabilité E à F sont probables, la classe de vulnérabilité E étant la plus vraisemblable pour les structures à murs en béton armé et la classe de vulnérabilité F étant la plus vraisemblable pour les ossatures en charpente métallique.

Pour les bâtiments à ossature en béton armé sans conception parasismique les classes de vulnérabilité B à C sont probables, la classe C étant la plus vraisemblable. Pour les bâtiments à ossature en béton armé présentant des défauts sérieux (comme des étages faibles, des poteaux faibles, un manque d'éléments de raidissement comme des remplissages de briques ou des voiles en béton armé les classes de vulnérabilité B, voire A, peuvent être appropriées. Pour les bâtiments réguliers à ossature en béton armé sans conception parasismique mais intégrant un certain niveau de résistance latérale (due à un dimensionnement à la charge du vent ou à des vérifications de stabilité), la classe D peut être représentative des cas exceptionnels.

Pour les structures à murs en béton armé sans conception parasismique les classes de vulnérabilité C à D sont probables, la classe C étant la plus vraisemblable. Pour les structures à murs en béton armé présentant des défauts sérieux, la classe B peut être considérée comme un cas exceptionnel. On notera que les défauts ne conduisent pas à une diminution aussi importante de la classe de vulnérabilité que celle observée dans le cas des structures avec ossature en béton armé.

2.4 Attribution de la classe de vulnérabilité

Lors de l'évaluation de la classe de vulnérabilité d'une structure ou d'un groupe de structures, un examen du type de construction des bâtiments permet de trouver la ligne correcte dans le Tableau de vulnérabilité. La décision de la classe à affecter dépend de la mise en relation des caractéristiques décrites ci-dessus avec les symboles représentant l'intervalle possible des classes du Tableau de vulnérabilité.

Le cercle indique la classe la plus probable. Si le bâtiment ne présente pas de résistance ou de faiblesses particulières, c'est la classe qui doit être attribuée. Une ligne pleine représente l'intervalle des valeurs probables vers le haut et vers le bas. Si le bâtiment présente quelques résistances ou faiblesses il pourra être classé dans cet intervalle. Une ligne pointillée représente l'intervalle des cas extrêmes – de nombreuses robustesses (strenghts) ou faiblesses, des résistances particulièrement remarquables ou des faiblesses très graves permettent le classement d'un bâtiment dans cet intervalle.

Quelques exemples illustrent cette méthode.

- (i) Un bâtiment est en briques non renforcées avec des planchers en béton armé, un rez-de-chaussée transparent et une régularité et une construction de niveau moyens. La classe normale devrait être C, mais le bâtiment n'a rien pour compenser la faiblesse importante de l'étage transparent, et il peut être classé en B, ce qui le situe dans l'intervalle des classes probables de vulnérabilité pour ce type de bâtiment.

(ii) Un bâtiment de conception identique est en briques non renforcées uniquement. Le type de bâtiment est normalement de la classe B. La faiblesse de la transparence de l'étage n'est pas suffisante pour le rétrograder à la classe A car c'est la partie extrême de l'intervalle. Si le bâtiment est également en mauvais état, inoccupé et non entretenu depuis quelques années et s'il est très irrégulier à l'intérieur en plus de son rez-de-chaussée faible, cette combinaison d'inconvénients serait suffisante pour le ranger en classe A.

Il est fréquent que les bâtiments les plus faibles d'un groupe soient les premiers endommagés au cours d'un tremblement de terre. Toutefois, ceci n'est pas une bonne raison pour rétrograder tous les bâtiments d'une classe de vulnérabilité de manière automatique. Dans les cas où l'on dispose uniquement d'informations sur le type de bâtiments (comme par exemple dans la plupart des récits historiques, où même parfois cette information manque), on doit généralement attribuer la classe de vulnérabilité la plus probable et n'employer une classe différente que comme moyen de résoudre des situations qui sinon seraient anormales.

2.5 Remarques sur l'introduction de nouveaux types de bâtiments

Lorsque l'on utilise l'échelle en dehors de l'Europe ou dans des zones de l'Europe où il existe un type d'habitat local différent, il peut être nécessaire de traiter des types de bâtiments non couverts par le Tableau de vulnérabilité tel qu'il se présente. Les brèves directives suivantes donnent certaines indications sur la manière dont on peut procéder. Il est peu vraisemblable qu'il s'agisse d'une procédure sans difficulté et il vaut mieux qu'elle soit entreprise de manière contrôlée par un groupe d'experts.

L'objectif global consiste à comparer le nouveau type de bâtiment à ceux déjà couverts, et à essayer d'établir une équivalence. Si l'on considère que ce type est aussi solide, mais pas plus qu'une construction normale en briques, par exemple, on classera le type comme étant fondamentalement de la classe B. Si le type de bâtiment est tel que, compte tenu de sa ductilité intrinsèque, il ne se comporte jamais plus mal que les bâtiments en briques mais que dans certains cas où la construction est très bonne, il se comporte beaucoup mieux, on en conclura alors que le type de bâtiment devra être représenté sur le Tableau de vulnérabilité par un cercle sous B et par une ligne s'étendant vers C mais pas vers A.

La question est de savoir la manière dont l'équivalence doit être établie. L'idéal est que, dans une zone où le nouveau type de bâtiment coexiste avec un type de bâtiment déjà présent dans le Tableau de vulnérabilité, les résultats d'une étude des dégâts puissent être utilisés pour établir une classification objective. Par exemple, dans une ville, de nombreux bâtiments de briques ont subi des dégâts de degré 2, mais seuls quelques bâtiments du nouveau type ont subi des dégâts de cette ampleur. L'intensité est évaluée à 7, ce qui indique que le nouveau type de bâtiment est de classe C.

Si cette méthode n'est pas possible car la construction du nouveau type de bâtiment est la seule représentée dans la zone, il peut être possible d'évaluer des intensités de 6 à 8 à partir d'autres diagnostics, puis en prenant en considération la proportion de bâtiments endommagés de déterminer la classe de vulnérabilité correcte.

Au cas où cette méthode ne conviendrait pas, on peut estimer une équivalence sur des bases théoriques à partir d'une comparaison de la ductilité et de la résistance, en prenant en compte tant les éléments horizontaux que verticaux.

Il faut faire attention aux types de bâtiments qui peuvent être considérés comme des constructions «composites». Les bâtiments en bois avec un plaquage extérieur en briques en fournissent un exemple. Dans ce cas, si le plaquage n'est pas bien lié à la structure, il peut être très faible et facilement endommagé tandis que l'ossature en bois reste ductile et n'est pas endommagée. De tels bâtiments peuvent facilement subir des dégâts non structuraux tout en ayant une résistance élevée à un effondrement de la structure. Des bâtiments avec un renforcement particulier, comme ceux dont il a été question auparavant, peuvent également présenter des cas très complexes.

3 Evaluation des intensités à partir des documents historiques

3.1 *Données historiques et documentaires*

Le terme de “données historiques” signifie généralement la description des effets d’un tremblement de terre à partir de sources historiques, c’est-à-dire de sources écrites avant la période où l’on disposait d’instruments (avant 1900). On doit toutefois insister sur le fait que des données macrosismiques importantes de cette nature sont encore disponibles et utilisées, pour des séismes du siècle actuel et même pour des événements récents.

Il est donc pratique de considérer les sources historiques et les documents écrits contemporains comme des “données documentaires”. Ce terme est utilisé ici pour faire la distinction entre les descriptions des séismes à des fins non sismologiques et les données des questionnaires rassemblées sous les directives de sismologues. Ces données doivent être récupérées et interprétées selon des méthodes historiques, qu’elles aient trait aux années 1890 ou 1980.

La collecte et le traitement des sources documentaires demandent du soin et une compétence, comme le montrent nombre d’études récentes. En particulier, le chercheur qui traite les sources documentaires doit être attentif au fait que les informations lui parviennent souvent après un itinéraire long et compliqué. Il est donc très important de commencer par prendre en considération le contexte des données au sens à la fois historique, géographique et littéraire.

On doit porter une attention particulière aux points suivants:

- (i) La valeur de la source, en prenant en compte les motivations de la rédaction et le contexte dans lequel elle a été réalisée. Quelle est la sensibilité de la source aux séismes et aux autres événements naturels? (Par exemple, il est plus vraisemblable de trouver la trace d’un tremblement de terre de faible intensité dans un journal intime que dans les comptes rendus d’un conseil municipal.)
- (ii) Le contexte du récit peut contenir des informations significatives qu’il ne faut pas ignorer. Par exemple, un livre peut décrire brièvement les effets d’un tremblement de terre dans un chapitre, mais, à d’autres endroits, des détails viennent corriger ces informations. Si la relation sur le tremblement de terre est prise isolément, les informations qui le certifie et peuvent être essentielles seront ainsi perdues. La manière de relater les faits est également importante et les informations ne doivent pas se limiter à un résumé qui élimine les nuances du texte d’origine.
- (iii) La localisation spatio-temporelle des informations. Ce point est essentiel: un traitement peu attentif peut conduire dans ce cas à une duplication de tremblements de terre, à des données correspondant à un séisme attribuées à un autre événement, ou au bon séisme mais à un endroit erroné. Dans certains cas, les données ne peuvent pas être

renseignées (endroit, date ou des deux); dans de tels cas, ce point doit clairement être indiqué lorsque les données sont cartographiées.

Ces courts paragraphes n'ont pas pour objectif de fournir un guide exhaustif des pratiques de l'enquête historique sur les tremblements de terre, sujet largement discuté dans les publications.

3.2 Types de bâtiments (classes de vulnérabilité) dans les documents historiques

Les récits historiques décrivent souvent les dégâts aux monuments particuliers (châteaux, églises, palais, tours, piliers, etc.). Ils font moins fréquemment état des effets sur les bâtiments ordinaires qui sont les seuls utilisables dans le cadre de l'échelle. Le premier type de données sera discuté ci-dessous en section 3.5, car ces bâtiments posent des problèmes spécifiques.

Pour ce qui est des bâtiments ordinaires, les classes de vulnérabilité des maisons traditionnelles varient dans la plupart des cas entre A et B, voire jusqu'à C et D (structures en bois). Les publications générales donnent très peu d'informations sur les types de bâtiments en Europe jusqu'au XVII^{ème} siècle, si ce n'est à l'évidence que les gens utilisaient les matériaux le plus facilement disponibles et que plus le propriétaire était riche et mieux la maison était construite et entretenue en général. Mais au Moyen-Age, il est certain que la plupart des maisons dans de nombreuses parties de l'Europe étaient construites en bois, et la transition vers la brique ou la pierre a été longue et parfois seulement partielle. Sans informations détaillées, il est très difficile de se prononcer avec certitude sur la résistance de ces structures: il n'est pas sûr, par exemple, que les structures en bois médiévales aient été aussi résistantes que celles que nous connaissons de nos jours.

