

**UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie civil

**THÈSE DE DOCTORAT**

En Génie Civil

Spécialité : Structures, Matériaux et Sols

**ÉVALUATION DES DOMMAGES POST-SISMIQUES DU BÂTI  
ALGÉRIEN : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION**

Par

**Sid Ahmed ALLALI**

Devant le jury composé de :

D. AMAR BOUZID	Professeur, U. Blida 1, Blida	Président
N. BOURAHLA	Professeur, U. Blida 1, Blida	Examineur
M. GHRICI	Professeur, U. Chlef, Chlef	Examineur
M. ABED	Professeur, U. Blida 1, Blida	Directeur de thèse
A. MEBARKI	Professeur, UPEM, France	Co-Directeur de thèse
M.N. FARSI	Directeur de Recherche, CGS, Alger	Invité

Blida, Juillet 2018

*À mes Parents, Sœurs et Frères ...*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu, **Dieu Allah**, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux, de toutes ces bénédictions qu'il m'a offertes, de m'avoir donné la force pour survivre, l'audace pour dépasser toutes les difficultés, la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon Directeur de thèse, Monsieur Mohamed ABED, Professeur à l'Université Saad Dahlab de Blida, de m'avoir accordé leur confiance et m'avoir encadré durant cette thèse, pour son soutien, pour son écoute et ses multiples conseils avisés qui m'ont permis de mener en bonnes conditions mes travaux de recherches.

Je souhaiterais également exprimer ma gratitude à mon Co-Directeur de thèse, Monsieur Ahmed MEBARKI, Professeur à l'Université Paris-Est Marne la Vallée de m'avoir supervisé et de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire MSME (*Modélisation et Simulation Multi-Echelle*). Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et la sympathie qu'il m'a témoignée pendant ces années de thèse.

Je tiens à remercier les responsables du centre national de recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS) pour m'avoir permis d'utiliser la base de données des dommages sismiques (fiches d'évaluation du séisme de Boumerdès 2003) et pour leurs collaborations et discussions que nous avons eues. Je souhaite aussi exprimer ma gratitude aux responsables du programme de coopération scientifique Algéro-Français PROFAS pour leur financement de mon séjour à l'université Paris-Est Marne-la-Vallée (France) pendant l'année 2016-2017.

Je tiens à remercier également l'ensemble des membres du jury pour l'attention qu'ils ont portée à mes travaux, Monsieur Djillali AMAR BOUZID, Professeur à l'Université Blida 1, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de thèse, Monsieur Noureddine BOURAHLA, Professeur à l'Université Saad DAHLEB de Blida 1, Monsieur Mohamed GHRICI, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, d'avoir accepté de prendre le temps de lire et commenter mon travail de thèse et Monsieur Mohammed Naboussi FARSI, Directeur de Recherche au CGS d'avoir accepté d'assister à ma soutenance et de faire partie du jury.

Je souhaiterais remercier tous les personnels administratifs, techniques et d'enseignement de l'Université Saad Dahlab de Blida qui m'ont accompagné et soutenu de près ou de loin dans mon travail de thèse. J'exprime ma gratitude également à tous les amis, collègues et membres de laboratoires de recherche qui m'ont aidée pendant mes années de recherche.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à ma famille, mes frères « *Mohamed et Djamel* » et mes sœurs « *Faiza, Meriem et Zineb* » pour leurs encouragements et sympathies, mes chers parents pour leur soutien inestimable et leurs prières sincères qui éclairent mon chemin, ils continuent à croire en moi beaucoup plus que moi-même. Vous êtes vraiment mon trésor le plus précieux, que Dieu vous bénisse tous !

## ملخص

في حالة الكوارث الزلزالية، يمثل تقييم الاضرار التي لحقت بالمنشآت بعد الزلزال تحديا كبيرا للسلطات. يجب تقييم المباني المتضررة وتصنيفها بسرعة ودقة من قبل مجموعات من المحققين من أجل اتخاذ تدابير وقائية مناسبة للتخفيف من حدة هذا الخطر الزلزالي. في مواجهة هذه القيود من سرعة ودقة تقييم الأضرار الزلزالية، يضاف إلى ذلك في بعض الأحيان عدم خبرة المحققين الذين تم إرسالهم إلى الموقع. في الواقع، غالباً ما يجد المحققون صعوبات في تحديد مستويات الضرر الإجمالية المناسبة للمباني المتضررة.

يتمثل هذا العمل في وضع منهجية لتطوير أدوات دعم القرار بالاعتماد على نظرية المجموعات الضبابية. في هذا السياق، أتاحت دراسة تأثير عدد ووزن القواعد الغامضة باشتقاق قواعد غامضة مرجحة ذات سابقة واحدة مما يتيح إمكانية ربط كل مستوى الضرر لكل مكون تم تقييمه بمستوى الضرر الاجمالي للمنشأة بواسطة قاعدة غامضة مرجحة واحدة. هذه العناصر هي عموماً العناصر الهيكلية (البنية التحتية، العناصر الأفقية، العناصر العمودية، السقوف والبلاطات) والعناصر غير الهيكلية (السلام، ألواح الجدران الخارجية، المكونات الداخلية والخارجية). تقترح المنهجية مستوى الضرر الاجمالي للمنشأة وفقاً لقيم دوال العضوية، حيث يمكن اعتبار مستوى ضرر واحد الأكثر تأثيراً مع أعلى قيمة عضوية، في حين أن بقية مستويات الضرر تؤخذ في الاعتبار لكن مع تأثير أقل.

تم استخدام قاعدة بيانات مجمعة والتي تحتوي على أكثر من 27000 منشأة مقيمة من قبل المركز الوطني للبحث التطبيقي في هندسة الزلازل عقب زلزال بومرداس (الجزائر) في 2003 ( $M_w = 6.8$ ) لمعايرة والتحقق من دقة المنهجية المقترحة. في الواقع، تم تعديل عناصر المنهجية بما في ذلك أوزان القواعد الضبابية المرجحة للحصول على أفضل تقدير للضرر الإجمالي. تظهر النتائج المتحصل عليها أن التقييم النظري المقترح (الآلي) يتطابق مع 90% من المنشآت المدروسة. تعزز هذه النتيجة المثيرة للاهتمام دقة المنهجية المطورة حيث يمكن اعتبار أداة الدعم المقترحة مفيدة للمحققين خلال مهام تقييم الأضرار بعد الزلزال.

## RÉSUMÉ

En cas des catastrophes sismiques, l'évaluation des dommages post-sismiques subis par les constructions représente un défi important pour les autorités. Les constructions endommagées doivent être évaluées et classées rapidement et précisément par des groupes d'enquêteurs afin de prendre des mesures préventives adéquates pour la mitigation de ce risque sismique. Face à ces contraintes de rapidité et de précision de l'évaluation des dommages subis, s'ajoute parfois le manque d'expérience des enquêteurs dépêchés sur le site. En effet, souvent des enquêteurs éprouvent des difficultés à attribuer les niveaux de dommage global appropriés aux constructions endommagées.

Le présent travail consiste à la mise au point d'une approche pour développer des outils d'aide à la décision basés sur la théorie des ensembles flous. Dans ce contexte, l'étude de l'effet du nombre et des poids des règles a permis de dériver des règles floues pondérées à un seul antécédent permettant de relier chaque niveau de dommage de chaque composant expertisé au niveau de dommage global de la construction avec une seule règle floue pondérée. Ces composants sont généralement des composants structurels (infrastructure, éléments porteurs, éléments de contreventement, toitures et dalles), et non structurels (escaliers, remplissages extérieurs, composants intérieurs et extérieurs). L'approche propose le niveau de dommage global de la construction selon les valeurs des fonctions d'appartenance, un niveau de dommage peut être considéré comme le plus dominant avec une valeur d'appartenance la plus élevée, alors que les autres niveaux de dommage sont toujours considérés bien qu'avec moins d'influence.

Une base de données de 27000 constructions expertisées collectée par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) conséquemment au séisme de Boumerdès (Algérie) en 2003 ( $M_w = 6.8$ ) a été utilisée pour calibrer et valider l'approche proposée. En effet, les paramètres de l'approche notamment les poids des règles floues pondérées ont été ajustés afin d'obtenir une meilleure appréciation de l'endommagement global. Les résultats obtenus montrent que l'évaluation théorique (automatique) proposée présente une concordance pour 90% des constructions étudiées. Ce résultat intéressant conforte le bien-fondé de l'approche développée où l'outil d'aide proposé peut être considéré utile aux inspecteurs pendant les tâches d'évaluation des dommages post sismiques.

## ABSTRACT

In the case of seismic disasters, the assessment of post-seismic damage to buildings represents a major challenge for the authorities. Damaged structures must be evaluated and classified quickly and accurately by groups of investigators in order to take adequate preventive measures for the mitigation of this seismic risk. Faced with these constraints of rapidity and precision of the evaluation of the damages sustained, is added sometimes the lack of experience of the dispatched investigators on the site. Indeed, investigators often find it difficult to assign the appropriate global damage levels to damaged buildings.

This work consists of developing an approach to develop decision support tools based on fuzzy set theory. In this context, the study of the effect of the number and weights of fuzzy rules allowed to derive weighted fuzzy rules with a single antecedent permitting to relate each damage level of each assessed component to the global damage level of the construction using a single weighted fuzzy rule. These components are usually structural components (infrastructure, load-bearing elements, bracing elements, roofs and slabs), and non-structural (stairs, external fillings, interior and exterior components). The approach proposes the global damage level of the construction according to membership functions values, one damage level can be considered as the most dominant with the highest membership value, while others damage levels are still considered although with lower influence.

A database of 27000 surveyed buildings collected by the National Center for Applied Research in Earthquake Engineering (CGS) following the Boumerdes earthquake (Algeria) in 2003 ( $M_w = 6.8$ ) was used to calibrate and validate the proposed approach. In fact, the approach's parameters including the weighted fuzzy rules' weights have been adjusted to obtain a better appreciation of the global damage. The obtained results show that the proposed (automatic) theoretical evaluation has a concordance for 90% of the studied constructions. This interesting result reinforces the validity of the developed approach where the proposed support tool can be considered useful for inspectors during post-earthquake damage assessment tasks.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	14
Contexte de la thèse.....	14
Objectifs de la thèse.....	16
Organisation de la thèse.....	17
CHAPITRE 1 : ÉVALUATION SISMIQUE DES STRUCTURES : ÉTAT DE L'ART..	19
1.1. Introduction.....	19
1.2. Notions de base.....	19
1.2.1. Séisme.....	19
1.2.2. Mesure du séisme.....	20
1.2.3. Mesure du dommage.....	21
1.3. Approches d'évaluation des dommages/vulnérabilité sismique.....	25
1.3.1. Approches d'opinion d'experts.....	26
1.3.2. Approches empiriques.....	29
1.3.3. Approches analytiques.....	39
1.3.4. Approches hybrides.....	52
1.4. Conclusion.....	52
CHAPITRE : 2 PROCÉDURES D'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES : DÉFIS & SOLUTIONS.....	54
2.1. Introduction.....	54
2.2. Séismes en Algérie.....	55
2.3. Procédures d'évaluation des dommages post-sismiques.....	58
2.3.1. Procédure d'évaluation sismique en Algérie.....	58
2.3.2. Procédures d'évaluation des dommages sismiques : Aperçu approfondi.....	64
2.4. Défis pendant les procédures d'évaluation post-sismique.....	71
2.5. Systèmes experts comme solution.....	74
2.5.1. Approches locales.....	75
2.5.2. Logique floue : Précision vs Signification.....	80
2.5.3. Applications des systèmes flous dans l'évaluation sismique.....	82
2.6. Conclusion.....	90
CHAPITRE 3 : DÉVELOPPEMENT DU CADRE THÉORIQUE DE L'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES PAR LOGIQUE FLOUE.....	92
3.1. Introduction.....	92

3.2. Évaluation sismique des structures : Définitions.....	92
3.3. Systèmes flous pour l'évaluation sismique : Cadre théorique général.....	94
3.3.1. Structure hiérarchique : Sélection des variables d'entrée et de sortie .....	95
3.3.2. Définition des termes linguistiques « <i>Niveaux de dommage</i> » .....	100
3.3.3. Développement des ensembles flous des termes linguistiques.....	101
3.3.4. Conception de la base de règles floues .....	105
3.4. Systèmes flous pour l'évaluation sismique : Développements théoriques.....	110
3.4.1. Fuzzification (Calcul des degrés d'appartenance des dommages observés) ....	110
3.4.2. Mécanisme d'inférence (Raisonnement flou).....	110
3.4.3. Défuzzification (Calcul des niveaux de dommage local et global) .....	115
3.5. Conclusion .....	116
<b>CHAPITRE 4 : CALIBRATION ET VALIDATION DU SYSTÈME FLOU</b>	
<b>D'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES.....</b>	<b>118</b>
4.1. Introduction.....	118
4.2. Base de données adoptée : Typologie du bâti Algérien.....	118
4.3. Calibration des poids des règles floues du système flou adopté.....	120
4.4. Valeurs optimums des poids des règles pondérées.....	122
4.4.1. 1 <sup>er</sup> sous-système « <i>Groupe 1 : Dommage structurel</i> ».....	122
4.4.2. 2 <sup>ème</sup> sous-système « <i>Groupe 2 : Dommage non-structurel</i> » .....	124
4.4.3. 3 <sup>ème</sup> sous-système « <i>Groupe 1-2 : Dommage global</i> » .....	125
4.5. Validation du système flou d'évaluation sismique.....	127
4.6. Nombre de règles floues : Analyse et discussion .....	131
4.7. Conclusion .....	132
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>134</b>
Conclusions.....	134
Contributions .....	136
Perspectives et Recommandations.....	138
<b>APPENDICE A : ESSENTIEL DES ENSEMBLES FLOUS.....</b>	<b>140</b>
<b>APPENDICE B : LISTE DES SYMBOLES.....</b>	<b>144</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>146</b>

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Schéma du phénomène de séisme [3] .....	20
Figure 1.2 : Relation entre les dommages observés et les indices de dommage [10] .....	23
Figure 1.3 : Diverses approches existantes d'évaluation sismique. ....	26
Figure 1.4 : Exemple d'une distribution log-normale du facteur de dommage estimé pour une intensité donnée montrant l'estimation faible (ML), la meilleure estimation (MB) et l'estimation haute (MH) du facteur de dommage [20]. ....	28
Figure 1.5 : Fonctions de vulnérabilité pour les niveaux des dommages de D1 à D5 proposées par Spence et al. (1992) [29] .....	32
Figure 1.6 : Courbes de vulnérabilité empiriques générées pour différents paramètres de mouvement du sol [30] .....	34
Figure 1.7 : Mécanismes de défaillance hors plan proposés par D'Ayala et al. (2003) [48].....	42
Figure 1.8 : Mécanismes d'effondrement proposés par Cosenza et al. (2005) [49] .....	43
Figure 1.9 : Modèle simplifié d'un système à un seul degré de liberté proposé par Calvi et al. (1999) [50].....	44
Figure 1.10 : Mécanismes de rupture pour les constructions en poteaux-poutres [50].....	44
Figure 1.11 : Mécanismes d'effondrement pour les constructions en maçonnerie [50].....	45
Figure 1.12 : Exemple d'une courbe de fragilité [71] .....	48
Figure 1.13 : Exemple d'une courbe de capacité [70].....	49
Figure 1.14 : Développement des courbes du spectre de capacité en format ADRS. ....	49
Figure 1.15 : Développement des spectres de réponse sismique en format ADRS.....	50
Figure 1.16 : Principe de l'approche HAZUS [72] .....	50
Figure 2.1 : Failles localisées autour de la capitale Alger [77] .....	55
Figure 2.2 : Sismicité de l'Algérie [78].....	56
Figure 2.3 : Effets du séisme de Boumerdès 2003 [84] .....	57

Figure 2.4 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie (1/2) [91, 92] ..	60
Figure 2.5 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie (2/2) [91, 92] ..	61
Figure 2.6 : Niveau de dommage « D1 » [9] .....	65
Figure 2.7 : Niveau de dommage « D2 » [9] .....	65
Figure 2.8 : Niveau de dommage « D3 » [9] .....	66
Figure 2.9 : Niveau de dommage « D4 » [9] .....	67
Figure 2.10 : Niveau de dommage « D5 » [9] .....	67
Figure 2.11 : Différentes combinaisons d'évènements entre les composants structurels et les composants secondaires [110] .....	76
Figure 2.12 : Différentes relations testées entre la catégorie de dommage et la probabilité de défaillance résiduelle [108, 110] .....	77
Figure 2.13 : Architecture du réseau de neurones adopté [111] .....	78
Figure 2.14 : Précision vs Signification [115] .....	81
Figure 2.15 : Structure générale du modèle de Carreño et al. (2010) [101] .....	82
Figure 2.16 : Fonctions d'appartenance adoptées .....	84
Figure 2.17 : Structure générale du modèle de Sanchez-Silva et Garcia (2001) [116] .....	85
Figure 2.18 : Structure générale du modèle de Tesfamariam et al. (2010) [117] .....	86
Figure 2.19 : Représentation du système de Demartinos et al. (2006) [119] .....	87
Figure 2.20 : Structure générale du modèle adopté par Zekai Şen (2010) [120] .....	88
Figure 2.21 : Catégories de risque sismique adoptées [120] .....	88
Figure 3.1 : Niveaux classiques de dommage .....	93
Figure 3.2 : Comparaison entre le système conventionnel et le système hiérarchique .....	96
Figure 3.3 : Structure hiérarchique adoptée .....	99
Figure 3.4 : Niveaux flous de dommage .....	101
Figure 3.5 : Représentation des niveaux de dommage local & global .....	103
Figure 3.6 : Fuzzification .....	110

Figure 3.7 : Exemple d'Implication.....	112
Figure 3.8 : Représentation des échelles pondérées .....	113
Figure 3.9 : Exemple d'Agrégation .....	114
Figure 3.10 : Exemple d'Agrégation en utilisant une échelle pondérée.....	115
Figure 3.11 : Défuzzification par <i>Centroïde</i> [102].....	116
Figure 4.1 : Intervalles effectifs pour chaque catégorie de dommage [102].....	120
Figure 4.2 : Organigramme du système flou proposé [102].....	121
Figure 4.3 : Poids $\omega_k$ du Groupe 1 : <i>Niveau de dommage structurel</i> .....	123
Figure 4.4 : Poids $\omega_k$ du Groupe 2 : <i>Niveau de dommage non-structurel</i> .....	124
Figure 4.5 : Poids $\omega_k$ du Groupe 3 : <i>Niveau de dommage global</i> .....	126
Figure 4.6 : Matrice de confusion du sous-ensemble de calibration [102] .....	127
Figure 4.7 : Matrice de confusion du sous-ensemble de validation [102].....	128
Figure 4.8 : Performance globale du système flou développé.....	130
Figure A.1 : Différentes formes de fonctions d'appartenance.....	140
Figure A.2 : Certains des opérateurs les plus connus [147] .....	141
Figure A.3 : Structure générale d'un système flou de Mamdani et Assilian (1975).....	143

Tableau 1.1 : Échelle des indices de dommage pour différents états de dommages [17] ...	25
Tableau 1.2 : Classification des états de dommages selon ATC-13 (1985) [19] .....	27
Tableau 1.3 : Matrice de probabilité de dommage de Whitman et al. (1973) [24] .....	30
Tableau 1.4 : Équivalence entre les échelles existantes et l'échelle HRC [30] .....	33
Tableau 1.5 : Éléments de calcul de l'indice de vulnérabilité [35] .....	36
Tableau 1.6 : Valeurs des scores de base, facteurs de modification et score final [41] .....	38
Tableau 2.1 : Séismes passés en Algérie [79-81] .....	56
Tableau 2.2 : Description des niveaux de dommage [91, 92] .....	59
Tableau 2.3 : Niveaux d'évaluation sismique selon ATC-20 [86, 95] .....	68
Tableau 2.4 : Comparaison entre les dommages prédits et dommages rapportés .....	80
Tableau 2.5 : Paramètres adoptés dans le réseau de neurones.....	84
Tableau 3.1 : Paramètres d'entrée/sortie et leurs catégories de dommage .....	98
Tableau 3.2 : Base de règles de « <i>Groupe 1 : Dommage structurel</i> ».....	107
Tableau 3.3 : Base de règles de « <i>Groupe 2 : Dommage non-structurel</i> » .....	108
Tableau 3.4 : Base de règles de « <i>Groupe 1-2 : Dommage global</i> ».....	109
Tableau 4.1 : Répartition des constructions de la base de données.....	119
Tableau 4.2 : Base de règles pondérées de « <i>Groupe 1 : Dommage structurel</i> ».....	123
Tableau 4.3 : Base de règles pondérées de « <i>Groupe 2 : Dommage non-structurel</i> » .....	125
Tableau 4.4 : Base de règles pondérées de « <i>Groupe 1-2 : Dommage global</i> ».....	126
Tableau 4.5 : Comparaison entre les résultats théoriques et ceux proposés par les inspecteurs .....	129
Tableau 4.6 : Performance du système flou développé en utilisant toute la base de données [102] .....	130
Tableau A.1 : Quelques propriétés valides dans la théorie des ensembles flous .....	142

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Contexte de la thèse

Aujourd'hui, les catastrophes naturelles telles que les inondations, les ouragans et les tremblements de terre perturbent plus fréquemment les activités humaines. Le développement et l'expansion récents des villes et zones urbaines et la fréquence et l'intensité des effets de ces événements sont interdépendants étant donné que plus des zones sont exposées à tels aléas, plus que ces catastrophes représentent une menace majeure contre les populations et leurs activités et biens. De telles menaces ont attiré l'attention des autorités publiques de nombreux pays et ont conduit à l'élaboration de nombreux codes de conception des constructions pour améliorer leurs performances pendant de tels événements, et également des règlements d'atténuation et de gestion pour mieux gérer les conséquences de ces événements. Toutes ces mesures sont faites pour atteindre un objectif qui est de réduire le risque associé à de telles catastrophes.

Les tremblements de terre en revanche sont l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes et intenses qui peuvent affecter les êtres humains aujourd'hui, leur risque s'est accru en raison du fait que les séismes affectent essentiellement les constructions et les bâtiments qui sont des zones densément peuplées. Les constructions récentes par exemple se caractérisent par un nombre élevé des niveaux et des grandes surfaces par rapport à l'époque où la plupart des constructions se caractérisent par des niveaux bas. Cette expansion des niveaux et de surfaces rend leurs habitants naturellement plus exposés aux tremblements de terre. Pour cela, concevoir des constructions capables de résister efficacement les séismes est un objectif vital. Cependant, l'évaluation des constructions affectées par les séismes assure une meilleure gestion post-désastre et également renforce la compréhension des effets des séismes et le comportement des constructions pendant les secousses sismiques. Ces informations sont essentielles pour élaborer des meilleurs codes et règlements de conception et des meilleurs critères de gestion post-désastre, ce qui montre clairement que des procédures précises et rigoureuses d'évaluation des dommages post-sismiques sont demandées plus souvent qu'auparavant.

Dans le cadre de l'évaluation des dommages post-sismiques, plusieurs procédures d'évaluation ont été mises au point dans le monde entier afin d'évaluer les niveaux de

dommage, la sécurité et l'utilisabilité des constructions endommagées après les séismes. Ces procédures concernent principalement l'évaluation des différents éléments structurels et non structurels des constructions, les éventuels problèmes de sol autour les constructions et les caractéristiques des constructions en termes de vulnérabilité selon leurs systèmes structurels. Tout ça pour effectuer une évaluation compréhensive afin de déterminer un niveau global de dommage qui se réfère directement à la sécurité et à l'utilisabilité de la construction endommagée. Les constructions endommagées sont classées après l'évaluation sismique en fonction de leurs endommagements dans des catégories de dommage où chaque catégorie représente le niveau global de dommage de la construction. L'échelle de dommage adoptée est généralement divisée en plusieurs catégories telles que : « *Pas de dommage, Dommage léger, Dommage modéré, Dommage important, Effondrement* ». Selon les catégories de dommage assignées, les constructions sont marquées en utilisant des couleurs appropriées pour déterminer leur niveau de sécurité et/ou d'utilisabilité, généralement les trois marques suivantes sont utilisées :

- *Vert* : Construction sûre et utilisable immédiatement.
- *Orange* : Construction endommagée nécessitant une évaluation détaillée à des fins de réparation avant d'être utilisable.
- *Rouge* : Construction très endommagée et condamnée à la démolition.

Après chaque séisme destructeur, les autorités en charge sont plus responsables de gérer rigoureusement et rapidement la phase post-désastre où multiples questions urgentes se posent au cours d'un tel événement :

- Combien des gens sont affectés et combien doivent être évacués ?
- Quelles mesures devraient être prises immédiatement ?
- Quelle est la répartition géographique des constructions endommagées ?
- Combien de constructions sont endommagées et à quel niveau de dommage ?
- Combien de personnel et matériel sont nécessaires pour couvrir la zone affectée ?
- Combien de constructions sont habitables et combien sont-elles dangereuses aux habitants et aux équipes de secours ?

Le caractère urgent de telles questions nécessite l'adaptation des procédures d'évaluation des dommages post-sismiques rigoureuses et rapides, afin de couvrir l'ensemble de la zone touchée et d'éviter toute classification erronée ou perte non nécessaire du temps qui pourrait entraîner encore plus des victimes pendant les opérations de sauvetage.

Les procédures d'évaluation des dommages post-sismiques représentent un défi considérable aux autorités en raison de leurs caractéristiques complexes et de leur environnement d'urgence. Ces tâches sont caractérisées par plusieurs facteurs, la gravité et l'extension de la zone affectée, les caractéristiques du parc immobilier en termes de typologies de bâtiments, les caractéristiques de la procédure d'évaluation adoptée et les caractéristiques du personnel engagé pour effectuer la procédure en ce qui concerne le nombre d'inspecteurs disponibles pour effectuer les tâches d'évaluation et leur niveau d'expérience et connaissance technique. Cependant, le défi le plus important est la capacité de l'inspecteur à effectuer une tâche d'évaluation adéquate et rigoureuse sans consommation inutile du temps. Pour ce faire, et afin de garantir une telle performance, des outils d'aide à la décision sont fréquemment adoptés pour assister les inspecteurs pendant leurs tâches post-sismiques.

Les outils d'aide à la décision sont utilisés pour assister les inspecteurs pendant les campagnes post-catastrophes afin de surmonter certaines difficultés les plus souvent signalées au cours de l'exécution de telles tâches. Diverses approches ont été utilisées pour développer ces outils d'aide à la décision, tels que des systèmes à base de règles, des systèmes des réseaux de neurones artificiels, des systèmes flous, des systèmes de raisonnement par cas, etc [1]. Cependant, les systèmes flous suscitent l'intérêt de nombreux chercheurs en raison de leur simplicité et de leur capacité à manipuler les incertitudes en simulant le raisonnement humain au cours du processus décisionnel, de telles incertitudes sont souvent constatées au cours des tâches d'évaluation sismique.

### Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette recherche est de développer un cadre théorique des outils d'aide à la décision d'évaluation des dommages sismiques des constructions basé sur la théorie de la logique floue. Les systèmes flous développés évaluent les dommages observés au niveau des composants des constructions en employant des termes linguistiques et des techniques de raisonnement flou et approximatif afin de fournir une estimation du niveau global des dommages de la construction. Les objectifs principaux de cette recherche peuvent être alors décomposés en sous objectifs :

- Examiner l'applicabilité et la faisabilité de la logique floue dans l'évaluation sismique des constructions afin de développer un cadre théorique des outils d'aide à la décision pour l'évaluation des dommages post-sismiques des constructions.

- Investiguer le concept de niveaux flous de dommage où les dommages observés peuvent être assignés à plus qu'un niveau de dommage.
- Investiguer le concept de relations de dommage « *Dommege local - Dommege global* » sous forme des règles floues pondérées.
- Adopter la méthodologie développée pour la procédure algérienne d'évaluation des dommages post-sismiques comme un outil d'aide à la décision pour assister les inspecteurs pendant l'exécution des tâches d'évaluation des dommages post-sismiques.

### Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en plusieurs chapitres avec les contenus suivants :

Le **premier chapitre** est consacré à l'étude bibliographique en présentant certaines notions à propos les séismes et les dommages sismiques. Il présente une discussion générale sur les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité et les dommages sismiques des structures disponibles dans la littérature en soulignant leurs avantages et limitations, notamment les méthodologies basant sur des approches empiriques et analytiques.

Le **deuxième chapitre** discute l'état de la pratique des procédures d'évaluation des dommages sismiques après les séismes en soulignant des défis et problèmes pendant l'exécution de telles procédures. Il présente également l'histoire sismique de l'Algérie avec la procédure d'évaluation des dommages post-sismiques adoptée en Algérie à titre d'exemple. Il discute finalement les systèmes experts en général et les systèmes flous en particulier comme une solution pour surmonter les défis liés aux procédures d'évaluations post-sismiques.

Le **troisième chapitre** présente la méthodologie proposée pour développer des systèmes flous d'évaluation des dommages subis par les constructions. Il discute les étapes opérationnelles de développement des systèmes flous d'évaluation des dommages observés au niveau des composants des structures afin de proposer des niveaux de dommage global où une structure hiérarchique est adoptée pour modéliser les paramètres de la procédure d'évaluation. Il discute également une nouvelle application des règles floues pondérées pour représenter des relations pondérées « *Dommege local - Dommege global* » entre les entrées et les sorties de la structure hiérarchique. Il décrit finalement le cadre théorique du système flou développé en termes d'étapes de : *Fuzzification, Inférence floue* et *Défuzzification*.

Le **quatrième chapitre** aborde la mise en application et la validation de la méthodologie développée en utilisant une base de données du séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 de magnitude  $M_w = 6.8$ . Il analyse et discute les résultats d'optimisation des poids associés aux règles floues pondérées et également la validation de la méthodologie proposée en comparant les résultats théoriques avec ceux rapportés par les inspecteurs. Il décrit brièvement l'utilité des solutions adoptées pour surmonter la bien connue *malédiction de la dimension*.

Et finalement, des **conclusions** générales sont présentées permettant de souligner les contributions et limitations de la recherche, des perspectives et des recommandations sont également discutées afin d'identifier des possibles axes futurs de recherche.

# CHAPITRE 1

## ÉVALUATION SISMIQUE DES STRUCTURES : ÉTAT DE L'ART

### 1.1. Introduction

Les séismes ont été classifiés à l'échelle mondiale comme l'un des phénomènes naturels les plus destructeurs qui causent des dommages considérables aux constructions [2]. En fait, aucun autre phénomène naturel ne peut causer autant des pertes et des dommages que les séismes dans une telle courte durée.

Les procédures d'évaluation des dommages sismiques analysent les preuves physiques d'une potentielle dégradation de la capacité sismique du bâtiment en termes des dommages subis par les éléments de la construction. Ces procédures évaluent principalement les dommages subis par les éléments structurels (éléments résistants) qui sont le facteur principal à considérer et les éléments non structurels qu'étaient l'objet de plusieurs recherches puisqu'ils ont déjà démontré une importance considérable pendant la classification des constructions endommagées.

En fait, les approches d'évaluation de la vulnérabilité et des dommages sismiques des constructions diffèrent selon leurs principes, objectifs, dépenses et leurs précisions proposées. Le choix de la procédure d'évaluation dépend de l'objectif de la procédure et de la disponibilité de la technologie et des données. plusieurs approches sont développées dans le monde entier afin d'identifier et de classer la vulnérabilité et les dommages sismiques des constructions.

Pour ceci, ce chapitre vise à fournir des brèves définitions de base des concepts fondamentaux associés aux séismes et aux dommages sismiques, il fournit quelques définitions du terme « *Damage* ». Il décrit brièvement les diverses approches actuelles de l'évaluation et l'estimation de dommage/vulnérabilité sismique (analytiques, empiriques...) avec la mise en évidence des avantages et limitations de chaque approche.

### 1.2. Notions de base

#### 1.2.1. Séisme

Un tremblement de terre ou un séisme est un mouvement du sol ou de la surface de terre associé à une libération d'énergie sous forme des secousses brusques et brèves d'une

portion de l'écorce terrestre à partir d'un épïcentre à une certaine profondeur. D'une façon plus détaillée, les séismes sont des mouvements du sol vibratoires naturels (ondes sismiques) résultant d'un certain nombre de causes y compris les mouvements soudains des segments de la croûte, glissements de terrain, éruption volcanique et des explosions artificielles. Parmi ces différentes causes, les tremblements de terre tectoniques dus au mouvement des plaques tectoniques sont les plus grands et les plus importants. Ils sont causés par la fracture et le glissement des roches le long des failles au sein de la croûte terrestre.

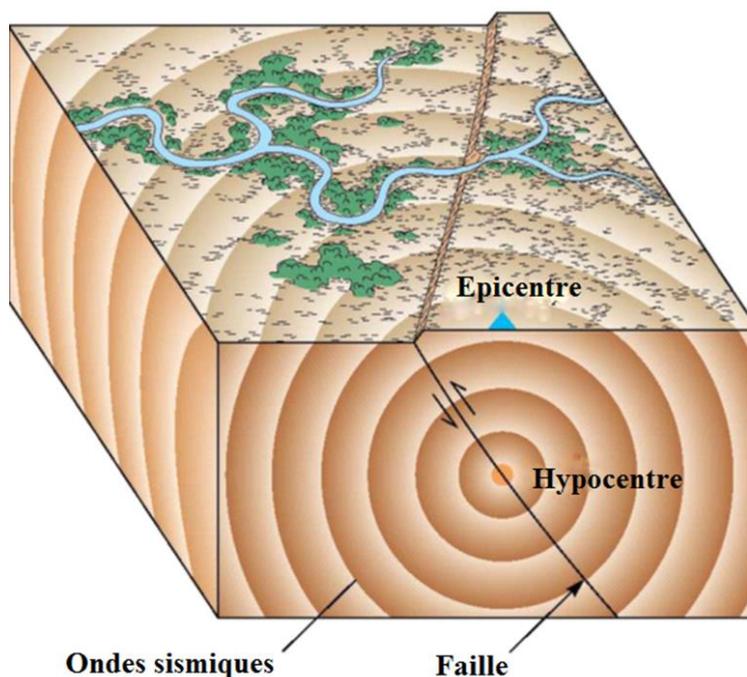


Figure 1.1 : Schéma du phénomène de séisme [3]

Les ondes sismiques se déplacent vers l'extérieur à partir de la source du tremblement de terre le long de la surface et à travers la terre à des vitesses variables en fonction de la nature du matériau par lequel elles se déplacent. Le point de départ de la rupture sismique sur la faille s'appelle l'hypocentre (foyer) et la projection de l'hypocentre à la surface est l'épicentre du séisme (voir Figure 1.1) [4].

### 1.2.2. Mesure du séisme

L'expérience de l'humanité avec les tremblements de terre est très brève. Au cours des années, plusieurs paramètres ont été développés pour bien quantifier et mesurer les caractéristiques et les effets des tremblements de terre. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, les scientifiques commencent à mesurer les tremblements de terre, généralement à l'aide des instruments très sensibles. Aujourd'hui, il existe deux approches dont la taille et la gravité des séismes peuvent être quantifiées : la magnitude et l'intensité.

### 1.2.2.1. Magnitude

La magnitude est une mesure quantitative de la taille du séisme en termes de sa quantité d'énergie libérée à la surface de rupture. Cette mesure, qui est une observation instrumentale, est le résultat du développement de l'instrumentation moderne pour mesurer le mouvement du sol pendant les séismes [5]. L'échelle de magnitude la plus populaire est l'échelle de Richter  $M_L$  qui a été développée par Charles F. Richter en 1936 [6]. Cette échelle estime l'énergie libérée au foyer d'un séisme à partir du logarithme de base 10 de l'amplitude sismique maximale de l'enregistrement d'un sismomètre standard situé à 100 km de l'épicentre. Aujourd'hui, l'échelle de magnitude de moment  $M_W$ , introduite en 1979 par Tom Hanks et Hiroo Kanamori est l'échelle la plus commune pour mesurer la taille des séismes des grandes magnitudes [7].

### 1.2.2.2. Intensité

Les échelles d'intensité sismique sont la mesure la plus ancienne des effets des tremblements de terre. L'intensité sismique d'un séisme est une mesure qualitative qui décrit la gravité du séisme en termes des effets observés et ressentis dans la zone ou la région urbaine affectée par ce séisme. Ces effets comprennent les effets dans la surface terrestre, l'environnement naturel, les dérangements au sol, l'environnement bâti, les dommages subis par les constructions et la façon dont les humains l'ont ressentie à l'endroit affecté [8].

Afin de caractériser les effets d'un tremblement de terre en termes des dommages potentiels, plusieurs échelles d'intensité sismique ont été développées dans le monde entier comme l'échelle macrosismique européenne « EMS-98 ». La classification des niveaux de l'intensité sismique dans « EMS-98 » est variée selon 12 niveaux d'intensité de « I » à « XII » avec des claires définitions des typologies des bâtiments et de la distribution des dommages corrélés à chaque degré d'intensité. L'intensité « I » représente les secousses imperceptibles et l'intensité « XII » représente une catastrophe généralisée [9].

### 1.2.3. Mesure du dommage

Les dommages subis par les constructions pendant les séismes sont généralement définis en dommages structuraux et dommages non structuraux. Plusieurs critères à propos la performance acceptable des bâtiments en cas des séismes sont considérés. Comprennent la sécurité contre l'effondrement complet ou partiel, la limitation de la déflexion et de la déformation et des autres critères. Les dommages subis par les constructions sont considérés

comme des évidences physiques d'une détérioration irréversible qui affectent la sécurité et la fonctionnalité de la construction.

Un endommagement d'un élément peut être défini comme une évidence des grandes déformations non linéaires et inélastiques avec une grande quantité d'énergie dissipée. Ces évidences sont sous forme des changements des propriétés du matériau et/ou des propriétés géométriques de l'élément. Ces changements entraînent une détérioration de la rigidité et la résistance de l'élément ce qui affecte et diminue leur performance latérale [10, 11].

En fait, il existe différents concepts pour la mesure et la classification des dommages physiques subis par les éléments sous des chargements sismiques où ces concepts sont basés sur des critères différents. « *État de dommage* » et « *Indice de dommage* » sont peut-être deux concepts courants de classification des dommages subis par les composants des bâtiments et également par les bâtiments d'une façon globale.

#### 1.2.3.1. Indice de dommage

Un indice de dommage « *Damage index* » décrit les dommages subis par un composant structural ou non structural d'un bâtiment. Plusieurs indices de dommage pour les bâtiments en béton armé ont été proposés dans la littérature. Les travaux de Park et Ang (1985) [10], Banon et al. (1981) [12], Wang et Shah (1987) [13] sont des exemples d'applications des indices de dommage.

Les indices de dommage ont été classés comme des indices de dommage locaux et des indices de dommage globaux en basant sur leur utilisation pour quantifier les dommages dans des composants individuels ou pour le bâtiment entier selon une échelle de zéro à l'unité. Le zéro indique que l'élément est en état intact et l'unité représente un état d'endommagement total (effondrement du composant ou du bâtiment). Par exemple, l'indice de dommage de Park et Ang (1985) est lié à la fois au déplacement inter étage et à l'énergie hystérétique dissipée, il consiste alors à une combinaison linéaire de déformation normalisée et d'absorption d'énergie :

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \delta_u} \quad (1.1)$$

Avec :

$\delta_m$ : Le déplacement plastique maximal positif ou négatif.

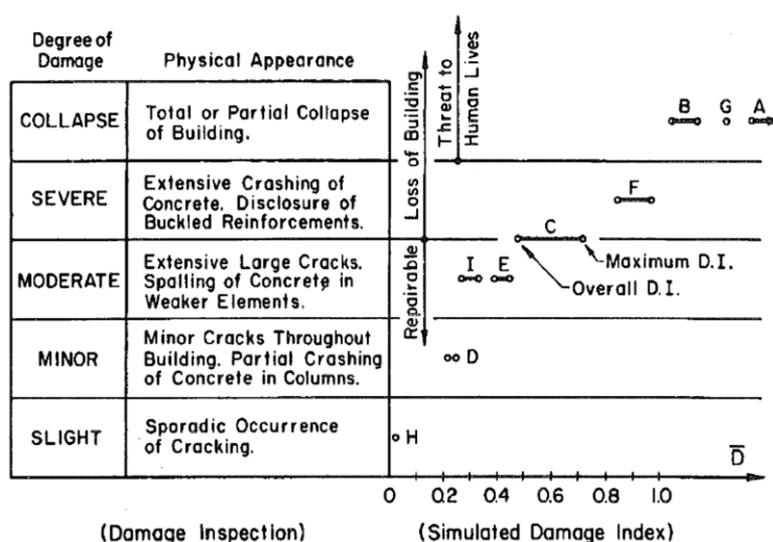
$\delta_u$ : La capacité de déplacement plastique sous charge monotone.

$\beta$ : Un paramètre non négatif du modèle.

$F_y$ : Une limite d'élasticité calculée.

$dE$ : L'énergie hystérétique dissipée incrémentale.

Cet indice de dommage et avec sa simplicité évidente a été calibré par rapport aux dommages observés obtenus à partir des essais de chargement cyclique des composants et des modèles structuraux, et pour cela il peut être considéré comme l'indice le plus populaire et le plus fiable (voir Figure 1.2) [10].



La détermination du facteur  $\beta$  était une tâche difficile. Park et Ang (1985) ont utilisé une régression des tests de laboratoire des éléments structuraux afin d'estimer le facteur  $\beta$  mais les résultats étaient très faibles (généralement inférieurs à 0,05), ce qui indique que la dissipation d'énergie cyclique n'a pas apporté une contribution significative dans le dommage global. Park et al. (1985) ont exprimé aussi les dommages globaux d'un bâtiment par la moyenne des indices locaux pondérés par l'absorption locale d'énergie et, par conséquent, un poids plus élevé est accordé aux éléments les plus gravement endommagés [14] :

$$D_{story} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i E_i}{\sum_{i=1}^N E_i}, D_{global} = \frac{\sum_{story,i=1}^N D_{story,i} E_{story,i}}{\sum_{story,i=1}^N E_{story,i}} \quad (1.2)$$

Où  $D_i$  est l'indice de dommage local à l'emplacement  $i$  et  $E_i$  est l'énergie dissipée à l'emplacement  $i$ . Ce système accorde une plus grande pondération aux éléments les plus fortement endommagés puisque les emplacements ayant des indices de dommage élevés sont également les endroits qui absorbent de grandes quantités d'énergie. Ils ont proposé également une classification de la réparabilité du dommage, un indice de dommage  $D < 0,4$  est considéré comme un niveau d'endommagement réparable. Par contre, tout indice de dommage  $0,4 \leq D < 1$  est considéré comme un niveau d'endommagement irréparable [15].

Sinha et Shiradhonkar (2012) ont effectué une révision considérable des indices de dommage disponibles dans la littérature. Ils ont étudié plusieurs approches selon leurs types et caractéristiques avec une analyse de la corrélation entre les indices de dommage et les états de dommages, et la capacité de ces indices de dommage à identifier certains états de dommages tels que les états de dommages faible, modéré et effondrement. Ils ont constaté que les indices de dommage actuels corrélaient avec bonne précision les bâtiments sans dommage et les bâtiments avec des dommages importants, mais les indices de dommage ne proposent pas une corrélation précise des états de dommages modérés ou intermédiaires qui sont les états de dommages les plus importants pour des objectifs de réparation après les séismes par exemple. Les travaux de Wang et Shah (1987), Roufaiel et Meyer (1987), Niu et Ren (1966) et Park et Ang (1985) sont des exemples des approches étudiées dans cette révision [14].

#### 1.2.3.2. État de dommage

Les états de dommages ont été utilisés pour classer les dommages lors des scénarios d'analyse des risques sismiques. Un état de dommage « *Damage state* » est une description qualitative des dommages physiques résultants d'un tremblement de terre, les états de dommages sont généralement discrets et décrivent l'ensemble des dommages subis par les éléments structurels et non structurels ou les dommages subis par l'ensemble de la construction lui-même. Pour cela, ils ont été utilisés pour représenter les conséquences des tremblements de terre tels que les coûts de réparation et les pertes monétaires, les pertes humaines ou tout autre terme [16]. Ils peuvent également être liés aux observations directes des preuves physiques de dommages comme la magnitude des fissures ou liés aux indices de dommage (voir Tableau 1.1) afin de créer des échelles des indices de dommage sélectionnés avec leurs états correspondants de dommages [10].

Tableau 1.1 : Échelle des indices de dommage pour différents états de dommages [17]

État de dommage	Indice de dommage de Park et Ang
Faible	0.1 – 0.2
Modéré	0.2 – 0.5
Grave	0.5 – 1
Effondrement	> 1

Les états de dommages représentent la sévérité des dommages observés d'une manière croissante en utilisant des termes quantitatifs discrets à partir du premier état de dommage qui se réfèrent à « *Aucun dommage* » jusqu'au dernier état de dommage qui est l'état de « *Effondrement* ». Différents états de dommages sont proposés entre ces deux états limites de dommage, généralement les états « *Dommage léger* », « *Dommage modéré* » et « *Dommage important* » sont adoptés. Même que les dommages subis par les bâtiments varient d'une façon continue en fonction de l'intensité du séisme, les états de dommages décrivent les dommages comme des intervalles, car il n'est pas pratique d'avoir une échelle continue pour décrire les dommages [18]. Il convient de mentionner que l'inconvénient principal des états de dommages est leur nature discrète et leur subjectivité puisqu'ils reposent fortement sur le jugement ou l'expertise technique, indépendamment de tout calcul structurel direct.

### 1.3. Approches d'évaluation des dommages/vulnérabilité sismique

Plusieurs méthodologies d'évaluation des dommages/vulnérabilités sismiques sont proposées et utilisées dans le monde entier. Ces méthodologies diffèrent en fonction de leurs dépenses et de leurs précisions, le choix de la méthodologie dépend de l'objectif et le contexte d'utilisation de la méthode, la disponibilité des données et de la technologie utilisée. Cette section présente une revue des diverses méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité et des dommages sismiques dans la littérature. L'applicabilité et les limitations de ces méthodes sont également analysées et discutées (voire Figure 1.3).

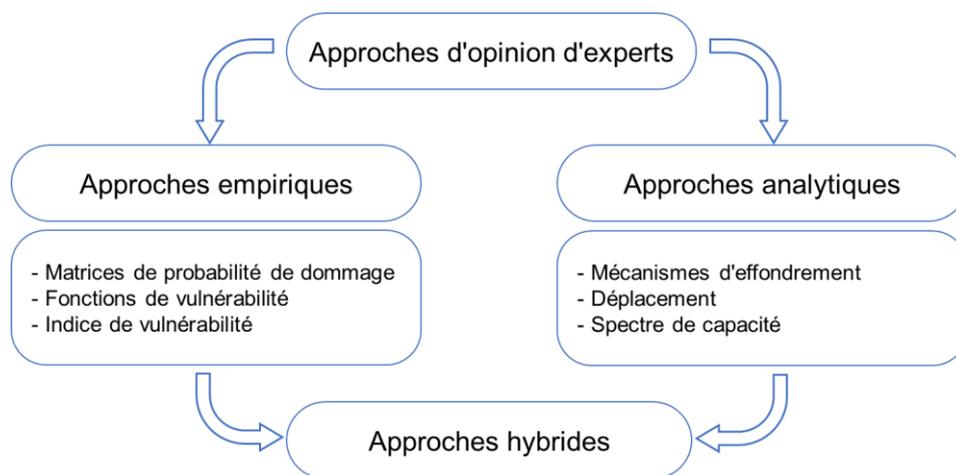


Figure 1.3 : Diverses approches existantes d'évaluation sismique.

Les méthodologies d'évaluation sismique varient selon leurs objectifs et leurs technologies utilisées. Plusieurs méthodologies sont développées dans la littérature, ces méthodologies seront groupées dans la section suivante en deux principaux groupes : Des méthodologies basées sur les approches **empiriques** et des méthodologies basées sur les approches **analytiques**. Toutefois, autres approches comme **l'opinion des experts** et les approches **hybrides** sont également discutées.

### 1.3.1. Approches d'opinion d'experts

En fait, presque toutes les approches développées pour l'évaluation sismique des constructions reposent dans une certaine mesure sur l'opinion des experts. Les jugements des experts ont été exploités afin de surmonter certains problèmes en considérant leurs jugements comme une meilleure estimation pour le problème donné. Cependant, les approches antérieures ont été fondées presque entièrement sur l'opinion d'experts.

Les premières méthodologies utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité et des dommages sismiques reposent entièrement sur l'opinion d'experts. Ces méthodes ont été utilisées avec succès dans les régions avec un haut aléa sismique ou lorsque de nombreuses expériences locales avec les séismes sont disponibles. Bien que, dans le cas où les données sismiques disponibles (les classes des constructions, l'intensité sismique locale...) sont rares ou pas fiables et les autres approches (empiriques et analytiques) ne sont pas réalisables, l'opinion d'experts a été consultée habituellement.

Ce genre des procédures repose sur le jugement et l'expérience de l'expert désigné et sa capacité à établir des relations entre un dommage observé aux différents niveaux d'intensité sismique. Fondamentalement, des experts et ingénieurs en séismes, ingénierie des

structures et en génie civil avec des expériences et des compétences éprouvées sont invités à fournir des estimations de la probabilité d'avoir un état de dommage particulier d'un type de construction particulier pour une intensité sismique donnée tout en basant sur leurs jugements techniques.

#### 1.3.1.1. Approche de l'ATC-13 (1985)

Le conseil américain de technologie appliquée « *Applied Technology Council – ATC* » a été le premier à appliquer la méthode d'opinion d'experts pour évaluer la vulnérabilité sismique des structures en Californie, États-Unis. L'approche est résumée dans le rapport ATC-13 (1985) pour estimer la vulnérabilité sismique [19]. Le rapport a classé les constructions en Californie en deux catégories principales avec des classes différentes. 78 classes pour la catégorie de « *Classification structurale* », dont 40 sont des bâtiments selon le type structurel du bâtiment tel que : la maçonnerie non armée, le béton armé, la charpente métallique contreventée, etc. en tenant compte de la hauteur du bâtiment (faible hauteur, hauteur moyenne et grande hauteur). Et 35 classes basées sur la catégorie de « *Classification fonctionnelle* » telle que : résidentielle, commerciale, industrielle, éducation et des bâtiments gouvernementaux. Le rapport propose des matrices de probabilité de dommage des différentes classes de construction basées sur le jugement de plus de 70 experts ayant une expérience éprouvée dans le domaine.

Les experts ont été invités à remplir des questionnaires avec leur estimation et jugement pour les différents états de dommages en termes de facteurs de dommages (voir Tableau 1.2) pour chaque typologie de bâtiment. Ces facteurs de dommage sont proposés pour différentes intensités sismiques en utilisant l'échelle (IMM) de VI à XII où ces facteurs représentent le rapport de la perte monétaire d'un bâtiment divisé par sa valeur de remplacement.

Tableau 1.2 : Classification des états de dommages selon ATC-13 (1985) [19]

État de dommage	Intervalle de facteur de dommage (%)	Facteur de dommage central	Description
1 – Aucun	0	0	Pas de dommage.
2 – Très léger	0 – 1	0.5	Dommages mineurs limités sans nécessiter de réparation.
3 – Léger	1 – 10	5	Dommages localisés importants de certains composants sans nécessiter de réparation.

4 – Modéré	10 – 30	20	Dommages localisés importants de nombreux composants avec nécessiter de réparation.
5 – Important	30 – 60	45	Dommages coûteux, nécessitent des réparations majeures.
6 – Majeure	60 – 100	80	Dommages importants et étendus. La construction peut être démolie ou réparée
7 – Détruit	100	100	Destruction totale de la majorité de la construction.

En outre, les experts ont été invités à donner trois niveaux d'estimation du facteur de dommage, faible, haute et la meilleure estimation. La meilleure estimation pour chaque niveau d'intensité sismique est interprétée comme la valeur moyenne ou l'état de dommage le plus attendu pour un type particulier de bâtiments. Les estimations faible et haute définissent les limites de probabilité de 90% du facteur de dommage, ce qui signifie qu'il existe seulement 10% de chance pour que le niveau de dommage soit plus grand ou moins que l'estimation de l'experte (voir Figure 1.4).

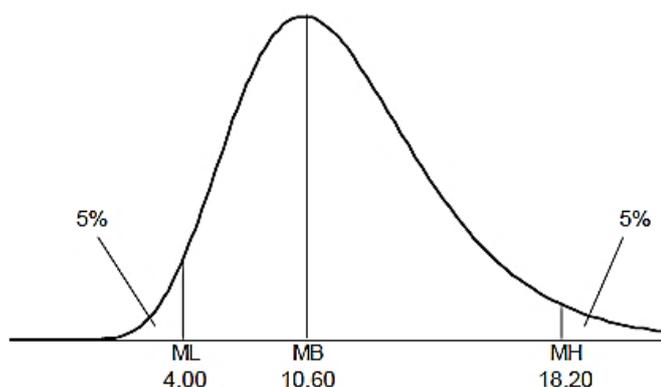


Figure 1.4 : Exemple d'une distribution log-normale du facteur de dommage estimé pour une intensité donnée montrant l'estimation faible (ML), la meilleure estimation (MB) et l'estimation haute (MH) du facteur de dommage [20].

Les experts ont également été invités à évaluer leurs propres niveaux d'expérience sur une échelle de 0 à 10, où 0 correspondant à une absence totale de connaissances et 10 à une certitude absolue afin de minimiser la subjectivité de l'approche. Bien que la méthode d'ATC-13 est difficile à étendre aux autres typologies des bâtiments et aux autres régions, l'approche est encore utilisée dans le monde en raison de son accessibilité.

- **Commentaires :**

L'approche d'opinion d'experts est capable de produire d'une façon efficace et relativement rapide des matrices de probabilité de dommage ou des fonctions de vulnérabilité à des faibles dépenses. Cette approche présente des avantages qui la rendent

convenablement applicable dans nombreux scénarios tels que l'absence complète des données des séismes passés ou pour certaines intensités spécifiques. L'approche s'appuie uniquement sur le jugement technique d'experts, des experts locaux de la région affectée qui possèdent une expérience considérable dans l'évaluation sismique des bâtiments peuvent être consultés. De plus, les approches d'opinion d'experts ne nécessitent pas des calculs structurels ce qui les rend moins coûteux par rapport aux autres approches.

D'autre part, certains inconvénients de ce genre des approches sont remarqués. Principalement la subjectivité de l'approche puisqu'elle repose sur l'expérience individuelle des experts consultés, leurs opinions sont subjectives et souffrent de préjugés humains tels que le conservatisme, le pessimisme et l'optimisme de l'expert. La fiabilité et la crédibilité de l'approche peuvent être remises en question même si des nombreuses mesures ont été prises pour réduire l'incertitude de l'approche, comme l'augmentation du nombre d'experts engagés ou l'autoévaluation du niveau d'expérience des experts [21].

### 1.3.2. Approches empiriques

Dans le passé, les données sismiques instrumentales étaient moins courantes et les stations d'enregistrement n'étaient pas encore disponibles. Les échelles d'intensité sismique étaient essentiellement la mesure commune des secousses sismiques [22]. Cela explique le fait que les études des pertes sismiques reposaient exclusivement sur des observations basées sur des échelles d'intensité macrosismique. L'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments notamment en grande échelle a été mise en place par le développement des plusieurs approches empiriques début des années 70. Les approches empiriques sont basées sur des données statistiques des enquêtes post-sismiques et des observations des dommages subis par différentes typologies des constructions dus aux différents séismes de différentes intensités.

Les approches empiriques ont été développées dues au fait que les premières études des séismes passés résultent des données statistiques étendues sur les états de dommages de diverses typologies des constructions. Ces données statistiques ont été extrapolées pour évaluer ou prévoir la vulnérabilité sismique pour des futurs événements tout en supposant que les dommages observés dus aux séismes particuliers pour une typologie particulière dans la même ou dans une région similaire seront les mêmes en cas des futurs séismes avec une typologie des constructions similaire.

L'objectif de ces approches est de : déterminer le niveau des dommages pour un type particulier de bâtiment pour une intensité particulière de séisme, d'identifier et d'établir des modèles des dommages sismiques, de synthétiser les données et d'extraire des leçons pour des futures approches de conception et même pour des décisions politiques et des programmes d'atténuation [23]. Plusieurs approches d'évaluation de la vulnérabilité/dommages sismiques ont été développées en basant sur des bases de données empiriques et parfois ces approches ont été calibrées en utilisant des opinions d'experts.

### 1.3.2.1. Approches basées sur les matrices de probabilité de dommage (DPM)

Les matrices de probabilité de dommage présentent (sous une forme discrète) la probabilité d'occurrence  $P = [D = j | i]$  d'un degré de dommage  $j$  d'une classe de bâtiment pour un niveau d'intensité sismique donnée  $i$  [24, 25]. Il est possible généralement d'obtenir une répartition des bâtiments endommagés avec des sondages après l'occurrence d'un séisme où ces informations peuvent être utilisées pour produire des matrices de probabilité de dommage. Le travail de Whitman et al. (1973) est parmi les premières tentatives de produire des matrices de probabilité de dommage. Il a rassemblé des données statistiques de plus de 1600 bâtiments endommagés avec une hauteur minimale de cinq étages pour des diverses typologies structurelles après le séisme de San Fernando du 9 février 1971 afin de proposer des matrices de probabilité de dommage (DPM) pour la prédiction probabiliste des dommages subis par bâtiments. Ces dommages peuvent être structuraux et non structuraux (voir Tableau 1.3) [24].

Tableau 1.3 : Matrice de probabilité de dommage de Whitman et al. (1973) [24]

État de dommage	Dommage structural	Dommage non-structural	Ratio de dommage (%)	Intensité du séisme				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Aucun	Aucun	0 - 0.05	<b>10.4</b>	-	-	-	-
1	Aucun	Faible	0.05 - 0.3	<b>16.4</b>	<b>0.5</b>	-	-	-
2	Aucun	Localisé	0.3 - 1.25	<b>40.0</b>	<b>22.5</b>	-	-	-
3	Non apparent	Répandu	1.25 - 3.5	<b>20.0</b>	<b>30.0</b>	<b>2.7</b>	-	-
4	Faible	Substantiel	3.5 - 4.5	<b>13.2</b>	<b>47.1</b>	<b>92.3</b>	<b>58.8</b>	<b>14.7</b>
5	Substantiel	Extensif	7.5 - 20	-	<b>0.2</b>	<b>5.0</b>	<b>41.2</b>	<b>83.0</b>
6	Majeur	Presque totale	20 - 65	-	-	-	-	<b>2.3</b>
7	Bâtiment condamné		100	-	-	-	-	-
8	Effondrement		100	-	-	-	-	-

L'état de dommage définit le degré de dommages structurels et non structurels qui aboutiraient à une typologie particulière de bâtiment pour une intensité particulière d'un

séisme. Le ratio de dommage a été déterminé comme le rapport du coût de réparation divisé par le coût du remplacement du bâtiment endommagé.

En Europe, Braga et al. (1982) ont essayé de produire des matrices de probabilité de dommage en basant sur les données statistiques du séisme d'Irpinia en Italie (1980). Les bâtiments ont été classés en trois classes de vulnérabilité « A, B et C ». Une matrice de probabilité de dommage basée sur l'échelle MSK a été proposée pour chaque classe de vulnérabilité. Cette étude a proposé une loi binominale pour représenter les distributions des dommages des différentes typologies des bâtiments sous différentes intensités sismiques [25]. Ces matrices sont toujours utilisées en Italie où des mises à jour et des améliorations sont également réalisées [26, 27]. Les approches empiriques basées sur les matrices de probabilité de dommage ont été classées parfois comme des approches « *Directe* » en raison de l'existence d'une relation directe entre la typologie du bâtiment et les dommages observés [28].

#### 1.3.2.2. Approches basées sur les fonctions de vulnérabilité

Les fonctions de vulnérabilité sont des courbes qui expriment la relation entre le dommage moyen et le niveau d'intensité sismique pour une typologie de construction. Les fonctions de vulnérabilité empiriques sont fondées sur les dommages observés aux bâtiments à la suite des séismes. Elles peuvent être considérées comme une représentation graphique « *Continue* » des matrices de probabilité de dommage (DPM), les fonctions de vulnérabilité ont été introduites un peu plus tard que les DPM [23].

Différentes fonctions de vulnérabilité empiriques ont été proposées dans la littérature généralement avec des distributions normales ou log-normales. L'un des obstacles lors de la dérivation des fonctions de vulnérabilité (qui sont des variables continues) est le fait que les intensités sismiques sont exprimées sous forme des variables discrètes et non pas continues. Ce problème a été résolu par Spence et al. (1992) en utilisant leur « *Parameterless Scale of Intensity  $\psi$  (PSI)* » [29] associée à une distribution normale pour définir la gravité des mouvements du sol afin de dériver des fonctions de vulnérabilité (voire Figure 1.5).

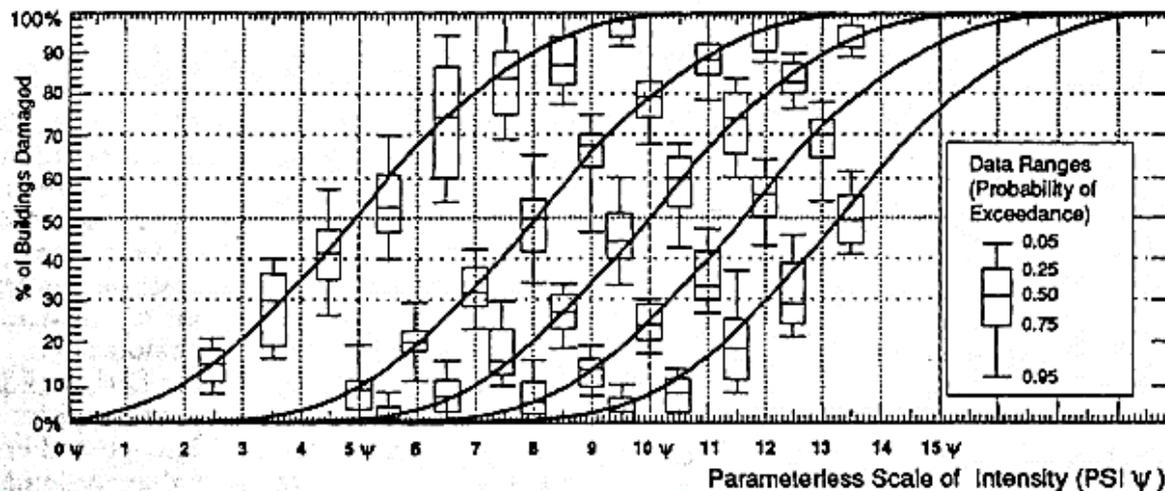


Figure 1.5 : Fonctions de vulnérabilité pour les niveaux des dommages de D1 à D5 proposées par Spence et al. (1992) [29]

Les fonctions de vulnérabilité empiriques proposées sont fondées sur des dommages observés des bâtiments selon l'échelle de dommages MSK. Spence et al. supposent que les bâtiments de la même typologie, lorsqu'ils subissent aux mouvements du sol avec des sévérités similaires, leurs dommages seront répartis de manière similaire entre les différents niveaux de dommage [23]. Leur étude a été réalisée en utilisant une base de données de 70,000 bâtiments recensés pendant 13 différents séismes où des fonctions de vulnérabilité empirique ont été proposées pour des différentes typologies de bâtiments [29].

Rossetto et A Elnashai (2003) ont effectué une étude très extensive afin d'en déduire des courbes de vulnérabilité empiriques pour les structures en béton armé en Europe pour l'évaluation des risques sismiques. Ces courbes de vulnérabilité sont basées sur des données d'observation recueillies à partir de 19 séismes et 340000 structures en béton armé. Ils ont introduit une nouvelle échelle de dommages « *Homogenized reinforced concrete scale – HRC* » qui était liée aux échelles de dommages existantes (voir Tableau 1.4). L'échelle HRC a été calibrée expérimentalement en utilisant un paramètre qui décrit le déplacement interétage maximal pour des constructions de différents systèmes de résistances aux charges latérales [30].

Tableau 1.4 : Équivalence entre les échelles existantes et l'échelle HRC [30]

DI <sub>HRC</sub>	HRC	HAZUS 1999	VISION 2000	FEMA 273	EMS98	MSK	AIJ	ATC-13	ATC-21	EPPO
0	None	No damage limit state								
10	Slight	Slight damage	Fully operational	Immediate occupancy	Grade 1	D1	Light	Slight	Green Tag	Green Tag
20	Light		Operational	Damage control	Grade 2	D2	Minor	Light		
30								Moderate		
40	Moderate	Moderate damage	Life safe	Life safe	Grade 3	D3	Moderate	Moderate	Yellow Tag	Yellow Tag
50								Heavy		
60								Major		
70	Extensive	Extensive damage	Near collapse	Limited safety	Grade 4	D4	Major	Major	Red Tag	Red Tag
80				Collapse prevention						
90								Major		
100	Partial Collapse	Collapse	Collapse	Collapse prevention	Grade 4	D4	Major	Major	Red Tag	Red Tag
100	Partial Collapse									
	Collapse	Collapse limit state								

L'échelle proposée est subdivisée en sept états de dommages allant de « *Aucun* » à « *Effondrement* ». Les états limites étant définis à l'aide des indices de dommage « DI<sub>HRC</sub> » qui ont été calibrés expérimentalement à l'aide des paramètres de déplacement interétage maximal. Cette échelle contient des informations sur les dommages structuraux et non structuraux typiques attendus dans les quatre principaux types des structures en béton armé en Europe [30] :

- Structures à ossature ductile résistant aux moments.
- Structures à ossature non ductile résistant aux moments.
- Structures à ossature résistant aux moments avec remplissage.
- Structures avec voiles de contreventement.

Les courbes de vulnérabilité empiriques dérivées expriment la probabilité de dépasser les états limites de dommages HRC par rapport du paramètre de demande sismique qui peut être considéré comme une représentation graphique du risque sismique. Ces courbes de vulnérabilité ont été dérivées en affectant des valeurs des indices de dommage « DI<sub>HRC</sub> » aux états de dommages en utilisant : Des valeurs d'accélération horizontale maximale du sol (PGA), des spectres de réponse d'accélération ( $S_{a5\%}$ ), des spectres de réponse de

déplacement ( $S_{d5\%}$ ) pour un amortissement  $\xi = 5\%$  et des spectres de réponse inélastique pour des valeurs d'amortissement basées sur la ductilité ( $S_{du\%}$ ) (voir Figure 1.6) [30].

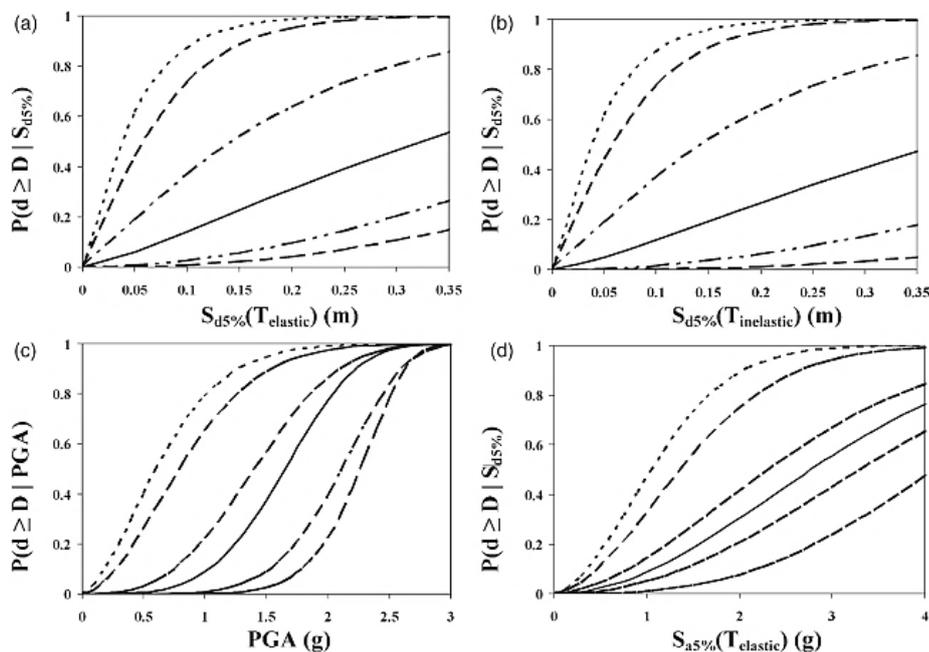


Figure 1.6 : Courbes de vulnérabilité empiriques générées pour différents paramètres de mouvement du sol [30]

Plusieurs autres études ont été menées pour dériver des fonctions de vulnérabilité empiriquement. Sabetta et al. (1998) Dérivent des courbes de vulnérabilité en utilisant des données d'environ de 50000 bâtiments endommagés après des séismes destructeurs en Italie [31], la base de données a été classée en trois « *Classes structurelles* » et six « *Niveaux de damage* » selon l'échelle MSK. D'autres fonctions de vulnérabilité ont été proposées par Rota et al. (2006). Ils ont dérivé des courbes de fragilité typologiques pour des classes de bâtiments typiques à partir des données des enquêtes post-sismiques pendant 30 ans en Italie [32] où ils ont utilisé la classification des bâtiments adoptée dans le projet RISK-UE [33].

### 1.3.2.3. Approches basées sur les indices de vulnérabilité

Les approches basées sur les indices de vulnérabilité consistent à recueillir des informations quantitatives sur le bâtiment ou le groupe des bâtiments après des observations visuelles en utilisant des formulaires d'évaluation qui comprennent un ensemble prédéterminé des paramètres. Ces paramètres décrivent la source potentielle de vulnérabilité dans le bâtiment. L'indice de vulnérabilité est attribué à chaque bâtiment comme une somme pondérée des valeurs de ces paramètres qui sont supposés d'affecter la réponse sismique du

bâtiment. Plus la valeur de l'indice de vulnérabilité est élevée, plus le bâtiment est vulnérable selon la gravité du mouvement du sol.

#### 1.3.2.3.1. Approche GNDT

En Italie, et pendant les dernières décennies, des procédures basées sur des systèmes de pointage ou indice de vulnérabilité ont été suivies afin d'estimer la vulnérabilité des constructions. Une procédure a été présentée par Benedetti et Petrini (1984) [34] et après par le « *GNDT* » 1993 [35], alors la procédure a généralement été appelée la méthode de GNDT « *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* ».

L'approche de l'indice de vulnérabilité de GNDT base sur l'inspection visuelle pour identifier le système structurel des bâtiments et les paramètres importants qui pourraient influencer la vulnérabilité du bâtiment. Ces paramètres incluent la configuration en plan et en élévation, type de fondation, éléments structurels et non structurels, etc. avec 11 paramètres proposés au total qui sont illustrés sous forme d'une fiche d'évaluation de GNDT.

Cette approche propose deux niveaux d'évaluation, le premier niveau consiste à une évaluation rapide et le deuxième niveau consiste à une évaluation détaillée pour les constructions en béton armé et en maçonnerie. Les informations collectées sont groupées dans une fiche d'évaluation avec 11 sections dont 9 sont communes pour les deux typologies de construction et deux sections sont distinctes :

- Type et organisation du système résistant
- Qualité du système résistant
- Résistance conventionnelle
- Position du bâtiment et fondations
- Planchers
- Configuration en plan
- Configuration en élévation
- Éléments non structurels
- État du bâtiment

Et les deux sections distinctes sont :

- Rapport épaisseur/longueur et toiture pour les constructions en maçonnerie.
- Nœuds éléments critiques et éléments fragiles pour les constructions en béton armé.

L'indice de vulnérabilité de chaque bâtiment est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (1.3)$$

Où :

$I_v$  : l'indice de Vulnérabilité du bâtiment expertisé.

$K_i$  : Coefficient de qualification pour chaque paramètre de « A : *Optimal* » jusqu'à « D : *Défavorable* » (voir Tableau 1.5).

$W_i$  : le poids de chaque paramètre selon leur importance relative dans la construction.

Tableau 1.5 : Éléments de calcul de l'indice de vulnérabilité [35]

Élément	Classe ( $K_i$ )				Facteurs de pondération ( $W_i$ )
	A	B	C	D	
1. Type du système résistant	0	5	20	45	1.00
2. Qualité du système résistant	0	5	25	45	0.25
3. Résistance conventionnelle	0	5	25	45	1.50
4. Position du bâtiment et fondations	0	5	25	45	0.75
5. Planchers	0	5	15	45	*
6. Configuration en plan	0	5	25	45	0.50
7. Configuration en élévation	0	5	25	45	*
8. Distance entre murs / Toitures	0	5	25	45	0.25
9. Éléments critiques / Éléments fragiles	0	15	25	45	*
10. Éléments non structuraux	0	5	25	45	0.25
11. État du bâtiment	0	5	25	45	1.00

Le score final de cette approche varie entre 0 et 382.5 et normalisé généralement entre 0 et 100. Le 0 représente une faible vulnérabilité et le 100 une vulnérabilité maximale. La méthode de GNDT notamment leur niveau II (évaluation détaillée) a été intensivement appliquée en Italie et récemment dans la ville de Catane. Cela a mené à une base de données des dommages post-sismiques où des distributions statistiques de l'indice de vulnérabilité en fonction de quelques paramètres ont été dérivé. L'approche a été calibrée par des données des dommages des séismes passés afin d'obtenir une bonne corrélation entre l'indice de vulnérabilité, les dommages sismiques et l'intensité sismique ou le PGA [36].

#### 1.3.2.3.2. Approche FEMA 154 (ATC-21)

En 1988, le conseil de technologie appliquée « ATC » a développé la méthode FEMA-154 connue aussi comme ATC-21 « *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards : A Handbook* ». Avec le Rapport d'assistance technique ATC-21-1 « *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation* » en coopération avec le FEMA « *Federal Emergency Management Agency* » Dans le cadre du projet « ATC-21 » [37, 38].

Le document offre une méthodologie pour évaluer la sécurité sismique d'un grand inventaire des bâtiments d'une façon rapide et économique avec un minimum accès aux bâtiments pour déterminer les bâtiments potentiellement dangereux qui nécessitent une évaluation plus détaillée. En 1999, cette méthode a été révisée par l'ATC et publiée en 2002 (FEMA 154, FEMA 155, 2nd Edition) [39, 40] et encore une fois en 2015 (FEMA 154, FEMA 155, 3rd Edition) [41, 42].

Cette méthode a été développée afin d'identifier et de classer les bâtiments qui sont potentiellement sismiquement dangereux avec un objectif principal de localiser :

- Les bâtiments construits et conçus avant l'adoption des exigences parasismiques.
- Les bâtiments construits sur des sols mous ou bien faibles.
- Les bâtiments ayant des caractéristiques de performance qui influencent leur réponse sismique d'une façon négative.

Lorsque des bâtiments sont identifiés comme des bâtiments « *Potentiellement dangereux* », ces bâtiments devraient être encore évalués par des ingénieurs spécialisés. Notant que cette méthodologie est fondée sur des observations visuelles du bâtiment de l'extérieur « *Sidewalk Survey* » et parfois si possible de l'intérieur. Des fiches techniques pour la collection des informations sont mises à la disposition selon le niveau de l'évaluation (Niveau I, Niveau II) et selon la zone sismique (Faible, Moyenne et Forte). Chaque bâtiment évalué est attribué initialement par un score de base ( $S_B$ ) selon le type et le matériau de construction parmi les 17 types de structures classés aux États-Unis (des constructions en bois, charpente métallique, maçonnerie et en béton armé) et la classe de la zone sismique [41-43].

Ce score de base est modifié après par l'ajout ou la soustraction des facteurs de modification ( $S_M$ ) en prenant en compte plusieurs paramètres comme :

- L'irrégularité en élévation et en plan.
- Le niveau de conception parasismique « *Pré-code* » pour les constructions construites et conçues avant l'adoption de code parasismique.
- Le « *Post-Benchmark* » pour les constructions construites et conçues après une amélioration significative de code sismique.
- Le type de sol en prenant en considération la hauteur de la construction.

Le score de base et les scores modifiés ont été calculés par la détermination de la probabilité d'effondrement d'une construction à travers la carte de ( $MCE_R$ ) « *Risk-targeted Maximum Considered Earthquake* » selon la relation (1.4). Cette carte est une version améliorée de la version précédente (MCE) « *Maximum Considered Earthquake* » [41, 42] :

$$S = -\log_{10} (P [\text{Collapse} / MCE_R \text{ ground motions}]) \quad (1.4)$$

La 3<sup>ème</sup> version de la méthode FEMA-154 a ajouté un score minimum ( $S_{MIN}$ ) pour éviter des scores négatifs qui peuvent être obtenus [41].

Tableau 1.6 : Valeurs des scores de base, facteurs de modification et score final [41]

BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL LEVEL 1 SCORE, $S_{L1}$																		
FEMA BUILDING TYPE	Do Not Know	W1	W1A	W2	S1 (MRF)	S2 (BR)	S3 (LM)	S4 (RC SW)	S5 (URM INF)	C1 (MRF)	C2 (SW)	C3 (URM INF)	PC1 (TU)	PC2	RM1 (FD)	RM2 (RD)	URM	MH
Basic Score		3.6	3.2	2.9	2.1	2.0	2.6	2.0	1.7	1.5	2.0	1.2	1.6	1.4	1.7	1.7	1.0	1.5
Severe Vertical Irregularity, $V_{L1}$		-1.2	-1.2	-1.2	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0	-0.8	-0.9	-1.0	-0.7	-1.0	-0.9	-0.9	-0.9	-0.7	NA
Moderate Vertical Irregularity, $V_{L1}$		-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	NA
Plan Irregularity, $P_{L1}$		-1.1	-1.0	-1.0	-0.8	-0.7	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.4	NA
Pre-Code		-1.1	-1.0	-0.9	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.2	-0.4	-0.7	-0.1	-0.5	-0.3	-0.5	-0.5	0.0	-0.1
Post-Benchmark		1.6	1.9	2.2	1.4	1.4	1.1	1.9	NA	1.9	2.1	NA	2.0	2.4	2.1	2.1	NA	1.2
Soil Type A or B		0.1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3
Soil Type E (1-3 stories)		0.2	0.2	0.1	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.4	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4
Soil Type E (> 3 stories)		-0.3	-0.6	-0.9	-0.6	-0.6	NA	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.3	NA	-0.4	-0.5	-0.6	-0.2	NA
Minimum Score, $S_{MIN}$		1.1	0.9	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	1.0

Le score final est obtenu par la somme du score de base avec tous les facteurs (Scores) de modification selon la relation suivante où le score final ne doit pas être inférieur à ( $S_{MIN}$ ) :

$$S_{L1} = S_B + \sum S_M \text{ Avec } S_{L1} \geq S_{MIN} \quad (1.5)$$

La 3<sup>ème</sup> version de la méthode FEMA-154 offre un 2<sup>ème</sup> niveau d'évaluation qui est un niveau optionnel. Leur objectif donc est d'obtenir des informations complémentaires et d'offrir une évaluation plus précise sans une augmentation substantielle de l'effort ou du temps nécessaire. Puisque l'objectif de cette approche est de sélectionner les constructions expertisées en deux catégories :

- Les bâtiments qui présentent une performance sismique acceptable.
- Les bâtiments qui sont potentiellement dangereux et nécessitent une évaluation plus détaillée.

L'approche a proposé un score acceptable « *Cut-off score* » = 2.0 pour séparer ces deux catégories où les bâtiments qui présentent une performance sismique acceptable doivent avoir un score final supérieur ou égal à 2.0 où la probabilité d'effondrement soit égale à 1% [41].

- *Commentaires*

Les approches empiriques généralement ont l'avantage d'être basées sur des données observées réelles. Cela permet de prendre en considération multiple autres effets tels que les effets de site, la variabilité de la capacité structurelle d'un groupe de bâtiments, l'interaction sol structure et les mécanismes potentiels qui régissent les modes de défaillance.

Puisque les données statistiques sont généralement spécifiques à des intensités sismiques, des typologies des bâtiments et des zones géographiques particulières, l'application de ces méthodes est toujours limitée et localisée. Mais notant que ces types des approches ont été développés avant que les ordinateurs de haute performance étaient disponibles pour exécuter des analyses complexes. Les approches empiriques étaient donc les seules approches raisonnables, pratiques et possibles qui pourraient être utilisées pour l'évaluation du risque sismique à une grande échelle.

Les approches empiriques présentent un haut niveau d'incertitude puisqu'elles se basent sur l'intensité sismique ce qui réfère aux observations de dommage qui est un paramètre non instrumental. Cela nous amène au fait que des données limitées sont disponibles pour des faibles intensités sismiques (Intensité sismique  $I < VI$ ) où aucun dommage observable n'est possible.

### 1.3.3. Approches analytiques

Il y a des cas où ni les approches empiriques ni les approches d'opinion d'experts ne sont disponibles ou fiables pour effectuer une évaluation sismique d'un bâtiment. De tels cas peuvent se présenter lorsque les données des bâtiments endommagés après les tremblements de terre sont limitées ou lorsque les données ou l'expérience disponible dans la région affectée ne peuvent pas être applicables aux autres régions. Dans telles situations pareilles, et en tirant parti du développement considérable des outils informatiques de calcul où des calculs intensifs et des simulations très poussées peuvent être effectués dans des délais très pratiques. Des approches analytiques peuvent être utilisées pour simuler le comportement sismique des bâtiments basant sur des calculs numériques des modèles structurels représentatifs afin d'obtenir des données détaillées qui permettent de dériver par exemple des courbes de vulnérabilité [44].

Les approches analytiques, souvent appelées des approches théoriques, ne se fondent pas sur des données d'observation des dommages après les séismes. Mais elles évaluent la performance attendue des bâtiments, y compris les états de dommages attendus sous l'effet

d'une charge sismique en se basant sur des simulations et des calculs à l'aide des modèles structurels. Ces modèles représentent les caractéristiques du bâtiment et donc son comportement sismique ainsi que les caractéristiques des charges sismiques. La simulation du bâtiment est généralement réalisée à l'aide de diverses méthodes numériques et la simulation des charges sismiques est réalisée sous forme des spectres de réponse ou sous forme des accélérations en fonction du temps.