On peut suggérer un certain nombre de méthodes pour résoudre ce problème – par exemple, si l'on croit que le type d'habitat dans un endroit particulier, à une date donnée, était de la classe de vulnérabilité A ou B, il est possible d'attribuer une intensité en faisant l'hypothèse d'une classe de vulnérabilité A, d'attribuer une autre intensité en faisant l'hypothèse d'une classe de vulnérabilité B et d'utiliser ensuite l'intervalle de valeurs fourni par les deux attributions. Il peut également être possible de prendre en considération d'autres facteurs culturels: s'il existe des preuves que les structures étaient plus faibles dans les zones rurales pauvres que dans les villes plus riches, il peut être raisonnable de supposer une proportion plus élevée de la classe de vulnérabilité A dans les hameaux, et de la classe de vulnérabilité B dans les villes. La notion selon laquelle les premières constructions à être endommagées sont vraisemblablement celles qui sont dans le plus mauvais état peut également servir à résoudre certaines situations (même s'il ne faut pas l'utiliser de manière aveugle et automatique).

3.3 Nombre total de bâtiments

Pour attribuer une intensité en fonction du pourcentage de maisons endommagées, il est nécessaire de connaître non seulement le nombre de maisons affectées, mais également celui de maisons qui n'ont subi aucuns dégâts. Les sources qui décrivent les dégâts ne comportent pas systématiquement (ou souvent) ce type d'information. Toutefois, on peut souvent obtenir avec un certain succès des informations sur le nombre total de bâtiments dans une localité à partir d'autres types de sources: études démographiques, travaux topographiques, données de recensement, etc. Dans certains cas, on peut trouver sans difficulté des chiffres fiables. Il est plus souvent nécessaire de réaliser des extrapolations en fonction des données démographiques, grâce à différentes hypothèses et corrélations. Ces chiffres comporteront une certaine part d'incertitude qui doit être prise en compte lors de l'attribution de l'intensité, conduisant souvent à des estimations sans doute incertaines, mais néanmoins utiles.

Une complication supplémentaire provient du fait que les chiffres disponibles peuvent correspondre au territoire entourant une petite ville, y compris certains villages, hameaux et maisons isolées, même si le texte suggère que c'est la ville elle-même qui est décrite. Les descriptions des dégâts peuvent subir le même inconvénient. Que l'on puisse ou non résoudre le problème dans des cas particuliers, on doit reconnaître que cette situation peut conduire à des erreurs d'interprétation de ± 1 degré. En pareils cas, il vaut mieux se cantonner à un intervalle d'intensités comme 7 - 8, etc.

3.4 Qualité des descriptions

Les documents relatant les effets des tremblements de terre, selon leur nature, se concentrent souvent sur les effets les plus remarquables, à l'exclusion de tous les autres détails. Le silence d'une source sur des effets mineurs peut être dû à un certain nombre de facteurs et ne peut être utilisé comme une preuve de leur inexistence. De même, des hypothèses inverses ne sont pas valables; par exemple, il est incorrect de faire des extrapolations du genre "si le clocher a été détruit, alors la plupart des autres bâtiments ont dû subir également au moins des dégâts mineurs". La seule manière d'améliorer les données consiste à poursuivre l'investigation (mais parfois sans succès). Des informations produites par la même source ou par une autre source quelques jours, quelques semaines, voire des mois après le tremblement de terre, peuvent être éloquentes et fournir soit de nouvelles données sur les dégâts, soit des preuves indirectes des effets. Par exemple, des preuves que la vie, après un tremblement de terre, ait continué dans la localité comme d'habitude – les gens vivent et travaillent dans leurs maisons, le conseil municipal se réunit, les services religieux ont lieu – ces éléments peuvent être considérés comme contradictoires avec une description de dégâts laissant supposer une intensité 9.

Si les données restent insuffisantes une fois que toutes les pistes ont été épuisées, il faut alors prendre les choses comme elles sont et évaluer l'intensité avec un intervalle d'incertitude qui représente de manière adéquate la pauvreté des données. Une bonne procédure consiste à conserver une trace de la manière dont les décisions ont été prises.

3.5 Dégâts subis par les monuments

Les dégâts subis par les monuments sont généralement mieux représentés dans les sources documentaires que les dommages subis par les maisons ordinaires, et ce, pour deux bonnes raisons:

- (i) Ces bâtiments sont plus importants pour les rédacteurs à cause de leur valeur sociale, économique, symbolique ou culturelle.

- (ii) Leur complexité structurale et non structurale est telle qu'ils peuvent être plus vraisemblablement endommagés que les bâtiments ordinaires, même s'ils ont des chances d'être mieux construits.

C'est le cas par exemple lorsque de petites décorations architecturales sont descellées dans les églises lors d'une secousse sismique qui est en général d'un niveau inférieur à celui à partir duquel des dégâts se produisent. Il faut veiller à ne pas surestimer l'intensité à cause d'effets de cette nature.

Les monuments sont généralement uniques, ou seuls quelques bâtiments de cette nature se trouvent dans un même endroit. Il est donc impossible d'utiliser les données ayant trait à ces bâtiments d'une manière statistique comme le requiert l'échelle. Celles-ci doivent donc être manipulées avec précaution, en complément d'autres preuves (s'il en existe). Si l'on ne dispose que de données de cette nature, on doit utiliser des intervalles de valeurs d'intensité pour indiquer l'incertitude de l'interprétation.

Dans certains cas, lorsque sont fournies de nombreuses précisions sur les dégâts subis par un bâtiment encore debout et qui peut être examiné, ou pour lequel il existe des descriptions détaillées, on peut tirer des conclusions utiles sur la secousse sismique en réalisant une analyse particulière.

4 Utilisation des échelles d'intensité

Traditionnellement, l'utilisation des échelles d'intensité se fait surtout au moyen d'une enquête à l'aide de questionnaires et d'une visite sur le terrain, réalisées immédiatement à la suite du tremblement de terre. Avec l'intérêt croissant pour les tremblements de terre anciens depuis le milieu des années 70, on a de plus en plus employé les échelles d'intensité comme des outils appliqués à des documents écrits de nature extrêmement hétérogène. En outre, les ingénieurs et les planificateurs se tournent de plus en plus fréquemment vers l'intensité, notamment pour définir les outils d'urbanisme prévisionnel servant à estimer les pertes lors de futurs séismes. Ce document a pour but de discuter des utilisations générales de l'échelle EMS-98 et non de servir de manuel complet de macrosismologie. Néanmoins, il convient de souligner certains points qui peuvent s'avérer utiles dans le contexte de ce document.

4.1 Intensités observées et intensités extrapolées

L'intensité telle qu'elle est décrite dans ces directives désigne un paramètre dérivé des données d'observation. Il est nécessaire de mentionner que parfois, les valeurs d'intensité que l'on peut rencontrer ne sont pas évaluées à partir d'observations en un endroit donné, mais sont des extrapolations ou des interpolations entre des données observées en d'autres endroits. C'est dans les catalogues que l'on trouve le plus souvent ces intensités, les compilateurs ayant extrapolé une intensité présumée à l'épicentre du séisme à partir de valeurs observées.

La discussion sur ces pratiques dépasse le cadre de ces directives, mais il serait utile que toutes les valeurs d'intensité qui ne sont pas dérivées directement d'observations réelles soient clairement distinguées comme telles.

4.2 Corrélations avec les paramètres du mouvement du sol

On a effectué de nombreuses tentatives pour corrélérer l'intensité avec des paramètres physiques spécifiques du mouvement du sol, en particulier avec le pic d'accélération du sol, et certaines échelles anciennes incluaient des valeurs d'équivalence de pic d'accélération du sol. Bien qu'il soit indéniable que les effets observés dont sont déduites les valeurs de l'intensité soient la conséquence des paramètres du mouvement réel du sol, la relation entre eux est complexe et ne se réduit pas à une simple corrélation: il a été aussi prouvé que l'accélération maximale du sol n'est pas le paramètre unique le plus important ayant un effet sur l'intensité. Les corrélations entre l'intensité et le pic d'accélération du sol présentent en général une dispersion extrêmement importante, au point qu'elle limite la signification des valeurs prédites (même si l'on peut réduire la dispersion en utilisant les accélérations spectrales).

Pour cette raison, on n'a pas cherché à inclure un tableau comparatif des intensités et des paramètres de mouvement du sol, comme l'accélération. Ce point fait encore l'objet de recherches actives.

4.4 Corrélation avec d'autres échelles

L'idéal serait de ne pas convertir les valeurs d'une échelle d'intensité dans une autre échelle d'intensité à l'aide d'une formule ou d'un tableau de correspondance, même si plusieurs tableaux de cette nature ont été publiés. Il faudrait plutôt réévaluer les données à l'aide de l'échelle dans laquelle les résultats doivent être exprimés. C'est en pratique souvent difficile, voire impossible, et on finit par utiliser jusqu'à un certain point, des facteurs de conversion.

L'expérience montre que la comparaison des différentes échelles d'intensité est loin d'être évidente, car les valeurs varient plus d'un utilisateur à un autre employant la même échelle qu'entre échelles différentes lorsque l'utilisateur reste le même. Ceci est particulièrement vrai pour les principales échelles à 12 degrés à cause de leur grande similitude de présentation. Si l'on essaie de faire une évaluation comparative, soit on utilisera les échelles de manière complètement littérale et on mettra en évidence de légères différences, auquel cas l'échelle n'est pas utilisée comme elle l'est normalement dans la pratique, et le test ne sera pas valable; soit, on utilisera les échelles d'une manière plus naturelle et plus souple, auquel cas les différences disparaîtront dans l'interprétation.

La plupart du temps, il n'y a pas de difficultés à convertir des valeurs MSK et des valeurs EMS à l'aide du système $MSK = EMS$. La différence la plus probable est que des valeurs imprécises comme 4 - 5 MSK ou 6 - 7 MSK seront plus vraisemblablement évaluées désormais comme 4 EMS et 6 EMS. D'autres divergences peuvent résulter d'interprétations littérales ou restrictives de l'échelle MSK. Par exemple, dans une lecture littérale du texte de l'échelle MSK, le seuil des dégâts se trouve à l'intensité 6. L'expérience pratique a montré que des dégâts peuvent parfois se produire dans des cas où toutes les autres données suggèrent des intensités plus faibles, et des utilisateurs ayant remarqué ce fait ont pu attribuer des intensités inférieures à 6 MSK, même lorsque des dégâts étaient mentionnés. D'autres utilisateurs n'utilisant pas cette tolérance peuvent trouver que des intensités évaluées à 6 MSK sont susceptibles de devenir dans certains cas 5 EMS.