Plusieurs approches analytiques simplifiées et détaillées ont été introduites dans la littérature pour évaluer la réponse sismique des bâtiments. Ces approches sont basées sur différentes théories, que le comportement de la construction soit considéré comme linéaire ou non linéaire et que la charge sismique soit considérée comme des charges statiques ou dynamiques. Cependant, le choix de la méthode dépend de l'ampleur du problème, où la qualité et la quantité des données recueillies dépendent de la taille de l'échantillon. Les méthodes simplifiées devraient pouvoir évaluer un grand nombre de bâtiments en peu de temps en utilisant des modèles simples avec peu de paramètres d'entrée. Des méthodes plus simples nécessitent moins de temps, ce qui les rend plus pratiques dans les scénarios sismiques avec des résultats toujours fiables. Des méthodes plus sophistiquées et détaillées conviennent aux bâtiments calculés récemment où la performance sismique peut être simulée et évaluée d'une façon analytique avec des résultats de haute qualité.

Chaque approche analytique requise des étapes pour générer leurs résultats. Ces étapes sont essentiellement la définition du système structurel, la génération des paramètres du mouvement du sol, l'évaluation de la réponse structurelle du système et finalement le traitement statistique des résultats des réponses obtenus. Les approches analytiques peuvent être classées comme suit :

- Les approches basées sur des mécanismes d'effondrement.
- Les approches basées sur le déplacement.
- Les approches basées sur le spectre de capacité.

#### 1.3.3.1. Les approches basées sur les mécanismes d'effondrement

Diverses recherches ont été menées en basant sur des approches analytiques qui utilisent des indices et des multiplicateurs d'effondrement. Ces paramètres sont calculés sur la base des caractéristiques géométriques et mécaniques du bâtiment ou du groupe des bâtiments afin de déterminer le mécanisme d'effondrement le plus probable qui peut se former. Cela permettra donc d'évaluer les dommages éventuels de cet effondrement. Ce type

d'approches a été particulièrement appliqué aux bâtiments en maçonnerie et plus récemment, aux bâtiments en béton armé.

Une procédure portant le nom de « *VULNUS* » a été mise au point à l'université de Padoue (Italie) pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie non renforcée (pour un seul bâtiment ou pour un groupe des bâtiments) [45, 46]. Cette approche permet d'évaluer multiples facteurs qui contrôlent la réponse de la structure (tels que les caractéristiques géométriques et mécaniques du bâtiment) en appliquant la théorie mathématique des ensembles flous afin de définir les multiplicateurs d'effondrement. La détermination de la probabilité de dépassement un état limite d'effondrement est en fonction de quatre paramètres [23] :

- Le multiplicateur d'effondrement pour le mécanisme de défaillance dans le plan.
- Le multiplicateur d'effondrement pour le mécanisme de défaillance hors plan.
- La réponse d'accélération absolue moyenne du bâtiment (l'effort tranchant maximal à la base, divisé par le poids total du bâtiment).
- Le facteur d'incertitude (exprimé par la théorie des ensembles flous) qui est une combinaison des facteurs de vulnérabilité pondérés (comme la qualité du système porteur ou l'interaction entre le sol et les fondations...).

Les deux principaux multiplicateurs d'effondrement dans cette approche sont :

Le 1<sup>er</sup> multiplicateur est le multiplicateur d'effondrement pour le mécanisme de défaillance dans le plan qui représente la rupture par cisaillement au rez-de-chaussée. Ce multiplicateur est calculé par le rapport entre la résistance au cisaillement dans le plan du système de murs et le poids total du bâtiment :

$$I_1 = \frac{\min(V_x, V_y)}{W} \quad (1.6)$$

Où :  $V_x$  et  $V_y$  sont les résistances dans les directions  $x$  et  $y$  à la hauteur du milieu de l'étage du rez-de-chaussée qui est calculé en fonction de la résistance à la traction de la maçonnerie et la surface totale des murs.  $W$  est le poids total du bâtiment.

Le 2<sup>ème</sup> multiplicateur est le multiplicateur d'effondrement pour le mécanisme de défaillance hors plan qui représente le rapport entre la résistance la plus critique à la flexion hors plan du mur extérieur et le poids total. Ce multiplicateur est calculé par la somme de la résistance des panneaux verticaux ( $I'_2$ ) et horizontaux ( $I''_2$ ) du mur :

$$I_2 = \min_i (I_2' + I_2'')_i \quad (1.7)$$

Une autre approche analytique basée sur les multiplicateurs d'effondrement a été introduite par D'Ayala et Speranza [47, 48] pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments historiques en maçonnerie. La méthode de « *FaMIVE* » (*Failure Mechanism Identification and Vulnerability Evaluation*) est fondée sur une analyse des défaillances par le calcul des coefficients des charges de rupture (multiplicateur d'effondrement). Ces coefficients sont définis par le calcul de la capacité de cisaillement équivalente pour chaque mur de façade afin de déterminer le mécanisme d'effondrement le plus réaliste (probable) que ce soit dans le plan ou hors plan.

L'approche propose plusieurs mécanismes possibles d'effondrement hors plan des murs extérieurs et d'effondrements dans le plan (voir Figure 1.7) [47]. L'occurrence d'effondrement local des autres éléments verticaux ou des pignons sont également pris en compte. Cependant, l'effondrement des planchers est traité comme étant associé aux effondrements hors plan [48].

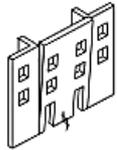
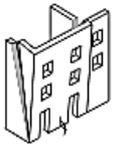
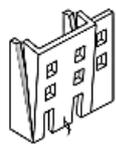
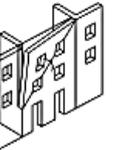
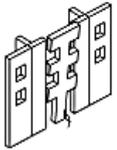
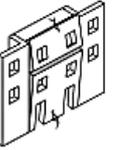
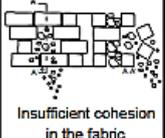
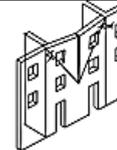
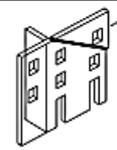
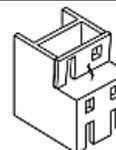
A	B1	B2	C	D	E	F
VERTICAL OVERTURNING	OVERTURNING WITH 1 SIDE WING	OVERTURNING WITH 2 SIDE WINGS	CORNER FAILURE	PARTIAL OVERTURNING	VERTICAL STRIP OVERTURNING	VERTICAL ARCH
						
FURTHER PARTIAL FAILURES				ASSOCIATED FAILURES		
G	H	I	L	ROOF/FLOORS COLLAPSE	MASONRY FAILURE	
HORIZONTAL ARCH	IN PLANE FAILURE	VERTICAL ADDITION	GABLE OVERTURNING			
				Insufficient cohesion in the fabric		

Figure 1.7 : Mécanismes de défaillance hors plan proposés par D'Ayala et al. (2003) [48]

L'analyse des défaillances est effectuée dans cette approche par étage de sorte qu'il est possible d'identifier le nombre d'étages concernés par n'importe quel mode d'effondrement.

Cosenza et al. (2005) ont aussi proposé une approche analytique récente qui base sur les mécanismes d'effondrement pour évaluer la capacité sismique des bâtiments en béton

armé [49]. L'approche basée sur plusieurs points à partir de : La définition de la capacité sismique d'un modèle de construction générique, l'établissement des mécanismes d'effondrement présumés et prédéfinis (voir Figure 1.8) puis le calcul de l'effort tranchant correspondant à la base en supposant une distribution linéaire des forces sismiques horizontales [23].

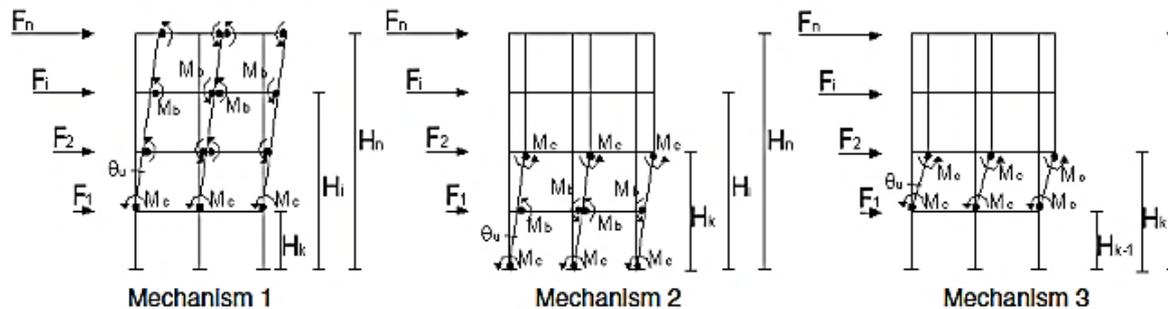


Figure 1.8 : Mécanismes d'effondrement proposés par Cosenza et al. (2005) [49]

Le comportement sismique global du bâtiment est ensuite représenté en termes de coefficient de l'effort tranchant à la base et de déplacement latéral global du bâtiment qui est défini en divisant le déplacement au sommet par la hauteur du bâtiment. La capacité sismique du bâtiment correspond au coefficient de l'effort tranchant à la base le plus faible. Ce coefficient est représenté par certains nombres de réponses sismiques en tenant compte des différentes configurations géométriques, structurales et propriétés des matériaux par la réalisation des simulations *Monte-Carlo*. Ces simulations permettent de déterminer les « *Courbes de capacité probabiliste* » exprimant la probabilité d'avoir une capacité sismique inférieure à la valeur seuil attribuée [23, 49].

### 1.3.3.2. Les approches basées sur le déplacement

D'autres approches analytiques ont été proposées, l'évaluation sismique des bâtiments par le calcul des déplacements est une approche analytique qui permet d'analyser les déplacements dans le bâtiment pour estimer les dommages possibles. Le travail du Calvi et al. (1999) [50] a été l'une des premières tentatives d'estimation des dommages subis par les bâtiments par l'analyse de leurs capacités de déplacement et leurs dissipations d'énergie en utilisant une approche basée sur les déplacements directs [51]. L'approche du Calvi et al. est basée sur :

1) La modélisation du bâtiment sous forme d'un système à un seul degré de liberté (SDOF) ce qui est l'équivalent du système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) (voir Figure 1.9)

afin d'en déduire le comportement non linéaire du bâtiment. 2) L'évaluation de la capacité de déplacement d'un bâtiment correspondant à quatre états limites en tenant compte les dommages structuraux et non structuraux. 3) L'évaluation de la demande de déplacement résultant d'un spectre de déplacement [50].

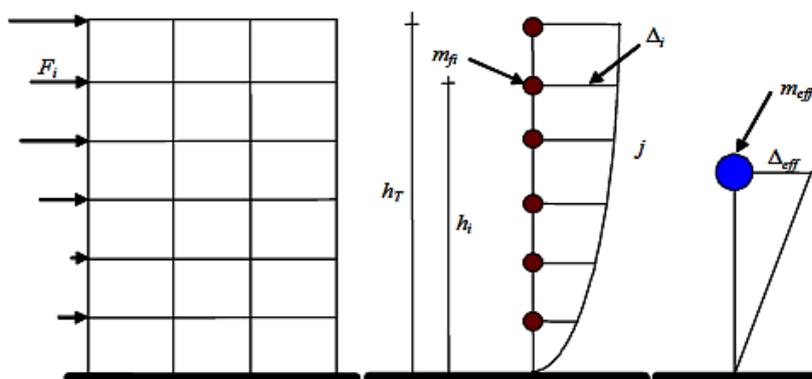


Figure 1.9 : Modèle simplifié d'un système à un seul degré de liberté proposé par Calvi et al. (1999) [50]

Différents profils de déplacement ont été pris en compte en fonction des mécanismes d'effondrement pour chaque état limite. Les mécanismes de rupture des poteaux et des poutres (voir Figure 1.10) ont été pris en compte pour les constructions en poteaux-poutres.

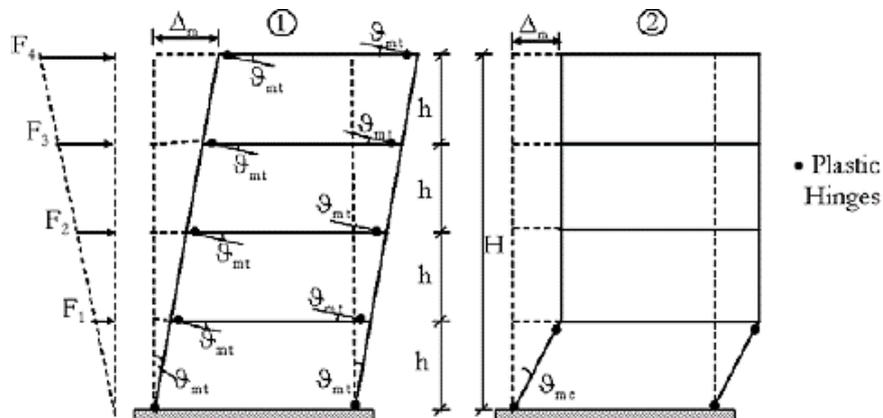


Figure 1.10 : Mécanismes de rupture pour les constructions en poteaux-poutres [50]

Et également, différents modes de défaillance dans le plan ont été pris en compte pour les constructions en maçonnerie (voir Figure 1.11).

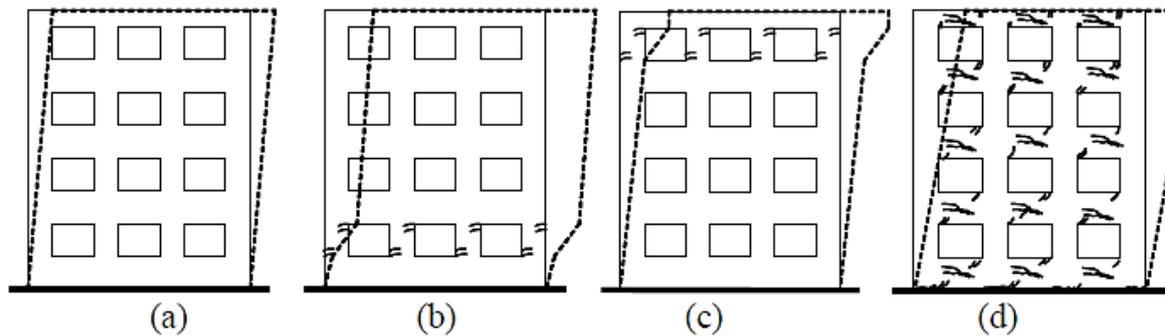


Figure 1.11 : Mécanismes d'effondrement pour les constructions en maçonnerie [50]

Les résultats sont exprimés sous forme d'une probabilité d'occurrence de chaque état limite de dommage spécifique pour un mouvement sismique particulier où chaque bâtiment est représenté par son spectre de réponse de déplacement. Les typologies de bâtiments ont été identifiées en fonction des propriétés géométriques et matérielles des structures telles que le nombre d'étages et le matériau de construction (en béton armé ou en maçonnerie) [50].

Cette approche a été développée par la suite à travers de nombreuses recherches [52-55] ce qui a conduit à l'élaboration de la procédure de « *DBELA* » « *Displacement-Based Earthquake Loss Assessment* » [56]. De la même façon, plusieurs approches ont été menées en utilisant cette approche pour les bâtiments en maçonnerie [57, 58] qui a conduit également à l'élaboration de la procédure de « *MeBaSe* » « *Mechanical Based Procedure for the Seismic Risk Estimation of Unreinforced Masonry Buildings* » [58].

### 1.3.3.3. Les approches basées sur le spectre de capacité

L'approche analytique du spectre de capacité « *Capacity Spectrum Method – CSM* » est une approche connue proposée par Freeman et al. [59, 60] pour une évaluation rapide du risque sismique des classes de construction. Cette approche qui est une technique d'analyse basée sur la performance des structures [61] applique une méthode d'analyse statique non linéaire par poussée progressive « *Push over* » sur un modèle élastoplastique. Le modèle à un seul degré de liberté (SDOF) comme un équivalent du système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) de la structure cible qui est également soumis à une charge statique latérale croissante afin d'obtenir la capacité du bâtiment cible qui peut supporter un certain niveau du mouvement du sol [62].

Le déplacement cible ou le point de performance « *dp* » du bâtiment ou d'une typologie des bâtiments représente la valeur du déplacement dans lequel le bâtiment atteindra sous la demande sismique appliquée et par conséquent les dommages possibles de

cette typologie de bâtiment seront expérimentés. Le point de performance est déterminé par l'intersection de la courbe de capacité du bâtiment (en reliant l'effort tranchant total à la base au déplacement latéral au sommet) avec la courbe de demande sismique sous forme de déplacement spectral. La valeur du point de performance d'une classe de construction spécifique sera utilisée comme une entrée avec des différentes courbes de fragilité de différents états de dommages afin d'obtenir la probabilité d'atteindre chaque état de dommage [61]. Peut-être la méthode HAZUS est la méthode la plus acceptée dans le monde entier qui utilise l'approche du spectre de capacité pour estimer les dommages aux bâtiments, cette méthode sera un exemple dans ce chapitre pour décrire les principes de l'approche du spectre de capacité avec ses principaux paramètres [63].

#### 1.3.3.3.1. Méthode HAZUS

Le « *National Institute of Building Science - NIBS* » des États-Unis a mené un projet en collaboration avec la FEMA sous la direction d'une équipe des experts dans les spécialités pertinentes de l'évaluation des risques afin de mettre au point une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique pour estimer les pertes et les dommages potentiels dus aux séismes. Le résultat était le logiciel interactif public d'évaluation des risques HAZUS, lancé pour la première fois en 1997 et mis à jour en 1999 [63, 64]. Même que le logiciel a été développé comme une méthodologie applicable à l'échelle nationale pour l'environnement construit aux États-Unis, HAZUS a été largement accepté et répandu dans des autres régions [65].

Le logiciel HAZUS base sur un système d'information géographique « *SIG* » pour gérer les données des aléas et pour afficher les résultats sous forme des dommages et pertes. HAZUS a été développé initialement pour évaluer le risque sismique mais ce logiciel a été mis à jour au fil du temps où une nouvelle version est apparue en 2003 sous le nom de « *HAZUS Multi-Hazard* » avec l'introduction des autres risques naturels dans le logiciel comme les ouragans et les inondations. Le logiciel HAZUS inclut plusieurs types et niveaux d'analyse selon les six modules intégrés dans l'approche. Ces modules sont interdépendants où l'utilisateur peut limiter ses études à des modules choisis et ignorer le reste. Cette limitation peut être souhaitable pour différentes raisons en fonction par exemple du budget et/ou en fonction de la nécessité d'obtenir des réponses à des questions spécifiques [66], ces modules sont résumés brièvement comme suit [64] :

**Module 1 « Aléa » :** Le module Aléa étudie les mouvements du sol avec ses effets induits (glissement de terrain, rupture des failles, liquéfaction du sol...) en termes d'accélération du sol (PGA) et de vitesse du sol (PGV). Les approches utilisées sont des approches déterministes [67] et probabilistes [68].

**Module 2 « Inventaires des enjeux » :** Ce module détermine les typologies des constructions incluses dans le logiciel, plusieurs catégories sont considérées comme les bâtiments courants, les systèmes de transport et les réseaux vitaux. Pour les bâtiments courants, 36 classes de construction (basant sur le système de classification de FEMA 178 [69]) sont adoptées selon leurs matériaux de construction (en bois, en acier, en béton armé et en maçonnerie), leurs systèmes structurels (16 systèmes structuraux inclus) et leurs hauteurs.

**Module 3 « Dommages directs » :** Ce module concerne l'estimation et l'évaluation des dommages sismiques affectant les constructions sous l'effet d'une sollicitation sismique donnée en basant sur l'approche du spectre de capacité et les courbes de fragilité afin de déterminer la probabilité d'atteindre et de dépasser chaque État limite de dommage. Cinq états de dommages sont définis dans la méthodologie HAZUS : *Négligeable, Léger, Modéré, Sévère* et *Complet*. Les principes de ce module seront décrits en détail dans les sections suivantes.

**Module 4 « Dommages induits » :** Ce module concerne l'évaluation et l'estimation des dommages induits qui sont les potentielles conséquences secondaires non désirées de l'événement (séismes) comme l'incendie généré à la suite des séismes, les potentielles inondations dans les barrages et les digues, etc.

**Module 5 « Pertes directes » :** Le module pertes directes fournit des estimations des potentielles pertes économiques et sociales à la suite des séismes. Les pertes économiques sont les dommages causés au bâtiment en termes de coûts de réparation des dommages structurels et non structurels, la capacité du bâtiment à fonctionner correctement, etc. Les pertes sociales sont décrites en termes de victimes (blessures et décès) où des corrélations sont établies entre les dommages structurels et non structurels et le nombre et la gravité des victimes.

**Module 6 « Pertes indirectes » :** Le dernier module fournit une estimation des effets des perturbations éventuelles dans les secteurs économiques même s'ils ne subissent pas de dommages directs. Tels que les interruptions d'opérations entre les entreprises et les clients

en termes d'opérations prospectives qui peuvent avoir des effets à long terme sur l'économie régionale.

### 1.3.3.3.2. Évaluation des dommages physiques

L'évaluation sismique adoptée dans la méthode HAZUS est fondée sur l'approche du spectre de capacité de l'ATC-40 [70] qui repose sur les courbes de capacité et les courbes de fragilité. Les courbes de fragilité (voir Figure 1.12) sont des fonctions qui expriment la probabilité qu'un élément ou un bâtiment atteigne ou dépasse différents états de dommages soumis aux différentes intensités sismiques selon une valeur de déplacement donnée (réponse du bâtiment). Ces courbes sont définies par la valeur moyenne de l'accélération maximale du sol PGA (ou de déplacement maximal du sol PGD) calculé par le module PESH « *Potential Earth Science Hazards* » [64]. Les courbes de fragilité peuvent être définies pour des dommages structuraux et non structuraux [70, 71].

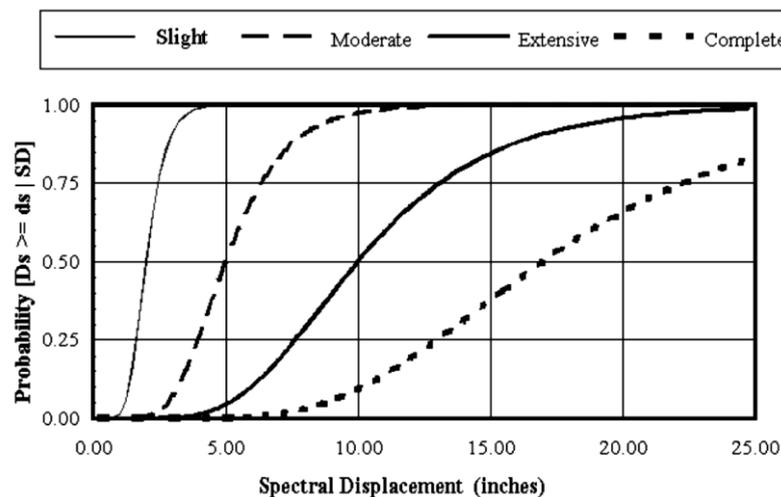


Figure 1.12 : Exemple d'une courbe de fragilité [71]

Les courbes de capacité (voir Figure 1.13) sont des courbes qui décrivent la résistance du bâtiment à la charge latérale imposée (la force sismique latérale appliquée) en fonction de ses caractéristiques [18]. Les courbes de capacité sont habituellement dérivées d'une analyse statique non linéaire par poussée progressive « *Push over* » (relation entre l'effort tranchant total à la base et le déplacement latéral au sommet).

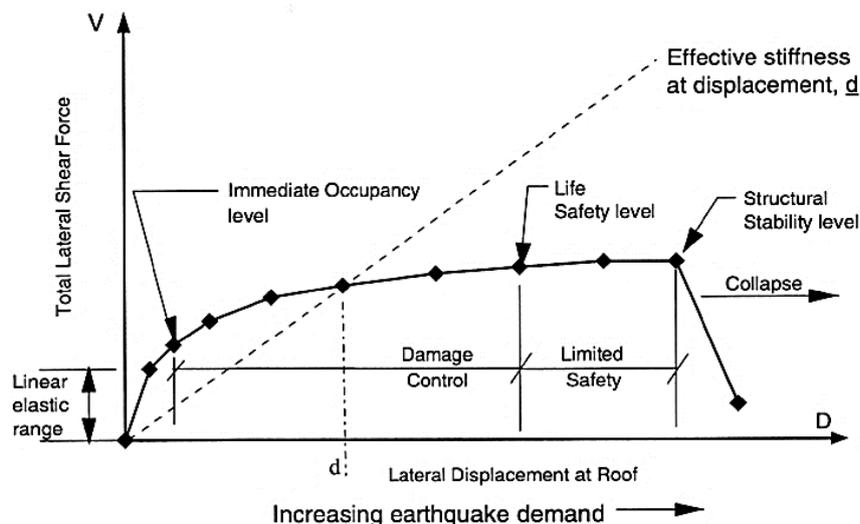


Figure 1.13 : Exemple d'une courbe de capacité [70]

Les courbes de capacité et les spectres de demandes doivent être convertis en format ADRS « *Acceleration Displacement Response Spectra* ». Les courbes de capacité qui sont représentées sous la forme d'une relation (Force - Déplacement) sont converties en format ADRS et deviennent des courbes de spectre de capacité. Ces courbes sont représentées sous la forme d'une relation (Accélération spectrale  $S_a$  - Déplacement spectral  $S_d$ ) (voir Figure 1.14).

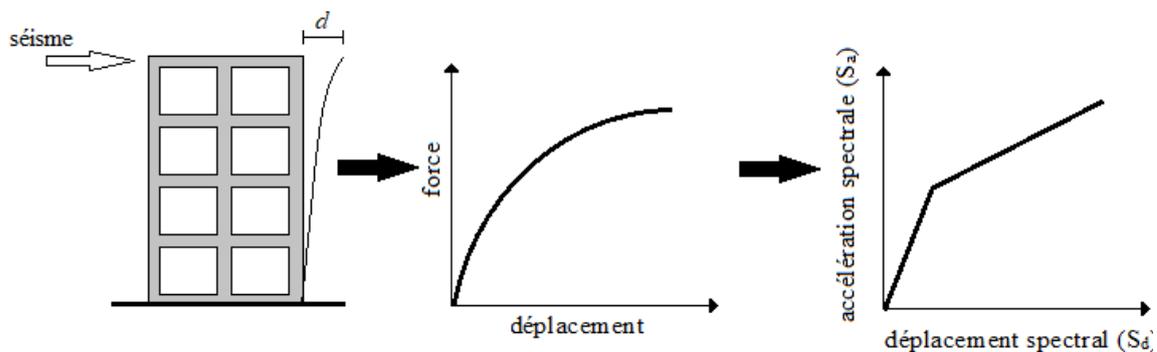


Figure 1.14 : Développement des courbes du spectre de capacité en format ADRS.

Les spectres de réponse sismique qui sont représentés sous la forme d'une relation (Accélération - Période) sont également convertis en format ADRS et deviennent des courbes de spectre de demande sismique normalisée. Ces courbes sont représentées sous la forme d'une relation (Accélération spectrale  $S_a$  - Déplacement spectral  $S_d$ ) (voir Figure 1.15).

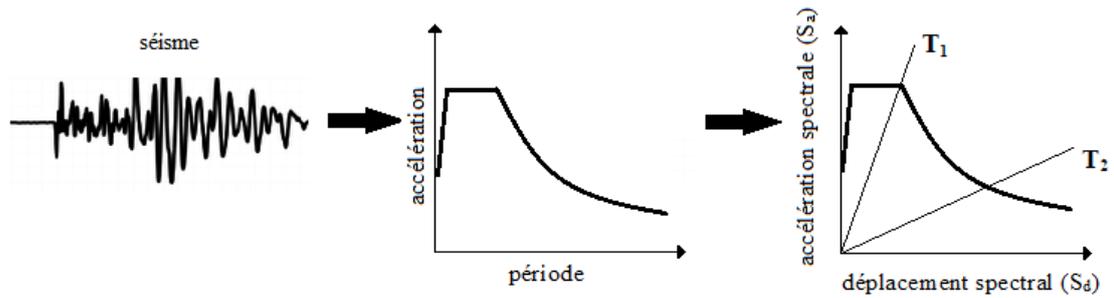


Figure 1.15 : Développement des spectres de réponse sismique en format ADRS.

Des valeurs d'amortissement visqueux efficaces sont appliquées aux spectres de réponse linéaire élastique pour prendre en considération le comportement non linéaire inélastique du système structurel [61]. Pour déterminer le point de performance «  $dp$  », le comportement non linéaire est simulé par l'augmentation de l'amortissement en utilisant des spectres de demande inélastique « *Spectres réduits équivalents* » pour différentes valeurs d'amortissements équivalents  $\xi_{eq}$  où le spectre élastique initial est relatif à un amortissement ( $\xi = 5$ ). L'intersection de la courbe du spectre de capacité avec la courbe du spectre de réponse détermine le point de performance «  $dp$  ». La valeur de ce point est utilisée pour déterminer les différentes probabilités d'atteindre chaque état de dommage selon les courbes de fragilité utilisées (voir Figure 1.16).

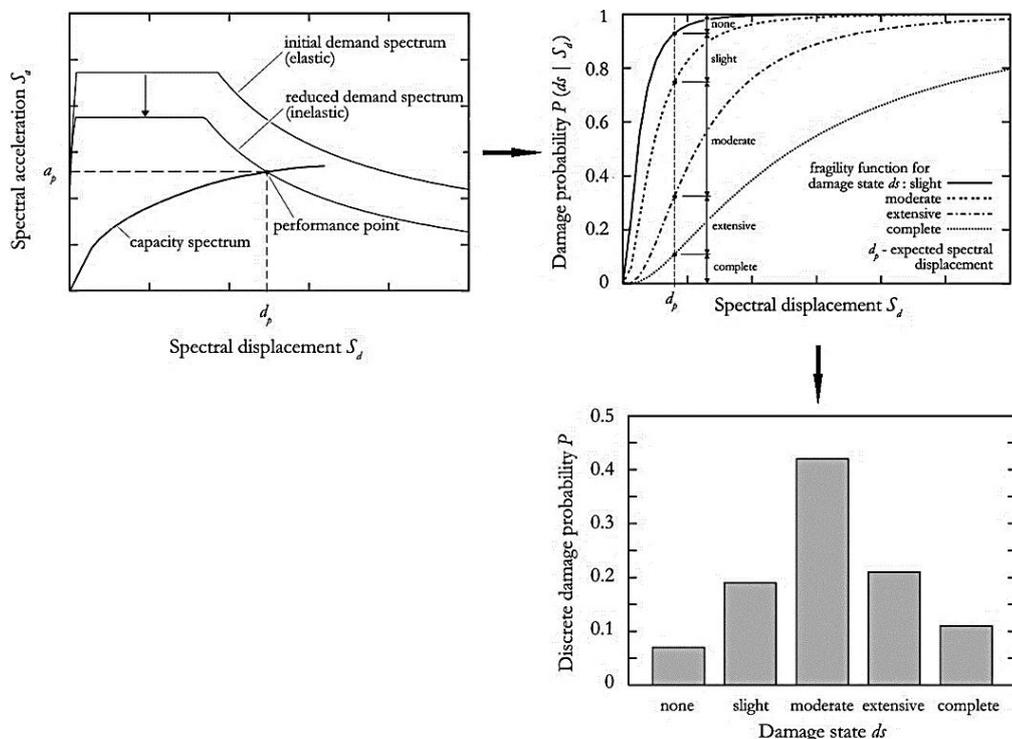


Figure 1.16 : Principe de l'approche HAZUS [72]

Les résultats sont exprimés d'une façon statistique, la vulnérabilité du bâtiment étudié est exprimée par les probabilités d'atteindre ou de dépasser chaque état de dommage selon les courbes de fragilité utilisées. Pour chaque état de dommage, sa valeur de probabilité est déterminée par l'intersection de la valeur du point de performance du bâtiment avec la courbe de fragilité qui représente cet état de dommage (voir Figure 1.16).

- **Commentaires :**

Les approches analytiques sont devenues plus utilisées récemment après le grand progrès dans le domaine d'ingénierie et le développement étendu dans les outils informatiques de calcul et de simulation. Les approches analytiques peuvent être très fiables pour effectuer des analyses détaillées des bâtiments existants ou durant la conception en utilisant des modèles numériques.

L'absence des données post-sismiques dans la région d'intérêt à faible activité sismique où peu ou pas de dommages ont été enregistrés ne pose aucun problème pour effectuer des simulations analytiques. Autres enregistrements sismiques (et même des enregistrements artificiels) peuvent être facilement appliqués aux modèles analytiques. En outre, les approches analytiques proposent des résultats très précis en prenant en compte plusieurs facteurs tels que la variabilité des résistances des matériaux lors de la modélisation et l'incertitude dans les enregistrements sismiques.

Puisque les bâtiments sont modélisés en 2D ou en 3D avec tous ces composants. Des simulations peuvent être effectuées séparément pour analyser le comportement de ces composants. Des informations détaillées peuvent être obtenues sur les dommages structuraux et non structuraux sous différents enregistrements des différentes intensités sismiques.

Cependant, certaines limitations existent en utilisant les approches analytiques. Principalement l'exigence d'ingénieurs qualifiés pour effectuer de telles procédures, sans se soucier du fait que telles procédures sont extrêmement intensives en termes de calcul et demandent beaucoup de temps. De plus, plusieurs paramètres importants ne peuvent pas être facilement modélisés, comme l'interaction sol structure ce qui peut réduire la crédibilité des résultats, en particulier pour les états de dommages élevés et les grandes demandes sismiques où les résultats doivent être validés et calibrés avec des données des dommages observés par exemple.

Les approches analytiques ont été fréquemment utilisées pour soutenir les résultats empiriques basés sur les données post-sismiques conduisant à ce qui est connu comme les approches hybrides qui sont discutées plus en détail dans la section suivante.

#### 1.3.4. Approches hybrides

Les approches hybrides sont des approches qui comblent l'écart entre les différentes autres approches afin de surmonter leurs points faibles. Les approches hybrides sont couramment appliquées pour améliorer les résultats des différentes approches d'évaluation sismique. Les approches hybrides combinent l'opinion d'experts et/ou les observations des dommages post-sismiques avec des modèles numériques afin de proposer des méthodologies qui satisfont adéquatement la plupart des critères nécessaires pour l'évaluation sismique. Par exemple, les dommages observés peuvent être utilisés pour calibrer des modèles analytiques. Au contraire, les modèles analytiques peuvent être utilisés pour combler le manque de données empiriques pour certaines intensités sismiques ou pour certaines typologies des constructions [73].

Cependant, peu d'études ont été publiées qui proposent des méthodologies hybrides, Kappos et al. (2006) ont étalonné des courbes de fragilité analytique à l'aide des données post-sismiques observées. Ils ont proposé également des matrices de probabilité de dommage en utilisant les données disponibles des séismes passés. Les informations manquantes à propos certaines intensités ont été construites à partir des résultats des analyses dynamiques non linéaires des modèles en simulant le comportement sismique de chaque classe des bâtiments [75, 76]. Autres approches hybrides ont été proposés également dans les travaux de Singhal et Kiremidjian (1996) [74], Barbat et al. (1996) [74] et Dolce et al. (2002) [75].

#### 1.4. Conclusion

Ce chapitre propose un bref état de l'art à propos la pratique actuelle d'évaluation sismique des structures où différentes approches pour l'évaluation des dommages /vulnérabilités sismiques ont été présentées. Ces approches sont généralement classées en trois catégories principales : Les approches empiriques basées sur des statistiques des données réelles observées et sont donc plus fiables en termes de vulnérabilité. Les approches analytiques basées sur des modèles numériques et sont donc plus objectifs en termes de définition d'aléa sismique puisqu'ils sont basés sur des enregistrements instrumentaux. Les approches basées sur le jugement d'experts pour fournir des meilleures estimations en cas

d'inapplicabilité des autres approches. Ainsi, il existe des approches hybrides qui combinent des caractéristiques des approches précédentes afin de combler ses lacunes pour obtenir des résultats plus fiables, ces approches sont utilisées aussi pour calibrer et valider les résultats des telles approches.

Il est clair qu'il n'est pas facile de déterminer quelle approche est la meilleure tout le temps puisque chaque approche a ses limites et elles ne conviennent pas nécessairement les applications pratiques pour chaque situation. En fait, le choix de l'approche appropriée dépend en grande partie des informations, du contexte d'utilisation et de la technologie disponible. Des procédures simples et précises devraient être les principaux objectifs à atteindre. Malgré le fait qu'un grand nombre des approches existantes répond à ces exigences, autres améliorations sont encore nécessaires surtout dans le contexte des missions d'évaluations des dommages après les séismes où les inspecteurs ne disposent ni le temps ni l'équipement nécessaire pour effectuer des évaluations rigoureuses.

## **CHAPITRE 2**

### **PROCÉDURES D'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES : DÉFIS & SOLUTIONS**

#### 2.1. Introduction

La phase post-désastre après tout tremblement de terre majeur doit être gérée sagement afin de minimiser les pertes humaines et économiques. Pour ce fait, plusieurs procédures d'évaluation des dommages post-sismiques ont été mises au point afin d'assurer un certain niveau de réponse. Ce niveau doit assurer une évaluation rigoureuse et rapide de toutes constructions affectées dans la région touchée afin d'effectuer toutes opérations de sauvetage le plus rapidement possible et dans les meilleures conditions. Ainsi que pour assurer que les meilleurs plans de gestion seront mis en application avec le minimum des pertes possibles afin de commencer tout plan de reconstruction.

La procédure d'évaluation des dommages causés par les séismes est difficile et sujette aux nombreux problèmes et défis. La procédure d'évaluation suppose que lorsqu'une construction est endommagée par un séisme, des inspecteurs compétents et qualifiés peuvent évaluer l'effet de ce séisme par une inspection visuelle pour déterminer comment les dommages observés ont modifié les propriétés de la construction en termes de résistance et de stabilité. Les procédures d'évaluation disponibles fournissent des fiches d'évaluation afin de systématiser la procédure pour une meilleure performance par les inspecteurs avec une évaluation la plus précise possible. Cependant, nombreux problèmes et défis se posent pendant l'exécution de telles procédures, principalement liés à l'élément humain (inspecteurs) dû aux caractéristiques des inspecteurs (e.g. subjectivité).

Ce chapitre présente l'histoire sismique de l'Algérie avec une présentation analytique de la procédure algérienne d'évaluation des dommages post-sismiques. Il présente également un aperçu de l'état de la pratique des procédures d'évaluation des dommages sismiques après les séismes avec des clarifications des niveaux de dommage utilisé pendant les classifications des constructions. Il met également en évidence les défis et problèmes les plus communs pendant l'exécution de ces procédures. Il décrit finalement le concept des systèmes experts et systèmes d'aide à la décision comme une solution potentielle pour surmonter les défis liés à l'exécution des procédures d'évaluation sismique avec une introduction des

systèmes flous comme un outil puissant qui peut manipuler de manière efficace toutes incertitudes potentielles dans la prise de décision des inspecteurs. Les recherches les plus récentes qui discutent les systèmes flous sont discutées et mettent en évidence leurs avantages et limitations.

## 2.2. Séismes en Algérie

Le contexte du bâti algérien est constitué principalement des constructions en béton armé et en maçonnerie, la majorité de ce contexte est localisée dans le nord de l'Algérie qu'est une zone d'une sismicité considérable. Cette sismicité est due aux mouvements des plaques tectoniques, en particulier, la collision et la convergence de la plaque africaine et de la plaque eurasienne ce qui concentre la sismicité dans la partie nord du pays le long de l'atlas tellien [76]. Cette convergence conduite à l'apparition de plusieurs failles actives. Bien que pas toutes les failles soient localisées en raison du manque des études géologiques détaillées. Six failles actives majeures ont été bien identifiées et localisées qui sont [77] : La faille de Kheir Eddine qui se trouve en mer au large des côtes d'Alger, la faille de Zemmouri qui se trouve en mer au large des côtes de Zemmouri, la faille de Chenoua, la faille de Sahel, la faille de Blida, la faille de Thenia (voir Figure 2.1).

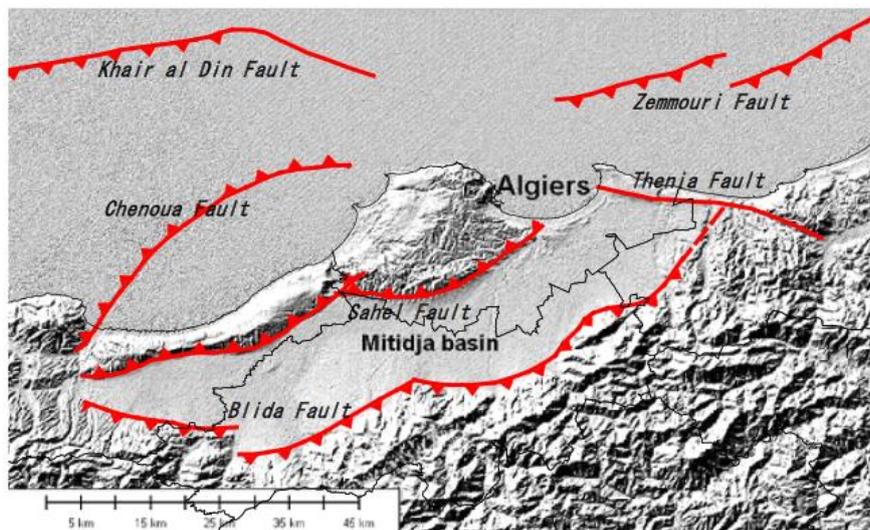


Figure 2.1 : Failles localisées autour de la capitale Alger [77]

Tout au long de son histoire, l'Algérie a été confrontée à plusieurs séismes d'intensité variée, allant de modérée à sévère (voir Figure 2.2) qui ont causé des pertes considérables et coûteuses en vies humaines et en construction dans nombreuses villes et régions.