4.5 Qualité de l'évaluation de l'intensité et échantillons de données

Un point important, mais souvent négligé, est le fait que les données macrosismiques disponibles ne sont jamais, ou très rarement, une description complète des effets qui se sont produits au cours d'un tremblement de terre. Lorsqu'une ville comptant 20 000 bâtiments est touchée par un séisme, chacun d'eux est affecté d'une manière ou d'une autre. L'utilisateur

peut disposer des données provenant seulement de quelques dizaines de bâtiments pour fonder son évaluation. En d'autres termes, ces données sont un échantillon des effets observés sur l'ensemble des bâtiments. Il est donc légitime de se poser la question suivante: l'échantillon est-il réellement représentatif de l'ensemble des bâtiments ou ne l'est-il pas? Plus le nombre de comptes rendus est faible en valeurs absolues, plus l'erreur est vraisemblablement en proportion du nombre d'observateurs relatant un effet donné sur l'ensemble de la ville. Si les données avaient été recueillies soigneusement grâce à des méthodes d'échantillonnage au hasard, il serait alors possible de calculer statistiquement l'erreur sur l'échantillon. Malheureusement, ce n'est généralement pas le cas. Il est recommandé aux personnes impliquées dans le recueil et le traitement des informations macrosismiques de se former elles-mêmes aux méthodologies des questionnaires et d'échantillonnage qui ont été mises au point dans le domaine des sciences sociales.

L'utilisateur peut ne pas être à même d'améliorer la qualité des données, mais il doit au moins en avoir une idée et il doit pouvoir la communiquer; soit à l'aide d'indications de qualité, par l'inclusion des tailles d'échantillons (par exemple, nombre de questionnaires), soit en utilisant des systèmes comme une police de caractère plus petite pour indiquer des valeurs déduites d'échantillons de qualité médiocre.

Le problème sera vraisemblablement moins grave et se produira rarement dans les cas où l'utilisateur a un contrôle direct sur le recueil des données grâce à une étude sur le terrain. Il peut être grave lorsque les données sont de seconde ou de troisième main. Une remarque hâtive d'un journaliste sur la gravité des effets dans une ville peut être fondée sur une enquête superficielle; le récit d'un observateur peut être repris comme une vérité générale alors qu'en réalité, il n'en est rien. Il s'agit là d'un problème particulier lié à l'étude des tremblements de terre historiques où l'utilisateur est dépendant des rares données qui ont eu la chance de nous parvenir.

Un exemple permet d'illustrer ce point. Supposons que la seule information provenant d'une certaine ville est que de nombreuses personnes ont éprouvé des difficultés à rester debout. Cet élément est un diagnostic d'une intensité 7, mais en l'absence de confirmation par d'autres diagnostics, l'attribution d'une intensité 7 est-elle justifiée? Il est difficile de définir des règles précises concernant ce que doivent être et ne pas être des preuves suffisantes sur lesquelles fonder une évaluation d'intensité. Une méthode utile consiste, lorsque les données sont médiocres, à marquer les évaluations fondées sur ces données médiocres à l'aide d'un 7?, ou utiliser une police de caractère plus petite ou toute indication similaire. Inversement, un code de qualité peut être attribué à chaque évaluation d'intensité.

4.5 *Qualité et incertitude*

Il est fréquent que l'on ne puisse pas décider avec certitude d'un degré d'intensité donné. Dans de tels cas, il est nécessaire de décider si l'on peut faire une quelconque évaluation approximative de l'intensité ou si les données sont tellement contradictoires qu'il vaut mieux laisser le problème en suspens.

Dans les cas où les données correspondent et même dépassent les descriptions relatives à l'intensité 6, mais ne sont visiblement pas compatibles avec celles de l'intensité 7, la meilleure méthode consiste à considérer l'intensité avec la valeur la plus faible. Il est recommandé de conserver le caractère entier de l'échelle et de ne pas utiliser des formes comme "6,5", "6 ½" ou "6+". Il ne paraît pas évident qu'une meilleure résolution de l'échelle ne soit en pratique nécessaire et réalisable. Si l'on pense qu'il est nécessaire pour une raison quelconque de présenter des détails supplémentaires, il faut les présenter de manière descriptive.

Exemple: un village comporte 180 maisons (de maçonnerie) dont 30 sont évaluées de vulnérabilité A et le reste de vulnérabilité B. Parmi les maisons de classe A, 15 ont subi des dégâts de degré 1, 10 des dégâts de degré 2 et 5 n'ont pas été endommagées. Parmi les maisons de classe B, 10 ont subi des dégâts de degré 1, 5 des dégâts de degré 2 et les autres maisons n'ont pas été endommagées. Si l'on considère uniquement les dégâts, ils sont plus que suffisants pour justifier une intensité de 6, mais visiblement insuffisants pour justifier une intensité de 7 (quelques B2 seulement, aucun A3). La meilleure description de l'intensité correspond à la valeur 6.

Il peut également exister des cas où les données peuvent aussi bien être interprétées comme (par exemple) 6 ou 7 (mais visiblement pas 8). Dans de tels cas, on écrira l'intensité sous la forme 6 - 7, signifiant soit 6, soit 7; cela n'implique aucune valeur intermédiaire quelconque. Le fait d'exprimer une intensité sous la forme d'un intervalle de valeurs est maintenant une pratique courante, en particulier pour les données historiques qui sont souvent insuffisantes pour permettre une meilleure résolution. Des intervalles plus grands que ceux s'étendant sur deux degrés de l'échelle sont possibles; il est possible d'écrire 6 - 8, ce qui ne signifie pas 7. Exemple: un document indique "dans notre ville, les cheminées se sont écroulées, mais aucune maison n'a été sérieusement endommagée". Dans ce récit limité, on ne trouve aucune indication sur la proportion des cheminées qui se sont écroulées et l'intensité peut donc être 6 ou 7; l'indication sans ambiguïté de l'absence de dégâts sérieux indique que l'intensité n'était pas égale à 8. L'intensité est 6 - 7.

Les estimations vagues comme <6 (moins de 6) ou >7 (plus de 7) sont acceptables quand il n'est pas possible d'obtenir une meilleure précision. Exemple: un document affirme, "il y a eu beaucoup de dégâts à Cortona". En l'absence d'autres informations, l'intensité est >6. En

théorie, on peut considérer que >6 peut être interprété comme 6 - 12, mais on peut généralement déduire une certaine limite supérieure pour des raisons pratiques.

Un autre problème est celui des ambiguïtés dans les données; par exemple, les effets sur les humains peuvent suggérer une intensité de 6 seulement, tandis que les effets sur les structures suggèrent une intensité 8 ou vice-versa. Si le problème apparaît constamment, il peut indiquer la présence d'un facteur culturel ou régional important (personnes plus facilement effrayées, techniques de construction locales très médiocres) qui doit être pris en considération. Lors de l'application de l'échelle, si des cas particuliers de ce type se présentent et que l'on ne peut discerner une certaine forme de cohérence, il est alors nécessaire d'exprimer l'intensité sous la forme d'un intervalle comme discuté ci-dessus.

Il y aura toujours des cas où les données sont si pauvres en détails ou si contradictoires ou incroyables que l'on ne pourra pas faire d'évaluation. On adoptera alors une certaine convention pour indiquer une observation, par exemple un point ou un R pour "ressenti" et ne faire aucune évaluation. S'il y a lieu, une note sera jointe.

Exemple: une chronique déclare, "ce tremblement de terre a été ressenti également à Ravenne, Ancone et Pérouse". On ne peut attribuer aucune intensité en ces endroits, mais il faut noter que le tremblement de terre a été ressenti à l'aide d'un symbole approprié (comme un "R" ou un point). Avec ces informations limitées, on ne sait même pas s'il y a eu des dégâts ou non.

On peut faire une distinction entre ce qui peut être appelé "certitude" et "qualité" (ces deux mots étant utilisés ici dans un sens particulier). Les cas où les données ne permettent pas une attribution précise d'intensité et où l'on doit utiliser des valeurs comme 6 - 7 ou >6 , sont des cas où la valeur de l'intensité est incertaine. Il n'y a pas de doute sur le fait que l'intensité attribuée est le meilleur choix possible compte tenu des données, mais celles-ci ne sont pas suffisamment complètes pour permettre de fixer un degré d'intensité unique. Les cas où les données correspondent exactement à l'échelle (ils sont si peu nombreux qu'ils ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble des observations) sont des cas que l'on désignera ici comme des cas de qualité médiocre. Un exemple est fourni par un compte rendu qui déclarerait seulement "les fenêtres ont tremblé à Manchester"; cet élément suggère une intensité de 4 et aucune autre valeur, mais en fonction de ce qui a été observé par ailleurs et de la fréquence de ces observations, l'intensité réelle peut se trouver n'importe où dans l'intervalle 3 - 5. Dans ce type de cas, on n'a à partir des données qu'une seule valeur de l'intensité, mais cette valeur pourrait très bien ne pas être la valeur correcte et si l'on disposait de données plus nombreuses, la valeur pourrait changer. Il est possible que des données soient à la fois incertaines et de mauvaise qualité. Il est recommandé de marquer d'une certaine manière les valeurs qui sont de qualité médiocre s'il faut malgré tout les utiliser.

4.6 Courbes de dégâts

Les anciennes échelles d'intensité traitaient en général des dégâts d'une manière limitée en indiquant qu'à partir d'une certaine intensité, les bâtiments subissaient un certain type de dégâts, d'où une uniformité dans la distribution des dégâts. Ce point était tout juste atténué par le commentaire de la préface de Richter en 1956 dans sa description de l'échelle de Mercalli modifiée, selon lequel un effet pouvait être observé sous une forme atténuée ou, dans quelques cas seulement, à un degré d'intensité inférieur à celui à partir duquel il était supposé se produire. L'introduction dans l'échelle MSK d'une méthode à la fois qualitative et quantitative des dégâts a donc constitué un progrès majeur; l'échelle EMS-98 suit cette direction et la développe. Les aspects qualitatifs traitent des types de bâtiments et de leur vulnérabilité; les aspects quantitatifs traitent de la probabilité d'occurrence des différents degrés de dégâts.