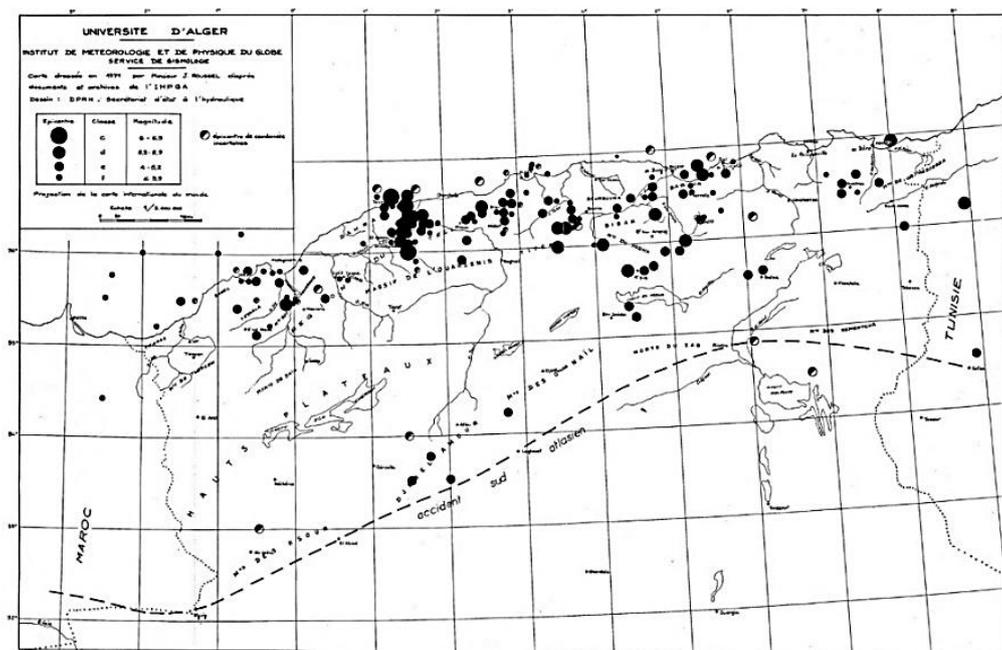


Figure 2.2 : Sismicité de l'Algérie [78]

Plusieurs sources ont mentionné des divers séismes dans différentes régions de l'Algérie au cours de la période antique jusqu'à présent. Bien qu'ils soient rares et ne soient pas assez fiables, ils pourraient être invoqués pour étudier l'histoire sismique de l'Algérie puisqu'ils sont les seules sources disponibles. Cependant, depuis le siècle dernier et après l'installation de la 1<sup>ère</sup> station sismique à Alger en 1910, la sismicité en Algérie a été bien étudiée où nombreuses études ont été effectuées [79-81] (voir Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Séismes passés en Algérie [79-81]

Lieu	Date	Intensité (I)	Magnitude (M)	Observation
Dellys	42	-	-	Séisme destructeur.
Tazoul	267	-	-	Probablement un séisme.
Djemila	365	-	-	Probablement un séisme.
Setif	419	-	-	Domages observés.
Alger	03-01-1365	X	-	Alger a été complètement détruit.
Alger	03-02-1716	IX	-	20000 victimes.
Alger	29-11-1722	-	-	Plusieurs victimes.
Mascara	03-1819	-	-	Domages considérables à Mascara et à Oran.
Oran	09-10-1790	IX-X	-	2000 morts.
Blida	03-03-1825	X-XI	-	7000 morts.
Jijel	22-08-1856	X	-	Séisme destructeur, tsunami.
Mouzaia	02-01-1867	X-XI	-	La ville a été complètement détruite, 100 morts.
Gouraya	15-01-1891	X	7.5	38 morts.
Sour el ghozlane	24-06-1910	X	6.5	81 morts.

Béjaïa	12-02-1946	IX	5.6	264 morts.
Chlef	09-09-1954	X-XI	6.7	20000 maisons détruites, 1243 morts.
Chlef	10-10-1980	IX	7.3	Séisme destructeur, 2633 morts, 8369 blessés.
Constantine	27-10-1985	VIII	5.9	Dommmages observés, 10 morts.
Tipasa	29-10-1989	VIII	5.9	Dommmages observés, 22 morts.
Mascara	18-08-1994	VII	5.6	171 morts, 289 blessés.
Ain temouchent	22-12-1999	VII	5.7	Dommmages observés, 26 morts.
Beni Ourtilane	10-11-2000	VII	5.7	3000 maisons endommagées, deux morts, 50 blessés.
Zemmouri	21-05-2003	X	6.8	Séisme destructeur, 2278 morts, 11450 blessés.

Peut-être parmi les séismes historiques en Algérie les séismes les plus destructeurs sont le tremblement de terre d'El Asnam ( $M_S = 7.3$ ) du 10 octobre 1980. Il a touché la ville d'Al Asnam (actuellement Chlef) causant plus de 2,600 morts et touchant plus de 60,000 bâtiments entre partiellement endommagé et effondré [82]. Le séisme de Boumerdès dans le nord de l'Algérie, le 21 mai 2003 ( $M_w = 6.8$ ) qui a causé d'énormes dégâts et pertes économiques dans la ville de Boumerdès et plusieurs zones environnantes [83] (voir Figure 2.3).



Figure 2.3 : Effets du séisme de Boumerdès 2003 [84]

Le gouvernement algérien a déclaré 2278 morts, 11450 blessés et 250000 personnes se sont retrouvés sans abri. Le tremblement de terre affecte plus de 100000 constructions où 17000 constructions ont été démolies et 116000 ont été réparées avec une estimation de cinq milliards de US dollars de pertes économiques directes. Les travaux d'évaluation des dommages post-sismiques avaient continué jusqu'au 30 Juin 2003 ce qui refaire clairement le taux des travaux demandés [83, 85].

### 2.3. Procédures d'évaluation des dommages post-sismiques

Afin d'améliorer la gestion après les événements sismiques, plusieurs pays du monde en particulier des pays à forte activité sismique (USA [86], Japon [87], Grèce [88], Italie [89], ...) ont mis au point des procédures d'évaluation des dommages post-sismiques comme une première action à mener après de tels événements [90]. L'objectif principal des autorités en cas des séismes est d'inspecter rapidement tous les bâtiments de la zone touchée afin d'identifier les bâtiments sûrs et dangereux. Pour exécuter cette procédure dans des conditions les plus appropriées malgré le caractère urgent de la phase post-désastre. Les autorités ont mis au point des procédures d'évaluation post-sismique avec des diverses cibles qui peut inclure l'évaluation des dommages subis par les constructions [9], l'évaluation de la sécurité des constructions [86] et l'évaluation de l'utilisabilité des bâtiments [89]. Ces procédures sont structurées par des manuels techniques et des fiches d'évaluation afin de systématiser la procédure pour atteindre meilleure performance possible.

#### 2.3.1. Procédure d'évaluation sismique en Algérie

Le nord Algérien au cours des dernières décennies a connu une population importante et croissante. Cela a conduit à une large diffusion des projets de construction sans considération des normes de conceptions sismiques rigoureuses jusqu'à l'adaptation du premier code sismique officiel qu'a été adopté au début des années 80. Une grande partie des bâtiments étaient hors recommandations de conception sismique et étaient très vulnérables aux aléas sismiques où cette vulnérabilité a été prouvée avec un coût très élevé après les séismes d'Al Asnam 1980 et de Boumerdès 2003. Le premier a été l'occasion de mettre en place la première procédure d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie [91].

Après un tremblement de terre, l'évaluation des dommages post-sismiques repose sur l'inspection visuelle par des équipes d'autorité. Ils sont généralement des experts et des ingénieurs du centre national de recherche appliquée en génie parasismique (CGS) et les organismes nationaux de contrôle technique de la construction (CTC) situé dans chaque wilaya.

La procédure d'évaluation implique l'inspection visuelle avec la détermination des niveaux de dommage de : Composants structurels (fondations, poteaux, poutres, voiles, planchers, etc.), composants non structurels (escaliers, parois de séparation, façade, balcons, cheminées, etc.), problèmes possibles de sol autour des bâtiments, état des constructions

adjacentes et la symétrie du bâtiment afin de déterminer un niveau global de dommage associé à une couleur qui détermine la sécurité de la construction. Les niveaux de dommage adoptés sont définis en cinq degrés de dommages de « D1 : Pas de dommage » jusqu'à « D5 : Bâtiment effondré » permettant de classer la construction dans une des trois catégories de couleurs « Vert – Orange – Rouge », voir Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Description des niveaux de dommage [91, 92]

Niveau de dommage	Couleur	Intensité du dommage	Description
D1	Vert clair	Pas de dommages	À l'exception des glaces cassées par exemple.
D2	Vert foncé	Dommages légers	Dommages non structuraux isolés : Fissures des cloisons intérieures, des plafonds, dommages au niveau des canalisations d'électricité, d'eau ...
D3	Orange clair	Dommages modérés	Dommages non structuraux importants et dommages structuraux faibles.
D4	Orange foncé	Dommages importants	Dommages non structuraux très importants et dommages structuraux considérables : Fissures en X au niveau des voiles de contreventement, éclatement des nœuds poteaux-poutres ...
D5	Rouge	Bâtiment effondré	Bâtiment a basculé, étage a disparu ...

Une fiche uniforme de deux pages, dite « *Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques* » datant de 1980 (séisme d'El Asnam) est utilisée en Algérie pour contenir les informations de chaque construction expertisée à partir de l'inspection visuelle des éléments structurels, des éléments non structurels, des problèmes de sol autour des bâtiments et l'état des constructions adjacentes. L'objectif de cette fiche technique est d'uniformiser les expertises et de les faciliter en les rendant systématiques (voir Figure 2.4 et Figure 2.5).

Code inspecteur :	FICHE D'EVALUATION DES	C.E.T.C.
<b>DOMMAGES</b>		
<b>IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION</b>		
Secteur :	Zone :	Construction calculée au séisme : Oui - Non
Adresse ou éléments d'identification :		Construction contrôlée : Oui - Non
<b>USAGE DE LA CONSTRUCTION</b>		
Logement Administratif Socio-culturel Autres (à préciser) : .....	Scolaire Hospitalier Sportif	Commercial Industriel Réservoir d'eau
<b>DESCRIPTION SOMMAIRE</b>		
Age approximatif : Nombre de niveaux : Nombre de joints de dilatation - en élévation : - en infrastructure :	Vide sanitaire : Oui - Non Sous-sol : Oui - Non Éléments extérieurs indépendants (escaliers, auvent, passage couvert) .....	
<b>PROBLEMES DE SOL AUTOUR DE LA CONSTRUCTION</b>		
Faille : Oui - Non Liquéfaction : Oui - Non	- Affaissement - soulèvement : Oui - Non - Glissement : Oui - Non	
<b>FONDATION - INFRASTRUCTURE</b>		
Fondations - Type de fondation : - Type dommage : . tassement uniforme : Oui - Non . glissement : Oui - Non . basculement : Oui - Non	<u>Infrastructure</u> (dans le cas VS ou S/Sol) - Voile béton continu : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - Poteaux béton avec remplissage : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	
<b>STRUCTURE RESISTANCE</b>		
<u>Éléments porteurs</u> (charge verticale) - murs en maçonnerie : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - voiles béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux métalliques : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux bois : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - autres : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	<u>Éléments de contreventement</u> - murs en maçonnerie : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - portique béton armé : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - portiques métalliques : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - palées triangulées : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - voiles béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - autres : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	
<u>Planchers - Toiture terrasse</u> - béton armé : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - solives métallique : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - solive bois : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	<u>Toiture inclinée</u> - charpente métallique : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - charpente bois : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture tuile : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture amiante-ciment : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture métallique : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	
(*) : entourer la mention utile, dans le cas de n° : un ou plusieurs numéros peuvent être entourés		

Figure 2.4 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie (1/2) [91, 92]

Éléments secondaires			
<u>Escaliers</u>		<u>Remplissages extérieures</u>	
- béton	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Maçonnerie	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- métal	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Béton préfabriqué	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- bois	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Bardages	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
		- Autres	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
<u>Autres éléments intérieures</u>		<u>Éléments extérieures</u>	
- Plafond	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Balcons	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- Cloisons	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Garde - corps	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- Éléments vitrés	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Auvents	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
		- Acrotères- corniches	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
		- Cheminées	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
		- Autres	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
INFLUENCE DES CONSTRUCTIONS ADJACENTES			
La construction menace une autre construction	:	OUI - NON	
La construction est menacée par une autre construction	:	OUI - NON	
La construction peut être un soutien pour une autre construction	:	OUI - NON	
La construction peut être un soutenue par une autre construction	:	OUI - NON	
VICTIMES			
OUI - NON - Peut-être	- Si oui combien ?		
COMMENTAIRE SUR LA NATURE ET LA CAUSE PROBABLE DES DOMMAGES			
	Sens transversal	sens longitudinal	
- Symétrie en plan	: Bon - Moyen - Mauvais	Bon - Moyen - Mauvais	
- Régularité en élévation	: Bon - Moyen - Mauvais	Bon - Moyen - Mauvais	
- Redondance des files	: Bon - Moyen - Mauvais	Bon - Moyen - Mauvais	
<u>AUTRES COMMENTAIRES :</u>			
EVAUATION FINALE			
<u>Niveau général des dommages</u>	<u>Couleur à utiliser</u>		
1 - 2 - 3 - 4 - 5	VERT	ORANGE ROUGE	
<u>MESURES IMMEDIATES A PRENDRE</u>			

Figure 2.5 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie (2/2) [91, 92]

Cette fiche a pour objectif de collecter toutes informations pertinentes sur l'état du bâtiment en termes de niveaux de dommage des différents composants, autres paramètres sont également inclus. La fiche d'évaluation peut être divisée en plusieurs sections selon leurs objectifs comme suit :

- **Section 01** : La 1<sup>ère</sup> section contient une description générale de la construction à propos : l'emplacement, la zone géographique, indication si la construction était contrôlée pendant la phase de construction et si elle répond aux critères du code sismique, type d'usage, l'âge de la construction, nombre de niveaux, la présence du vide sanitaire et sous-sol, etc.
- **Section 02** : Cette section contient des observations concernant les problèmes de sol autour le bâtiment comme la présence de liquéfaction, glissements de terrain, dommages aux fondations, la présence des dommages au niveau des fondations et l'infrastructure ...
- **Section 03** : La 3<sup>ème</sup> section décrit les dommages observés au niveau des composants structurels, la fiche couvre les éléments porteurs et les éléments de contreventement et les planchers (toiture terrasse et toiture inclinée).
- **Section 04** : La 4<sup>ème</sup> section (deuxième page) décrit les dommages des composants non structurels notamment les escaliers, les remplissages extérieurs, les éléments extérieurs et intérieurs de la construction comme les cloisons, balcons, cheminées, acrotères, etc.
- **Section 05** : Cette section représente l'influence des constructions adjacentes, c'est-à-dire si la construction menace ou soutien une autre construction et vice versa, la symétrie, la régularité et redondances des files des bâtiments au sens transversal et longitudinal et la présence des victimes.
- **Section 06** : La dernière section propose un niveau de dommage global avec une couleur qui représente la sécurité du bâtiment, des recommandations et des mesures à prendre sont également mentionnées.

Le niveau de dommage global est déterminé par l'expert en fonction de toutes informations indiquées dans la fiche d'évaluation. Les experts sont des inspecteurs, les ingénieurs et des techniciens qui sont considérés qualifiés.

Les constructions marquées par la couleur « Vert » sont des constructions prêtes à l'occupation immédiate et ne présentent aucun risque considérable à ce stade même elles peuvent avoir besoin de réparations légères par la suite. La couleur « Vert » inclut les constructions qui présentent un niveau général de dommage « D1 » et « D2 ».

Les constructions marquées par la couleur « *Orange* » sont des constructions potentiellement dangereuses. Ces constructions doivent être évacuées et ne sont pas prêtes à l'occupation qu'après une évaluation approfondie qui permettra de décider si la construction peut être récupérée après une réparation et/ou renforcement approprié. La couleur « *Orange* » inclut les constructions qui présentent un niveau général de dommage « *D3* » et « *D4* ».

Les constructions marquées par la couleur « *Rouge* » qui présentent un niveau général de dommage « *D5* » sont des constructions soit effondrées (complètement ou partiellement) ou ayant subi des dommages vraiment considérables. Cette catégorie des constructions est condamnée à être démolie.

Lors des missions d'expertise, les inspecteurs sont chargés d'inspecter visuellement la construction potentiellement endommagée en analysant les états de ses composants (structurels et non structurels) et tous autres paramètres relatifs où chaque paramètre doit être renseigné dans les sections appropriées dans la fiche d'évaluation. Les inspecteurs sont invités d'affecter le niveau maximum de dommage observé pour chaque paramètre dans la fiche d'évaluation. Après avoir examiné la construction et rempli la fiche d'évaluation, les inspecteurs doivent alors analyser la fiche remplie pour prendre leur jugement et décision finale à propos l'état global de la construction. Ils doivent également prendre en considération toutes informations disponibles pour chaque paramètre tout en tenant en compte son importance relative dans la stabilité et la sécurité de la construction.

La décision finale consiste à l'attribution d'un niveau général de dommage pour représenter l'état de la construction en termes de résistance et stabilité. Également, la construction devrait être étiquetée par une couleur appropriée pour déterminer si la construction est en sécurité d'être occupée ou pas. Des mesures immédiates à prendre sont également prévues.

### 2.3.2. Procédures d'évaluation des dommages sismiques : Aperçu approfondi

Une procédure d'évaluation des dommages après les séismes est un élément essentiel de tout programme de gestion des catastrophes. Ces procédures sont les premières à être menées en cas de séismes destructeurs. Immédiatement après un séisme, les équipes locales d'intervention sont les premières à être dépêchées dans les zones touchées pour localiser les victimes potentielles [93] afin d'effectuer des opérations de sauvetage. Toutefois, ces équipes sont généralement accompagnées par des ingénieurs et des inspecteurs experts pour évaluer la sécurité des bâtiments potentiellement endommagés avant toute opération de sauvetage ou d'entrée dans tels bâtiments. Ces inspecteurs sont supposés d'être prêts de traiter tous les aspects de l'environnement bâti dans la zone touchée [94]. La section suivante présente un aperçu approfondi de la pratique actuelle des procédures d'évaluation post-sismique ce qui peut être utilisé dans toutes améliorations éventuelles de la méthodologie adoptée en Algérie d'évaluation des dommages post-sismiques.

#### 2.3.2.1. Classification des dommages

La bonne classification des dommages subis par les constructions lors les enquêtes post-sismiques est très importante où des définitions précises et claires des niveaux de dommage sont toujours appropriées. Le niveau de dommage est défini en fonction de la sévérité des fissurations, de la déformation ou de l'effondrement des éléments et ses nœuds dans la structure. Les échelles macrosismiques modernes représentent une bonne référence où le niveau de dommage est défini sous forme d'une description qualitative discrète en tant que « *État de dommage* » pour décrire les dommages dans les éléments structurels et non structurels de la construction. Les éléments structurels sont les parties les plus importantes de la construction puisqu'ils garantissent la capacité portante aux charges horizontales et verticales ce qui se réfère directement à la stabilité et à la sécurité du bâtiment. Les dommages subis aux composants non structurels sont importants à la fois pour la classification par exemple de l'utilisabilité de la construction et pour l'estimation des coûts de réparation puisque leurs coûts de réparation représentent la majorité de la valeur du bâtiment [18].

Les classifications suivantes des niveaux des dommages sont basées principalement sur l'échelle EMS-98 [9] mais des autres critères sont également adoptés afin de produire des définitions compréhensives. Ces classifications décrivent les dommages apparus dans les éléments structurels et non structurels pour les deux types de constructions, les

constructions en béton armé et les constructions en maçonnerie. Les descriptions des dommages de chaque niveau de dommage sont illustrées par diverses études avec quelques clarifications de type et d'intensité des fissures et des défaillances [9, 14, 36, 71, 89] :

#### 2.3.2.1.1. Niveau 1 – Dommages négligeables ou légers (D1)



Figure 2.6 : Niveau de dommage « D1 » [9]

Ce niveau de dommage (voir Figure 2.6) réfère que le bâtiment n'a pas subi des dommages au niveau de ses éléments structurels. Cependant, des dommages non structurels peuvent être observés mais ces dommages ne compromettant pas la sécurité des occupants (La chute des éléments non structurels par exemple). Ce niveau est considéré comme le point d'apparition des fissures, des fissures fines apparaissent dans le plâtre, les murs, les cloisons et les remplissages des bâtiments en béton armé. Aussi, quelques fissures fines apparaissent au niveau de quelques murs en plus de la chute de quelques petits morceaux de plâtre dans le cas des bâtiments en maçonnerie.

#### 2.3.2.1.2. Niveau 2 – Dommages modérés (D2)



Figure 2.7 : Niveau de dommage « D2 » [9]

Dans ce niveau de dommage (voir Figure 2.7), le bâtiment a subi des dommages modérés au niveau des éléments non structurels avec des dommages légers au niveau des éléments structurels. Ce qui réfère que le comportement du bâtiment commence à devenir non linéaire et que certains éléments commencent à entrer dans leur phase plastique et que la rigidité du bâtiment commence à diminuer. Cependant, les dommages observés n'affectent pas significativement la capacité de la structure.

Dans le cas de bâtiments en maçonnerie, des fissures de largeur  $\leq 1 \text{ mm}$  apparaissent dans nombreux murs avec le risque de chute des gros morceaux de plâtre. Des effondrements partiels des cheminées sont plus souvent observés. Des fissures plus grandes apparaissent autour des ouvertures des portes et des fenêtres.

De l'autre côté, des fissures légères sont observées dans les poutres (jusqu'à  $1 \text{ mm}$ ) et dans les poteaux ( $< 0.5 \text{ mm}$ ) des structures de type portique. Des fissures légères sont également apparues près des nœuds ou à l'intérieur des nœuds. Des fissures légères diagonales apparaissent dans les structures avec murs porteurs. De plus, plusieurs fissures (jusqu'à  $2 \text{ mm}$ ) apparaissent dans les murs de remplissage et les cloisons de séparation. La chute des revêtements friables et du plâtre avec le chut du mortier des joints entre les panneaux des murs sont également observés dans le cas des bâtiments en béton armé.

#### 2.3.2.1.3. Niveau 3 – Dommages importants (D3)



Figure 2.8 : Niveau de dommage « D3 » [9]

Les bâtiments classés dans le niveau 3 de dommage (voir Figure 2.8) sont des bâtiments qu'ont subis des dommages structuraux modérés et des dommages non structuraux importants. Cela se réfère au fait que le bâtiment présente une augmentation significative de sa non-linéarité et que sa capacité a considérablement changé avec une rigidité très réduite. Le comportement non linéaire du bâtiment est clair par l'étendue des fissures.

Les bâtiments en béton armé souffrent des fissures de flexion dans les poutres (jusqu'à  $4-5 \text{ mm}$ ). Des fissures dans les poteaux et les voiles (jusqu'à  $2-3 \text{ mm}$ ), dans les nœuds à la base de l'ossature et dans les extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. L'écaillage du revêtement de béton avec le flambement des barres d'armature sont également observés. Au niveau de leurs éléments non structurels, des fissures importantes au niveau des cloisons de séparation et murs de remplissage sont observées ( $> 2 \text{ mm}$ ) avec des fissures diagonales jusqu'à quelques  $\text{mm}$ . Des cas individuels de défaillance des panneaux de remplissage sont également constatés.

Les bâtiments en maçonnerie souffrent des fissures importantes et étendues (jusqu'à  $1 \text{ cm}$  ou plus) dans la plupart des murs (surtout des fissures diagonales dans les murs avec des

ouvertures de grande surface). Des détachements des tuiles des toitures, des ruptures de cheminées au niveau de la ligne de toiture et des défaillances multiples des éléments non structurels (cloisons, murs pignons) sont observés.

#### 2.3.2.1.4. Niveau 4 – Dommages très importants (D4)



Figure 2.9 : Niveau de dommage « D4 » [9]

Ce niveau de dommage (voir Figure 2.9) réfère que le bâtiment a atteint son déplacement ultime, sa capacité portante a changée significativement et sa résistance à l'effort tranchant à la base a diminué considérablement. Le déplacement est très important et peut entraîner l'effondrement de certaines parties du bâtiment, les murs de maçonnerie non renforcés présentent des graves défaillances et peuvent s'effondrer et les voiles en béton armé sont très endommagés et peuvent basculer.

Les bâtiments en maçonnerie sont confrontés à des défaillances graves des murs avec des défaillances structurales partielles des toits et des planchers. Les bâtiments en béton armé présentent des fissures importantes dans les éléments structurels avec des défaillances en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence. Des pertes de l'adhérence entre le béton et les barres sont constatées avec un basculement des poteaux. L'effondrement de quelques poteaux ou d'un seul étage supérieur est souvent constaté.

#### 2.3.2.1.5. Niveau 5 – Destruction (D5)



Figure 2.10 : Niveau de dommage « D5 » [9]

Ce niveau de dommage (voir Figure 2.10) se réfère à l'effondrement total du bâtiment, l'effondrement du rez-de-chaussée ou des parties du bâtiment ou que le bâtiment est en danger imminent d'effondrement. En raison des dommages très importants dans les éléments

du bâtiment (quelques soit les éléments structurels ou non structurels) et après la défaillance des plusieurs éléments porteurs, les éléments restants ne peuvent pas continuer à supporter les charges, et le bâtiment va s'effondrer.

### 2.3.2.2. Niveaux des procédures d'évaluation des dommages sismiques

La plupart des procédures d'évaluation proposent deux ou trois niveaux pour effectuer les procédures. Par exemple, la procédure *ATC-20* [86, 95] propose: « *Rapide* », « *Détaillée* » et « *Calcul structural* ». L'évaluation rapide est suffisante pour la plupart des bâtiments. L'évaluation détaillée est une évaluation plus approfondie pour les cas complexes et difficiles et le calcul structural est le dernier niveau d'évaluation à adopter (voir Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Niveaux d'évaluation sismique selon ATC-20 [86, 95]

Procédure	But	Durée
Évaluation rapide	- Évaluation rapide de la sécurité, identification rapide des constructions dangereuses qui nécessitent une évaluation détaillée	10-20 mins
Évaluation détaillée	- Évaluation attentive des constructions endommagées, identification des constructions qui nécessitent une évaluation structurale	1-4 heures
Calcul structural	- Évaluation et investigation détaillée des constructions endommagées en utilisant les plans, les données numériques, modélisations et des nouveaux calculs structuraux.	1-7 jours

Les deux premières procédures sont le plus souvent utilisées pendant la phase post-désastre, l'évaluation rapide a pour objectif de déterminer rapidement quels bâtiments sont clairement sûrs ou sont clairement dangereux et quels bâtiments sont douteux et nécessitent des investigations approfondies. L'évaluation détaillée a pour objectif de déterminer non seulement si le bâtiment est sûr ou non, mais aussi (par des enquêtes approfondies sur le système de résistance du bâtiment) s'il peut être restauré et réparé ou s'il est perdu et doit être démoli [96]. Les bâtiments qui restent sans classement définitif après ces deux procédures sont soumis à une troisième évaluation qui est le « *Calcul structural* ».

#### 2.3.2.2.1. Évaluation rapide [96]

L'objectif principal de l'inspection rapide (Niveau **I**) est de sauver des vies humaines. Les procédures d'inspection rapide sont effectuées principalement pour évaluer et déterminer rapidement par inspection visuelle et avec le minimum personnel disponible au moment de l'urgence les bâtiments évidemment sûrs et non dangereux. L'idée est donc de minimiser le nombre de bâtiments qui nécessitent une inspection détaillée (qui prennent plus

de temps). Les bâtiments sont examinés visuellement (de l'extérieur et de l'intérieur après avoir vérifié qu'il est sans danger) pour déterminer les dommages visibles aux éléments résistants et porteurs (poteaux, poutres, voiles, etc.) ainsi qu'aux éléments secondaires (cheminées, toitures, façades, etc.). Pour déterminer tout signe de déformation résiduelle du bâtiment ou d'une partie de celui-ci. Ainsi que tout déplacement devrait également être inspecté. Les risques géotechniques sont également évalués. De telle opération ne devrait pas prendre plus de 20 minutes. Les bâtiments présentant des dommages mineurs doivent être considérés comme sûrs avec une étiquette *Verte*. Les bâtiments présentant des dommages considérables, tels que des fissures importantes, des effondrements partiels, des graves dommages aux éléments structurels, des risques de chute des composants non structurels ou tout autre danger doivent être considérés comme bâtiments dangereux avec une étiquette *Rouge*. Les autres bâtiments qui ont des doutes concernant leur niveau de sûreté sont limités d'accès avec une étiquette *Orange*.

#### 2.3.2.2.2. Évaluation détaillée [89, 96]

L'évaluation détaillée (Niveau **II**) est généralement effectuée après un certain temps du séisme afin d'évaluer en détail le bâtiment endommagé par des investigations approfondies. L'objectif de l'évaluation détaillée n'est pas seulement de déterminer le niveau de sécurité des bâtiments, mais également d'identifier les bâtiments qui peuvent être restaurés et réparés ou qui doivent être démolis. L'évaluation détaillée consiste tout d'abord à une vérification de l'extérieur du bâtiment afin de : Déterminer les risques extérieurs éventuels, déterminer le système structural du bâtiment avec un examen de l'irrégularité du bâtiment, examiner les éléments non structurels de l'extérieur (cheminées, murs de remplissage, ...) qui peuvent devenir une source de danger s'ils sont endommagés. Les risques géotechniques sont également évalués en examinant le site par exemple pour tout glissement de terrain ou liquéfaction. Une investigation approfondie doit être effectuée sur le système structural du bâtiment. Les éléments porteurs et les éléments de contreventement, les fondations, les poutres, les voiles, les poteaux, les murs porteurs, les dalles et les planchers doivent tous faire l'objet d'une évaluation minutieuse afin de déterminer s'ils sont endommagés et à quel niveau afin de déterminer la capacité de résistance dans le bâtiment. Les éléments non structurels doivent également être soigneusement examinés. Même s'ils n'affectent pas toujours la capacité du bâtiment, ils affectent l'utilisabilité du bâtiment et ils peuvent présenter des risques considérables pour les occupants en cas de dommages importants. Après avoir examiné tous les paramètres précédents, les inspecteurs ont pris leurs décisions

concernant le bâtiment en termes de mesures nécessaires de réparation et de réaménagement ou ils décident que le bâtiment est sévèrement endommagé et donc les mesures de réparation ne sont pas faisables et économiques. En cas des doutes concernant l'état du bâtiment et dans certaines situations spécifiques, le bâtiment est référé au dernier niveau d'évaluation, qui est le calcul structural.

#### 2.3.2.2.3. Calcul structural [11, 97, 98]

Le calcul structural « *Engineering evaluation* » est le dernier et le plus rigoureux niveau d'évaluation sismique des constructions. Il est seulement recommandé après la détermination que le bâtiment a subi des dommages de tel degré que l'inspection visuelle n'est plus suffisante pour évaluer l'état actuel de la structure. Le calcul structural prend plusieurs jours ou même des semaines pour être complet et nécessite des experts bien qualifiés pour effectuer l'évaluation. Il faut en tenir compte toutes ressources techniques possibles, comme les plans de la construction, les données collectées concernant les dommages. Le calcul structural consiste à effectuer des calculs structuraux et des modélisations, les méthodes de calcul sont des méthodes sophistiquées qui peuvent être divisées en méthodes linéaires (statique et dynamique) et méthodes non linéaires (statique et dynamique). Ces méthodes ont l'objectif de déterminer le niveau d'endommagement réel de la construction et finalement d'évaluer la faisabilité d'effectuer des travaux de réparation et de renforcement ou aller à la démolition afin de prendre les mesures nécessaires tout en tenant compte de l'importance du bâtiment. Certaines de ces procédures d'évaluation et également des techniques de réparation sont développées par exemple dans *FEMA 306 « Evaluation of earthquake damaged. concrete and masonry wall buildings »* et également dans *FEMA 351 « Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings »* pour les constructions en béton, en maçonnerie et en acier respectivement.

Plusieurs procédures avec différents niveaux ont été proposées dans plusieurs pays pour évaluer les dommages subis par les bâtiments après les tremblements de terre. Chaque procédure vise à évaluer rigoureusement et rapidement le bâtiment afin d'assurer la sécurité des occupants, de minimiser les pertes économiques et de mieux gérer la phase post-séisme. La procédure d'évaluation suivie en Algérie est adoptée à titre d'exemple local et ensuite est considérée comme un exemple dans le reste de la thèse.

Toutefois, plusieurs défis et problèmes peuvent surgir au cours de l'exécution de ces tâches, ce qui peut affecter l'efficacité de telles opérations. Les défis et les problèmes les plus courants lors l'exécution des procédures d'évaluation des dommages post-sismiques sont décrits dans la section suivante.

#### 2.4. Défis pendant les procédures d'évaluation post-sismique

Comme il a été discuté dans les sections précédentes, plusieurs approches ont été développées pour évaluer les dommages survenus après les tremblements de terre. Pour cela, plusieurs directives et guides ont été proposées pour systématiser les tâches d'évaluation sismique des bâtiments endommagés afin de décider le plus tôt possible (avec précision) si les bâtiments peuvent être occupés en toute sécurité ou pas. Cependant, et même avec les guides directives proposées, l'évaluation de la sécurité des bâtiments repose entièrement sur l'élément humain (les inspecteurs) qui est vulnérable aux nombreux facteurs. Ces facteurs peuvent réduire leur efficacité pendant les tâches d'évaluation, ce qui peuvent alors affecter leur capacité à effectuer des évaluations rigoureuses. Les tâches d'évaluation des dommages après les séismes présentent nombreux défis et problèmes, les plus courants sont résumés dans les points suivants.

Au cours des campagnes post-désastres, la pratique actuelle repose et dépend des enquêtes manuelles d'inspection des bâtiments effectués par des inspecteurs. Ils remplissent des fiches d'évaluation durant l'évaluation de l'état des bâtiments endommagés où la procédure d'évaluation se déroule durant plusieurs semaines. La non-organisation électronique de ces fiches présente des inconvénients majeurs qui conduisent à plusieurs carences. L'exécution manuelle de ces tâches réduit l'efficacité de la campagne puisqu'elle prend beaucoup de temps et d'efforts ce qui peut entraver les opérations de sauvetage. La planification de phase de reprise post-désastre repose entièrement sur le retour des enquêteurs et ses rapports. Ces rapports fournissent des informations précieuses (aperçu de l'étendue des dommages en termes de distribution spatiale avec le nombre de bâtiments endommagés associés aux niveaux de dommage). Le retard dans la communication de ces rapports entravera les opérations de récupération et le démarrage des programmes de reconstruction. Également, les fiches d'évaluation ne fournissent pas des actualités en temps réel sur l'état actuel de la zone touchée, ce qui limite les options des décideurs. Ceci montre l'efficacité et l'importance des versions numériques de ces fiches avec des visualisations en SIG par exemple [90].

Les tâches d'évaluation sont effectuées à travers des inspections visuelles. De telles procédures étant sujettes aux jugements « *Subjectifs* » des inspecteurs [99, 100]. Les inspecteurs s'appuient sur leur propre jugement personnel pour évaluer les composants des bâtiments endommagés et pour déduire des conclusions à propos le niveau global de dommage tout en basant seulement sur des observations visuelles. Le jugement des inspecteurs est influencé par plusieurs facteurs comme : La subjectivité et la partialité de l'inspecteur lui-même, le niveau d'expérience et les connaissances techniques de l'inspecteur, leur compréhension de : Système structurel du bâtiment, degré de vulnérabilité et la gravité des dommages observés au niveau des composants du bâtiment et leurs influences sur l'état global du bâtiment. Cela signifie qu'un bâtiment endommagé peut être évalué différemment entre les inspecteurs.

Les guides directives des procédures d'évaluation sismique proposent des termes linguistiques pour définir les niveaux de dommage comme : Dommage Léger, Dommage Modéré et Dommage Important. Ces termes linguistiques peuvent avoir des significations différentes entre les inspecteurs [101]. Plusieurs niveaux de dommage sont proposés dans ces guides directives et une définition commune des niveaux de dommage n'est pas encore atteinte [102]. Ces niveaux de dommage sont souvent définis de façon ambiguë et aucunes limites claires n'ont été définies entre ces niveaux. Ces termes linguistiques rendent le jugement des inspecteurs plus subjectif et donc augmentent leur incertitude et imprécision. L'élément humain (les inspecteurs) est toujours vulnérable aux changements de l'état mental lors événements de crise tels que les tremblements de terre, la complexité de la procédure d'évaluation elle-même, le manque d'information et de connaissances [103]. L'absence de coordination, de partage d'informations, de confiance et de communication entre les équipes [104]. Le manque d'équipement et de temps nécessaires pour effectuer les tâches d'évaluation en meilleures conditions. La pression supplémentaire des habitants locaux lorsqu'ils abandonnent leurs logements par crainte des répliques [105] et d'autres facteurs sont autant des sources d'incertitude qui peuvent affecter la capacité des inspecteurs à produire des jugements objectifs.

L'un des scénarios complexes pour les inspecteurs est l'évaluation de constructions vastes et complexes. Il est difficile d'identifier le système structurel de la construction. Les composants des différents systèmes structurels se comportent différemment pendant les séismes et la détermination de l'influence de chaque composant sur la réponse globale de la structure est très difficile. Un nombre élevé des composants à évaluer rend la dérivation d'un

niveau de dommage global plus complexe pour les inspecteurs. De tels scénarios comportent des grands degrés d'incertitude pour les inspecteurs et c'est absolument difficile de porter des jugements rigoureux [102]. Un autre scénario difficile est le suivant : plusieurs bâtiments sont construits avec une mauvaise qualité d'exécution et de contrôle, autres bâtiments n'ont pas été construits selon des règlements parasismiques modernes. De tels bâtiments ne peuvent pas garantir une performance sismique suffisante. Cette information est nécessaire pour que les inspecteurs disposent une idée première sur la performance du bâtiment. Lorsque cette information n'est pas disponible ou garantie, l'inspecteur doit se fier de nouveau à son propre jugement technique. En outre, un autre défi peut être posé lorsque le bâtiment a subi des dommages non structuraux importants (façades, bardages, parties architecturales ...) mais le système structurel reste intact ou subit des dommages mineurs. De tels bâtiments peuvent tromper les inspecteurs et peuvent être classés comme *dangereux* alors qu'ils peuvent être occupés comme abris. D'autre part, certains bâtiments peuvent manquer de preuves visibles de dommages structuraux importants lorsque ces dommages peuvent être couverts par les éléments architecturaux du bâtiment [102]. Ces bâtiments représentent une réelle menace pour les occupants et requièrent une attention particulière de la part des inspecteurs.

Peut-être l'un des moments les plus difficiles pour les inspecteurs est l'hésitation entre deux niveaux de dommage à adopter. Par exemple, il est parfois difficile de distinguer si un dommage observé dans un composant du bâtiment a atteint ou dépassé un certain niveau de dommage seulement par inspection visuelle [102]. Il arrive parfois que deux niveaux de dommage adjacents soient acceptés avec prudence, un niveau de dommages soit trop faible pour décrire le dommage observé et le niveau suivant soit trop élevé où la description souhaitable se situe entre les limites de ces niveaux. Le même défi peut être soulevé lors de l'appréciation du niveau global des dommages. Les inspecteurs peuvent hésiter à prendre une décision finale surtout lorsque le niveau de dommage possiblement adopté est un niveau limite et peut donner lieu à des mesures significatives telles que l'autorisation ou non aux occupants d'entrer dans leurs bâtiments (étiquette *Verte* ou *Orange*). Ou de condamner le bâtiment à démolir ou non (étiquette *Orange* ou *Rouge*). De telles décisions sont importantes et difficiles et mettent les inspecteurs sous pressions additionnelles.

La procédure d'évaluation adoptée en Algérie est également vulnérable aux défis et problèmes potentiels qui pourraient apparaître au cours des campagnes post-désastre. Il apparaît également que la fiche d'évaluation adoptée en Algérie présente plusieurs

limitations ce qui la rendra ouverte aux autres améliorations. Par exemple, la fiche ne tient pas en compte l'emplacement et la position du composant endommagé dans la construction. Est un facteur important puisque par exemple les dommages aux étages inférieurs affectent plus fortement la construction que les dommages aux étages supérieurs. De plus, chaque paramètre de la fiche ne peut être affecté qu'avec le niveau de dommage maximum observé, une telle affectation peut ne refléter pas l'état réel du groupe des composants du paramètre. Finalement, la fiche d'évaluation ne fournit aucune sorte de relations entre les paramètres de la fiche (endommagements locaux observés) et leur influence sur le niveau général de dommage de la construction. Les inspecteurs s'appuient entièrement sur leur propre sens du jugement pour évaluer l'influence potentielle de chaque paramètre et pour déterminer le niveau général de dommage le plus approprié. Un tel processus est beaucoup plus difficile pour les inspecteurs non expérimentés.