En règle générale, pour les degrés d'intensité auxquels les dégâts apparaissent, on observe une progression linéaire des dégâts. Si l'étendue des dégâts est la même, pour chaque augmentation d'une classe de la vulnérabilité, l'attribution de l'intensité résultante croît également d'un degré. Ces schémas d'augmentation des dégâts en fonction de l'accroissement de l'intensité sont déduits des distributions statistiques observées des dégâts structuraux et non structuraux. Bien que l'on puisse rencontrer dans certains cas exceptionnels des distributions de dégâts irrégulières, on doit s'attendre avec une forte probabilité à ce que toute distribution de dégâts que l'on peut rencontrer sur le terrain pour une intensité particulière corresponde à celle décrite ici.

Dans un cas idéalisé, on peut considérer que la distribution des dégâts des bâtiments de même vulnérabilité, soumis à la même intensité, est une distribution normale autour de la moyenne des dégâts du degré. Les degrés de dégâts donnés dans l'échelle EMS-98 sont une représentation discrète d'un continuum de degrés possibles de dégâts; cette discrétisation a été réalisée pour faciliter la discrimination sur le terrain. Si l'on pouvait tracer une courbe de dégâts plus continue, elle devrait représenter une distribution normale et les diagnostics de dégâts mentionnés dans l'échelle représenteraient des points d'échantillonnage sur cette courbe. On ne doit pas oublier qu'il ne s'agit que de points d'échantillonnage et que l'on peut également observer des intersections d'autres degrés de dégâts sur la courbe. Si, pour un certain degré d'intensité, on a défini que seuls quelques bâtiments d'une certaine classe de vulnérabilité subissent des dégâts de degré 3 tandis que beaucoup subissent des dégâts de degré 2, on ne doit pas oublier que l'on peut rencontrer également des observations à l'extrémité inférieure de la distribution; dans ce cas, on peut s'attendre à ce que de nombreux bâtiments subissent des dégâts de degré 1 et à ce que quelques-uns ne soient pas endommagés.

De même que les degrés de dégâts définis représentent des points discrets sur une fonction de dégâts continue qui couvre toutes les graduations, de l'absence de dégâts à l'effondrement complet, de même les degrés de l'échelle d'intensité représente des paliers discernables dans

une fonction hypothétique, plus continue, de la secousse. On peut donc imaginer de même, dans un cas idéalisé, que lorsque l'intensité augmente, la distribution des dégâts est translatée vers des points de plus en plus élevés de la fonction de dégâts tout en gardant l'essentiel de sa forme.

Toutefois, comme la fonction de dégâts présente des limites supérieure et inférieure, la forme de la distribution des dégâts doit changer lorsque l'on se rapproche de ces bornes. Ainsi, aux faibles intensités, on observe une déformation de la courbe normale aux degrés de faibles dégâts, car l'essentiel de la distribution s'accumule au point représentant l'absence de dégâts, les degrés de dégâts négatifs étant impossibles. Et de même, pour les intensités élevées, on observerait de manière idéale une déformation de la courbe normale aux degrés de dégâts élevés, car l'essentiel de la distribution s'accumule au point représentant l'effondrement complet, point qui ne peut pas être dépassé.

Cette remarque est illustrée par le diagramme de la figure 4 - 1 sur laquelle sont représentées trois fonctions de dégâts théoriques: le type "a" pour les faibles intensités (généralement pour une intensité de 6), où la fonction présente une probabilité monotone décroissante des dégâts

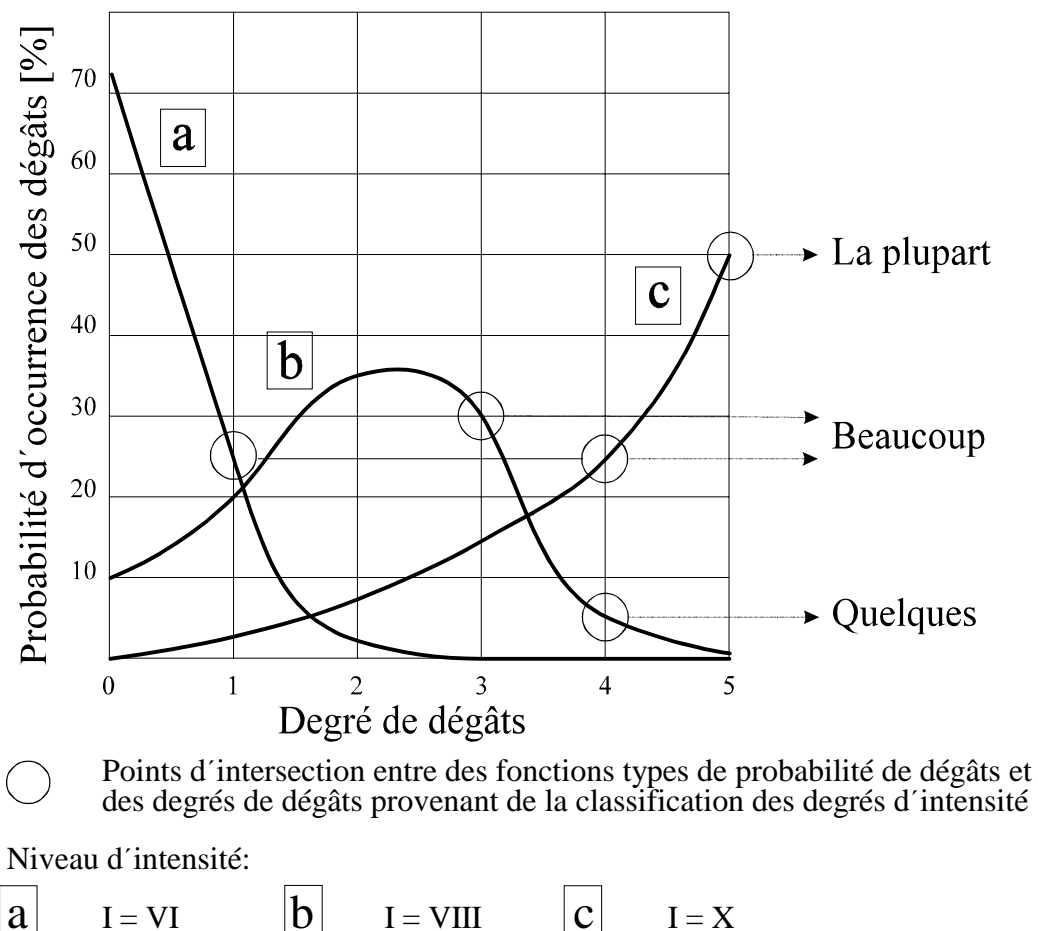


Figure 4 -1 Relation entre les fréquences de distribution type de degrés de dégâts pour différents degrés d'intensité et les définitions utilisées dans l'échelle d'intensité présente

aux degrés plus élevés, le type “b” étant le cas de base où l’on peut observer une distribution normale des probabilités centrée sur un degré moyen de dégâts et le type “c”, qui représente une probabilité monotone croissante avec le degré de dégâts, typique des intensités plus élevées (comme l’intensité 10). Sur la figure 4 - 1, les courbes réelles représentées sont caractéristiques d’observations sur le terrain pour des types de bâtiments particuliers plutôt que pour des classes de vulnérabilité, mais le principe reste le même.

La définition ou la description des degrés d’intensité dans l’échelle sont obtenues en choisissant un ou deux points d’intersection particuliers sur les courbes correspondant à chacune des classes de vulnérabilité, points où la courbe coupe un degré de dégâts donné. Ainsi, par exemple, pour l’intensité 8 et la classe de vulnérabilité C, les points d’intersection de la fonction de dégâts sont ceux correspondant aux degrés de dégâts 2 et 3; on ne dit rien sur la probabilité des dégâts de degré 1 ou sur l’absence de dégâts, mais ils existent et sont impliqués par la figure 4 - 1. Les points mentionnés correspondent généralement au degré de dégâts le plus élevé ou aux degrés auxquels on peut s’attendre (“décision de dégâts maximum”); ce sont les cas qui seront vraisemblablement les mieux relatés ou les mieux examinés.

Les résultats statistiques des études de dégâts peuvent fournir la clé permettant d’introduire de nouveaux types de bâtiments et d’établir une meilleure corrélation entre des types de bâtiments particuliers et les classes de vulnérabilité les plus vraisemblables ou les plus probables.

4.7 Limitation des échelles à douze degrés

On peut remarquer incidemment que bien que l’échelle EMS-98 et d’autres échelles comme la MSK, la plupart des versions MM, etc. aient douze degrés, elle ont tendance à fonctionner en pratique comme des échelles à huit degrés. L’intensité 1 signifie “non ressenti” et l’intensité 2 est si faible qu’elle n’est généralement pas relatée et elle est donc rarement utilisée. A l’autre extrémité de l’échelle, l’intensité 12 est définie comme les effets maximaux concevables non nécessairement observables lors d’un tremblement de terre. Les intensités 10 et 11 sont difficiles à distinguer dans la pratique et l’intensité 11 est donc rarement utilisée. Ainsi, «l’intervalle pratique» de toutes ces échelles a tendance généralement à s’étendre de l’intensité 3 à l’intensité 10.

4.8 L’hypothétique degré “manquant” de l’échelle MSK

L’un des problèmes pris en compte par le Groupe de travail pour la révision de l’échelle d’intensité MSK était le problème de la perception de l’absence d’un degré entre les intensités 6 et 7 MSK. La question a été étudiée de manière détaillée et on a conclu qu’il s’agissait d’une illusion. On peut très simplement démontrer qu’il en est ainsi. Si l’échelle MSK était

non linéaire à cause de l'absence d'un degré entre les intensités 6 et 7, ce point apparaîtrait très clairement lors d'une étude des cartes isoséistes. Toutes ces cartes présenteraient un écart spatial disproportionné entre les courbes isoséistes 6 et 7 MSK, par rapport à l'écart entre les courbes 5 et 6 MSK et les courbes 7 et 8 MSK. En trente ans d'utilisation de l'échelle MSK, personne n'a mis en évidence un problème de cette nature. L'échelle, telle qu'elle est définie, doit donc bien être linéaire.

Pourquoi cette illusion persiste-t-elle? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de revenir encore une fois sur la nature de l'intensité et des échelles d'intensité. Si l'on considère la secousse du sol comme un paramètre physique, ou plutôt, comme une combinaison de paramètres physiques (accélération, vitesse, déplacement et durée), on peut imaginer qu'il existe un continuum complet de valeurs possibles, allant de l'absence de secousse au mouvement sismique maximum crédible. Comme l'intensité est d'une certaine manière une équivalence de ces mesures combinées de secousses du sol, elle possède également un intervalle continu hypothétique allant de l'absence d'effets aux effets maximaux possibles.