### 2.5. Systèmes experts comme solution

Les systèmes experts par définition sont des programmes informatiques intelligents ont été programmés pour émuler la façon dont les experts de domaine résoudre les problèmes. Ces systèmes ont été utilisés depuis le milieu des années 60 pour fournir une aide essentielle dans le processus de prise de décision et de résolution des problèmes. Peut-être l'une des définitions les plus complètes c'est celle proposée par Feigenbaum (1970) [106] comme suit :

*« An expert system is an intelligent computer program that uses knowledge and inference procedures to solve problems that are difficult enough to require significant human expertise for their solutions »*

L'idée de base des systèmes experts est de recevoir des données ou des informations de l'utilisateur afin de fournir une expertise en réponse. Pour cela, diverses techniques ont été utilisées pour développer les systèmes experts. Notamment les systèmes à base de règles, à base de connaissances, systèmes flous, systèmes des réseaux de neurones, systèmes de raisonnement par cas ... [1]. Les applications de ces systèmes se sont étendues pour atteindre presque tous les domaines pour traiter avec succès des problèmes complexes tels que le domaine de la science, l'industrie, l'ingénierie, le diagnostic médical, la finance, etc.

Parmi les types des systèmes experts, les systèmes flous ont été utilisés avec beaucoup de succès pour manipuler l'incertitude en utilisant la logique floue et la théorie mathématique des ensembles flous afin de simuler le raisonnement humain au cours du processus

décisionnel. Les systèmes flous sont autorisés de se comporter de manière moins précise que les systèmes conventionnels. Ces systèmes sont motivés par le fait que le processus décisionnel n'est pas toujours une question de vrai ou faux et implique parfois des zones grises où la conclusion n'est pas toujours certaine à 100% [1, 107].

### 2.5.1. Approches locales

Divers travaux de recherche ont été menés à propos l'évaluation des dommages sismiques des bâtiments en tenant compte de la méthodologie d'évaluation adoptée en Algérie et/ou de la typologie du bâti Algérien. Motivés par l'absence des méthodologies de traitement automatique des dommages subis par les composants des bâtiments, certains chercheurs ont développé des cadres théoriques d'évaluation des dommages sismiques des bâtiments avec des applications sur la typologie du bâti Algérien.

#### 2.5.1.1. Approches basées sur les probabilités de défaillance

Mébariki et al. (2014) [108-110] ont développé une méthodologie probabiliste qui traite les dommages observés au niveau des éléments structurels (infrastructure, éléments verticaux, éléments horizontaux et toitures) et les éléments non structurels ou secondaires (escaliers, murs de remplissage, éléments intérieurs et éléments extérieurs). La méthodologie transforme les catégories proposées de dommages en termes des probabilités « *Risque résiduel* » de défaillance allant de 0 (*Aucun dommage*) à 1 (*Domage complet*) avec cinq catégories de dommage proposées  $D_c(i)$  :

$$D_c \in \{D_c(1), \dots, D_c(i), \dots, D_c(5)\} \quad (2.1)$$

Quatre composants structurels sont adoptés dans cette recherche, chacun est associé à un événement de défaillance comme suit :

$$P_s(E_I) = P_I ; P_s(E_V) = P_V ; P_s(E_H) = P_H ; P_s(E_R) = P_R \quad (2.2)$$

Et également quatre composants non structurels sont adoptés, chacun de ces éléments est associé à un événement de défaillance comme suit :

$$P_{ns}(E_{IN}) = P_{IN} ; P_{ns}(E_{FL}) = P_{FL} ; P_{ns}(E_{EX}) = P_{EX} ; P_{ns}(E_{ST}) = P_{ST} \quad (2.3)$$

Où  $E_i$  sont des événements de défaillance des éléments structurels et non structurels et  $P_i$  sont leurs probabilités correspondantes d'occurrence.

Ils ont également investigué certains mécanismes de défaillance susceptibles d'être déclenchés par les séismes. Deux mécanismes de défaillance possibles  $C_{S1}$  et  $C_{S2}$  pour les éléments structurels et un mécanisme de défaillance  $C_{ns}$  pour les éléments non structurels sont proposés comme suit (voir Figure 2.11) :

$$C_{S1}: P_S = 1 - (1 - P_I). (1 - P_V). (1 - P_H \cdot P_R)$$

$$C_{S2}: P_S = 1 - (1 - P_I). (1 - P_V). (1 - P_H). (1 - P_R) \quad (2.4)$$

$$C_{ns}: P_{ns} = 1 - (1 - P_{IN}). (1 - P_{FL} \cdot P_{EX} \cdot P_{ST})$$

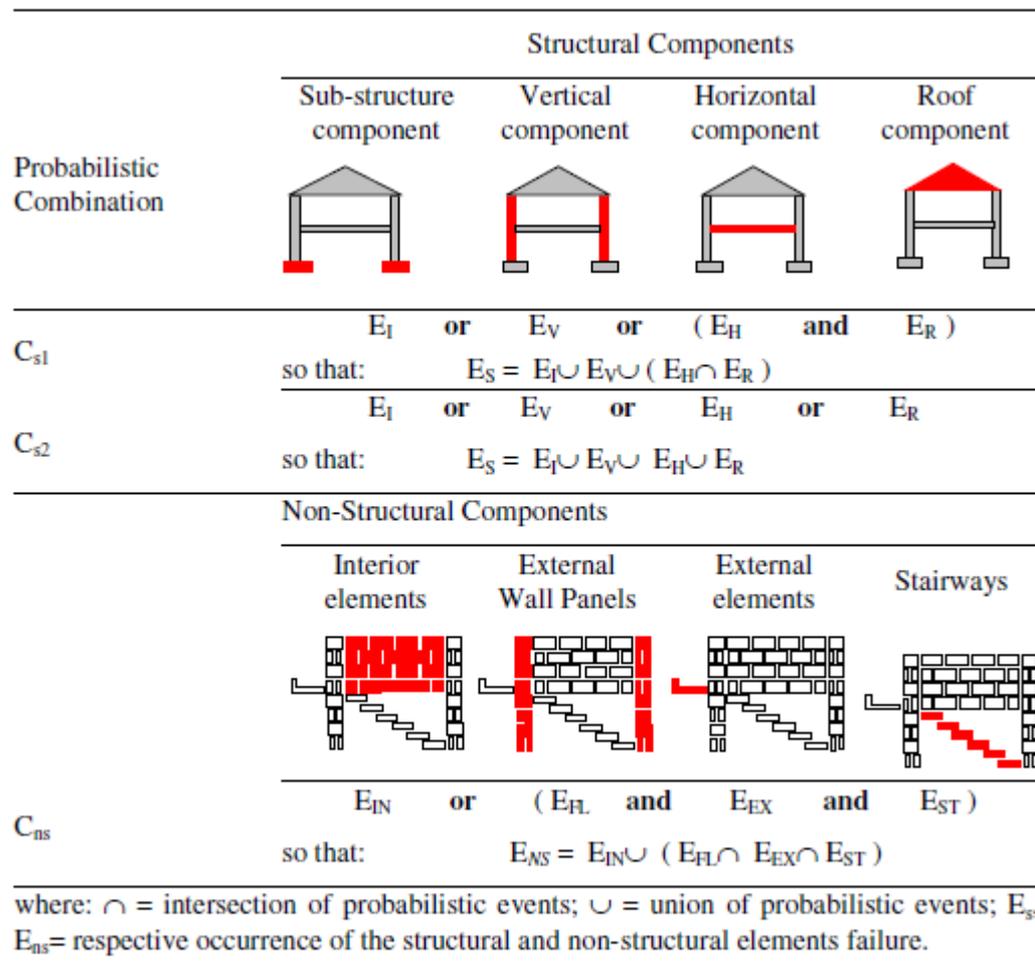


Figure 2.11 : Différente combinaisons d'évènements entre les composants structurels et les composants secondaires [110]

La probabilité « *Risque global* » de défaillance du bâtiment est alors dérivée selon des combinaisons prédéfinies des événements probabilistes de défaillance des éléments structurels et non structurels afin de déterminer l'influence de chaque élément sur la probabilité de défaillance du bâtiment. Le dommage global du bâtiment est alors exprimé soit par la combinaison  $(C_{S1} \cup C_{ns})$  ou par la combinaison  $(C_{S2} \cup C_{ns})$  et le risque de

défaillance  $P_f$  du bâtiment devient en cas de défaillance des éléments structurels ou des éléments non structurels :

$$P_f = 1 - (1 - P_s) \cdot (1 - P_{ns}) \quad (2.5)$$

Avec :

$$P_f(i) = f(D_c(i)) = \begin{cases} P_f(1) = 0, & D_c(1) = \text{Pas de dommage} \\ P_f(5) = 1, & D_c(5) = \text{Dommage complet} \end{cases} \quad (2.6)$$

$f(\cdot)$  : fonction représentante des relations théoriques entre les catégories de dommage et le risque résiduel de défaillance où six relations mathématiques ont été étudiées (voire Figure 2.12).

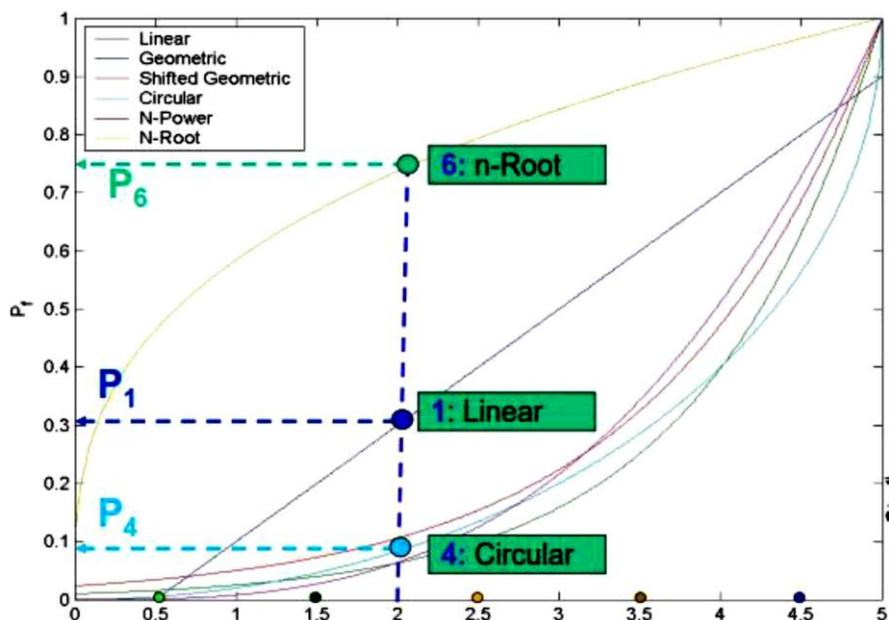


Figure 2.12 : Différentes relations testées entre la catégorie de dommage et la probabilité de défaillance résiduelle [108, 110]

Après avoir obtenu le risque de défaillance  $P_f$  du bâtiment, le dommage global correspondant  $D_c$  est alors obtenu comme suit :

$$D_c = f^{-1}(P_f) \quad (2.7)$$

Où  $f^{-1}(\cdot)$  est la fonction inverse de  $f(\cdot)$

La méthodologie proposée a été testée en utilisant des données des constructions endommagées après le séisme de Boumerdès 2003 en comparant les dommages théoriques

(par traitement automatique) aux dommages rapportés par les inspecteurs. Les résultats ont montré que les dommages théoriques sont généralement en accord avec ceux rapportés par les inspecteurs (précision générale égale à 80%). Les fonctions de relation adoptées  $f(\cdot)$  produisent des résultats similaires et la deuxième combinaison ( $C_{S2} \cup C_{ns}$ ) produit une meilleure précision comparant avec l'autre combinaison ( $C_{S1} \cup C_{ns}$ ).

### 2.5.1.2. Approches basées sur les réseaux de neurones

Les travaux de Noura et al. (2017) [111] ont développé une méthodologie d'évaluation des dommages sismiques des bâtiments basant sur les réseaux de neurones artificiels *RNA*. Ils ont investigué certains paramètres influençant dans les réseaux de neurones tels que le nombre optimal de neurones, le nombre de couches cachées, les fonctions d'activation afin d'atteindre une performance maximale. Le réseau de neurones proposé analyse les valeurs des paramètres qui représentent les dommages observés au niveau des composants du bâtiment afin d'en déduire un niveau de dommage global. Pour ce fait, ils ont proposé deux groupes de paramètres gouvernants : un groupe des composants structurels et un groupe des composants secondaires (Figure 2.13).

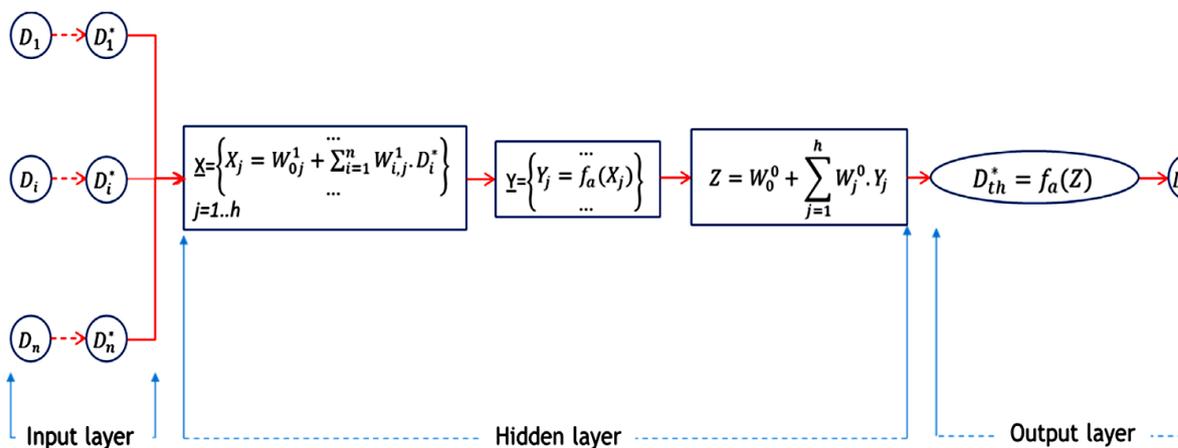


Figure 2.13 : Architecture du réseau de neurones adopté [111]

Ils ont également étudié la meilleure combinaison entre ces groupes afin d'atteindre une meilleure corrélation entre le niveau de dommage théorique et le niveau de dommage réel du bâtiment. Pour ce fait, ils ont examiné 3 combinaisons comme suit :

*1<sup>ère</sup> Combinaison « Groupe des composants structurels  $G_S$  » :* Cette option calcule le niveau de dommage global  $D_{th}$  en fonction des dommages observés au niveau des composants structurels avec un nombre total de paramètres d'entrée  $n = 4$  :

$$D_{th} = D_{th}(D_I, D_V, D_H, D_R) \quad (2.8)$$

Où :  $D_I$  : dommage observé au niveau de l'infrastructure.  $D_V$  : dommage observé au niveau des éléments porteurs.  $D_H$  : dommage observé au niveau de système de contreventement et  $D_R$  : dommage observé au niveau des toitures.

*2<sup>ème</sup> Combinaison « Groupe des composants non structurels  $G_{nS}$  »* : Cette option calcule le niveau de dommage global  $D_{th}$  en fonction des dommages observés au niveau des composants secondaires avec un nombre total de paramètres d'entrée  $n = 4$  :

$$D_{th} = D_{th}(D_{ST}, D_{FL}, D_{IN}, D_{EX}) \quad (2.9)$$

Où :  $D_{ST}$  : dommage observé au niveau des escaliers.  $D_{FL}$  : dommage observé au niveau des remplissages extérieurs.  $D_{IN}$  : dommage observé au niveau des éléments intérieurs et  $D_{EX}$  : dommage observé au niveau des éléments extérieurs.

*3<sup>ème</sup> Combinaison « Groupe des composants structurels + non structurels  $G_{S+nS}$  »* : Cette option calcule le niveau de dommage global  $D_{th}$  en fonction des dommages observés au niveau des composants structurels et les composants secondaires avec un nombre total de paramètres d'entrée  $n = 8$  :

$$D_{th} = D_{th}(D_I, D_V, D_H, D_R, D_{ST}, D_{FL}, D_{IN}, D_{EX}) \quad (2.10)$$

La sortie finale alors du réseau de neurones peut être exprimée comme suit :

$$D_{th} = D_{min} + \frac{1}{2}(1 + D_{th}^*). (D_{max} - D_{min}) \quad (2.11)$$

Avec  $D_{th}^*$  est une fonction des dommages des composants normalisés  $D_i^*$  :

$$D_{th}^* = f(D_i^*) \quad (2.12)$$

Où :

$$D_i^* = 2 \cdot \frac{(D_i - D_{min})}{(D_{max} - D_{min})} - 1 \quad (2.13)$$

Avec :

$$\begin{cases} D_{min} = 1, & \text{Pas de dommage} \\ D_{max} = 5, & \text{Dommage complet} \end{cases} \quad (2.14)$$

L'optimisation des paramètres du réseau de neurones a été réalisée en minimisant les erreurs quadratiques moyennes entre les niveaux de dommage théoriques  $D_{th}$  et les niveaux de dommage réels  $D_{ex}$  rapportés par les inspecteurs en utilisant une base de données des bâtiments endommagés lors du séisme de Boumerdès 2003. La comparaison entre les prédictions théoriques du réseau de neurones et les niveaux de dommage rapportés a été effectuée à l'aide d'un coefficient de corrélation linéaire comme suit :

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{N_L} (D_{ex,k} - \bar{D}_{ex}) \cdot (D_{th,k} - \bar{D}_{th})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_L} (D_{ex,k} - \bar{D}_{ex})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{N_L} (D_{th,k} - \bar{D}_{th})^2}} \quad (2.15)$$

La comparaison a été effectuée en examinant chaque combinaison de groupes de paramètres adoptés pour déterminer quelle combinaison donne la meilleure performance. La dernière combinaison  $G_{S+nS}$  dans laquelle elle adopte tous les paramètres (structurels et non structurels) a donné la meilleure performance du réseau de neurones (voir Tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Comparaison entre les dommages prédits et dommages rapportés

Combinaison adoptée	Coefficient de Corrélation $R$ (%)			
	Apprentissage	Validation	Test	Toute la base de données
$G_S$	82	84	<b>80</b>	82
$G_{nS}$	71	71	<b>70</b>	71
$G_{S+nS}$	85	87	<b>87</b>	86

Le modèle assure une bonne précision (plus de 85% de corrélation) ce qui est similaire et légèrement meilleure que la méthode discutée précédemment (méthodes probabilistes) qui assure une précision égale à 80%.

### 2.5.2. Logique floue : Précision vs Signification

Dans le contexte du développement et de l'amélioration continue de la performance des méthodologies développées pour le traitement automatique des informations relatives aux bâtiments endommagés en tant qu'outils d'aide à la décision, les systèmes flous qui basent sur la théorie des ensembles flous ont prouvé leur haute performance avec des exigences de développement simples et beaucoup de flexibilité lors de l'exploitation de tels systèmes.

Les premières idées à propos la théorie des ensembles flous ont commencé à émerger au début du 20<sup>ème</sup> siècle par plusieurs chercheurs. Bertrand Russell (1923) a discuté le terme imprécision « *Vagueness* » [112] et Max Black (1937) a discuté le terme ensemble vague « *Vague Sets* » [113]. Mais l'article fameux de Zadeh (1965) « *Fuzzy Sets* » dans lequel il a présenté et discuté les aspects mathématiques de la logique floue est considéré comme l'introduction reconnue de cette logique [107]. Malgré que cet article n'ait pas été bien accepté par la communauté scientifique en ce temps-là, plusieurs chercheurs ont continué à développer des applications rigoureuses en exploitant les propriétés peu familières de la logique floue. La théorie des ensembles flous a continué à chercher d'être acceptée et applicable jusqu'aux années 70 lorsque Mamdani et Assilian (1975) ont proposé la première application rigoureuse de cette théorie pour contrôler un système dynamique non linéaire [114].

La logique floue décrit des concepts vagues où sa philosophie repose entièrement sur l'importance relative de la précision, elle base sur l'idée d'appartenance partielle des éléments aux ensembles ou catégories, où ces derniers sont caractérisés par des limites floues. La logique floue est caractéristique de sa façon de développer des systèmes simples, mais élégants pour résoudre des systèmes complexes quand aucune autre approche simple n'est applicable ou ne fournit pas des solutions pratiques. Elle fournit des solutions très applicables en assurant un équilibre harmonieux entre « *Signification* » et « *Précision* » (voir Figure 2.14).

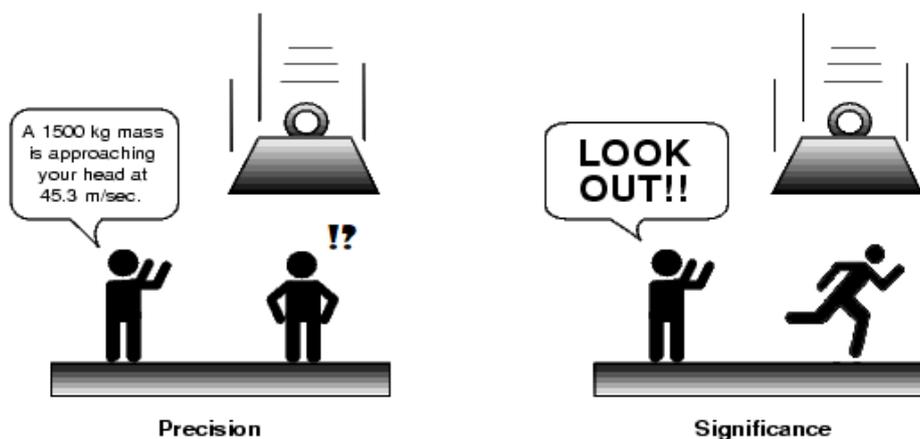


Figure 2.14 : Précision vs Signification [115]

La logique floue est utilisée pour surmonter certains problèmes inhérents qui surviennent lorsque les connaissances fournies par l'utilisateur sont vagues, incertaines et incomplètes et quand le raisonnement approché est plus pratique. L'un des points les plus

forts de la logique floue est sa capacité à décrire linguistiquement les valeurs du processus ou les entrées (variables). Cette approche permet de développer des systèmes de façon simple et efficace où la signification des résultats est plus importante que leur précision.

### 2.5.3. Applications des systèmes flous dans l'évaluation sismique

La logique floue a été appliquée avec succès dans le domaine de l'évaluation sismique où multiples recherches ont été menées motivées par sa flexibilité pendant le développement et par sa capacité à manipuler les incertitudes. Ces incertitudes apparaissent pendant les procédures d'évaluation sismique en raison des termes linguistiques utilisés pour décrire les dommages par exemple et en raison de l'imprécision des mesures et des jugements proposés par l'inspecteur influencés par la subjectivité et le biais naturel de l'inspecteur lui-même. La logique floue apporte un support significatif dans des situations où l'information (observation) est vague, ambiguë, qualitative ou imprécise. La section ci-dessous décrit brièvement divers cas d'application de la logique floue à travers le monde dans le domaine de l'évaluation des dommages sismiques, de vulnérabilité sismique et de risque sismique :

Carreño et al. (2010) [101] ont établi un outil de calcul pour l'évaluation des dommages post-sismiques et de la sécurité dans les bâtiments après les séismes afin de soutenir les inspecteurs pendant les campagnes post-séisme. Le modèle est basé sur un système hybride « *Neuro-flou* » dans lequel il évalue les dommages structuraux et non structuraux, les conditions du sol et l'état préexistant du bâtiment afin de soutenir la décision finale à propos l'habitabilité et la réparabilité du bâtiment. Un réseau de neurones artificiels est utilisé pour calibrer le modèle (facteurs de pondération) où la calibration du réseau de neurones a été effectuée à l'aide d'une base de données d'évaluations des dommages sismiques réels effectuée par des experts.

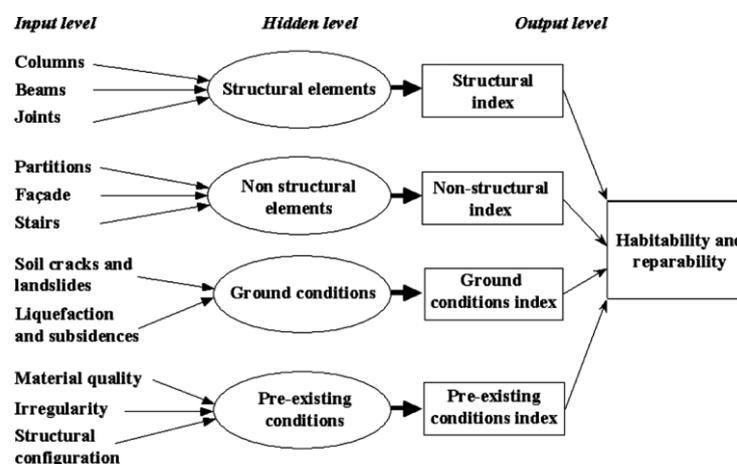


Figure 2.15 : Structure générale du modèle de Carreño et al. (2010) [101]

Le modèle est construit à partir quatre groupes (voir Figure 2.15), chaque groupe est chargé de déterminer un indice de dommage spécifique en utilisant cinq niveaux de dommage possibles sous forme des ensembles flous. Les niveaux « *Aucun* », « *Léger* », « *Modéré* », « *Important* » et « *Sévère* » sont adoptés pour les indices de dommage structuraux et non structuraux et : « *Très bon* », « *Bon* », « *Moyen* », « *Mauvais* » et « *Très mauvais* » pour les indices de conditions du sol et conditions préexistantes. Les fonctions d'appartenance adoptées sont basées sur des indices de dommage proposés par des divers rapports techniques et recherches puis ces indices ont été ajustés par les auteurs.

Après avoir évalué les valeurs d'entrée, chaque groupe dans le système propose un indice de dommage en utilisant un processus de défuzzification « *Centroïde* » qui représente la gravité des dommages observés dans ce groupe. Ces indices de dommage sont calculés en tenant compte certains facteurs d'importance relative (poids) pour chaque groupe. Ces poids offrent des valeurs élevées aux composants structurels tels que les poteaux, les voiles, les murs porteurs par rapport aux composants non structurels par exemple. L'étape finale consiste à définir l'indice de dommage global attendu en utilisant également un processus de défuzzification « *Centroïde* ». L'indice final est assigné avec des qualifications linguistiques en fonction de la proximité de l'indice par rapport à l'échelle d'évaluation adoptée, une fois les qualifications finales effectuées, il est possible de déterminer alors l'habitabilité et la réparabilité du bâtiment.

Le modèle a utilisé une structure hiérarchique (quatre sous-systèmes pour chaque groupe avec des échelles d'évaluation similaires en termes de nombre de catégories (5 catégories dans chaque groupe) ce qui rend la construction de la base de règles beaucoup plus facile ( $5^2 = 25$  règles pour chaque sous-système). Le modèle est simple et compréhensible et fournit un soutien fiable aux inspecteurs pendant les tâches d'évaluation des dommages. Toutefois, la phase de calibration est compliquée et nécessite une bonne compréhension des réseaux de neurones. La taille de la base de données adoptée pour entraîner le réseau de neurones est un peu limitée (250 constructions) où la qualité du calibrage est liée à la qualité de la base de données elle-même.

Sanchez-Silva et Garcia (2001) [116] ont mis au point une méthodologie d'estimation des dommages sismiques des structures basée sur la logique floue, les réseaux de neurones et la théorie des systèmes afin d'évaluer les dommages prévus pour un séisme d'une magnitude donnée. Le modèle proposé est basé sur trois couches (voir Tableau 2.5), la

première couche contient 10 variables d'entrée qui seront utilisées pour déterminer quatre indices dans la deuxième couche (intermédiaire). La dernière couche propose les dommages globaux potentiels du bâtiment en utilisant une échelle de dommages de cinq catégories sous forme des ensembles flous : « *Aucun* », « *Léger* », « *Modéré* », « *Grave* » et « *Effondrement* ». Figure 2.16 représente un exemple des fonctions d'appartenance.

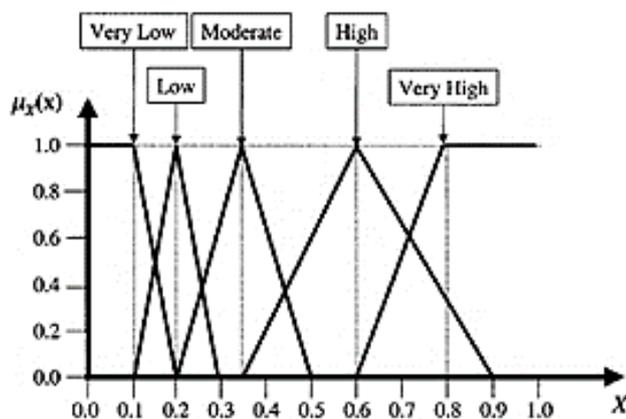


Figure 2.16 : Fonctions d'appartenance adoptées

Les fonctions d'appartenance adoptées sont déterminées sur la base du rapport *ATC-13* (1985) en effectuant une analyse de sensibilité approfondie en utilisant des différentes bases de données des constructions endommagées.

Tableau 2.5 : Paramètres adoptés dans le réseau de neurones

1 <sup>ère</sup> couche	2 <sup>ème</sup> couche	Dernière couche
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement du sol</li> <li>• Caractéristiques du sol</li> <li>• Système structurel</li> <li>• Poteaux courts</li> <li>• Éléments non structurels</li> <li>• Irrégularités verticales</li> <li>• Irrégularités horizontales</li> <li>• Année de construction</li> <li>• Qualité de construction</li> <li>• Maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque sismique</li> <li>• Résistance structurelle</li> <li>• Forme structurelle</li> <li>• Caractéristiques de construction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dommage global de la construction</li> </ul>

La première couche (voir Figure 2.17) contient des facteurs qui sont considérés comme significatifs pour la détermination du comportement sismique du bâtiment, ces facteurs sont basés sur *ATC-21* (1988). Chaque variable est liée à un coefficient d'importance (dans une échelle de 0 à 1) pour déterminer dans quelle mesure cette variable peut influencer les indices de la couche intermédiaire. La couche de sortie consiste à définir le dommage global attendu

en utilisant un processus de défuzzification où la méthode « *Centroïde* » est adoptée dans cette étude. Le réseau de neurones est entraîné pour calibrer les indices de classification des dommages où les valeurs adoptées initialement sont celles proposées par *ATC-13* (1985).

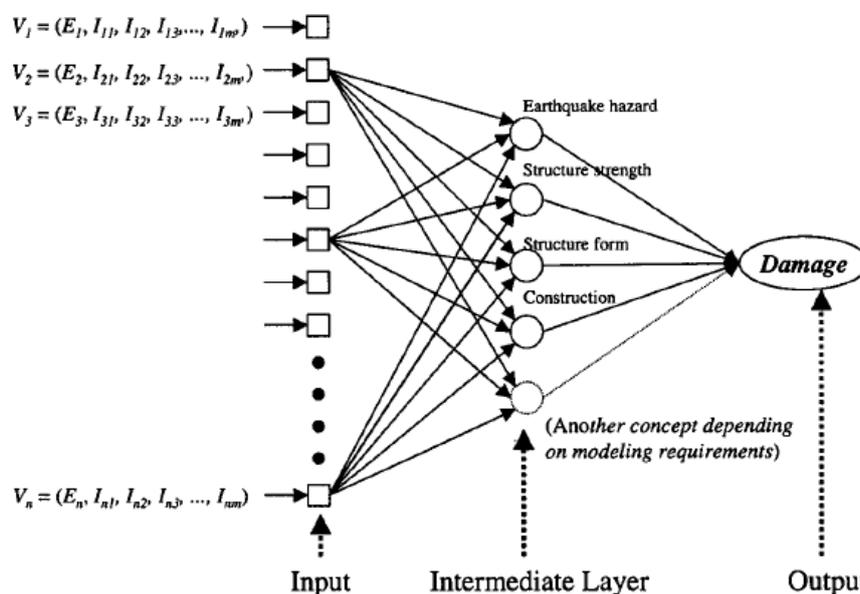


Figure 2.17 : Structure générale du modèle de Sanchez-Silva et Garcia (2001) [116]

La méthode proposée présente un bon outil d'évaluation lors l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments, le modèle n'est pas limité par un nombre donné de variables et la procédure d'évaluation reste cohérente en restreignant les résultats dans la plage  $[0, 1]$ . Cependant, le nombre de règles adoptées n'est pas mentionné dans l'étude, ce qui rend la complexité de la base de règles n'est pas claire. La calibration du modèle est basée sur des données antérieures qui peuvent affecter la qualité du processus. La taille de la base de données adoptée pour entraîner le réseau de neurones est limitée (150 constructions). Finalement, le modèle est un peu complexe ce qui peut rendre difficile l'adaptation du modèle aux autres procédures d'évaluation.

Tesfamariam et al. (2008, 2010) [117, 118] ont mis au point un système flou hiérarchique pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé sur la base des normes *FEMA-154* (2002) et *FEMA-310* (1998). Le système inclut par exemple comme paramètres : type de bâtiment, irrégularité verticale et horizontale, année de construction, qualité de construction, bâtiments adjacents, étages souples, étages faibles, poteaux courts, etc. (voir Figure 2.18).

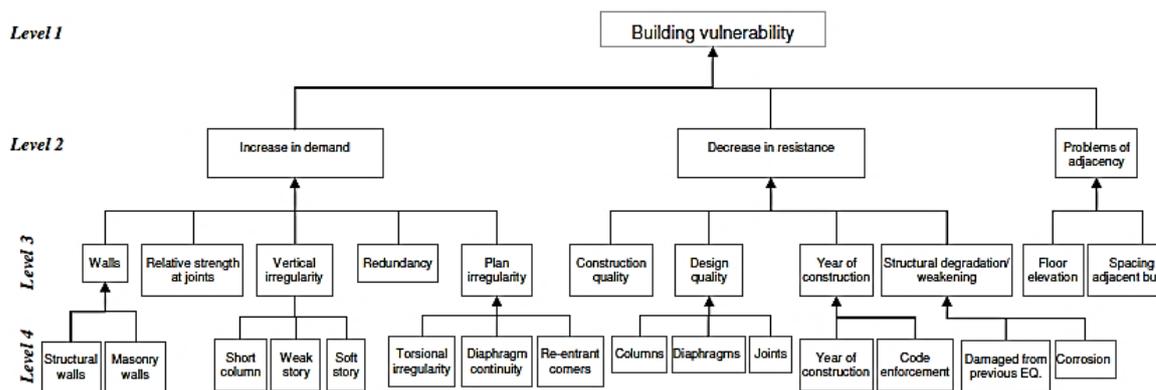


Figure 2.18 : Structure générale du modèle de Tesfamariam et al. (2010) [117]

Une structure hiérarchique a été utilisée pour réduire le nombre de règles floues. Chaque groupe d'entrées produit une sortie spécifique (indice) à utiliser dans la couche de niveau supérieur, jusqu'à ce que l'indice global soit obtenu. La procédure peut être résumée comme suit : La collection des paramètres d'entrée pour chaque groupe du système hiérarchique, la transformation de toutes les valeurs d'entrées en valeurs floues, l'obtention des indices pour chaque groupe par raisonnement flou et la répétition du processus tout en haut de la hiérarchie jusqu'au niveau final pour calculer l'indice de vulnérabilité du bâtiment. À chaque niveau de la hiérarchie, la sortie floue est convertie en une valeur nette par un processus de défuzzification où la méthode de la moyenne pondérée est utilisée.

Le modèle proposé est détaillé et contient plusieurs paramètres. La logique floue a été utilisée pour traduire les connaissances qualitatives en raisonnement numérique à l'aide des algorithmes approximatifs de raisonnement pour manipuler toutes imprécisions possibles. Une méthode heuristique a été utilisée pour déterminer les fonctions d'appartenance pour chaque variable. Cependant, l'approche est limitée aux bâtiments en béton armé seulement. La densité des paramètres conduit à un nombre important de règles floues qui peuvent rendre le développement et l'adaptation de la procédure aux autres contextes plus difficiles.

Demartinos et al. (2006) [119] ont développé un système flou hiérarchique pour l'évaluation des bâtiments avant les séismes par une procédure de vérification visuelle et rapide. Le modèle contient 13 variables d'entrée réparties en quatre groupes. Le premier groupe analyse les risques sismiques à travers l'évaluation du mouvement du sol, la qualité du sol, la hauteur du bâtiment. Le second groupe analyse la résistance structurale du bâtiment par l'évaluation de : hauteur du bâtiment (entrée commune avec le premier groupe), année de construction, étages souples, murs, poteaux courts, le troisième groupe analyse la

régularité du bâtiment. Le dernier groupe analyse l'état actuel du bâtiment à travers l'évaluation de la qualité de l'entretien et des dommages antérieurs (voir Figure 2.19).

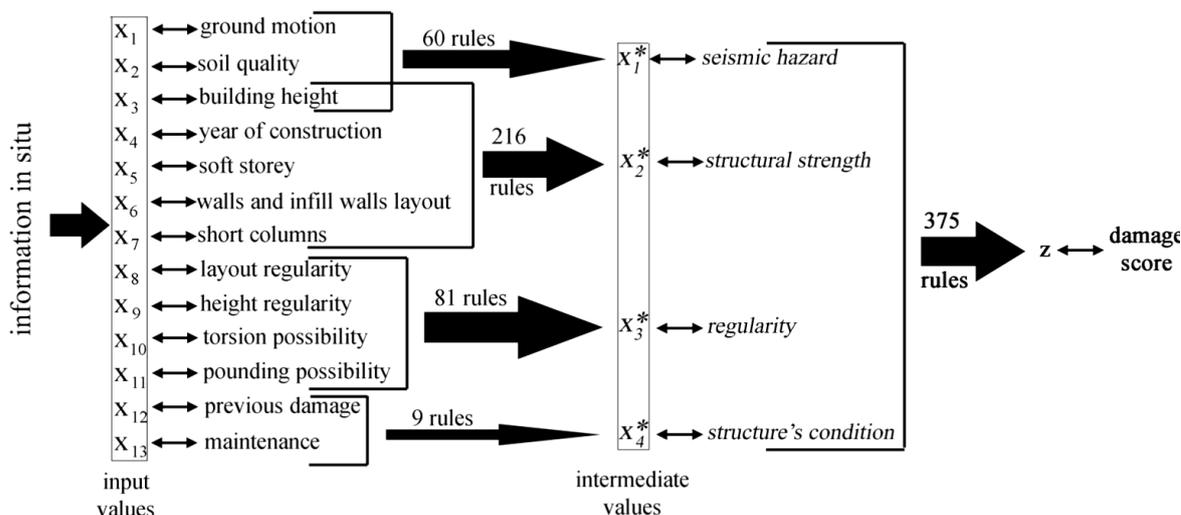


Figure 2.19 : Représentation du système de Demartinis et al. (2006) [119]

La méthode de la moyenne pondérée est utilisée au cours des processus de défuzzification pour obtenir un indice à chaque niveau du système hiérarchique. La sortie finale du système est un score de dommages qui représente la possibilité que la structure subisse un certain niveau de dommage. Cinq niveaux de dommage sont adoptés sous forme des ensembles flous : « *Très léger* », « *Léger* », « *Modéré* », « *Sévère* » et « *Effondrent* » associés aux niveaux de performance bien définis du bâtiment : « *Phase d'exploitation (OP)* », « *Occupation immédiate (IO)* », « *Contrôle des dommages (DC)* », « *Sécurité des personnes (LS)* » et « *Prévention des effondrements (CP)* » selon FEMA-356 (2000).

Un réseau de neurones a été utilisé pour calibrer la performance du modèle. Le calibrage consistant sur la modification des parties de règles floues (qui sont faites initialement selon l'opinion d'experts) et les paramètres des fonctions d'appartenance sur la base du calcul de taux d'erreur entre le score de dommage théorique et le score réel de dommage (vulnérabilité) dans la base de données. Toutefois, le nombre de bâtiments adoptés pour étalonner la méthodologie est faible (102 bâtiments) ce qui peut affecter la faisabilité des résultats. Le nombre final de règles est toujours élevé (375 règles floues) ce qui peut rendre difficile l'interprétation de la performance du cadre théorique du modèle. L'adaptation du réseau de neurones pour réaliser le processus d'optimisation est complexe et peut nécessiter certaines connaissances et compétences.

Zekai Şen (2010) [120] a développé un cadre de calcul basé sur la logique floue pour une évaluation visuelle et rapide du risque sismique pour les bâtiments existants en zones

potentiellement exposées aux séismes afin de déterminer la catégorie de risque sismique appropriée pour chaque bâtiment. L'approche développée propose cinq classes ou catégories représentant le risque sismique sous forme de termes linguistiques. Ces termes sont représentés par des ensembles flous : « *Sans risque* », « *Léger* », « *Modéré* », « *Important* » et « *Complet* ». Les paramètres inclus qui peuvent influencer l'ampleur du risque sismique sont : Nombre d'étages, Extension en porte-à-faux, Étage souple, Étage faible, Qualité visible du bâtiment, Effet de martèlement, Effet de pente et la vitesse maximale du sol. Ces paramètres sont considérés comme des entrées avec une seule variable de sortie « *Catégorie de risque sismique* » (voir Figure 2.20). Le modèle analyse les variables d'entrée et effectue une inférence floue afin de classer chaque bâtiment en diverses catégories de risques avec des pourcentages différents.

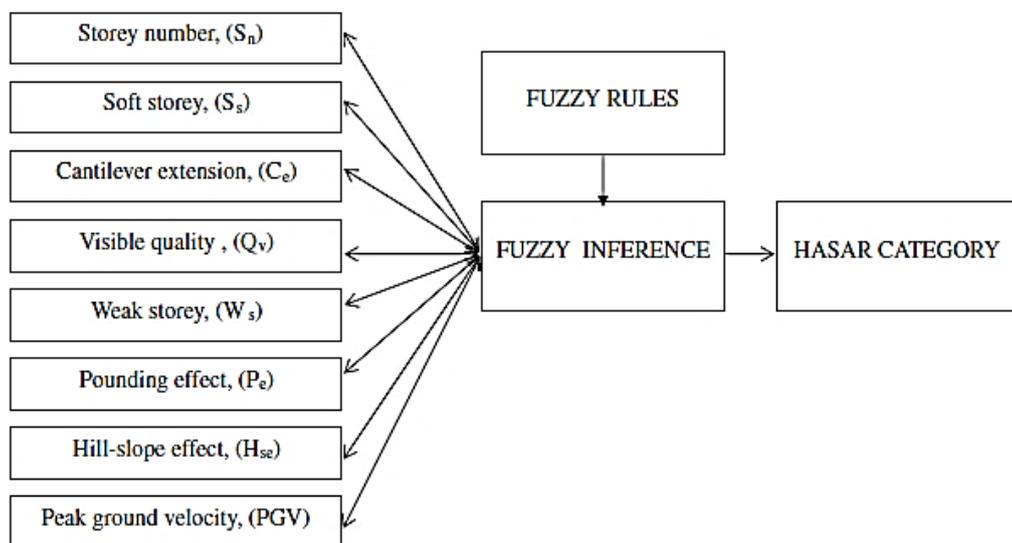


Figure 2.20 : Structure générale du modèle adopté par Zekai Şen (2010) [120]

Le modèle analyse les facteurs visuels au niveau des bâtiments qui sont pris en considération pendant toute évaluation du risque sismique. Certains des facteurs adoptés ont des valeurs numériques et d'autres ont des valeurs linguistiques. Chaque facteur est représenté par des fonctions d'appartenance (voir Figure 2.21) pour assurer des relations floues entre ses valeurs et leur influence sur la sortie (catégorie de risque sismique).

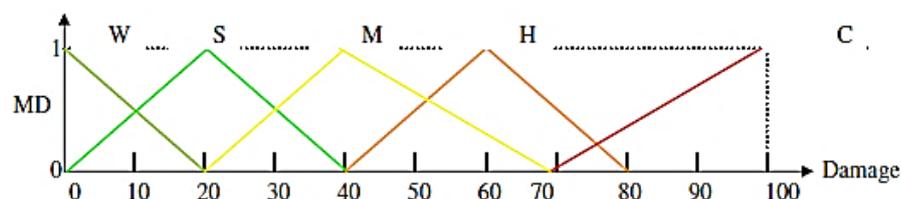


Figure 2.21 : Catégories de risque sismique adoptées [120]

Le modèle a été appliqué sur 1249 bâtiments en béton armé dans la ville d'Istanbul en Turquie. Les résultats montrent que la moitié des bâtiments se situent dans la catégorie « *Risque modéré* » et 29% du bâtiment sont condamnés à démolir. Le modèle présente un outil d'évaluation rapide pour évaluer rapidement les bâtiments, ce qui le rend un bon outil d'assistance. Toutefois, le modèle proposé comporte certaines limites et inconvénients, le modèle ne sert que comme un outil d'évaluation rapide dans lequel une liste complète de facteurs possibles n'est pas incluse pour effectuer des tâches d'évaluation plus détaillées. La décision finale concernant la catégorie de risque adoptée pour chaque bâtiment n'a pas été bien expliquée. Peut-être l'inconvénient principal du modèle est le fait qu'il est basé sur un système flou standard et non pas hiérarchique. Le système comprend 8 entrées avec une sortie ce qui nécessite un grand nombre de règles floues. L'auteur a étudié toutes les règles possibles (12288 règles floues) afin de réduire le nombre total à 1344 règles floues, cette tâche est longue et fastidieuse et non pratique. Ainsi, le calibrage du modèle pour servir dans un autre contexte n'a pas été pris en compte.

- ***Commentaire : Caractéristiques de la logique floue***

La logique floue a été utilisée dans le domaine de l'évaluation sismique en raison de ses nombreuses caractéristiques intéressantes. Ces caractéristiques conviennent mieux aux tâches d'évaluation étant donné qu'elles simulent le raisonnement humain où le facteur humain est principalement engagé dans l'exécution de ces tâches. Ces caractéristiques peuvent être mises en valeur comme suit :

- La logique floue est simple et facile à comprendre.
- Les systèmes flous peuvent être considérés comme des approximateurs universels. Ils peuvent modéliser uniformément n'importe quelle fonction non linéaire avec un certain niveau choisi de précision.
- La logique floue peut modéliser des problèmes complexes d'une façon simple et élégante.
- La logique floue est une généralisation de la logique classique, ce qui signifie que tous les systèmes basés sur la logique classique (conventionnelle) peuvent être modélisés par des systèmes flous.
- La logique floue assure une transition progressive et en douceur entre les catégories adoptées (e.g. : Niveaux de dommage, de vulnérabilité, de risque ...) ce qui rend la décision finale plus compréhensive.

- La logique floue manipule bien les informations imprécises, ambiguës, vagues et incertaines en utilisant le concept des ensembles flous.
- Les systèmes flous reposent moins sur des données empiriques par rapport aux systèmes conventionnels. Les systèmes flous peuvent être développés en utilisant des données partiellement complètes ou sans données historiques, mais en se basant sur l'opinion d'experts.
- La logique floue traite bien les termes qualitatifs en utilisant des variables linguistiques qui sont plus commodes au raisonnement humain.

## 2.6. Conclusion

Les tâches d'évaluations des dommages post-sismiques sont des tâches difficiles et délicates. Même si plusieurs pays ont élaboré plusieurs guides pour systématiser la procédure d'évaluation des dommages post-sismiques en cas des séismes destructeurs, multiples défis et problèmes surgissent pendant le déroulement de telles procédures. Ces défis sont principalement liés au facteur humain dans la procédure qui est représenté par les inspecteurs engagés. Par exemple le caractère urgent de la phase post-désastre peut affecter leur capacité d'évaluer la construction rigoureusement et rapidement. Également, le nombre requis des inspecteurs n'est pas toujours suffisant pour terminer la campagne post-séisme en temps utile, ce qui accroît la pression sur les inspecteurs déjà en place.

Même si les inspecteurs engagés sont qualifiés, les jugements des inspecteurs sont toujours sujets à des incertitudes dues aux plusieurs facteurs puisque l'estimation des dommages dépend principalement de l'expérience et le savoir-faire technique de l'inspecteur. Toutefois, le jugement des inspecteurs est toujours influencé par la subjectivité et le biais naturel de l'inspecteur lui-même. De telles caractéristiques ne peuvent pas être facilement prises en considération dans l'élaboration de telles procédures et donc c'est difficile de mettre au point des méthodologies assez fiables et scientifiquement validées capables d'éliminer l'incertitude soulevée par les inspecteurs.

Dans tels cas, des méthodologies d'aide à la décision peuvent présenter une assistance considérable lors les missions d'évaluation sismiques. Actuellement, multiples recherches ont été menées pour proposer des méthodologies et des outils d'aide à la décision basés sur des différentes théories. Ces outils permettent d'analyser les informations recueillies sur les dommages subis par les composants du bâtiment pour proposer des estimations plus précises du niveau d'endommagement global du bâtiment. Toutefois, motivé par les caractéristiques

de la procédure d'évaluation sismique et par le niveau élevé d'incertitude dans l'exécution de ces tâches, les systèmes flous ont prouvé leur efficacité à gérer les incertitudes et à fournir des résultats rigoureux. Ces systèmes fournissent une manière mathématique de représenter l'incertitude et l'imprécision dans les jugements des inspecteurs et de surmonter de telles incertitudes par des raisonnements approximatifs.

## CHAPITRE 3

### DÉVELOPPEMENT DU CADRE THÉORIQUE DE L'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES PAR LOGIQUE FLOUE

#### 3.1. Introduction

Les procédures d'évaluation des dommages post-sismiques consistent à l'évaluation des composants du bâtiment (entre autres paramètres connexes) afin d'obtenir une estimation globale du niveau du dommage, de la sécurité et de l'utilisabilité de l'ensemble du bâtiment. Ces procédures s'appuient sur le jugement technique des inspecteurs où le processus décisionnel de ces derniers base sur l'analyse des dommages observés au niveau des composants du bâtiment en tenant compte de l'intensité des dommages observés et de l'importance des composants eux-mêmes afin de proposer un jugement final. Pendant ces tâches et en considérant le fait que le temps disponible est toujours court pour effectuer des évaluations assez rigoureuses. La compréhension des relations entre les dommages locaux (dommages observés au niveau des composants du bâtiment) et le dommage global du bâtiment est importante et cruciale où des procédures fiables avec des critères clairs sont toujours requises pour exécuter de telles tâches.

Le but de ce chapitre est d'élaborer un cadre théorique d'évaluation des dommages subis par les constructions après les tremblements de terre en basant sur la théorie de la logique floue afin d'effectuer des évaluations objectives et précises du niveau de dommage global des constructions en fonction des dommages observés au niveau de leurs composants. La procédure d'évaluation est effectuée par le traitement automatique des informations rapportées par les inspecteurs (observation des dommages sur les composants) en tenant compte de l'importance des dommages observés et de l'importance de ces composants eux-mêmes. Des relations « *Damage local-Damage global* » sont modélisées sous forme de règles floues pondérées pour simplifier le développement de tels systèmes en évitant également la bien connue malédiction de la dimension « *Curse of dimensionality* ».

#### 3.2. Évaluation sismique des structures : Définitions

Les séismes causent des dommages importants aux éléments structurels et non structurels des bâtiments, ces dommages ont de grandes conséquences sur la sécurité et

l'utilisabilité des bâtiments et sur les coûts de réparation ou de reconstruction. Pour ce fait, l'évaluation des dommages sismiques devrait être effectuée sur la base des approches rigoureuses dont la précision et la rapidité sont deux objectifs principaux à atteindre.

L'objectif de la présente étude est de développer une méthodologie générale de traitement automatique des fiches d'évaluation sismiques avec une application à la procédure d'évaluation des dommages post-sismiques adoptée en Algérie [91] (voir section 2.3.1. ). Les fiches d'évaluation adoptées sont remplies après des inspections visuelles des bâtiments à la suite d'un séisme où ces fiches d'évaluation contiennent des sections pour systématiser la procédure d'évaluation. Chaque section contient des sous-composants sélectionnés à évaluer conjointement. La procédure adoptée en Algérie consiste que chaque sous-composant ne soit représenté que par le maximum dommage observé dans cette catégorie « *Cas le plus défavorable* » où ce dommage observé doit être classé sur une échelle allant de D1 « *Aucun dommage* » à D5 « *Effondrement* » (voir Tableau 2.2).

Puisque la méthodologie algérienne ne propose pas une échelle claire de dommage (comme l'échelle d'indice de dommage par exemple) et elle ne propose que 5 valeurs numériques représentant des catégories discrètes de dommage. La transformation de ces valeurs numériques en une échelle de dommages doit être faite de manière adéquate. Pour cela, chaque catégorie de dommages est transformée en un rang effectif sur une échelle où chaque valeur numérique représente le centre d'une catégorie de dommage (voir Figure 3.1).

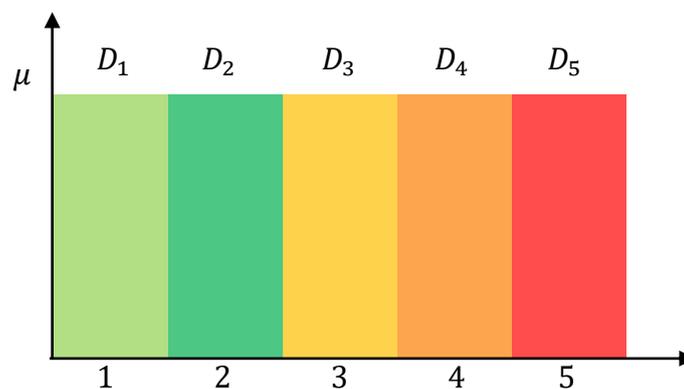


Figure 3.1 : Niveaux classiques de dommage

Après avoir rempli la fiche d'évaluation, l'inspecteur analyse toutes les informations assignées dans la fiche afin de proposer un niveau de dommage global du bâtiment (également sur une échelle de D1 à D5) tout en considérant l'importance de chaque composant endommagé. Le niveau de sécurité du bâtiment est déterminé en conséquence en

utilisant des couleurs appropriées. Le niveau de dommage général d'un bâtiment « *Damage global* » peut être représenté alors en tant que fonction des niveaux de dommage des composants « *Damage local* » :

$$D_G = D_G(d_1, \dots, d_k, \dots, d_{N_c}), k = 1, \dots, N_c \quad (3.1)$$

Avec  $D_G$  : Niveau de dommage global du bâtiment,  $d_k$  : Niveau de dommage local du composant  $k$ ,  $N_c$  : Nombre total des composants adoptés dans la procédure d'évaluation.

Toute modélisation d'une telle fonction devrait tenir compte que chaque composant endommagé devrait contribuer (théoriquement) au niveau de dommage global du bâtiment en fonction de leur niveau de dommage et en fonction de leur importance relative dans le bâtiment (composant structurel ou secondaire). Pour cela, la représentation de telles importances relatives de chaque composant endommagé devrait être effectuée de manière adéquate afin de donner la meilleure représentation possible de telles influences relatives de chaque composant endommagé dans la stabilité globale de la structure.

### 3.3. Systèmes flous pour l'évaluation sismique : Cadre théorique général

La logique floue a été introduite en 1965 par Zadeh [107] qui propose un raisonnement imprécis ou approximatif plutôt qu'un raisonnement exact en utilisant des valeurs et des termes linguistiques et des techniques d'inférence floue. Cette approche attribue des valeurs d'appartenance à ses variables (entrées) traduisant un certain degré de « *Croyance* » que la valeur d'une variable appartient à un terme linguistique correspondant.

Pour cela, la logique floue a été utilisée dans le domaine d'évaluation sismique afin de garantir un moyen naturel pour que les inspecteurs peuvent exprimer leur jugement à propos les dommages observés au niveau des composants. La logique floue permet d'utiliser des termes linguistiques et des degrés d'appartenance. Les inspecteurs peuvent exprimer l'intensité de chaque dommage observé par l'affectant à un niveau de dommage spécifique où le dommage observé peut appartenir de manière partielle ou complète à ce niveau de dommage. Après, les jugements des inspecteurs à propos les dommages observés au niveau des composants du bâtiment (niveaux de dommage local) seront traités à l'aide des techniques d'inférence floue pour conclure un jugement final qui représente le niveau de dommage global du bâtiment.

L'utilisation de la logique floue est utile pour résoudre des problèmes complexes où il n'y a pas des solutions mathématiques simples pour accommoder le problème comme le

processus décisionnel du niveau de dommage global. La nature imprécise et incertaine des tâches d'évaluation des dommages sismiques était la motivation pour mener cette recherche. Ce travail permet de développer des systèmes flous d'évaluation des dommages sismiques des constructions en tant que des systèmes experts pour effectuer de telles tâches d'évaluation avec le plus haut niveau d'objectivité, de précision et de rapidité [102]. La méthodologie proposée dans ce chapitre est basée sur la représentation la plus couramment utilisée des relations « *Entrées-Sorties* », le modèle de Mamdani et Assilian (1975) [114] (voir Appendice A).

### 3.3.1. Structure hiérarchique : Sélection des variables d'entrée et de sortie

La procédure d'évaluation des dommages est un problème complexe qui nécessite l'évaluation de plusieurs paramètres, ce problème peut être regroupé dans une structure hiérarchique gérable afin de décomposer la procédure pour plus de clarté et de simplicité. Dans cette recherche, les systèmes hiérarchiques sont plus convenables que les systèmes conventionnels pour développer la méthodologie de traitement automatique des fiches d'évaluation sismique. Les systèmes hiérarchiques ont l'avantage de subdiviser le problème en plusieurs contributeurs suivant un ordre logique afin de parvenir à une décision finale, une telle systématisation est similaire aux sections adoptées dans les fiches d'évaluation.

Également, et puisque les systèmes flous sont des systèmes fondés sur des règles. Le nombre des règles augmente exponentiellement avec le nombre de variables utilisées [121] afin de couvrir toutes les possibilités (combinaisons). Le nombre possible de règles  $N$  pour un système conventionnel de  $n$  variables d'entrée et de  $m$  fonctions d'appartenance pour chaque variable est défini par l'équation :

$$N = \prod_{j=1}^n m_j = m^n \quad (3.2)$$

Au fur et à mesure que  $n$  augmente, l'effort et le temps de développement requis pour la mise au point de tels systèmes augmentent, et l'exécution de tel système surchargera rapidement la mémoire et rendra le système difficile à implémenter. C'est ce qu'on appelle la malédiction de la dimension « *Curse of dimensionality* » des systèmes fondés sur des règles [122].

Les systèmes hiérarchiques sont adoptés dans cette recherche comme **première solution** pour éviter la malédiction de la dimension dans le cas des systèmes complexes. Une

structure hiérarchique décompose la méthodologie en sous-systèmes pour construire le système global [122-124] ou le nombre total de règles n'augmente que linéairement avec le nombre de variables d'entrée [121] (voir Figure 3.2).

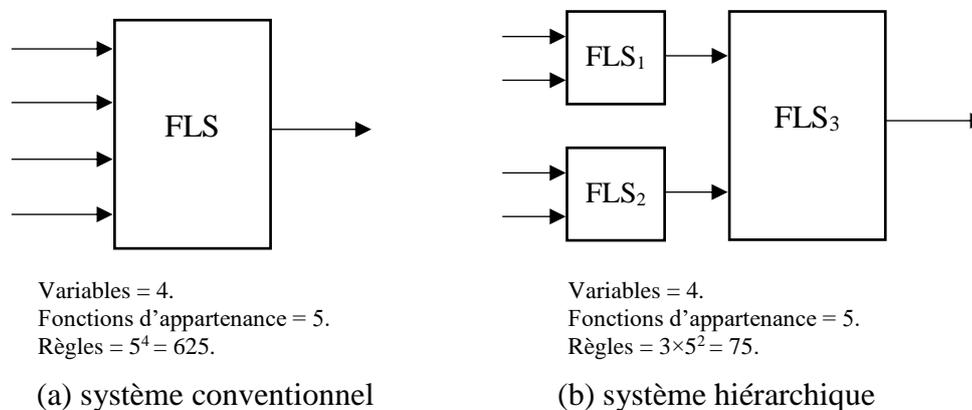


Figure 3.2 : Comparaison entre le système conventionnel et le système hiérarchique

Les paramètres gouvernant pour effectuer une procédure d'évaluation rigoureuse sont regroupés en sous-systèmes (groupes) selon leur nature (type) afin de systématiser la procédure en construisant une structure hiérarchique. Pour cela, et selon la fiche d'évaluation, les paramètres de chaque section sont regroupés dans des sous-systèmes distincts à évaluer conjointement afin de produire une sortie représentant ce groupe « solution partielle ». Ces sorties sont considérées comme des entrées au niveau suivant de la hiérarchie jusqu'au niveau final qui produit une sortie finale représentant le niveau de dommage global du bâtiment.

Après avoir analysé la procédure d'évaluation sismique adoptée en Algérie, les paramètres suivants peuvent être considérés comme des groupes potentiels à évaluer conjointement selon une échelle de dommage uniforme de D1 à D5 (voir Tableau 3.1) :

- Dommage maximal observé au niveau des éléments structurels :
  - ✓ Infrastructure *SC*.
  - ✓ Éléments porteurs *VC*.
  - ✓ Éléments de contreventement *LC*.
  - ✓ Toitures terrasses *FR*.
  - ✓ Toitures inclinées *SR*.
- Dommage maximal observé au niveau des éléments secondaires :
  - ✓ Escaliers *ST*.
  - ✓ Remplissages extérieurs *EW*.

- ✓ Éléments intérieurs *IC*.
- ✓ Éléments extérieurs *EC*.

Le reste des paramètres dans la fiche d'évaluation sont évalués qualitativement en utilisant des indications simples comme « Oui / Non » pour quantifier par exemple les problèmes géotechniques tels que la présence de la faille, liquéfaction, glissement ... ou les problèmes des fondations comme le tassement, basculement, etc. Ces paramètres ont été ignorés dans des recherches antérieures de traitement automatique des fiches d'évaluation [110, 111] en raison de la nature de l'indicateur associé « Oui / Non » qui ne permet pas de préciser l'intensité du problème observé (niveaux de dommage). Bien que ces paramètres soient importants et devraient être pris en compte dans toute recherche ultérieure, seuls les paramètres précédents sont adoptés actuellement pour présenter la méthodologie proposée.

Il convient de mentionner que seul le dommage maximal parmi les sous-paramètres de chaque paramètre est adopté (voir Figure 2.5). Cela peut être justifié comme suit :

- ✓ Après avoir évalué la base de données adoptée lors l'élaboration de la méthodologie proposée, il a été trouvé que généralement chaque paramètre adopté est représenté par une seule valeur dans leur groupe de sous-paramètres.
- ✓ Il est en effet possible de modéliser chaque paramètre avec son propre sous-système comme discuté ci-dessus. Mais cela ne fera qu'augmenter la complexité de la structure hiérarchique. Les sous-paramètres de chaque paramètre ont été modélisés en utilisant des sous-systèmes, mais les résultats ont montré que la performance finale n'a pas augmenté mais seulement la complexité. Ce qu'il est préférable de l'éviter en cas de problèmes complexes.
- ✓ La fiche d'évaluation a également fait l'objet d'autres recherches de traitement automatique [110, 111] où ils n'adoptent que les valeurs maximales de chaque paramètre pour les mêmes raisons.

Donc, le dommage global peut être défini selon l'équation (3.1) comme une fonction des paramètres de gouvernance considérés dans la structure hiérarchique comme suit :

$$D_G = D_G(\mathbb{1}_k, d_k), k = 1, \dots, N_c \quad (3.3)$$

Avec :

$$\mathbb{1}_k = \begin{cases} 1: \text{le } k - \text{ième composant est un paramètre gouvernant} \\ 0: \text{le } k - \text{ième composant n'est pas un paramètre gouvernant} \end{cases} \quad (3.4)$$

Les paramètres représentant les dommages observés au niveau des éléments structurels et secondaires qui sont supposés d'avoir une influence considérable sur le niveau de dommage global du bâtiment sont considérés dans cette recherche comme des entrées des sous-systèmes. Chaque groupe de paramètres produit un indice (sortie) représentant ce sous-système. Ces indices sont également considérés comme des entrées du sous-système final qui propose le niveau de dommage global du bâtiment.

Les groupes (sous-systèmes) adoptés pour construire la structure hiérarchique sont décrits comme suit (voir Tableau 3.1) :

Tableau 3.1 : Paramètres d'entrée/sortie et leurs catégories de dommage

Sous-système	Entrées	Composant $k$	Sortie	Échelle de dommage
Groupe 1	$d_{SC}$	Infrastructure	$D_S^*$	$d_k \in \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$ $D_S^* \in \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$
	$d_{VC}$	Éléments porteurs		
	$d_{LC}$	Éléments de contreventement		
	$d_{FR}$	Toitures terrasses		
	$d_{SR}$	Toitures inclinées		
Groupe 2	$d_{ST}$	Escaliers	$D_{nS}^*$	$d_k \in \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$ $D_{nS}^* \in \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$
	$d_{EW}$	Remplissages extérieurs		
	$d_{IC}$	Éléments intérieurs		
	$d_{EC}$	Éléments extérieurs		
Groupe 1-2	$D_S^*$	Éléments structurels	$D_G^*$	$D_G^* \in \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$
	$D_{nS}^*$	Éléments non structurels		

**Groupe 1 « Dommage structurel »** : Ce sous-système comprend  $N_S = 5$  composants nommés « Composants structurels » comme suit : Infrastructure **SC**, éléments porteurs **VC**, éléments de contreventement **LC**, toitures terrasses **FR** et toitures inclinées **SR**. Ce sous-système détermine un indice représentant le niveau de dommage des éléments structurels  $D_S^*$  :

$$D_S^* = D_S^*(d_k), k = 1, \dots, N_S \quad (3.5)$$

Ce qui devient :

$$D_S^* = D_S^*(d_{SC}, d_{VC}, d_{LC}, d_{FR}, d_{SR}) \quad (3.6)$$

**Groupe 2 « Dommage non-structurel »** : Ce sous-système comprend  $N_{nS} = 4$  composants nommés « *Composants secondaires* » comme suit : Escaliers **ST**, remplissages extérieurs **EW**, éléments intérieurs **IC** et éléments extérieurs **EC**. Ce sous-système détermine un indice représentant le niveau de dommage des éléments secondaires  $D_{nS}^*$  :

$$D_{nS}^* = D_{nS}^*(d_k), k = 1, \dots, N_{nS} \quad (3.7)$$

Ce qui devient :

$$D_{nS}^* = D_{nS}^*(d_{ST}, d_{EW}, d_{IC}, d_{EC}) \quad (3.8)$$

**Groupe 1-2 « Dommage global »** : Ce sous-système évalue les sorties des groupes précédents  $D_S^*$  et  $D_{nS}^*$  avec  $N_G = 2$  afin de proposer un indice représentant le niveau de dommage global  $D_G^*$  du bâtiment :

$$D_G^* = D_G^*(D_k), k = 1, \dots, N_G \quad (3.9)$$

Ce qui devient :

$$D_G^* = D_G^*(D_S^*, D_{nS}^*) \quad (3.10)$$

La structure hiérarchique finale adoptée est représentée alors dans la Figure 3.3. Notant que cette structure peut être conçue d'autres façons selon les exigences de la méthodologie d'évaluation adoptée ou selon les sorties souhaitées.

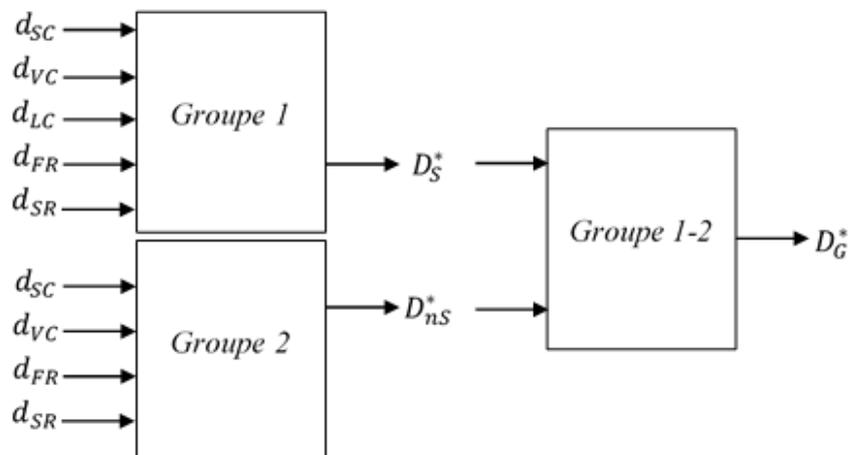


Figure 3.3 : Structure hiérarchique adoptée

### 3.3.2. Définition des termes linguistiques « Niveaux de dommage »

Les variables linguistiques sont des variables floues qui contiennent des valeurs linguistiques au lieu des valeurs numériques, elles sont utilisées pour décrire la nature représentative des fonctions d'appartenance adoptées [125]. La logique floue utilise des variables linguistiques telles que les mots en langage naturel plutôt que des variables numériques pour fournir une caractérisation approximative des concepts qui peuvent être trop complexes pour être définis à partir des termes numériques. La nature linguistique de ces variables est compatible avec le fait que la plupart des guides disponibles dans la littérature pour effectuer des procédures d'évaluation sismiques proposent des classifications des niveaux de dommage en utilisant des termes linguistiques pour décrire l'intensité de ces dommages. Une échelle de classification des dommages qui contient cinq termes  $N_D = 5$  est utilisée dans cette étude conformément à l'échelle adoptée dans la procédure algérienne :

« D1 : Pas de dommage ». « D2 : Dommage léger ». « D3 : Dommage modéré ». « D4 : Dommage important » et « D5 : Effondrement ».

La même échelle est utilisée pour évaluer les dommages observés dans les composants  $d_k$  « Niveau de dommage local » ainsi que pour proposer le niveau des dommages structuraux, le niveau des dommages non structuraux et le niveau de dommage global  $D^*$  « Niveau de dommage global » du bâtiment :

$$d_k \in \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\} \quad (3.11)$$

$$D^* \in \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\} \quad (3.12)$$

Puisque toutes les entrées dans les sous-systèmes proposés présentent des niveaux de dommage, deux variables linguistiques **similaires** sont adoptées dans cette étude qui sont les niveaux de dommage local et global (voir équations (3.11) et (3.12)). Les niveaux de dommage dans ces variables linguistiques sont considérés comme des « termes linguistiques », ces variables sont définies alors par des triplets  $(V, T_V, X)$  comme suit :

- 1<sup>er</sup> Variable linguistique « Dommage local » :
  - ✓  $V_1$  = Variable linguistique représentant les niveaux de dommage local  $d_k$
  - ✓  $T_{V_1}$  = Termes linguistiques associés :  $\{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$
  - ✓  $X_1$  = Univers du discours associé :  $[1, \dots, 5]$ .

- 2<sup>ème</sup> Variable linguistique « Dommage global » :
  - ✓  $V_2$  = Variable linguistique représentant les niveaux de dommage cible  $D^*$
  - ✓  $T_{V_2}$  = Termes linguistiques associés :  $\{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$
  - ✓  $X_2$  = Univers du discours associé :  $[1, \dots, 5]$ .

### 3.3.3. Développement des ensembles flous des termes linguistiques

Le raisonnement des inspecteurs pendant les procédures d'évaluation sismique est plus ou moins imprécis. En réalité, les informations obtenues uniquement par l'inspection visuelle des évidences de dommage sont généralement imprécises, incomplètes et incertaines. Alors il n'est pas toujours clair « Certain » si un dommage observé appartient à un niveau de dommage particulier ou pas. Cette incertitude est interprétée par la théorie des ensembles flous d'une façon approximative où chaque dommage observé peut appartenir à plusieurs niveaux de dommage dans lesquels chaque niveau a un degré de certitude que le dommage observé lui appartient. Alors et afin de répondre à cette perspective du raisonnement approximatif, il faut donc adopter des niveaux *flous* de dommage (voir Figure 3.4) au lieu des niveaux *classiques* (voir Figure 3.1). Les fonctions d'appartenance représentant les catégories de dommages atteignent leur point d'appartenance maximal dans chaque valeur numérique qui représente le centre d'une catégorie de dommage.

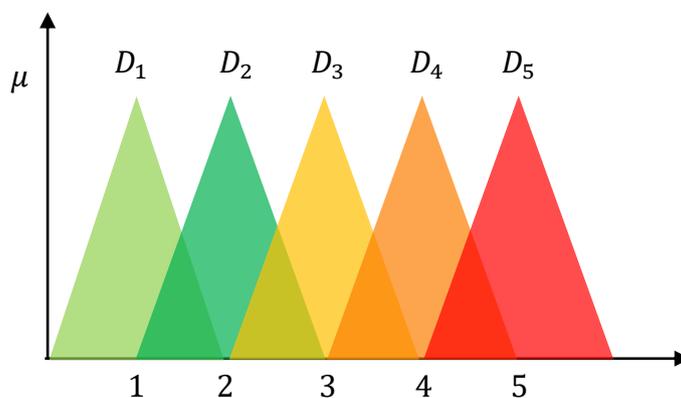


Figure 3.4 : Niveaux flous de dommage

Un ensemble flou  $A_k$  représentant un niveau de dommage quelconque  $d_k$  est défini par des limites floues. Il fournit différents degrés d'appartenance aux valeurs d'entrée (dommages observés) dans un intervalle de  $[0, 1]$  où : 0 se réfère que le dommage observé n'appartient pas à l'ensemble et 1 que le dommage observé appartient complètement à l'ensemble [107]. L'appartenance du dommage observé est caractérisée par la fonction

d'appartenance de l'ensemble flou  $\mu$  ce qui garantit une transition de manière graduelle et en douceur de l'état « *Appartient* » à l'état « *N'appartient pas* » (voir Appendice A) [102] :

$$\begin{aligned} A_k &= \{d_k, \mu(d_k)\} \\ \mu(d_k) &\in [0, 1] \end{aligned} \quad (3.13)$$

$\mu$  : fonction d'appartenance (fonction caractéristique généralisée). Avec la théorie des ensembles flous, nous distinguons trois cas possibles d'appartenance d'un dommage observé au niveau de dommage  $d_k$  [102] :

$$\begin{cases} \mu(d_k) = 0 \\ 0 < \mu(d_k) < 1 \\ \mu(d_k) = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

$\mu(d_k) = 0$  et  $\mu(d_k) = 1$  signifient que tout dommage observé appartient et n'appartient pas au niveau de dommage  $d_k$  représenté par l'ensemble flou  $A_k$  respectivement. Ce sont les seuls cas possibles en utilisant la théorie des ensembles classiques.  $0 < \mu(d_k) < 1$  signifie une appartenance partielle de l'élément  $d_k$  à l'ensemble flou  $A_k$  ce qui est plus similaire au raisonnement humain. Pour cela, chaque variable linguistique qui représente un niveau de dommage dans les échelles de dommage adoptées est représentée par un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance comme il est présenté dans la section suivante.

### 3.3.3.1. Construction des fonctions d'appartenance des variables

Chaque ensemble flou représentant un niveau de dommage (voir équations (3.11) et (3.12)) est complètement caractérisé par sa fonction d'appartenance  $\mu$ . Le choix de la forme de fonction dépend du problème à résoudre où deux approches sont généralement utilisées pour développer les fonctions d'appartenance [126] : Opinions d'experts ou données collectées. Il existe plusieurs formes de fonctions d'appartenance telles que : Triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, etc. La forme triangulaire qui est la plus fréquemment utilisée [114, 127] est adoptée dans cette recherche comme forme des fonctions d'appartenance (voir Figure 3.5 et Appendice A).

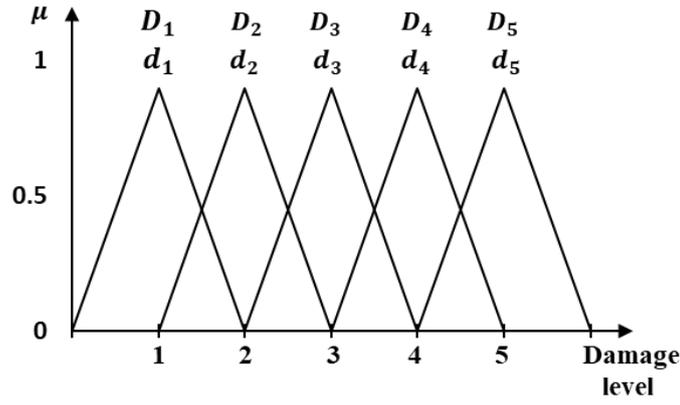


Figure 3.5 : Représentation des niveaux de dommage local & global

Par exemple, une fonction d'appartenance triangulaire  $\mu_{d_k}(d_0)$  qui représente un niveau de dommage local quelconque  $d_k$  est caractérisée par l'équation suivante où  $a$ ,  $b$  et  $c$  représentent les valeurs aux : La limite inférieure, le sommet et la limite supérieure respectivement :

$$\mu_{d_k}(d_0) = \begin{cases} 0 & d_0 \leq a \\ \frac{d_0 - a}{b - a} & a \leq d_0 \leq b \\ \frac{c - d_0}{c - b} & b \leq d_0 \leq c \\ 0 & c \leq d_0 \end{cases} = \max(\min\left(\frac{d_0 - a}{b - a}, \frac{c - d_0}{c - b}\right), 0) \quad (3.15)$$

Ou, plus compact :

$$\mu_{d_k}(d_0|a, b, c) \quad (3.16)$$

Avec  $d_0$  : valeur d'entrée représentant le dommage observé par l'inspecteur.

En conséquence, les ensembles flous adoptés dans cette étude représentant les niveaux de dommage  $d_k$  et  $D_k$  peuvent être représentés mathématiquement comme suit :

$$\begin{aligned} \mu_{d_1} &= \mu_{D_1} = (d_0|0,1,2) \\ \mu_{d_2} &= \mu_{D_2} = (d_0|1,2,3) \\ \mu_{d_3} &= \mu_{D_3} = (d_0|2,3,4) \\ \mu_{d_4} &= \mu_{D_4} = (d_0|3,4,5) \\ \mu_{d_5} &= \mu_{D_5} = (d_0|4,5,6) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Les degrés d'appartenance de chaque dommage observé  $\mu_{d_k}(d_0)$  aux niveaux de dommage adoptés  $d_k$  sont affectés par le système flou pendant les tâches d'évaluation en fonction des entrées de l'inspecteur. C'est un fait que parfois les inspecteurs hésitent, un niveau de dommage est trop bas pour représenter le dommage observé et le niveau de

dommage suivant est trop élevé. Alors au lieu d'être forcés de choisir un seul niveau de dommage, la logique floue permet aux inspecteurs de classer les dommages observés dans les limites chevauchées « *Overlapped* » des niveaux de dommage (voir Figure 3.5). Pour cela, chaque dommage observé peut être représenté par plus qu'un niveau de dommage, dans lequel chaque niveau de dommage est associé avec sa valeur d'appartenance. La détermination des valeurs d'appartenance est effectuée au cours du processus de *Fuzzification* (voir section 3.4.1. ). Pour tous les paramètres adoptés dans les sous-systèmes de la hiérarchie, les mêmes fonctions d'appartenance représentées en Figure 3.5 sont adoptées pour chaque paramètre, que ce soit pour les entrées ou pour les sorties.

### 3.3.3.2. Chevauchement entre les niveaux de dommage

Le chevauchement « *Overlapping* » entre les niveaux de dommage représentés par ses fonctions d'appartenance est important en logique floue car il traduit le concept de « *Imprécision* » et représente le croisement entre les significations des termes linguistiques représentant les niveaux de dommage. Plus il y a de chevauchement entre les termes adjacents, plus il existe d'incertitude possible entre les termes. Différents degrés de chevauchement entre les fonctions d'appartenance peuvent être considérés afin de représenter l'ambiguïté et l'incertitude possible dans le jugement des inspecteurs pendant leur évaluation sismique. De telles régions de chevauchement permettent d'évaluer les valeurs des entrées avec plus qu'un terme linguistique (Niveau de dommage). Tout en prenant en considération les valeurs d'appartenance convenable où des fonctions d'appartenance sans chevauchement réduisent le système à la logique booléenne ordinaire.

Cependant, le degré de chevauchement varie en fonction du domaine d'application, Shepard (2006) a indiqué que le chevauchement entre les fonctions d'appartenance voisines est généralement de 50% de leurs bases ou dans une marge de 35-65% selon le domaine d'application [128]. Les régions qui se chevauchent peuvent être considérées comme des régions de « *Manque de connaissance* » dans la décision de l'inspecteur [129], le rapport du chevauchement entre les niveaux de dommage égal à 50% dans cette étude (voir Figure 3.5).

Les régions qui ne contiennent pas de chevauchement peuvent être considérées comme des régions de *certitude* où l'inspecteur est sûr que la valeur d'entrée (niveau du dommage observé) appartient à un seul niveau de dommage. Cependant, dans la zone de chevauchement entre les niveaux de dommage, l'interprétation du niveau de dommage observé n'est pas certaine et plus qu'un niveau de dommage (ensemble flou) peut être

considéré comme un choix valide. Ce qui la rend une région *d'incertitude* où le point d'intersection des deux fonctions d'appartenance est considéré comme un point d'un manque maximum de connaissance ou de certitude dans le jugement de l'inspecteur concernant le niveau approprié du dommage observé.

### 3.3.4. Conception de la base de règles floues

Dans tout système flou, la base des règles est la base qui contient une collection des règles floues sous forme des règles conditionnelles « *IF-THEN* ». Cette base est une composante très importante pour représenter les connaissances stockées dans le système, cette base est généralement construite à partir des connaissances des experts ou à partir des bases de données liées au problème à modéliser [130]. Le développement d'une base de règles est important puisque sa qualité affecte directement la performance du système [131]. Cependant, le nombre de règles est également un facteur important puisqu'il affecte l'efficacité de calcul et la flexibilité du système, les systèmes comportant un grand nombre de règles sont moins flexibles et beaucoup plus difficiles à adapter et à actualiser.