Toutefois, l'intensité ne peut pas être définie comme un paramètre continu. Pour des questions de robustesse, elle est discrétisée selon des valeurs entières. Cela signifie l'attribution de valeurs au minimum et au maximum et la définition d'un certain nombre de points espacés régulièrement entre ces deux extrémités, où l'on puisse décrire clairement la gravité des effets. Il est évident que la nature ne suit pas les descriptions dans l'échelle d'intensité sous la forme de paliers; il serait absurde d'imaginer que dans la réalité, les effets au voisinage de l'épicentre devraient suivre exactement la description d'une intensité 8 (par exemple) sur une certaine distance, puis décroîtraient de manière brusque pour passer à la description de l'intensité 7, et ainsi de suite.

Le nombre de divisions et leurs positions doivent répondre à deux critères: d'abord, elles doivent être régulièrement espacées et, en second lieu, se distinguer l'une de l'autre dans la pratique. L'expérience sur l'ensemble du XX^{ième} siècle semble montrer que le nombre optimum de degrés que l'on peut discriminer en pratique tout en conservant un espacement régulier est de douze. Certains chercheurs dans des circonstances particulières, notamment lorsqu'ils travaillent sur des données historiques, ont trouvé qu'un nombre moins important de degrés serait optimal, mais dans la plupart des études modernes, les échelles à douze degrés ont prouvé qu'elles fonctionnaient bien.

Toutefois, il ne faut pas en conclure que l'on ne pourrait pas distinguer des divisions intermédiaires, en particulier dans les cas où interviennent certains effets de seuil, par exemple, lorsque certains diagnostics apparaissent pour la première fois, au lieu de simplement voir augmenter la fréquence de leurs apparitions. C'est le cas entre les intensités 6 et 7, car l'on peut facilement décrire un degré intermédiaire qui serait plus fort que la description de l'intensité 6 et moins que la description de l'intensité 7. Cependant, le fait qu'il soit plus facile de définir un tel degré intermédiaire dans cette partie de l'échelle que dans une

autre partie n'est d'aucune utilité. Il n'y a aucun intérêt à avoir un degré supplémentaire qui ne soit pas linéaire par rapport au reste de l'échelle.

Pour des raisons pratiques, les douze degrés d'intensité devraient suffire et il est recommandé aux utilisateurs de ne pas perdre de temps à essayer d'interpoler des valeurs intermédiaires, même dans les cas où il serait possible de faire une discrimination entre ces paliers. La pratique la plus simple et la plus robuste consiste à arrondir vers la valeur inférieure toutes les intensités "fractionnaires" pour obtenir une valeur entière correcte de l'intensité. Ainsi, les effets qui pourraient correspondre à un degré intermédiaire entre 6 et 7 doivent se voir attribuer une valeur d'intensité 6 EMS.

5 Exemples illustrant la classification des dégâts selon les types de bâtiments

Les exemples de dégâts aux bâtiments dus séismes sont classés selon les différents types de structures (cf. le Tableau de vulnérabilité de l'EMS-98) et le degré des dégâts (de 1 à 5) qu'ils ont subis (cf. la Classification des dégâts de l'EMS-98).

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en briques crues	Est Kazakhstan 1990 / Saisan			●		



Commentaire:

Les fissures larges et étendues sur tous les murs suggèrent des dégâts de degré 3.

Figure 5 - 1

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en briques crues	Carpates 1986 / Moldavie, Leovo				●	



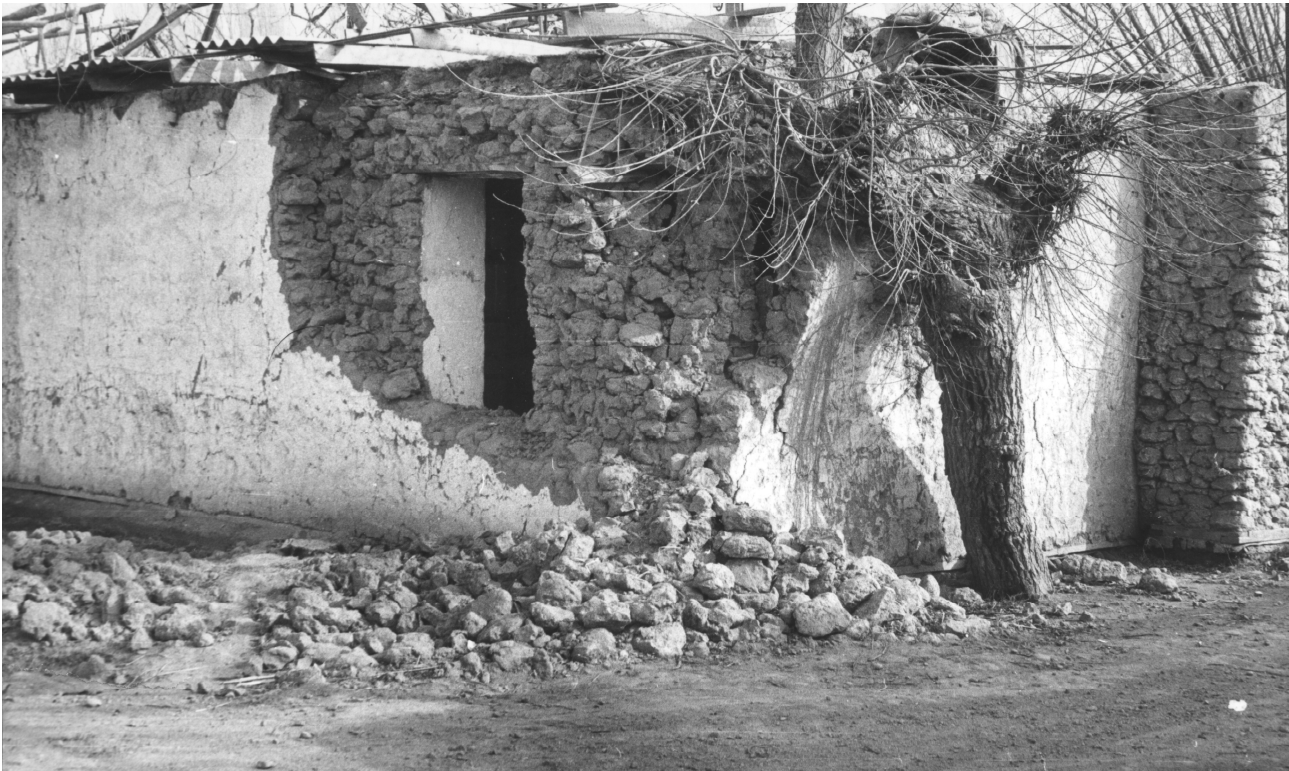
Commentaire :

La perte de continuité entre les murs extérieurs et la défaillance partielle de la partie inférieure de l'angle gauche suggèrent des dégâts de degré 4 (défaillance grave des murs).

La partie droite du bâtiment ne semble pas avoir subi de dégâts sérieux et est visiblement en meilleur état. La classification finale doit prendre en considération les raisons de cette différence.

Figure 5 - 2

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en briques crues	Tadjikistan 1985 / Kairakkoum				●	



Commentaire:

Cet exemple montre des défaillances sérieuses des murs, considérées comme des dégâts de degré 4.

Figure 5 - 3

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en moellons bruts	Nord Péloponnèse, Grèce 1995 / Aegion				●	



Commentaire:

La défaillance sérieuse des murs dans cet exemple indique des dégâts de degré 4. La vulnérabilité est affectée par la qualité médiocre du mortier et l'absence d'efficacité des éléments en béton de cette construction.

Figure 5 - 4

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en moellons bruts (dans un mortier très faible)	Campanie-Basilicate, Italie 1980 / Balvano					
						●



Commentaire:

Les poutres du plancher ont cédé ainsi que la plupart des murs. Dégâts structuraux très graves correspondant à des dégâts de degré 5.

Figure 5 - 5

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en pierres brutes	Grisons, Suisse 1991 / Vaz		●			



Commentaire:

La longue fissure dans le mur est suffisamment grande pour constituer un dégât structural léger. Les dégâts sont considérés comme étant de degré 2.

Figure 5 - 6

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en pierres brutes	Monténégro, Yougoslavie 1979			●		



Commentaire:

L'élément mural central de la partie supérieure qui a cédé est un mur pignon et non un mur supportant le toit. Il s'agit là d'un dégât non structural. Les dégâts doivent être classifiés comme non structuraux graves de degré 3.

Figure 5 - 7

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en pierres brutes	Monténégro, Yougoslavie 1979				●	



Commentaire:

Une partie des murs porteurs a cédé, causant un effondrement partiel du toit et des poutres des planchers. Il s'agit de dégâts structuraux graves, de degré 4.

Figure 5 - 8

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non Renforcée	Bohème e NO - Vogtland 1985, République tchèque / Skalná		●			

Commentaire:

Bien qu'aucun dégât structural ne soit visible de l'extérieur du bâtiment, on peut voir à l'intérieur des fissures qui se sont produites aux raccords mur-plancher, ce qui constitue des dégâts structuraux légers. Des morceaux assez importants de plâtres sont tombés de l'extérieur et du plâtre s'est également détaché des cloisons intérieures. Ces dégâts sont de degré 2.



Figure 5 - 9

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée	Roermond, Pays Bas, 1992 / Heinsberg		●			



Commentaire:

Plusieurs cheminées ont été endommagées et les tuiles du toit se sont détachées. On n'a pas observé de fissures importantes et étendues dans la plupart des murs et les dégâts ont donc été évalués de degré 2.

Remarque: la cheminée sur la gauche de l'image a été endommagée par la différence de comportement des bâtiments adjacents lors de la secousse. Des parties de la cheminée cassée ont heurté le toit et délogé des tuiles; les dégâts des tuiles sont donc un effet secondaire et ne sont pas causés directement par la secousse sismique.

Figure 5 - 10

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée	Jura Souabe, 1978 Allemagne / Albstadt					
			●			



Commentaire:

De nombreuses fissures verticales sont apparues à la suite de décalages entre les murs. Il s'agit de dégâts structuraux légers de degré 2.

Figure 5 - 11

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée	Correggio, Italie 1996 / Bagnolo (Reggio Emilia)		●			



Commentaire:

Si l'on regarde les murs extérieurs, on peut voir de nombreuses fissures dans le remplissage de briques, indiquant des dégâts de degré 2. Il faut également inspecter l'intérieur du bâtiment pour confirmer cette évaluation du degré des dégâts.

Figure 5 - 12

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée	Frioul, Italie 1976 / Gemona (Udine)			●		



Commentaire:

Il existe de nombreuses fissures diagonales dans la plupart des murs, mais elles ne sont pas si graves et les murs n'ont pas cédé. Dans ce cas, les dégâts sont de degré 3.

Remarque: La différence du degré de classification des dégâts par rapport à la figure suivante.

Figure 5 - 13

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée avec des planchers en béton armé	Frioul, Italie 1976 / Braulins (Udine)				●	



Commentaire:

Les grandes fissures diagonales dans les murs et la perte de continuité entre les murs externes indiquent des dégâts structuraux graves. Ces dégâts sont de degré 4.

Figure 5 - 14

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie non renforcée avec des planchers en béton armé	Nord Péloponnèse, Grèce 1995 / Aegion			●		



Commentaire:

Les fissures dans les murs extérieurs sont larges et étendues, mais elles ne pénètrent pas toutes dans la totalité de l'épaisseur du mur. Il s'agit de dégâts structuraux modérés et de dégâts de degré 3.

Figure 5 - 15

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Ossature en béton armé	Mexico 1985			●		



Commentaire:

Ce bâtiment en béton armé a subi des fissures dans les poteaux et les cloisons de remplissage avec chute de morceaux de plâtre; dans certains cas, les remplissages de briques ont partiellement cédé. Les dégâts structuraux (des poteaux) sont modérés et les dégâts non structuraux (des remplissages) sont graves, ce qui constitue des dégâts de degré 3.

Figure 5 - 16

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Ossature en béton armé	Irpinia-Basilicata, Italie 1987 / Sant' Angelo dei Lombardi				●	



Commentaire:

De nombreux murs de remplissage extérieurs ont cédé entièrement, ce qui constitue des dégâts non structuraux très graves. Dans certains cas, il y a eu des dégâts graves dans les raccords entre poutres et poteaux. Il s'agit de dégâts de degré 4.

Figure 5 - 17

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Ossature en béton armé	Nord Péloponnèse, Grèce 1995 / Aegion					●



Commentaire:

Le rez-de-chaussée s'est effondré complètement. Les dégâts sont de degré 5.



Figure 5 - 18

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
Ossature en béton armé	Nord Péloponnèse, Grèce 1995 / Aegion	1	2	3	4	5
						●



Commentaire:

La partie médiane du bâtiment s'est effondrée complètement; les dégâts sont de degré 5.

Figure 5 - 19

TYPE OF STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
Ossature en béton armé	Mexico 1985	1	2	3	4	5
					●	



Commentaire:

Ce bâtiment a subi un effondrement partiel de la partie supérieure. Bien que des étages supérieurs aient cédé, aucune partie du bâtiment ne s'est effondrée entièrement jusqu'au niveau du sol et les dégâts ne sont que de degré 4.

Figure 5 - 20

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Ossature en béton armé	Spitak, Arménie 1988 / Leninakan					
						●



Commentaire:

Il s'agit évidemment de dégâts structuraux très graves et d'un effondrement presque complet et donc de dégâts de degré 5.

Remarque: cette structure à ossature en béton armé avec un certain degré de conception parasismique a souffert d'un assemblage (nœuds) insuffisant entre les poutres et les poteaux. Ce bâtiment est un exemple type où l'on doit attribuer une classe de vulnérabilité basse, dans ce cas B, ce qui représente une classe exceptionnellement faible pour ce type de structure.

Figure 5 - 21

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Murs en béton armé	Great Hanshin, Japon 1995 / Kobe					
						●



Commentaire:

Le rez-de-chaussée s'est effondré entièrement, les dégâts sont de degré 5.

Figure 5 - 22

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Ossature en charpente métallique	Great Hanshin, Japon, 1995 / Kobe				●	



Commentaire:

L'un des étages supérieurs de ce bâtiment s'est effondré et il y a une flexion latérale des poteaux; il s'agit de dégâts structuraux graves. Certaines des façades rideaux ont cédé par suite de défaillances au niveau des raccords. Les dégâts sont évalués de degré 4.

Figure 5 - 24

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
Ossature en bois	Great Hanshin, Japon, 1995 / Kobe	1	2	3	4	5
					●	



Commentaire:

Le bâtiment de gauche a subi des dégâts importants au niveau des raccords de la charpente du bâtiment. Les dégâts doivent être évalués au degré 4.

Remarque: A cause de la faiblesse du système de structure au rez-de-chaussée (étage transparent), l'ensemble du bâtiment s'est décalé vers la droite. Le bâtiment voisin a fourni un support latéral, et de ce fait, l'effondrement n'a pas été complet. C'est une bonne illustration de l'effet que peut avoir la position d'un bâtiment par rapport aux autres bâtiments.

Figure 5 - 25

Références des photographies

Figures 5 - 1, 5 - 2, 5 - 3 par E. T. Kenjebaev et A. S. Taubaev (Almaty);

Figures 5 - 5, 5 - 7, 5 - 8, 5 - 16, 5 - 17, 5 - 20, 5 - 21 par H. Tiedemann (Compagnie Suisse de Réassurance, Zürich);

Figures 5 - 4, 5 - 6, 5 - 15, 5 - 18, 5 - 19, 5 - 22, 5 - 23, 5 - 24, 5 - 25 par Th. Wenk (Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich);

Figures 5 - 13, 5 - 14 par D. Molin (Servizio Sismico Nazionale, Rome);

Figures 5 - 12 par A. Tertulliani (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome);

Figures 5 - 9, 5 - 10 par G. Grünthal (GeoForschungsZentrum Potsdam);

Figures 5 - 11 par Landesstelle für Bautechnik Baden Württemberg.

6 Exemples d'attribution d'intensités

Exemple 1 – A partir de données documentaires

Les deux descriptions suivantes sont celles des effets du séisme du 20 juillet 1564 à La Bollène, Roquebillière et Belvédère, dans l'arrière pays niçois (Alpes Maritimes, France).

La relation suivante a été écrite par un notaire de Nice, un certain Lubonis; le texte original a été perdu et il n'est connu qu'à travers la transcription réalisée par Scaliero, un historien local du XVIII^e siècle, qui déclare que ce texte était annexé à un protocole notarié de 1564:

"De admirabili hora et horrendo terremotu in comitatu Niciense facto. Anno ipsi millesimo quingentesimo [quinguagesimo supprimé] sexagesimo quarto indictione septima et die iovis vigesima iulii circa unam horam noctis fuit quidam terremotus in Comitatu Niciense absque tamen aliquo damno veruntamen tota nocte per illius discursum sepius iterato ipso terremotu in vale Lantusie qui adeo infremuit et impetum fecit ut locus Bolene omnino devastatus et diruptus remansit ad quod omnes parietes domorum dirupte sunt et duo partes ex tribus personarum eiusdem loci mortui sunt et fere alia tertia pars remansit vulnerata in locis rocabigliera et de bello vedere fere alia pro dimidia remansit dirupta et devastata adeo quod in loco Rocabigliera mortui sunt viginti due et fere sexaginta vulnerati in loci de bello vedere mortui sunt quinquaginta et totidem vulnerati

a fol. 79 dicto, del prottocolo di Gio. Lubonis del 1564."

Le second récit est une histoire de la Provence de Caesar Nostradamus, le fils aîné du célèbre Michel; ces sources contiennent un compte-rendu laissé sur "un rouleau écrit en nissard par quelqu'un de la région de Nice qui passait à Salon [Salon de Provence, où Nostradamus a passé la dernière partie de sa vie] au moment du tremblement de terre".

"En ce mesme temps [1564] passa par nostre ville de Sallon, un qui se disoit de ces quartiers là, lequel racomptant ces tristes choses et ces tant estranges prodiges, laissa un roolle en sa langue naturelle et Nissarde qui est comme un vieil Provençal des villes et chasteaux ruynez: ... La Boullene entierement et de fond en comble ruynee deux cens cinquante morts, et quatorze blessés".

Analyse

Ce récit est typique des documents que l'on doit traiter pour les anciens tremblements de terre historiques. Le nombre de détails est extrêmement limité, à la fois en ce qui concerne les dégâts et les types de maisons. On pourrait conclure d'un examen superficiel que l'échelle EM est moins adaptée que les autres échelles lorsqu'il manque des informations détaillées sur les bâtiments. Ce n'est pas le cas; d'autres échelles font des hypothèses cachées sur les types

de bâtiments qui réduisent les options offertes à l'utilisateur, ou bien utilisent des classifications larges qui n'offrent qu'une faible résolution.

Si l'on prend le cas de Bollène, l'information se réduit à l'affirmation suivante: "tous les murs des maisons se sont écroulés". Les questions que l'on doit se poser sont: (a) quelle était la classe de vulnérabilité des bâtiments; (b) quel était le degré réel et la distribution des dégâts et, simultanément, (c) dans quelle mesure le compte rendu est-il exagéré? Prenons les questions dans l'ordre inverse: l'expérience montre qu'un certain degré d'exagération est fréquent dans les descriptions historiques des dégâts des tremblements de terre et que moins l'on dispose de détails et plus ceux-ci sont vraisemblablement imprécis. Les exagérations sont de deux ordres. Les quantités peuvent être exagérées: "tout" signifie plus vraisemblablement "la plupart". Les degrés peuvent être exagérés: "écroulé" signifie souvent "gravement endommagé". L'interprétation probable de "tous les murs des maisons se sont écroulés" est donc que la plupart des bâtiments ont subi des dégâts de degré 4 ou 5, certains pouvant même être moins endommagés. Si l'on passe à la vulnérabilité, on peut s'attendre à un mélange des classes A et B, d'après ce que l'on sait également des bâtiments historiques dans cette région. A supposer que la distribution exacte de dégâts était que de nombreux bâtiments ont subi des dégâts de degré 4, alors si tous les bâtiments étaient de classe A, nous attribuerions une intensité 8 et, s'ils étaient de classe B, une intensité 9. Ceci nous fournit un intervalle de valeurs où peut se trouver l'intensité dans le cas le plus probable d'un mélange des classes A et B. A moins d'avoir de bonnes raisons de supposer que la grande majorité des bâtiments était d'une classe plutôt que d'une autre, la conclusion logique est une affectation 8 - 9. Dans ce cas, nous avons une incertitude complémentaire sur l'étendue des dégâts, avec des interprétations crédibles allant de «beaucoup de bâtiments ont subis des dégâts de degré 4 et quelques-uns de degré 5» jusqu'à «la plupart des bâtiments ont subi des dégâts de degré 4 et beaucoup ont subi des dégâts de degré 5». La conjugaison des deux incertitudes fournit un intervalle crédible de valeurs d'intensité de 8 - 10 (On remarquera que dans l'échelle, lorsque l'on utilise "beaucoup de degré 5", "la plupart de degré 4" n'est pas mentionné explicitement, mais ce point est une conséquence et peut être utilisé.)