#### 3.3.4.1. Règles floues

Les règles floues sont des règles conditionnelles utilisées pour représenter la connaissance humaine de manière naturelle, les règles floues prennent une forme simple [132] comme suit :

$$IF \ x \text{ is } A \ THEN \ y \text{ is } B \quad (3.18)$$

Où **A** et **B** sont des ensembles flous correspondent aux termes linguistiques. Les règles floues sont caractérisées par deux parties, la partie antécédente ou *condition*, exprimée par « *x is A* » et la partie conséquente ou *conclusion* exprimée par « *y is B* ». Le concept des règles floues est plus que les propositions de la partie antécédente sont satisfaites, plus que l'action demandée de la partie conséquente doit être respectée avec le même degré de validité des propositions.

Dans les systèmes flous conventionnels, la base de règles contient généralement des règles floues sous la forme des règles avec multiples antécédents en utilisant les opérateurs logiques « *AND, OR* » pour établir des relations entre les attributs de l'antécédent afin de couvrir toutes les possibilités (combinaisons) :

$$IF \ x_1 \text{ is } A_1 \ AND \ \dots \ AND \ x_n \text{ is } A_n \ THEN \ y \text{ is } B \quad (3.19)$$

Cependant, en utilisant cette forme de règles dans des systèmes complexes, le nombre de règles augmente exponentiellement en fonction du nombre de variables et termes linguistiques adoptés (voir équation (3.2)) ce qui provoque la fameuse malédiction de la dimension [122].

### 3.3.4.2. Relations « *Dommage local-Dommage global* »

Comme **deuxième solution** au problème de malédiction de la dimension. Des règles floues pondérées à un seul antécédent [133] sont utilisées dans cette recherche. Une nouvelle application de ce type des règles est proposée pour exprimer des « **Relations pondérées** » entre les niveaux de dommage local  $\mathbf{d}_k$  des composants  $\mathbf{k}$  (valeurs des entrées) et le niveau de dommage cible (global)  $\mathbf{D}^*$  (valeurs des sorties). Pour chaque composant  $\mathbf{k}$ , La forme générale des règles floues pondérées est comme suit [102] :

$$R_j: IF \mathbf{d}_k \text{ is } \mathbf{d}_j \text{ THEN } \mathbf{D}^* \text{ is } \mathbf{D}_j \text{ with } \omega_k, \quad j = 1 .. N_D \quad (3.20)$$

Avec :

$$\omega_k \in [0, 1] \quad (3.21)$$

$R_j$  : Règle floue exprimant l'influence pondérée du composant prenant le niveau de dommage  $\mathbf{d}_k$  au niveau de dommage cible. Les règles pondérées représentent des relations « *Dommage local-Dommage global* » entre le niveau de dommage du composant et le niveau de dommage cible à adopter.  $\mathbf{d}_j$  : Niveau d'endommagement proposé ou observé du composant  $\mathbf{k}$  lors de l'inspection visuelle effectuée par l'inspecteur, il prend l'un des niveaux de dommage proposés dans la méthodologie d'évaluation (voir équations (3.11)).  $\mathbf{D}_j$  : Niveau de dommage à affecter au niveau de dommage cible  $\mathbf{D}^*$ ,  $\mathbf{D}_j$  prends le même niveau de dommage comme le dommage observé  $\mathbf{d}_j$  (voir équations (3.12)).  $\omega_k$  : Poids associé à la règle, il exprime la pondération de l'influence du niveau de dommage observé  $\mathbf{d}_j$  du composant  $\mathbf{k}$  sur le niveau de dommage cible  $\mathbf{D}^*$ . Les valeurs de  $\omega_k$  peuvent être calibrées lors d'un processus d'optimisation à l'aide des données numériques ou en exploitant les opinions des experts.

- La base de règles floues du 1<sup>er</sup> sous-système « *Groupe 1 : Dommage structurel* » est constituée des règles floues pondérées qui expriment des relations pondérées entre les dommages observés au niveau des *Composants structurels* et leurs influences potentielles

sur le niveau du *Damage structurel*  $D_S^*$ . Chaque composant selon leur importance relative dans la structure et selon leur degré d'endommagement (voir Tableau 3.2). Le nombre total des règles du 1<sup>er</sup> sous-système « *Groupe 1 : Damage structurel* » est :

$$N_{Group\ 1} = N_S \times N_D = 5 \times 5 = 25 \text{ règles} \quad (3.22)$$

Tableau 3.2 : Base de règles de « *Groupe 1 : Damage structurel* »

Composants structurels	Règles floues pondérées
<p style="text-align: center;">Infrastructure <b>SC</b></p>	$R_1: IF d_{SC} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_1 \text{ with } \omega_1$ $R_2: IF d_{SC} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_2 \text{ with } \omega_2$ $R_3: IF d_{SC} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_3 \text{ with } \omega_3$ $R_4: IF d_{SC} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_4 \text{ with } \omega_4$ $R_5: IF d_{SC} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_5 \text{ with } \omega_5$
<p style="text-align: center;">Éléments porteurs <b>VC</b></p>	$R_6: IF d_{VC} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_1 \text{ with } \omega_6$ $R_7: IF d_{VC} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_2 \text{ with } \omega_7$ $R_8: IF d_{VC} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_3 \text{ with } \omega_8$ $R_9: IF d_{VC} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_4 \text{ with } \omega_9$ $R_{10}: IF d_{VC} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_5 \text{ with } \omega_{10}$
<p style="text-align: center;">Éléments de contreventement <b>LC</b></p>	$R_{11}: IF d_{LC} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_1 \text{ with } \omega_{11}$ $R_{12}: IF d_{LC} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_2 \text{ with } \omega_{12}$ $R_{13}: IF d_{LC} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_3 \text{ with } \omega_{13}$ $R_{14}: IF d_{LC} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_4 \text{ with } \omega_{14}$ $R_{15}: IF d_{LC} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_5 \text{ with } \omega_{15}$
<p style="text-align: center;">Toitures terrasses <b>FR</b></p>	$R_{16}: IF d_{FR} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_1 \text{ with } \omega_{16}$ $R_{17}: IF d_{FR} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_2 \text{ with } \omega_{17}$ $R_{18}: IF d_{FR} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_3 \text{ with } \omega_{18}$ $R_{19}: IF d_{FR} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_4 \text{ with } \omega_{19}$ $R_{20}: IF d_{FR} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_5 \text{ with } \omega_{20}$
<p style="text-align: center;">Toitures inclinées <b>SR</b></p>	$R_{21}: IF d_{SR} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_1 \text{ with } \omega_{21}$ $R_{22}: IF d_{SR} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_2 \text{ with } \omega_{22}$ $R_{23}: IF d_{SR} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_3 \text{ with } \omega_{23}$ $R_{24}: IF d_{SR} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_4 \text{ with } \omega_{24}$ $R_{25}: IF d_{SR} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_S^* \text{ is } D_5 \text{ with } \omega_{25}$

- La base de règles floues du 2<sup>ème</sup> sous-système « *Groupe 2 : Damage non-structurel* » est constituée des règles floues pondérées qui expriment des relations pondérées entre les dommages observés au niveau des *Composants non-structurels* et leurs influences potentielles sur le niveau du *Damage non-structurel*  $D_{ns}^*$ . Également, chaque composant

selon leur importance relative dans la structure et selon leur degré d'endommagement (voir Tableau 3.3). Le nombre total des règles du 2<sup>ème</sup> sous-système « *Groupe 2 : Dommages non-structurel* » est :

$$N_{Group\ 2} = N_{nS} \times N_D = 4 \times 5 = 20 \text{ règles} \quad (3.23)$$

Tableau 3.3 : Base de règles de « *Groupe 2 : Dommage non-structurel* »

Composants non-structurels	Règles floues pondérées
<i>Escaliers</i> <b>ST</b>	$R_1: IF \mathbf{d}_{ST} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \omega_1$ $R_2: IF \mathbf{d}_{ST} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \omega_2$ $R_3: IF \mathbf{d}_{ST} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \omega_3$ $R_4: IF \mathbf{d}_{ST} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \omega_4$ $R_5: IF \mathbf{d}_{ST} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \omega_5$
<i>Remplissages extérieurs</i> <b>EW</b>	$R_6: IF \mathbf{d}_{EW} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \omega_6$ $R_7: IF \mathbf{d}_{EW} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \omega_7$ $R_8: IF \mathbf{d}_{EW} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \omega_8$ $R_9: IF \mathbf{d}_{EW} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \omega_9$ $R_{10}: IF \mathbf{d}_{EW} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \omega_{10}$
<i>Éléments intérieurs</i> <b>IC</b>	$R_{11}: IF \mathbf{d}_{IC} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \omega_{11}$ $R_{12}: IF \mathbf{d}_{IC} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \omega_{12}$ $R_{13}: IF \mathbf{d}_{IC} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \omega_{13}$ $R_{14}: IF \mathbf{d}_{IC} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \omega_{14}$ $R_{15}: IF \mathbf{d}_{IC} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \omega_{15}$
<i>Éléments extérieurs</i> <b>EC</b>	$R_{16}: IF \mathbf{d}_{EC} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \omega_{16}$ $R_{17}: IF \mathbf{d}_{EC} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \omega_{17}$ $R_{18}: IF \mathbf{d}_{EC} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \omega_{18}$ $R_{19}: IF \mathbf{d}_{EC} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \omega_{19}$ $R_{20}: IF \mathbf{d}_{EC} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_{nS}^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \omega_{20}$

- La base de règles floues du 3<sup>ème</sup> sous-système « *Groupe 1-2 : Dommage global* » est constituée des règles floues pondérées qui expriment des relations pondérées entre les niveaux proposés du *Dommage structurel*  $\mathbf{D}_S^*$  et les niveaux proposés du *Dommage non-structurel*  $\mathbf{D}_{nS}^*$  et leurs influences potentielles sur le niveau de *Dommage global*  $\mathbf{D}_G^*$ . Chaque niveau de dommage selon leur importance relative et selon leur valeur (voir Tableau 3.4). Le nombre total des règles du 3<sup>ème</sup> sous-système « *Groupe 1-2 : Dommage global* » :

$$N_{Group\ 1-2} = N_G \times N_D = 2 \times 5 = 10 \text{ règles} \quad (3.24)$$

Tableau 3.4 : Base de règles de « Groupe 1-2 : Dommage global »

Composants	Règles floues pondérées
<i>Dommage structurel</i> $D_S^*$	$R_1: IF D_S^* is D_1 THAN D_G^* is D_1 with \omega_1$ $R_2: IF D_S^* is D_2 THAN D_G^* is D_2 with \omega_2$ $R_3: IF D_S^* is D_3 THAN D_G^* is D_3 with \omega_3$ $R_4: IF D_S^* is D_4 THAN D_G^* is D_4 with \omega_4$ $R_5: IF D_S^* is D_5 THAN D_G^* is D_5 with \omega_5$
<i>Dommage non-structurel</i> $D_{nS}^*$	$R_6: IF D_{nS}^* is D_1 THAN D_G^* is D_1 with \omega_6$ $R_7: IF D_{nS}^* is D_2 THAN D_G^* is D_2 with \omega_7$ $R_8: IF D_{nS}^* is D_3 THAN D_G^* is D_3 with \omega_8$ $R_9: IF D_{nS}^* is D_4 THAN D_G^* is D_4 with \omega_9$ $R_{10}: IF D_{nS}^* is D_5 THAN D_G^* is D_5 with \omega_{10}$

La solution adoptée pour générer des règles floues en utilisant des règles floues pondérées à un seul antécédent au lieu des combinaisons réduit le nombre total de règles floues d'être en augmentation linéaire  $N = N_c \times N_D$  et non pas exponentielle. Le nombre total dans ce modèle égal à **55** règles en utilisant des règles floues pondérées. Si l'approche proposée a été élaborée en utilisant des systèmes conventionnels, le modèle nécessiterait normalement **3,775** ( $= 5^5 + 5^4 + 5^2$ ) règles floues afin de couvrir toutes les combinaisons au lieu de **55** règles proposées dans le présent modèle, ce qui ne représente que **1,46%** du nombre précédent de règles.

### 3.3.4.3. Calibration des poids des règles

Comme il a été discuté ci-dessus, les règles floues pondérées représentent des relations pondérées entre les dommages locaux  $d_k$  au niveau des composants (valeurs des entrées) et le dommage cible  $D^*$ . Afin de calibrer ces relations pondérées, les poids associés aux règles doivent être calibrés de manière adéquate afin de bien représenter l'influence du dommage local sur le dommage cible.

Les opinions des experts peuvent être adoptées comme approche pour calibrer ces poids puisqu'il est plus facile de calibrer les poids qui sont des nombres réels uniques au lieu d'examiner et de sélectionner des règles significatives si les règles conventionnelles sont utilisées. Cependant, une base de données recueillie lors le séisme de Boumerdès 2003 est adoptée dans cette étude afin de calibrer les poids par un processus d'optimisation heuristique [134].

### 3.4. Systèmes flous pour l'évaluation sismique : Développements théoriques

#### 3.4.1. Fuzzification (Calcul des degrés d'appartenance des dommages observés)

La *Fuzzification* est le processus de transformation des valeurs nettes (numérique) des entrées (dommages observés) vers leurs versions floues et de trouver leurs degrés d'appartenance aux termes linguistiques adoptés (niveaux de dommage). Le système analyse chaque valeur d'entrée affectée par l'inspecteur qui représente leur jugement concernant le dommage observé au niveau du composant en question avec les variables linguistiques associées (niveaux de dommage). Il détermine alors le degré d'appartenance de valeur d'entrée à chaque terme linguistique par le moyen des fonctions d'appartenance associées où chaque valeur d'entrée sera attribuée avec une valeur d'appartenance de 0 à 1 pour chaque ensemble flou qui représente à quel point elle s'intègre (voir Figure 3.6) :

$$\mu_{d_k}(d_0) = \text{fuzzifier}(d_0) \quad (3.25)$$

Avec  $\mu_{d_k}$  : fonction d'appartenance associée à l'ensemble flou représentant le niveau de dommage  $d_k$ ,  $d_0$  : valeur d'entrée représentant le dommage observé et *fuzzifier* : opérateur de fuzzification.

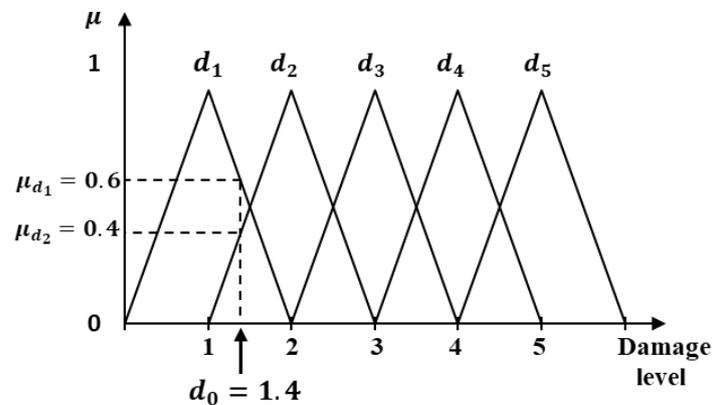


Figure 3.6 : Fuzzification

#### 3.4.2. Mécanisme d'inférence (Raisonnement flou)

Le raisonnement flou (raisonnement approximatif) se réfère généralement à une procédure d'inférence dans laquelle les informations d'entrée sont évaluées à travers les règles floues pour conclure une valeur de sortie. Le raisonnement flou fournit des sorties même s'il n'y a pas de correspondance *exacte* entre les valeurs des entrées « *Dommage observé* » et les antécédents des règles floues « *Niveau de dommage local* » où les

conséquents des règles floues « *Niveau de dommage global* » seront adoptés en fonction de ce niveau de correspondance [135] (voir Appendice A).

Ce type de raisonnement peut être utilisé efficacement dans l'évaluation des niveaux des dommages observés puisque pas tout dommage observé correspond *exactement* (appartenance complète  $\mu = 1$ ) à un niveau de dommage particulier. Mais il peut le correspondre d'une façon approximative (appartenance partielle  $0 < \mu < 1$ ). L'inférence floue est un moyen mathématique d'imiter le raisonnement de l'inspecteur. Autrement dit, si le composant évalué souffre d'un dommage  $d_k$ , le dommage global devrait souffrir du même niveau de dommage  $D_k$ . Si plusieurs composants souffrent de différents niveaux de dommage  $d_k$ , le dommage global devrait souffrir du niveau de dommage global  $D_k$  qui représente tous les niveaux de dommage observés, chacun selon sa valeur et son importance relative dans le bâtiment.

Le mécanisme d'inférence se réfère essentiellement au processus de transformation des valeurs d'entrée vers une valeur de sortie via l'application d'une séquence des opérations. Le mécanisme d'inférence se compose de deux processus principaux : l'Implication et l'Agrégation.

Il est nécessaire de déterminer quelles règles  $R_i$  dans la base de règles devraient être activées après avoir obtenu les valeurs floues des entrées  $\mu_{d_k}(d_0)$ . L'implication consiste à l'évaluation de ces valeurs floues dans la base des règles afin de déterminer le degré de *compatibilité* de l'antécédent «  $d_0$  is  $d_k$  » de chaque règle avec les valeurs floues d'entrées et d'appliquer ces degrés de *compatibilité* à la fonction d'appartenance représentant l'ensemble flou du conséquent «  $D^*$  is  $D_k$  ». Chaque règle est *activée* tant qu'il y a un degré de *compatibilité non nul* entre la valeur floue d'entrée et l'antécédent de cette règle. La sortie du processus d'implication est un ensemble flou  $D'_k$  qui représente le niveau de dommage cible à adopter qui est approximatif à  $D_k$ . Le niveau d'approximation est représenté par le degré d'appartenance du dommage observé au niveau de dommage de l'antécédent de la règle. Plus le dommage observé appartient au niveau de dommage de l'antécédent, plus le niveau de dommage cible à adopter appartient au niveau de dommage du conséquent de la règle (voir Figure 3.7).

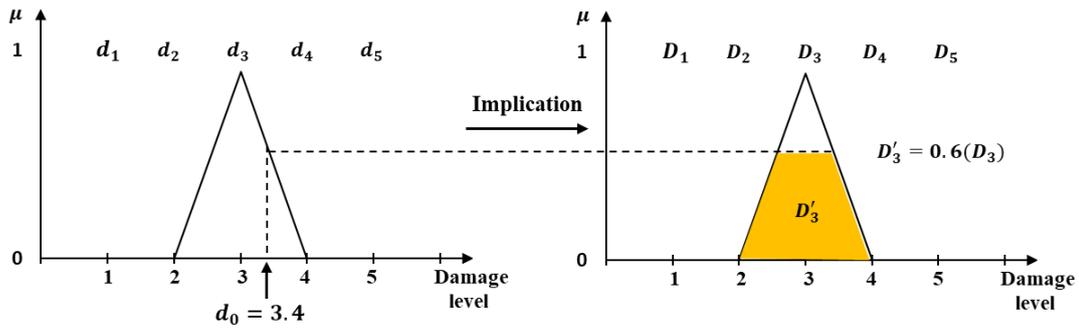


Figure 3.7 : Exemple d'Implication

Après avoir déterminé les règles à activer, les conséquents de ces règles doivent être adoptés en tant que niveau de dommage cible  $D^*$ . Chacun selon la puissance d'activation (degré de compatibilité) de la règle et le poids associé de la règle. La fonction d'implication floue  $f(R_i)$  est écrite comme :

$$f(R_i) = d_k \rightarrow D_k \quad (3.26)$$

Une règle est dite activée si le degré de *compatibilité* de leur antécédent par rapport à la valeur floue du dommage observé  $\mu_{d_k}(d_0)$  est supérieur à zéro. La puissance d'activation des règles floues nommée  $\alpha_i$  doit être déterminée pour chaque règle  $R_i$ . Puisque chaque règle a un seul antécédent, la puissance d'activation de la règle sera :

$$\alpha_i = \mu_{d_k}(d_0) \quad (3.27)$$

$\alpha_i$ : Degré de *compatibilité* de l'antécédent de la règle  $R_i$ , ce facteur égale à la valeur floue  $\mu(d_0)$  de l'entrée  $d_0$ .

Afin de bien calibrer les « *Relations pondérées* » entre le niveau proposé de dommage local  $d_k$  et le niveau de dommage cible  $D^*$  a adopté  $D_k$ , le degré de *compatibilité* de la règle  $R_i$  est pondéré en utilisant le poids associé  $\omega_k$  pour chaque règle  $R_i$ . Pour cela, un coefficient de pondération  $\psi$  est proposé qui représente l'influence possible du dommage du composant  $k$  sur le dommage cible  $D^*$  :

$$\psi_k = \mu_k(D_k) \cdot \omega_k \quad (3.28)$$

Où  $\mu_k(D_k)$ : Ensemble flou (valeur floue) de la sortie d'une règle floue.

La représentation graphique de l'influence de  $\psi$  est illustrée dans la Figure 3.8, il est clair que les composants avec des valeurs élevées de  $\psi_k$  ont une plus d'influence sur le niveau de dommage cible. Également, l'influence des composants à faible  $\psi_k$  est limitée en fonction de la valeur de  $\psi_k$ .

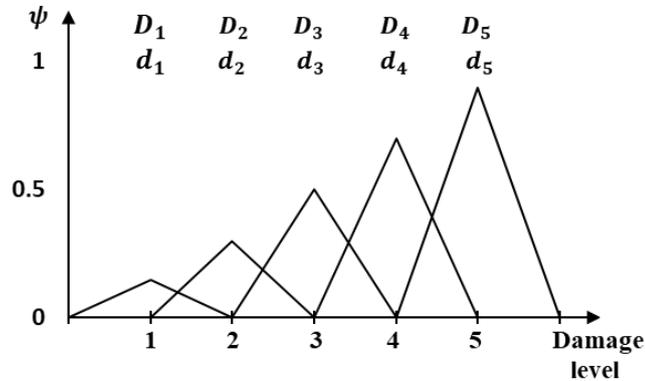


Figure 3.8 : Représentation des échelles pondérées

En adoptant les poids de pondération, le degré de *compatibilité* de la règle  $R_i$  sera :

$$\alpha_{ik} = \alpha_i \cdot \omega_k = \psi_{ik} \quad (3.29)$$

Le conséquent de la règle  $R_i$  est un ensemble flou représentant un niveau de dommage à adopter. L'inférence de Mamdani utilise l'opération de conjonction ( $\wedge$ ) pour effectuer l'implication ( $\rightarrow$ ). L'ensemble flou  $D'_k$  impliqué comme une sortie de la règle  $R_i$  est exprimée alors comme suit :

$$\mu_{D'_{ik}} = \min(\alpha_{ik}, \mu_{D_{ik}}) = \alpha_{ik} \wedge \mu_{D_{ik}} \quad (3.30)$$

Où  $\mu_{D'_{ik}}$  : Fonction d'appartenance de la sortie de la règle  $R_i$  représentant un ensemble flou  $D'_k$  approximatif à l'ensemble flou  $D_k$ . Selon l'inférence de Mamdani, la présentation graphique de l'implication floue est de couper « *Clipping* » la fonction d'appartenance du conséquent au niveau de la *compatibilité* de l'antécédent (voir Figure 3.7).

Après le processus d'implication, les règles activées avec leurs conséquences doivent être combinées d'une manière adéquate afin de prendre une décision finale. Les résultats du processus d'implication sont des valeurs floues  $\mu_{D'_{ik}}$  représentant un ensemble flou  $D'_k$  approximatif à l'ensemble flou  $D_k$ . Il est nécessaire alors de combiner ces ensembles flous dans un ensemble flou composite par le processus d'agrégation, le modèle de Mamdani utilise l'opération de disjonction ( $\vee$ ) pour effectuer l'agrégation :

$$\mu_{D'} = \max(\mu_{D'_{1k}}, \mu_{D'_{2k}}, \dots) = \mu_{D'_{1k}} \vee \mu_{D'_{2k}} \vee \dots \quad (3.31)$$

Ce qui devient :

$$\mu_{D'} = \bigvee_{i=1}^n \mu_{D'_{ik}} \quad (3.32)$$

Où :  $n$  : Nombre des règles activées.

La sortie finale est un ensemble flou composite  $D'$  :

$$D' = \bigcup_{i=1}^n D'_i \quad (3.33)$$

Où le résultat obtenu  $D'$  représente « Ensemble flou solution » qui représente une enveloppe des ensembles flous coupés de chaque règle activée représentant l'enveloppe des niveaux de dommage à adopter comme un niveau de dommage cible  $D^*$  (voir Figure 3.9).

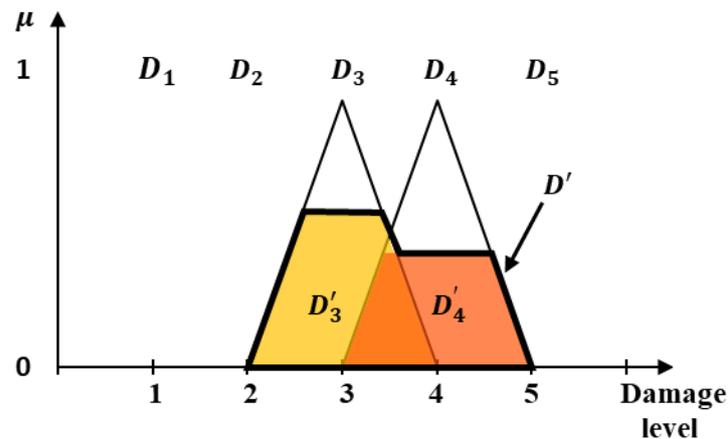


Figure 3.9 : Exemple d'Agrégation

Dans cette étude, et puisque les niveaux de dommage sont pondérés, l'ensemble flou solution peut être également représenté en utilisant une échelle pondérée afin d'illustrer l'importance relative  $\psi_k$  de chaque catégorie de dommage adopté pour construire l'ensemble flou solution  $D'$  comme l'illustre la Figure 3.10.

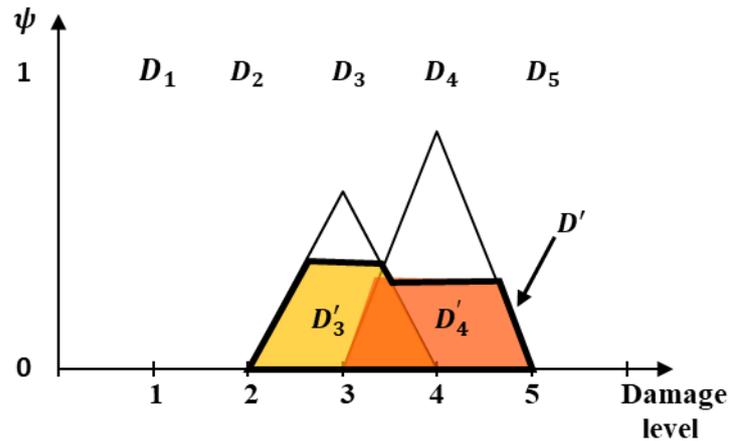


Figure 3.10 : Exemple d'Agrégation en utilisant une échelle pondérée

Si une valeur nette représentant cette enveloppe d'ensemble flou solution est nécessaire (valeur numérique de dommage), alors une méthode de défuzzification est utilisée pour effectuer la transformation de la forme floue de la sortie vers une valeur nette (numérique).

### 3.4.3. Défuzzification (Calcul des niveaux de dommage local et global)

Le processus de défuzzification peut être considéré comme le processus de transformation « *Mapping* » d'un espace *flou* vers un espace *non flou* en utilisant une fonction de transformation « *Défuzzification* ». Il existe plusieurs méthodes de défuzzification qui ont été développées pour diverses applications. Toutefois, il n'existe pas une manière systématique pour choisir la méthode de défuzzification la plus appropriée [136] même s'il y a quelques recommandations selon la nature du problème à résoudre [137]. Le choix de la méthode de défuzzification reste toujours arbitraire et dépend du contexte du problème. Dans cette recherche le processus de défuzzification par la méthode centroïde « *Centre de gravité* » [138] est utilisé pour déterminer la sortie de chaque sous-système, la forme générale de la méthode centroïde est comme suit :

$$x^* = \frac{\sum \mu(x) \cdot x}{\sum \mu(x)} \quad (3.34)$$

En adoptant la méthode centroïde, la forme générale de défuzzification de la sortie floue est comme suit (voir Figure 3.11) [102] :

$$D^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot D_k \cdot \omega_k}{\sum_{k=1}^{N_c} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot \omega_k} \quad (3.35)$$

Où :  $D^*$ : Niveau de dommage cible,  $\mu_k(D_k)$ : Fonctions d'appartenance des ensembles flous de la sortie  $D'_k$  impliqués par les règles floues activées,  $\omega_k$ : poids associés aux règles floues activées,  $N_c$ : Nombre des composants adoptés dans la procédure d'évaluation.

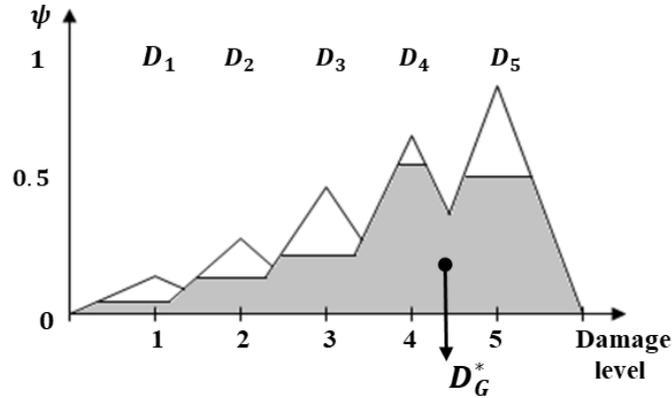


Figure 3.11 : Défuzzification par *Centroïde* [102]

L'équation (3.35) peut être spécifiée pour chaque sous-système (*Groupe*) adopté dans cette recherche en développant les équations (3.5), (3.7) et (3.9) comme suit [102] :

*Groupe 1 « Dommage structurel » :*

$$D_S^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_S} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot D_k \cdot \omega_k}{\sum_{k=1}^{N_S} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot \omega_k} = \frac{\sum_{k=1}^{N_S} \mathbb{1}_k \cdot D_k \cdot \psi_k}{\sum_{k=1}^{N_S} \mathbb{1}_k \cdot \psi_k} \quad (3.36)$$

*Groupe 2 « Dommage non-structurel » :*

$$D_{nS}^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_{nS}} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot D_k \cdot \omega_k}{\sum_{k=1}^{N_{nS}} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot \omega_k} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{nS}} \mathbb{1}_k \cdot D_k \cdot \psi_k}{\sum_{k=1}^{N_{nS}} \mathbb{1}_k \cdot \psi_k} \quad (3.37)$$

*Groupe 1-2 « Dommage global » :*

$$D_G^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_G} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot D_k \cdot \omega_k}{\sum_{k=1}^{N_G} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot \omega_k} = \frac{\sum_{k=1}^{N_G} \mathbb{1}_k \cdot D_k \cdot \psi_k}{\sum_{k=1}^{N_G} \mathbb{1}_k \cdot \psi_k} \quad (3.38)$$

En fait, diverses méthodes de défuzzification sont également développées à côté de *Centroïde* comme les méthodes *Maxima* « *Middle of maxima*, *First of maxima*, *Last of maxima* » [139]. Toutefois, ces méthodes ne conviennent pas la présente étude puisqu'elles produisent des valeurs pour lesquelles la valeur de sortie est maximale, ce qui élimine l'effet des poids de règle pendant la défuzzification.

### 3.5. Conclusion

Les systèmes flous ont des fortes capacités fonctionnelles et sont très flexibles dans la manipulation des incertitudes et défis engendrés pendant le processus de prise de décision durant les procédures complexes comme l'évaluation des dommages post-sismiques. Ces caractéristiques rendent ces systèmes très puissants en tant que des outils d'évaluation des dommages post-sismiques des bâtiments pendant les campagnes post-désastre. Ce chapitre qui représente le cœur de cette recherche décrit la méthodologie proposée pour développer des systèmes flous d'évaluation des dommages post-sismiques en utilisant une structure hiérarchique avec des règles floues pondérées.

Ce chapitre fournit une explication détaillée des étapes opérationnelles à suivre pendant le développement des systèmes flous d'évaluation sismique en basant sur le modèle flou de Mamdani et Assilian (1975). Ces étapes comprennent brièvement : La détermination des variables (Entrées/Sorties) qui sont actuellement les composants *structurels* et *secondaires* comme des entrées et les niveaux des *dommage structurel*, *dommage non-structurel* et *dommage global* comme des sorties. Le développement des fonctions d'appartenance des variables avec leurs termes linguistiques qui représentent les niveaux de dommage adoptés dans la méthodologie d'évaluation sismique, cinq niveaux de dommage sont adoptés de D1 « *Pas de dommage* » jusqu'à D5 « *Effondrement* ». La construction de la base de règles en utilisant des règles floues pondérées à un seul antécédent qui représentent des relations « *Dommage local-Dommage global* » entre les paramètres adoptés et le niveau de dommage cible. Cette approche en plus de sa clarté de son interprétabilité, elle réduit le nombre requis de règles floues et élimine la malédiction de la dimension « *Curse of dimensionality* ». La détermination de la méthode d'inférence floue pour imiter le raisonnement de l'inspecteur lors l'interprétation des dommages observés sur les composants du bâtiment. Et finalement la détermination des méthodes de défuzzification où la méthode centroïde « *Centre de gravité* » est adoptée pour calculer le niveau de dommage cible « *Dommage structurel, Dommage non-structurel et Dommage global* ».

La validation de la méthodologie proposée nécessite tout d'abord l'optimisation des poids associés aux règles floues de chaque sous-système dans la hiérarchie. Pour cela, une base de données recueillie lors d'un séisme passé (séisme de Boumerdès 2003) est adoptée pour calibrer les poids des règles floues par un processus d'optimisation itératif. Les résultats d'optimisation des poids des règles floues et de la performance du système en termes de précision entre les niveaux de dommage théoriques et ceux rapportés par les inspecteurs sont présentés dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE 4**

### **CALIBRATION ET VALIDATION DU SYSTÈME FLOU D'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES**

#### 4.1. Introduction

Afin de mettre en évidence les avantages des systèmes flous développés par des règles floues pondérées dans l'évaluation des dommages sismiques des constructions. La performance de la méthodologie proposée pour l'évaluation des dommages sismiques des bâtiments est examinée pour démontrer le concept d'évaluation des dommages par inférence floue et pour valider le cadre théorique et les contributions attendues de cette recherche. Pour ce fait, une base de données contenant plus de 27000 fiches d'évaluation des bâtiments endommagés lors le séisme de Boumerdès 2003 est adaptée pour calibrer et valider l'approche proposée.

Le processus de calibration consiste à l'optimisation des paramètres du système flou. Principalement les valeurs des poids des règles floues pour chaque composant adopté dans la procédure sous chaque niveau de dommage afin de calibrer leur contribution particulière au niveau de dommage final. Ensuite la performance de l'approche est examinée dans la phase de validation en comparant les niveaux de dommage théorique proposés par le système flou par ceux rapportés par les inspecteurs. Une analyse et discussion des résultats obtenus sont également présentées.

#### 4.2. Base de données adoptée : Typologie du bâti Algérien

Les typologies des constructions les plus adoptées en Algérie sont généralement des constructions en béton armé, en maçonnerie et en charpente métallique. Ces constructions constituent l'inventaire du bâti algérien où pour la plupart des cas sont des bâtiments d'habitation, des hôpitaux, des écoles, des locaux administratifs et publics. La campagne post-désastre qui a suivi le séisme de Boumerdès (2003) a bien permis de classer les constructions endommagées par ce séisme. Cela a permis d'avoir une vision claire des typologies de bâtiments adoptées dans la ville de Boumerdès et de la distribution des niveaux de dommage pour chaque typologie de construction. En fait, les enquêtes post-sismiques du séisme de Boumerdès ont couvert environ 100000 bâtiments affectés dans la zone touchée

[83]. Des échantillons extraits (fiches d'évaluation) de la campagne post-sismique sont utilisés pour construire la base de données adoptée dans la présente recherche avec plus de 27000 bâtiments inclus. Tous les bâtiments de la base de données ont subi différents niveaux de dommage dans leurs composants structurels et non structurels.

Toutefois, et puisque le système flou adopté ne tient pas compte d'autres paramètres tels que les problèmes géotechniques. Toutes les fiches d'évaluation où les bâtiments souffrent de tels problèmes ont été exclues de la base de données afin d'éliminer toute influence possible de ces paramètres. La base de données contient diverses typologies structurelles des bâtiments selon leurs systèmes de contreventement (voir Tableau 4.1) : Structures en portiques (poteaux – poutres) en béton armé (RC1). Structures contreventées par des voiles en béton armé (RC2). Structures en charpente métallique (S). Structures en maçonnerie porteuse non confinée (URM).

Tableau 4.1 : Répartition des constructions de la base de données

Typologie	Catégorie de dommage					Total	%
	D1	D2	D3	D4	D5		
RC1	62	9823	2883	1091	355	14214	<b>51.93</b>
RC2	0	336	182	57	10	585	<b>2.14</b>
S	1	77	37	21	4	140	<b>0.51</b>
URM	8	5522	3693	1921	1288	12432	<b>45.42</b>
Total	71	15758	6795	3090	1657	27371	<b>100</b>
<b>%</b>	<b>0.26</b>	<b>57.57</b>	<b>24.83</b>	<b>11.29</b>	<b>6.05</b>	<b>100</b>	

La majorité des bâtiments sont soit des constructions en béton armé (portiques poteaux poutres), soit des constructions en maçonnerie non confinée. D'autre part, plus de la moitié des bâtiments de la base de données ont subi des dommages légers « *D1-D2* ». Le tiers des bâtiments ont été classés comme des bâtiments potentiellement dangereux « *D3-D4* » et le reste des bâtiments ont été effondrés ou condamnés à la démolition « *D5* ».

Afin d'examiner la performance du système flou développé, la base de données est divisée de façon aléatoire en deux sous-ensembles de données pour calibrer et valider l'approche proposée :

- Sous-ensemble de calibration : Le sous-ensemble de calibration représente 70% de la base de données (19161 fiches) est utilisé pour effectuer un processus itératif d'optimisation. Le processus d'optimisation permet de calibrer les poids des règles floues  $\omega_k$  en minimisant une *fonction objectif*, la *fonction objectif* adoptée est l'erreur quadratique moyenne (MSE)  $\chi^2$ .

- Sous-ensemble de validation : Le sous-ensemble de validation représente 30% de la base de données (8210 fiches) est utilisé pour valider les poids obtenus  $\omega_k$  afin d'évaluer la précision du système flou proposé. Pendant la phase de validation, les résultats du modèle  $D_G^*$  (Niveaux théoriques de dommage global) sont comparés à ceux rapportés par les inspecteurs  $D_G^{obs}$  (Niveaux réels de dommage global).

Puisque tous les niveaux de dommage dans la base de données sont codés comme des nombres entiers allant de 1 (D1) à 5 (D5). La conversion des valeurs de sortie (valeurs numériques) en termes quantitatifs (Catégories de dommage) peut être réalisée en attribuant des intervalles effectifs pour chaque niveau de dommage (voir Figure 4.1).

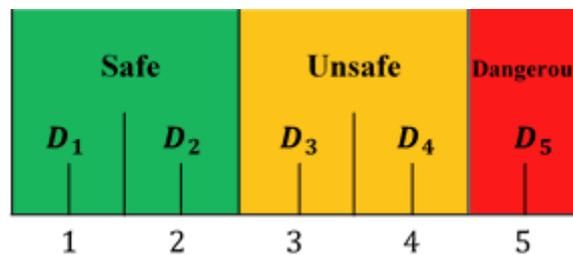


Figure 4.1 : Intervalles effectifs pour chaque catégorie de dommage [102]

#### 4.3. Calibration des poids des règles floues du système flou adopté

Comme discuté ci-dessus, le modèle flou de Mamdani est adopté dans le présent cadre théorique avec une application de la fiche d'évaluation standard utilisée en Algérie. Pour cela, le système flou proposé dérive le niveau de dommages global  $D_G^*$  du bâtiment à partir des dommages observés au niveau des composants structurels et non structurels. Il dérive également des sorties intermédiaires qui représentent le niveau de dommage structurel  $D_S^*$  et le niveau de dommage non-structurel  $D_{nS}^*$  (voir Figure 4.2).