Dans le cas de Roquebillière et de Belvédère "la moitié des maisons ont été gravement endommagées". Ici, l'interprétation de la distribution des dégâts comme "la plupart de degré 4, beaucoup de degré 5" ne tient plus. L'interprétation "Beaucoup de degré 4, quelques-unes de degré 5" est encore crédible et "beaucoup de degré 3, quelques-unes de degré 4" peut aussi être prise en considération, mais est moins bien approprié. Avec une vulnérabilité allant de nouveau de A à B, on obtient un intervalle d'intensité de 7 - 9, mais 8 - 9 est plus probable.

Exemple 2 – A partir de données documentaires

Les deux descriptions suivantes sont celles des effets d'un tremblement de terre ayant eu lieu le 7 septembre 1801 à Comrie en Ecosse. Toutes deux sont extraites de journaux d'Edim-

bourg de l'époque. Edimbourg était alors l'endroit le plus proche où paraissaient des journaux. La distance de Comrie à Edimbourg est d'environ 75 km. L'heure du tremblement de terre était 6 heures du matin environ.

Le récit suivant a été rédigé par un observateur à Comrie le 9 septembre, deux jours après le tremblement de terre. Il fut publié dans le journal "Edinburgh Advertiser" (15 septembre 1801, p. 174):

1. "The... shock... was very great, and alarming beyond expression... Slates fell from some houses, and many loose bodies tumbled down with great precipitation. Sonorous bodies were dashed on each other, and rang loudly, such as bottles, glasses, etc. Several large stones and fragments of rocks fell down the sides of the mountains. Pieces of stone dykes fell, and one bank of earth slid from its place. If the shock had had a little more impetus, it is probable, several frail houses would have thrown down; but, in the kindness of Providence, no farther harm hath been done than what is above stated. "

Le second récit a également été rédigé à Comrie le 9 septembre et il fut publié dans le journal "Edinburgh Evening Courant" (14 septembre 1801, p. 3):

2. ... the noise and shock ... were instantaneous; all those persons who were in bed were terrified that their houses were tumbling down about their ears, and many here and in the neighbourhood jumped out as quickly as possible - its duration might be about five or six seconds, and during all that time the floors, beds, and window shutters shook violently, and the roofs creaked and strained at a great rate. The horses that were grazing seemed much frightened and to listen with their ears pricked up; the cows also that were housed appeared, from their lowing, to be very uneasy, and all the dogs and other animals gave signs of fear. A shepherd, a few miles to the westward, had just separated a flock of cattle, but as soon as the earth began to tremble they all crowded together in a moment.»

Commentaires

Ces deux descriptions sont assez utiles et contiennent plus d'informations qu'il n'en est généralement donné pour les effets dans un petit village (la population en 1801 était de 1500 habitants environ) pour un tremblement de terre modéré à cette époque.

Disons tout d'abord un mot sur le type des bâtiments locaux, qui devaient être en majorité des maisons de pierre (généralement d'un seul étage) avec des toits de charpente en bois recouverts d'ardoises. Ils peuvent être considérés comme des structures de la classe de vulnérabilité B. La résistance de ces bâtiments était vraisemblablement assez bonne lorsqu'ils étaient entretenus.

On obtient généralement une première indication sur le degré d'intensité en examinant les dégâts. Ici, les dégâts sont évidemment légers et ne sont pas mentionnés du tout par le second rédacteur. Le principal effet observé a été des chutes d'ardoises pour certaines des maisons.

C'est du point de vue technique un dégât de degré 3, mais comme il n'existe aucune preuve d'autres types de dégâts de degré 3 (sur les cheminées ou les murs), il est vraisemblable que les ardoises qui sont tombées étaient mal fixées. Il n'est fait aucune mention de fissures dans le plâtre, mais c'est souvent le cas (a) parce que ces fissures ne sont pas observables de l'extérieur du bâtiment (b) elles peuvent n'être remarquées que plus tard par le propriétaire de la maison, en particulier lorsqu'il existe d'autres fissures préexistantes. L'absence de mention de dégâts des plâtres n'est donc pas très importante. L'absence de mention de dégâts des cheminées, qui sont des éléments bien visibles, est beaucoup plus significative, en particulier lorsque le premier rédacteur déclare spécifiquement qu'il ne s'est pas produit d'autres dégâts que ceux qu'il a décrits. Le fait que certaines maisons très faibles ne se soient pas écroulées est également mentionné explicitement.

La première conclusion que l'on peut tirer à l'examen des dégâts est que l'intensité est au moins de 5, mais pas plus de 6. Pour une intensité de 7, il faudrait disposer de plus de preuves du fait que de nombreuses maisons ont été endommagées, en particulier les cheminées. Ce n'est pas le cas. Les «roches filoniennes» mentionnées ici sont des murs de clôture. Ce type de structure n'est pas traité en tant que tel dans l'échelle EMS, mais l'expérience montre que ce type de dégâts commence à l'intensité 5.

Si l'on considère les effets sur les personnes, les deux récits s'accordent sur le fait que la secousse était très effrayante. Les personnes étaient explicitement terrifiées à l'idée que leur maison était en train de s'écrouler. De nombreuses personnes sont sorties de leur lit – on ne dit pas qu'elles se sont précipitées dehors, mais cela semble vraisemblable et, dans ce cas, la description correspond au mieux avec la description “de nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors” de l'intensité 6. Il est clair que le tremblement de terre a été ressenti à l'extérieur (par exemple, par un berger) mais pas par de nombreuses personnes. Les effets sur les personnes confirment une gamme possible de 5 - 6, et 6 est la valeur la plus vraisemblable.

Le premier récit mentionne que de nombreux objets ont été renversés violemment. Ceci ressemble plus à “de petits objets de stabilité normale peuvent tomber” (intensité 6) qu'à “de petits objets dont le centre de gravité est élevé et/ou des objets qui sont mal placés peuvent se déplacer ou tomber” (intensité 5) et même à “des objets tombent des étagères en grand nombre” (intensité 7).

Les bouteilles qui s'entrechoquent, les volets qui battent, etc. sont des effets qui commencent à une intensité de 4 et continuent à être observés à des intensités plus élevées. Il est clair ici que l'intensité de la secousse est d'au moins 5.

Le second rédacteur mentionne des effets sur des animaux. Les vaches à l'intérieur étaient mal à l'aise (intensité 5), mais les chevaux et le bétail à l'extérieur étaient aussi inquiets (intensité 6).

L'accumulation de tous ces éléments indique qu'une intensité 6 est la meilleure évaluation de l'intensité du séisme du 7 septembre 1801 à Comrie. On peut trouver certaines confirmations dans les données sismogéologiques. Le premier rédacteur mentionne des effets sur des pentes – de grosses pierres et fragments de roches sont tombés des montagnes et une bande de terrain a subi un léger glissement. Le premier effet correspond plus à un mouvement de pentes d'éboulis qu'à des chutes de pierres, mais les deux effets commencent avec une intensité de 5 et sont typiques des intensités 6 - 7 (6 - 8 dans le cas des chutes de pierres). Le second effet est associé à des intensités 5 - 7, mais comme il est apparu dans un cas isolé, ce n'est pas un indicateur très solide. Ces effets confirment le jugement déduit de l'examen des autres données.

Exemple 3 – A partir de données des questionnaires

Les données suivantes sont tirées de questionnaires relatant les effets du tremblement de terre du 26 décembre 1979 de Carlisle (magnitude 4,8 ML), au Nord de l'Angleterre. Le questionnaire a été publié par les journaux locaux; les lecteurs des journaux étaient invités à le remplir et à le renvoyer. Les techniques d'échantillonnage statistiques n'ont donc pas été employées lors du recueil des données et il n'est pas garanti que les pourcentages calculés à partir de l'échantillon soient un indicateur fiable de la population totale. Le questionnaire n'a pas été rédigé en fonction de l'échelle EM et, certaines questions ne reflètent pas exactement le texte de l'échelle. Dans cet exemple, on montre comment fonctionne l'échelle avec des données qui ne sont pas optimales.

Pour cette étude, la ville de Carlisle a été divisée en trois zones. On utilise dans cet exemple les données provenant de la partie ouest de la ville. Le nombre de questionnaires reçus pour cette partie de la ville était de 222. L'heure du tremblement de terre était 3 heures 57; pratiquement tous les observateurs étaient à l'intérieur et couchés. Il n'existe aucun témoignage émanant de personnes se trouvant à l'extérieur, car les rues étaient désertes à cette heure de la nuit, le matin suivant Noël.

Question: Qu'avez-vous ressenti?

87% ont ressenti une certaine forme de vibration; 19% l'ont décrite comme forte (bien qu'il ne leur ait pas particulièrement été demandé de la qualifier); 1% l'ont décrite comme faible; 11% n'ont ressenti aucune secousse.

Commentaire: la vibration a été observée de manière générale et même parfois forte.

Question: Qu'est-ce que les autres personnes au voisinage ont ressenti ou entendu?

73% ont déclaré que leurs voisins avaient ressenti ou entendu le tremblement de terre; 12% déclarent qu'ils ne l'ont ni ressenti ni entendu et le reste ne sait pas ou n'a pas répondu à cette question.

Commentaire: le tremblement de terre a été ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des habitations.

Question: Avez-vous été effrayé ou alarmé?

69% répondent par l'affirmative – 18% par la négative. Trois personnes déclarent qu'elles se sont précipitées dehors, mais cette information n'était pas demandée par le questionnaire et donc un nombre plus important de personnes a pu le faire.

Commentaire: de nombreuses personnes ou la plupart des personnes ont été alarmées ou effrayées et au moins quelques-unes d'entre elles ont essayé de se précipiter dehors. Jusqu'à présent, l'intensité semble être dans l'intervalle 5 - 7.

Question: Est-ce que les portes ou les fenêtres ont tremblé?

54 % ont répondu par l'affirmative, 26 % par la négative.

Question: Est-ce que quelque chose d'autre a tremblé?

54 % a répondu par l'affirmative, 19 % par la négative.

Commentaire: d'après ces éléments, l'intensité est au moins 4 et probablement 5, voire plus.

Question: Est-ce que des objets suspendus se sont balancés?

14 % a répondu par l'affirmative, 26 % par la négative, et les autres n'avaient pas d'objets suspendus à observer, ne pouvaient pas voir dans le noir ou n'ont pas répondu.

Commentaire: Comme la secousse d'un tremblement de terre relativement faible à courte distance (comme c'est le cas ici) est vraisemblablement de fréquence élevée, on ne s'attend pas à avoir beaucoup d'observations d'objets suspendus qui se balancent. Dans ces circonstances, un rapport de 1/2 entre les oui et les non suggère une secousse relativement forte, c'est-à-dire au moins d'intensité 5.

Question: Est-ce que des objets sont tombés ou se sont renversés?

18 % ont répondu par l'affirmative, 72 % par la négative.

Commentaire: l'intensité était au moins 5.

Question: Y a-t-il eu des dégâts?

13 % ont fait état de dégâts d'une nature quelconque; 85 % n'en ont pas mentionné. La plupart des dégâts étaient des fissures dans les plâtres et les murs, ainsi que des chutes d'ardoises, de cheminées ou des descellements de briques mal fixées. Dans un cas, il a été fait état de l'apparition d'une fente entre un garage et l'extension d'une maison.

Commentaire: le type d'habitat prédominant est construit en briques. Les dégâts peuvent être résumés sous la forme de quelques bâtiments de classe de vulnérabilité B ont subi des dégâts

de degré 1 et 2. Ce point ne correspond pas exactement aux descriptions données par l'échelle, mais il est plus proche de la description du degré 6 que de tout autre niveau.

Question: Avez-vous d'autres observations?

Des réponses variées ont été reçues. Neuf personnes ont mentionné que les meubles s'étaient déplacés, un effet mentionné pour la première fois au degré 6 de l'échelle.

Résumé: D'après les éléments ci-dessus, la meilleure évaluation est celle d'une intensité 6, bien que l'évaluation soit marginale et que certains puissent argumenter pour des valeurs d'intensité de 5 ou de 5 - 6. Le degré des dégâts, le déplacement des meubles et le nombre de personnes effrayées suggère une valeur de 6 et les autres données sont au moins cohérentes avec cette valeur, même si on pouvait s'attendre à une proportion plus élevée d'observations de chutes d'objets.

7 Effets sur l'environnement naturel

Les effets des tremblements de terre sur le sol, désignés ici plus brièvement sous le nom d'effets "sismogéologiques", ont souvent été inclus dans les échelles d'intensité, notamment dans l'échelle MSK, mais ils sont dans la pratique assez difficiles à utiliser de manière appropriée. La raison en est leur complexité et ils sont souvent influencés par différents facteurs qui sont peu visibles pour un observateur: stabilité intrinsèque des pentes, niveau de la nappe phréatique, etc... Il en résulte que la plupart de ces effets peuvent être observés dans un large intervalle d'intensités. Nous considérons donc que ces preuves sont insuffisantes pour la définition d'une bonne corrélation entre les effets et des degrés d'intensité particuliers. On présente dans cette section certaines considérations générales sur l'utilisation limitée d'effets comme les variations de la hauteur d'eau dans les puits, les fissures du sol, les glissements de terrain et les chutes de pierres.

La décision de supprimer ces diagnostics des descriptions des degrés d'intensité et de les présenter dans une section séparée n'a pas été prise à la légère, car dans les régions rurales à habitat dispersé (ou inhabitées), les autres données disponibles sont rares. Le problème est que, s'il est possible de présenter de manière raisonnablement cohérente mais robuste les variations des constructions faites par l'homme, la plupart des effets sur l'environnement naturel dépendent de caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques complexes dont l'évaluation est difficile, voire impossible pour un observateur. Par exemple, les chutes de rochers qui se produisent fréquemment même en l'absence d'un quelconque tremblement de terre, peuvent être facilement déclenchées lorsque les parois rocheuses sont érodées et très vulnérables dans certains cas, tandis que dans d'autres cas où les roches sont très compactes, elles ne peuvent se produire qu'à la faveur d'une secousse très violente. Les conditions qui influencent de tels phénomènes ne sont pas forcément constantes dans un endroit donné: elles peuvent dépendre de l'état de la nappe phréatique ou varier de manière saisonnière. Dans une certaine mesure, la situation est similaire à celle qui prévaut pour la vulnérabilité des bâtiments – une paroi rocheuse peu résistante est plus vulnérable aux dégâts se manifestant par des chutes de pierres qu'une paroi compacte. Le problème est qu'il n'existe pas de méthode pour estimer cette vulnérabilité comme celle utilisée pour les bâtiments. Dans de nombreux cas également, les effets sismogéologiques se produisent d'une manière telle qu'ils ne peuvent pas être quantifiés facilement avec les mêmes degrés que ceux des autres observations.

Il est certain que l'on peut observer des variations spatiales de l'étendue de ces phénomènes lors d'un tremblement de terre particulier, et que ces variations peuvent parfois sembler utiles pour différencier les degrés relatifs de la secousse. Par exemple, on peut tracer la carte de la distribution spatiale des chutes de pierres ou des fissures du sol. Cependant, des études récentes sur la distribution spatiale de paramètres géotechniques comme la teneur en humidité du sol (dont l'importance est critique dans la définition de la stabilité des pentes) ont montré

que ces propriétés présentaient souvent le schéma d'un essaim fractale. Ainsi, on a observé que la distribution des glissements de terrains est regroupé de façon typique même si aucun tremblement de terre ne s'est produit, et ce que l'on pourrait considérer à tort comme une distribution ayant une relation avec l'intensité n'a rien à voir avec une secousse sismique.

En règle générale, les effets sur l'environnement naturel doivent donc être utilisés avec précaution et en complément d'autres effets. Les données provenant exclusivement d'effets sur l'environnement naturel, normalement ne doivent pas être utilisées pour l'attribution des intensités. Ces données peuvent être utilisées pour confirmer des intensités suggérées par d'autres diagnostics. On a donc toujours un problème pour l'estimation des intensités dans les zones inhabitées; au mieux, on peut donner un intervalle d'intensités. Ceci est regrettable, mais il vaut mieux admettre cette restriction que d'attribuer des intensités qui sont trop peu fiables pour être utiles.

On doit faire attention à la localisation des effets de cette nature; ils peuvent se produire à la campagne à une distance considérable de la ville la plus proche et être attribués à cette dernière par suite d'une relation imprécis.

Dans le cadre de l'échelle EMS-98, les effets sismogéologiques sont présentés sous la forme d'un Tableau. Pour chacun des effets, les trois types de symboles suivants sont utilisés:

- | | |
|---------------------------|---|
| lignes | - indiquent l'intervalle possible des observations; |
| cercles (vides ou pleins) | - indiquent l'intervalle des intensités typique de cet effet; |
| cercles (pleins) | - indiquent l'intervalle des intensités pour lesquelles cet effet peut être utilisé comme diagnostic de la manière la plus utile. |

Ces lignes se terminent par des flèches permettant d'indiquer les possibilités d'observations extrêmes même au delà des limites indiquées dans les cas exceptionnels, pour des configurations géologiques différentes ou en cas de sensibilité particulière. Pour certains effets, aucune des trois catégories n'a été mentionnée car nous pensons que l'expérience ne permet pas de formuler une opinion. Il ne faut pas oublier que pour la plupart des effets, la gravité de l'observation augmentera avec l'intensité. Ainsi, pour "le débit des sources est affecté", on s'attendra, à l'intensité 5, à une légère variation du débit des sources, tandis que les variations peuvent être beaucoup plus importantes à des intensités plus fortes. Nous avons décidé qu'il n'était pas possible de faire une distinction dans l'échelle entre une "variation légère du débit des sources" et une "variation importante du débit des sources" compte tenu de la difficulté à donner une définition quantitative de ces expressions.

On doit veiller, en particulier lors de l'examen des fissures du sol, à bien faire la distinction entre les observations géotechniques, c'est-à-dire les fissures causées par le séisme et les ob-

servations néotectoniques, c'est-à-dire celles causées directement par une rupture de la faille. Cette dernière comprend les variations importantes du paysage dues à des failles majeures.

Les effets énumérés dans le Tableau sont regroupés en quatre catégories: effets hydrologiques, rupture des pentes, processus affectant le sol plat et processus multiples (cas complexes). Ce dernier groupe couvre les cas où plusieurs processus sont impliqués dans la création de l'effet. Il est à noter que les glissements de terrain apparaissent à la fois comme effet de ruptures de pentes et comme effet de processus multiples. Ceci est dû au fait que certains glissements de terrains sont directement provoqués par la secousse qui déloge des roches, tandis que d'autres se produisent seulement lorsque l'instabilité de la pente se conjugue à certaines conditions hydrologiques. La distinction entre ces deux cas n'est pas facile; ce point illustre les problèmes qui se présentent lors de l'étude de ce type d'effets.

Remarques sur le tableau des effets sismogéologiques

- ¹⁾ détecté uniquement par des instruments automatiques
- ²⁾ variations faciles à observer
- ³⁾ résultant de séismes distants; possible avec des ondes provoquant la turbidité
- ⁴⁾ provenant d'une perturbation des sédiments du fond
- ⁵⁾ variations du débit ou eau des sources devenant trouble
- ⁶⁾ dans des matériaux sans cohésion sur des sites naturels (berges de rivières, etc.) ou artificiels (remblais de routes)
- ⁷⁾ chutes de pierres peu importantes dans des sites naturels (falaises) ou artificiels (talus, carrières)
- ⁸⁾ ces deux catégories se recouvrent. Il faut répéter la mise en garde sur le risque de confusion entre les ruptures du sol et les fissures provoquées par la secousse
- ⁹⁾ glissements de terrain avec des causes principalement de nature hydrologique (il peut s'agir d'effets à retardement)
- ¹⁰⁾ liquéfaction (par exemple cratères de sable, formation de monticules, etc.)

8 Forme abrégée de l'échelle EMS-98

La forme abrégée de l'Echelle Macrosismique Européenne, tirée de la partie principale, est conçue pour donner une vision très simplifiée et générale de l'échelle EMS. Elle peut, par exemple, être utilisée à des fins éducatives. *Cette forme abrégée ne convient pas pour les estimations d'intensité.*

Intensité EMS	Définition	Description des effets typiques observés (résumée)
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos 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, 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 se 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 se 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 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.

Publié avec le soutien
de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (Fontenay-aux-Roses),
de l'Observatoire Royal de Belgique (Bruxelles),
du Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (Luxembourg)
et de GeoForschungsZentrum Potsdam.