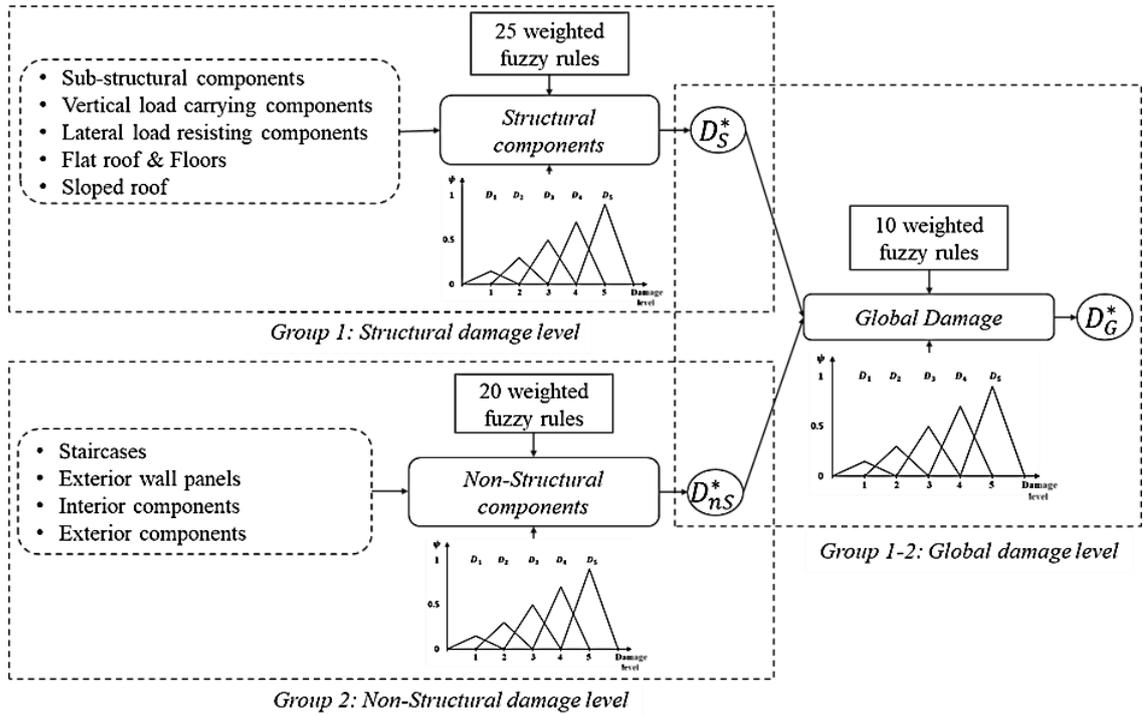


Figure 4.2 : Organigramme du système flou proposé [102]

Le système est basé sur des règles floues pondérées afin de relier chaque dommage local à son dommage global correspondant avec un poids associé pour calibrer son influence. Les valeurs des poids des règles floues  $\omega_k$  sont la solution du problème d'optimisation qui calcule l'erreur quadratique moyenne entre les niveaux de dommage global théoriques  $D_G^*(i)$  et leurs niveaux de dommage global correspondants  $D_G^{obs}(i)$  rapportés par les inspecteurs :

$$\text{Minimiser } \chi^2 \quad (4.1)$$

Avec :

$$\chi^2 = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} (D_G^*(i) - D_G^{obs}(i))^2 \quad (4.2)$$

Où :

$\chi^2$ : Erreur quadratique moyenne.  $N_b$ : Nombre total de bâtiments considérés dans le processus d'optimisation.  $D_G^*(i)$ : Niveaux de dommage global théoriques prédits par le modèle pour tout  $i$ -ème bâtiment.  $D_G^{obs}(i)$ : Niveaux de dommage global correspondants rapportés par les inspecteurs.

La *fonction objectif* à minimiser  $\chi^2$  peut alors être exprimée sous la forme générale [102] :

$$\chi^2 = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_c} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot D_k \cdot \omega_k}{\sum_{k=1}^{N_c} \mathbb{1}_k \cdot \mu_k(D_k) \cdot \omega_k} \Big|_{i-\text{ème bâtiment}} - D_G^{obs}(i) \right)^2 \quad (4.3)$$

Il est clair que la *fonction objectif* à minimiser a une forme complexe et donc sa convexité ne peut pas être démontrée et également l'unicité des solutions ne peut être garantie. Pour cela, les méthodes de minimisation itérative (approches d'optimisation heuristique) sont des approches pratiques à adopter pour atteindre le minimum global de la fonction objectif [134]. Puisque plusieurs approches heuristiques sont déjà intégrées dans la plate-forme MatLab [140]. Plusieurs de ces approches ont été testées avec des efficacités éprouvées et similaires telles que les algorithmes génétiques [141, 142], essaim de particules [143] et recherche directe [144].

Les résultats obtenus en utilisant des algorithmes génétiques sont présentés dans cette étude où la boîte à outils intégrée d'optimisation dans MatLab est utilisée pour effectuer le processus d'optimisation. Les paramètres par défaut (proposés par MatLab) ont été adoptés sans changement pour la configuration des algorithmes génétiques.

Notant que la description de la technique de recherche heuristique adoptée pour effectuer l'optimisation n'entre pas dans le cadre de la présente recherche. Cependant, une description détaillée des algorithmes génétiques peut être en trouvée [142].

#### 4.4. Valeurs optimums des poids des règles pondérées

Après avoir effectué le processus d'optimisation, la meilleure valeur obtenue de la *fonction objectif* est  $\chi^2 = \mathbf{0.17}$ , les valeurs obtenues des poids  $\omega_k$  des règles floues pondérées pour chaque sous-système sont discutées dans la section suivante comme suit [102] :

##### 4.4.1. 1<sup>er</sup> sous-système « Groupe 1 : Dommage structurel »

Les poids des règles pondérées (voir Figure 4.3 et Tableau 4.2) sont clairement dans un ordre croissant de D1 à D5. Les règles floues pondérées représentant les relations « *Dommage local-Dommage global* » entre les composants structurels et le dommage cible « *Niveau de dommage structurel* » montrent des pondérations proportionnelles à la gravité du niveau de dommage où le niveau de dommage D5 dans chaque variable d'entrée présente le poids de pondération le plus élevé. Il s'agit donc du niveau de contribution de chaque

composant sous chaque niveau de dommage au niveau de dommage cible. Les niveaux de dommage élevés ont plus d'influence par rapport aux faibles niveaux de dommage où D3, D4 et D5 montrent des valeurs élevées pour tous les composants structurels par rapport à D1 et D2 qui sont faibles.

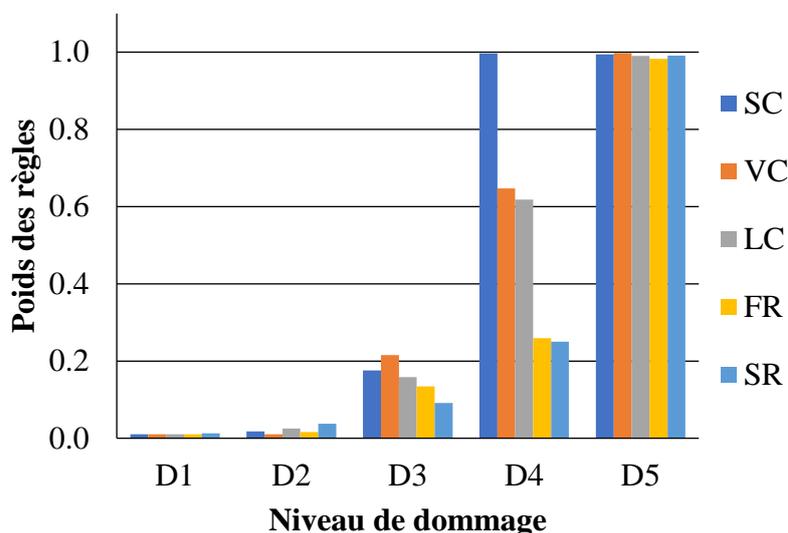


Figure 4.3 : Poids  $\omega_k$  du Groupe 1 : Niveau de dommage structurel

Tableau 4.2 : Base de règles pondérées de « Groupe 1 : Dommages structurels »

Composants structurels	Règles floues pondérées
Infrastructure <b>SC</b>	$R_1$ : IF $d_{SC}$ is $d_1$ THAN $D_S^*$ is $D_1$ with <b>0.010</b> $R_2$ : IF $d_{SC}$ is $d_2$ THAN $D_S^*$ is $D_2$ with <b>0.017</b> $R_3$ : IF $d_{SC}$ is $d_3$ THAN $D_S^*$ is $D_3$ with <b>0.175</b> $R_4$ : IF $d_{SC}$ is $d_4$ THAN $D_S^*$ is $D_4$ with <b>0.997</b> $R_5$ : IF $d_{SC}$ is $d_5$ THAN $D_S^*$ is $D_5$ with <b>0.994</b>
Éléments porteurs <b>VC</b>	$R_6$ : IF $d_{VC}$ is $d_1$ THAN $D_S^*$ is $D_1$ with <b>0.010</b> $R_7$ : IF $d_{VC}$ is $d_2$ THAN $D_S^*$ is $D_2$ with <b>0.010</b> $R_8$ : IF $d_{VC}$ is $d_3$ THAN $D_S^*$ is $D_3$ with <b>0.215</b> $R_9$ : IF $d_{VC}$ is $d_4$ THAN $D_S^*$ is $D_4$ with <b>0.647</b> $R_{10}$ : IF $d_{VC}$ is $d_5$ THAN $D_S^*$ is $D_5$ with <b>0.998</b>
Éléments de contreventement <b>LC</b>	$R_{11}$ : IF $d_{LC}$ is $d_1$ THAN $D_S^*$ is $D_1$ with <b>0.010</b> $R_{12}$ : IF $d_{LC}$ is $d_2$ THAN $D_S^*$ is $D_2$ with <b>0.025</b> $R_{13}$ : IF $d_{LC}$ is $d_3$ THAN $D_S^*$ is $D_3$ with <b>0.158</b> $R_{14}$ : IF $d_{LC}$ is $d_4$ THAN $D_S^*$ is $D_4$ with <b>0.618</b> $R_{15}$ : IF $d_{LC}$ is $d_5$ THAN $D_S^*$ is $D_5$ with <b>0.990</b>

<i>Toitures terrasses</i> <b>FR</b>	$R_{16}: IF \mathbf{d}_{FR} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \mathbf{0.010}$ $R_{17}: IF \mathbf{d}_{FR} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \mathbf{0.016}$ $R_{18}: IF \mathbf{d}_{FR} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \mathbf{0.134}$ $R_{19}: IF \mathbf{d}_{FR} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \mathbf{0.259}$ $R_{20}: IF \mathbf{d}_{FR} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \mathbf{0.983}$
<i>Toitures inclinées</i> <b>SR</b>	$R_{21}: IF \mathbf{d}_{SR} \text{ is } \mathbf{d}_1 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_1 \text{ with } \mathbf{0.013}$ $R_{22}: IF \mathbf{d}_{SR} \text{ is } \mathbf{d}_2 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_2 \text{ with } \mathbf{0.037}$ $R_{23}: IF \mathbf{d}_{SR} \text{ is } \mathbf{d}_3 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_3 \text{ with } \mathbf{0.091}$ $R_{24}: IF \mathbf{d}_{SR} \text{ is } \mathbf{d}_4 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_4 \text{ with } \mathbf{0.250}$ $R_{25}: IF \mathbf{d}_{SR} \text{ is } \mathbf{d}_5 \text{ THAN } \mathbf{D}_S^* \text{ is } \mathbf{D}_5 \text{ with } \mathbf{0.991}$

De plus, les composants structurels ont une importance relative similaire où les valeurs des poids sont assez similaires pour tous les composants structurels. Il s'agit du fait que les inspecteurs traitent les composants structurels avec presque la même importance relative.

#### 4.4.2. 2<sup>ème</sup> sous-système « *Groupe 2 : Dommage non-structurel* »

Les poids des règles (voir Figure 4.4 et Tableau 4.3) varient entre les composants non structurels où il n'y a pas une relation claire entre le niveau de dommage des composants et leur influence sur le niveau de dommage cible. Les relations « *Dommage local-Dommage global* » entre les composants secondaires et le dommage cible « *Niveau de dommage non-structurel* » ne sont pas claires cela peut être dû au fait que les composants secondaires ont moins d'influence comparant par les éléments structurels dans le cas de la méthodologie algérienne où les inspecteurs se concentrent plus aux dommages structurels pour conduire leurs jugements.

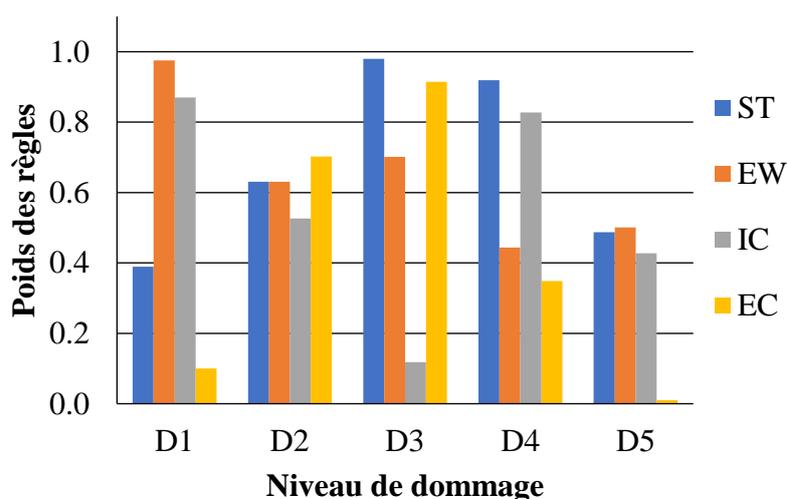


Figure 4.4 : Poids  $\omega_k$  du Groupe 2 : Niveau de dommage non-structurel

Tableau 4.3 : Base de règles pondérées de « Groupe 2 : Dommage non-structurel »

Composants non-structuraux	Règles floues pondérées
<i>Escaliers</i> <b>ST</b>	$R_1: IF d_{ST} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_1 \text{ with } 0.389$ $R_2: IF d_{ST} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_2 \text{ with } 0.630$ $R_3: IF d_{ST} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_3 \text{ with } 0.979$ $R_4: IF d_{ST} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_4 \text{ with } 0.919$ $R_5: IF d_{ST} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_5 \text{ with } 0.487$
<i>Remplissages extérieurs</i> <b>EW</b>	$R_6: IF d_{EW} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_1 \text{ with } 0.975$ $R_7: IF d_{EW} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_2 \text{ with } 0.630$ $R_8: IF d_{EW} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_3 \text{ with } 0.701$ $R_9: IF d_{EW} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_4 \text{ with } 0.444$ $R_{10}: IF d_{EW} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_5 \text{ with } 0.501$
<i>Éléments intérieurs</i> <b>IC</b>	$R_{11}: IF d_{IC} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_1 \text{ with } 0.870$ $R_{12}: IF d_{IC} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_2 \text{ with } 0.526$ $R_{13}: IF d_{IC} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_3 \text{ with } 0.119$ $R_{14}: IF d_{IC} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_4 \text{ with } 0.828$ $R_{15}: IF d_{IC} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_5 \text{ with } 0.428$
<i>Éléments extérieurs</i> <b>EC</b>	$R_{16}: IF d_{EC} \text{ is } d_1 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_1 \text{ with } 0.100$ $R_{17}: IF d_{EC} \text{ is } d_2 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_2 \text{ with } 0.703$ $R_{18}: IF d_{EC} \text{ is } d_3 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_3 \text{ with } 0.914$ $R_{19}: IF d_{EC} \text{ is } d_4 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_4 \text{ with } 0.348$ $R_{20}: IF d_{EC} \text{ is } d_5 \text{ THAN } D_{nS}^* \text{ is } D_5 \text{ with } 0.010$

De plus, plusieurs processus d'optimisation ont été réalisés et au cours de ces processus, les poids des composants secondaires ont varié par rapport aux composants structurels. Cependant, les résultats finaux du niveau de dommage global étaient similaires dans tous les cas. Cela fait référence à la faible influence des composants secondaires sous n'importe quel niveau de dommage sur le niveau de dommage global puisque la performance du modèle n'a pas été affectée de manière significative par leurs changements.

#### 4.4.3. 3<sup>ème</sup> sous-système « Groupe 1-2 : Dommage global »

Les poids des règles floues (voir Figure 4.5 et Tableau 4.4) sont dans un ordre croissant de D1 à D5 pour les composants structurels et non structurels où les relations pondérées « Dommage local-Dommage global » sont claires entre les composants structurels et les composants secondaires et le niveau de dommage global. Chaque niveau de dommage local pour les composants structurels et non structurels présente une influence pondérée sur le niveau de dommage global en fonction de sa gravité ou le niveau de dommage D5 présente le poids de pondération le plus élevé.

De plus, un décalage clair peut être observé pour chaque niveau de dommage entre les composants structurels et non structurels. Les composants structurels ont toujours des poids plus élevés pour le même niveau de dommage comparant aux composants secondaires. Ces résultats sont en conformité avec le fait que les composants structurels sont considérés comme plus influents que les composants non structurels en ce qui concerne la stabilité et la sécurité du bâtiment pendant les procédures d'évaluation post-sismique.

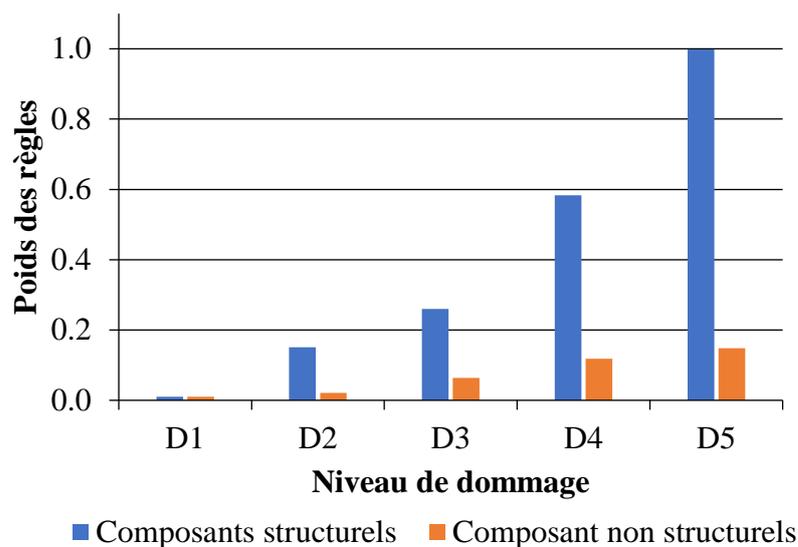


Figure 4.5 : Poids  $\omega_k$  du Groupe 3 : Niveau de dommage global

Tableau 4.4 : Base de règles pondérées de « Groupe 1-2 : Dommage global »

Composants	Règles floues pondérées
<i>Dommage structurel</i> $D_S^*$	$R_1$ : IF $D_S^*$ is $D_1$ THAN $D_G^*$ is $D_1$ with <b>0.010</b> $R_2$ : IF $D_S^*$ is $D_2$ THAN $D_G^*$ is $D_2$ with <b>0.151</b> $R_3$ : IF $D_S^*$ is $D_3$ THAN $D_G^*$ is $D_3$ with <b>0.260</b> $R_4$ : IF $D_S^*$ is $D_4$ THAN $D_G^*$ is $D_4$ with <b>0.583</b> $R_5$ : IF $D_S^*$ is $D_5$ THAN $D_G^*$ is $D_5$ with <b>0.999</b>
<i>Dommage non-structurel</i> $D_{nS}^*$	$R_6$ : IF $D_{nS}^*$ is $D_1$ THAN $D_G^*$ is $D_1$ with <b>0.010</b> $R_7$ : IF $D_{nS}^*$ is $D_2$ THAN $D_G^*$ is $D_2$ with <b>0.021</b> $R_8$ : IF $D_{nS}^*$ is $D_3$ THAN $D_G^*$ is $D_3$ with <b>0.064</b> $R_9$ : IF $D_{nS}^*$ is $D_4$ THAN $D_G^*$ is $D_4$ with <b>0.119</b> $R_{10}$ : IF $D_{nS}^*$ is $D_5$ THAN $D_G^*$ is $D_5$ with <b>0.148</b>

Par ailleurs, et en comparant le poids de chaque niveau de dommage des composants structurels et non structurels. Les niveaux de dommage les plus élevés dans les composants non structurels (D5 par exemple) ont un poids plus élevé par rapport aux niveaux plus bas dans les composants structurels (D1 par exemple). Cela se réfère au fait que le coût de

réparation prévu est pris en considération où il est également influencé par les dommages causés aux composants non structurels : plus le niveau des dommages non structurels est élevé, plus le coût de réparation est élevé et donc plus le niveau global de dommage du bâtiment est élevé.

#### 4.5. Validation du système flou d'évaluation sismique

La phase de validation consiste à comparer les résultats théoriques du système flou avec ceux rapportés par les inspecteurs. La comparaison est effectuée en utilisant d'abord le sous-ensemble de calibration utilisée pendant l'optimisation pour vérifier la performance du système pendant la calibration (voir Figure 4.6).

Niveaux de dommage observés	D <sub>1</sub>	80.00%	20.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	D <sub>2</sub>	5.68%	90.16%	3.86%	0.25%	0.05%
	D <sub>3</sub>	0.06%	10.43%	88.77%	0.71%	0.02%
	D <sub>4</sub>	0.00%	0.46%	5.50%	94.04%	0.00%
	D <sub>5</sub>	0.00%	0.00%	0.26%	1.90%	97.84%
		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
		<b>Niveaux de dommage théoriques</b>				

Figure 4.6 : Matrice de confusion du sous-ensemble de calibration [102]

Pour valider la performance du système, le système est analysé en utilisant le sous-ensemble de validation afin d'examiner leur performance avec des nouvelles données (

Figure 4.7).

Niveaux de dommage observés	D <sub>1</sub>	85.71%	14.29%	0.00%	0.00%	0.00%
	D <sub>2</sub>	5.82%	89.89%	4.08%	0.21%	0.00%
	D <sub>3</sub>	0.00%	10.84%	88.42%	0.74%	0.00%
	D <sub>4</sub>	0.00%	0.43%	6.90%	92.66%	0.00%
	D <sub>5</sub>	0.00%	0.00%	0.00%	3.42%	96.58%
		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
		Niveaux de dommage théoriques				

Figure 4.7 : Matrice de confusion du sous-ensemble de validation [102]

Les résultats de la comparaison obtenus en utilisant les sous-ensembles de calibration et de validation montrent une performance élevée avec **90%** de concordance globale entre les résultats théoriques du système flou et les propositions des inspecteurs. Le système flou est capable de prédire correctement le niveau de dommage global de la plupart des cas. Il existe cependant une légère diminution de performance pour le premier niveau de dommage (D<sub>1</sub> : *Aucun dommage*). Cela peut être dû au faible nombre de fiches d'évaluations avec un tel niveau de dommage dans la base de données (0.26% de la base de données). Il est également clair que les niveaux de dommage mal prédits se situent principalement aux niveaux suivants de dommage. Cela signifie que le degré d'erreur du système est faible où la qualité de la base de données est également un facteur important qui affecte directement la performance du système.

Tableau 4.6 et Figure 4.8 présentent une comparaison de la précision des bâtiments affectés pour chaque niveau de dommages par les inspecteurs et par le système flou pour chaque typologie structurelle en utilisant toute la base de données. Les résultats de précision montrent que le système est conforme aux rapports des inspecteurs pour chaque typologie structurelle. Toutefois, une légère diminution de la performance des bâtiments RC2 et S est observée, ce qui peut être dû au faible nombre de bâtiments RC2 et S dans la base de données (2.65% de la base de données).

Tableau 4.5 présente quelques exemples extraits de la base de données. Il compare les niveaux théoriques de dommage global proposés par les systèmes et ceux proposés par les

inspecteurs. Les résultats théoriques sont en conformité avec les niveaux de dommage proposés par les inspecteurs ainsi que les décisions adoptées dans la plupart des cas.

Tableau 4.5 : Comparaison entre les résultats théoriques et ceux proposés par les inspecteurs

N°	$d_{SC}$	$d_{VC}$	$d_{LC}$	$d_{FR}$	$d_{SR}$	$D_S^*$	$d_{ST}$	$d_{EW}$	$d_{IC}$	$d_{EC}$	$D_{nS}^*$	$D_G^*$	Décision du Model	$D_G^{Obs}$	Décision de l'inspecteur
1	/	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	/	$d_2$	$d_2$	/	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
2	/	$d_2$	$d_2$	$d_3$	/	$D_3$	$d_2$	$d_3$	$d_2$	$d_3$	$D_3$	$D_3$	Unsafe	$D_3$	Unsafe
3	/	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	/	$d_1$	$d_2$	/	$D_1$	$D_1$	Safe	$D_1$	Safe
4	/	$d_4$	$d_4$	/	$d_3$	$D_4$	/	$d_3$	$d_3$	/	$D_3$	$D_4$	Unsafe	$D_4$	Unsafe
5	/	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$D_2$	/	$d_3$	$d_2$	/	$D_3$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
6	/	$d_5$	$d_5$	/	$d_5$	$D_5$	/	$d_5$	$d_5$	/	$D_5$	$D_5$	Dangerous	$D_5$	Dangerous
7	$d_2$	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_2$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
8	/	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	/	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	$D_1$	Safe	$D_1$	Safe
9	/	$d_2$	$d_2$	/	$d_2$	$D_2$	/	$d_3$	$d_2$	/	$D_3$	$D_2$	Safe	$D_3$	Unsafe
10	/	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	$d_1$	$d_2$	$d_2$	/	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
11	/	$d_5$	$d_5$	/	$d_5$	$D_5$	/	$d_5$	$d_5$	/	$D_5$	$D_5$	Dangerous	$D_5$	Dangerous
12	$d_1$	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	$d_1$	$d_3$	$d_2$	/	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
13	/	$d_3$	$d_3$	/	/	$D_3$	$d_4$	$d_3$	$d_3$	$d_1$	$D_3$	$D_3$	Unsafe	$D_3$	Unsafe
14	/	$d_2$	$d_2$	$d_2$	/	$D_2$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	/	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_3$	Unsafe
15	/	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$D_2$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	/	$D_2$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
16	/	$d_1$	$d_1$	$d_1$	/	$D_1$	$d_1$	$d_1$	$d_2$	/	$D_1$	$D_1$	Safe	$D_2$	Safe
17	$d_1$	$d_4$	$d_4$	$d_1$	/	$D_4$	/	$d_4$	$d_4$	/	$D_4$	$D_4$	Unsafe	$D_4$	Unsafe
18	/	$d_1$	$d_1$	$d_2$	/	$D_2$	$d_1$	$d_1$	$d_2$	/	$D_1$	$D_2$	Safe	$D_2$	Safe
19	/	$d_5$	$d_5$	/	$d_5$	$D_5$	/	$d_5$	/	/	$D_5$	$D_5$	Dangerous	$D_5$	Dangerous
20	/	$d_3$	$d_3$	$d_2$	/	$D_3$	$d_3$	$d_4$	$d_4$	$d_4$	$D_3$	$D_3$	Unsafe	$D_4$	Unsafe

Tableau 4.6 : Performance du système flou développé en utilisant toute la base de données [102]

Type	D1			D2			D3			D4			D5			(%)
	$D_G^{obs}$	$D_G^*$	(%)													
RC1	62	51	82.26%	9823	8431	85.83%	2883	2311	80.16%	1091	964	88.36%	355	347	97.75%	<b>86.87%</b>
RC2	0	0	/	336	292	86.90%	182	133	73.08%	57	42	73.68%	10	8	80%	<b>78.42%</b>
S	1	1	100%	77	71	92.21%	37	22	59.46%	21	18	85.71%	4	4	100%	<b>87.48%</b>
URM	8	6	75%	5522	5400	97.79%	3693	3559	96.37%	1921	1869	97.29%	1288	1256	97.52%	<b>92.79%</b>
Total	71	58	<b>81.69%</b>	15758	14194	<b>90.07%</b>	6795	6025	<b>88.67%</b>	3090	2893	<b>93.62%</b>	1657	1615	<b>97.47%</b>	<b>90.30%</b>

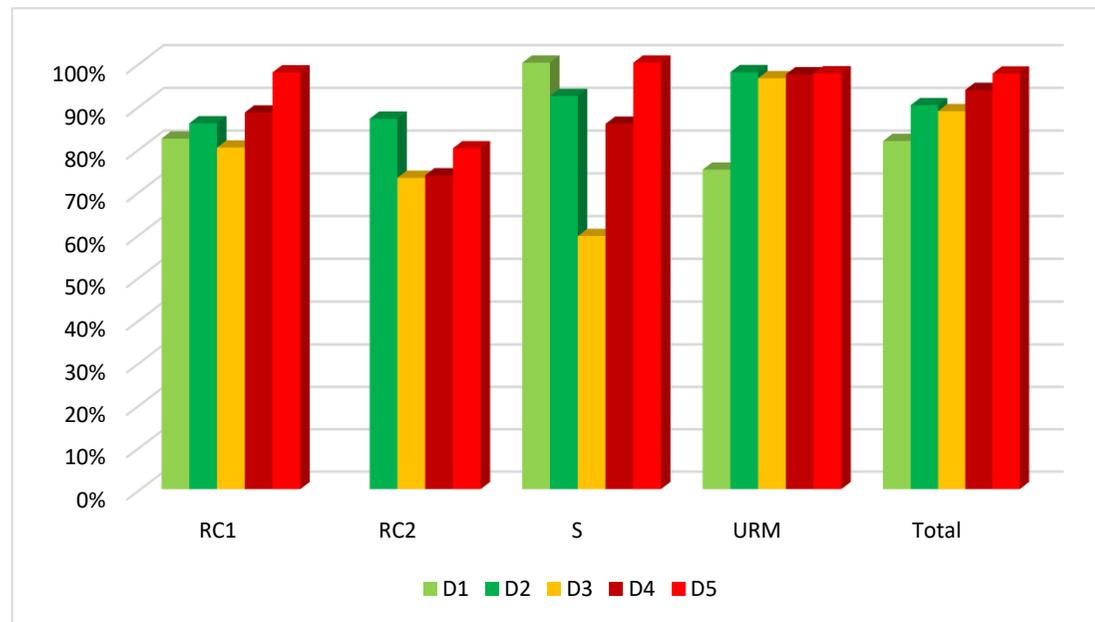


Figure 4.8 : Performance globale du système flou développé

#### 4.6. Nombre de règles floues : Analyse et discussion

Comme mentionné ci-dessus, les systèmes flous sont des systèmes basés sur des règles qui sont soumis à la fameuse malédiction de la dimension dans le cas de systèmes complexes avec un nombre élevé de paramètres. Les solutions adoptées dans cette recherche pour surmonter la malédiction de la dimension sont justifiées par leur simplicité et leur performance :

✓ En adoptant une structure hiérarchique pour développer des systèmes flous, le nombre total de règles est réduit pour être en augmentation linéaire et non pas exponentielle. Le modèle développé couvre 9 paramètres qui représentent les composants structurels et non structurels. Si un système conventionnel a été adopté au lieu d'un système hiérarchique, le nombre requis de règles pour couvrir toutes les combinaisons devrait devenir  $5^9 = 1953125$  règles. Par l'adoption d'une structure hiérarchique, et même si le nombre de paramètres a augmenté pour atteindre 11 (9 paramètres + 2 paramètres intermédiaires représentant les niveaux de dommage structurel et non structurel), le nombre total possible de règles est réduit au point de devenir  $5^5 + 5^4 + 5^2 = 3775$  qui ne représentent que **0.19%** du nombre précédent. Les paramètres intermédiaires ne sont pas inclus dans la fiche d'évaluation originale. Ces nouveaux paramètres apportés par la méthodologie développée peuvent alors être considérés comme une amélioration de la procédure d'évaluation des dommages post-sismiques car ils fournissent de nouvelles informations sur l'ensemble des composants structurels  $D_S^*$  et les composants secondaires  $D_{nS}^*$ .

✓ La deuxième solution est considérée comme la principale solution dans cette étude, comme indiqué précédemment. Le système actuel exigeait normalement 3775 règles floues afin de couvrir toutes les possibilités en utilisant la méthode traditionnelle de développement des systèmes flous. Cependant, pas toutes les combinaisons possibles sont réellement faisables, l'examen et la sélection de seules règles significatives pour réduire le nombre des règles prennent beaucoup de temps et d'efforts. Au contraire, un très petit nombre de règles est requis en utilisant des règles floues pondérées à un seul antécédent. Le système hiérarchique développé avec 11 paramètres ne requiert que  $5 \times 5 + 4 \times 5 + 5 \times 5 = 55$  qui ne représentent que **1.46%** de 3775 (système hiérarchique) et **0.003%** de 1953125 (système conventionnel). De plus, le calibrage des poids des règles est beaucoup plus facile car ils sont que des valeurs individuelles par rapport à l'examen et la sélection des règles floues à partir d'un grand nombre de règles.

Les avantages et l'efficacité des solutions proposées dans cette recherche pour développer des systèmes simples sont clairs. L'approche proposée peut être appliquée efficacement dans le traitement automatique des procédures d'évaluation des dommages sismiques. Elle offre un moyen simple et efficace pour construire des systèmes flous dans lesquels le développement et la définition des ensembles flous, des variables d'entrée et de sortie, ainsi que les règles floues et leurs poids de pondération est facile à mettre en œuvre.

#### 4.7. Conclusion

La méthodologie proposée dans cette recherche est basée sur la logique floue et les règles floues pondérées afin de minimiser le nombre de règles floues, ce qui simplifie le développement de systèmes flous. Les poids des règles représentent le degré d'influence des règles floues pondérées qui expriment des relations pondérées entre les dommages des composants et le niveau de dommage global. Le système flou développé selon la méthodologie d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie dérive trois niveaux de dommage. Niveau de dommage structurel, niveau de dommage non-structurel et le niveau de dommage global de la structure en évaluant les dommages observés au niveau des composants structurels et secondaires.

Le système flou est calibré et validé en utilisant une base de données du séisme de Boumerdès en 2003 avec plus de 27000 fiches d'évaluation incluses. La base de données est divisée aléatoirement en deux sous-ensembles : un sous-ensemble de calibration pour optimiser les poids des règles floues en utilisant un processus d'optimisation heuristique où les algorithmes génétiques sont utilisés. Le processus d'optimisation consiste à minimiser une *fonction objectif* où l'erreur quadratique moyenne (MSE) est adoptée dans cette recherche.

Les résultats de l'optimisation montrent que les niveaux de dommage élevés sont calibrés avec des valeurs de poids élevées. De plus, les composants structurels élevés sont également calibrés avec des valeurs élevées de poids par rapport aux composants secondaires. Le deuxième sous-ensemble est utilisé pour valider le système flou en comparant les niveaux de dommage théorique du système flou avec les niveaux de dommage proposé par les inspecteurs. Les résultats de validation montrent que le système flou développé même avec sa simplicité montre une performance élevée avec **90%** de concordance globale entre les résultats du système flou et les propositions des inspecteurs.

En comparant les résultats de l'approche développée et les approches locales précédentes comme l'approche des réseaux de neurones (voir 2.5.1.2. ). Le facteur adopté de corrélation  $R$  (voir équation (2.15)) montre une corrélation de **96%** avec le système flou développé où l'approche des réseaux de neurones a rapporté une corrélation de **86%**, ce qui prouve la haute performance du système flou développé.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### Conclusions

L'évaluation des dommages subis par les constructions après un séisme constitue l'une des étapes cruciales et impératives de tout cadre de gestion de risque sismique et d'atténuation de ses conséquences. À la suite d'un tremblement de terre, toutes les structures affectées doivent faire l'objet d'une évaluation rapide et rigoureuse par des inspecteurs pour déterminer leur niveau de dommage. Les bâtiments endommagés doivent être classés après de telles évaluations en utilisant des catégories de dommages et des couleurs qui expriment leur niveau de sécurité. La pratique actuelle pour effectuer ces évaluations repose entièrement sur le jugement des ingénieurs et des experts qualifiés, qui sont dépêchés sur les lieux afin d'évaluer rapidement la sécurité des bâtiments en se basant uniquement sur l'aspect visuel. Malheureusement, l'exécution manuelle des tâches rend la procédure consommatrice de temps. Également, ces procédures sont vulnérables aux incertitudes liées à la nature subjective des jugements des inspecteurs et de leurs capacités d'être influencé par divers facteurs tels que, niveau d'expérience, niveau de compétences techniques, partialité humaine, état moral, etc.

L'identification des niveaux des dommages observés aux composants du bâtiment et la proposition d'un niveau général de dommage sont certainement difficiles. Ces décisions reposent sur le sens du jugement de l'inspecteur et plus important leur tentative d'équilibrer deux aspects très cruciaux, la sécurité des habitants (en termes de rester ou d'évacuer les résidences) et les besoins économiques pendant et après les catastrophes (en termes de réparation ou démolition). L'échelle de dommage adoptée pendant les tâches d'évaluation est caractérisée par sa nature discrète. Pendant les tâches d'évaluation, les inspecteurs sont confrontés aux nombreux cas où le niveau de dommage souhaité est à la frontière entre deux catégories successives (limite supérieure d'un niveau et limite inférieure du niveau suivant). Ou par exemple, un composant peut être classé en D2 tandis que la catégorie D3 pourrait également être un jugement acceptable avec un certain degré de « *Croyance* ». Lors du jugement du niveau global de dommage, la décision finale pour déterminer si le bâtiment peut être occupé ou non ou également s'il doit être démolé ou pas, constitue une décision

délicate. Ce genre des cas met les inspecteurs dans des situations très difficiles où ils devraient être très prudents dans leur jugement.

Motivé par le rôle critique des inspecteurs lors des enquêtes post-sismiques dans l'atténuation du risque sismique, et par la nécessité vitale d'une évaluation rapide et rigoureuse dans les zones sinistrées, la présente thèse de recherche consiste à l'élaboration d'un cadre théorique pour développer des systèmes d'aide à la décision pour soutenir les inspecteurs pendant les tâches d'évaluation des constructions endommagées. L'objectif de ces systèmes est d'automatiser le traitement des fiches d'évaluation afin de prendre des décisions plus rigoureuses en ce qui concerne l'endommagement et la sécurité des constructions avec une adaptation du contexte du bâti existant en Algérie.

Le cadre théorique développé est basé sur les théories de logique floue, de ensembles flous et de systèmes hiérarchiques. La capacité significative des systèmes flous à imiter le raisonnement humain, à manipuler les incertitudes, à fournir un raisonnement imprécis et approximatif et à soutenir les termes linguistiques rend ces systèmes convenables en considérant la nature et les caractéristiques des procédures d'évaluation des dommages sismiques. Le concept de systèmes hiérarchiques a été investigué afin de construire des systèmes plus efficaces en termes de temps et d'effort de développement, transparence et la compréhensibilité, efficacité et charge de calcul. Les paramètres de la fiche d'évaluation sont considérés comme des entrées. Les niveaux de dommage sont exprimés en utilisant des ensembles flous caractérisés par des fonctions d'appartenance. Cette recherche propose une nouvelle approche pour construire la base de règles des systèmes flous où des règles floues pondérées sont adoptées pour exprimer des relations pondérées « *Dommage local-Dommage global* » entre les niveaux de dommage des composants (entrées) et le niveau de dommage cible (sorties). Chaque niveau de dommage pour chaque composant est lié à la sortie cible en utilisant une seule règle floue pondérée à un seul antécédent où le poids exprime l'importance relative du niveau de dommage de ce composant et leur influence sur le niveau de dommage global. L'application de règles floues pondérées réduit significativement le nombre de règles nécessaires pour construire la base de règles ce qui réduit le temps et l'effort de développement.

L'adaptation de la fiche d'évaluation en Algérie pour développer un système flou d'évaluation des dommages post-sismiques. Le système définit les principaux paramètres de la fiche comme entrées. Principalement les composants structurels (infrastructures, éléments

porteurs, contreventement, toiture terrasse et toiture inclinée) et les composants secondaires (escaliers, remplissages extérieurs, éléments intérieurs et éléments extérieurs). Le système est constitué de 3 sous-systèmes : le 1<sup>er</sup> sous-système traite les composants structurels et fournit un niveau de dommage pour les composants structurels, ce sous-système est constitué de 5 entrées, 25 règles floues pondérées et une sortie  $D_S^*$ . Le 2<sup>ème</sup> sous-système traite les composants secondaires et fournit un niveau de dommage pour les composants secondaires, ce sous-système est constitué de 4 entrées, 20 règles floues pondérées et une sortie  $D_{NS}^*$ . Le 3<sup>ème</sup> sous-système traite les résultats des deux sous-systèmes précédents et fournit un niveau de dommage général, ce sous-système est constitué de 2 entrées, 10 règles floues pondérées et une sortie  $D_G^*$ .

Le processus d'optimisation consiste à la calibration des poids de règles. Pour ce fait, une base de données des bâtiments endommagés après le séisme de Boumerdès (21 mai 2003,  $M_w = 6.8$ ) est adoptée. La base de données qui contient plus de 27000 fiches a été divisée en deux sous-ensembles. Un sous-ensemble de calibration qui est utilisé pour calibrer le système en minimisant une *fonction objectif* (erreur quadratique moyenne) où les valeurs des poids des règles sont les solutions de cette fonction. Un sous-ensemble de validation qui est utilisé pour valider la performance du système par la comparaison de leurs résultats (niveaux théoriques de dommage global) avec les niveaux de dommage proposés par les inspecteurs. Les résultats montrent que l'évaluation théorique est en conformité avec les propositions des inspecteurs pour **90%** des bâtiments étudiés.

### Contributions

Cette recherche présente des contributions considérables dans le domaine d'évaluation des dommages sismique en exploitant des outils informatiques et des théories mathématiques. La contribution principale de cette recherche est l'introduction d'un cadre générique et compréhensif pour développer des systèmes d'évaluation automatique des dommages sismiques (qui peut être facilement étendu aux autres domaines) d'une manière novatrice pour soutenir le processus de prise de décision des inspecteurs pendant les tâches d'évaluation sismique.

Le travail adopte la logique floue comme une base du cadre théorique pour développer des systèmes experts et systèmes d'aide à la décision en tenant compte le caractère subjectif et vague de l'information connexe qui sera traitée à travers la théorie des ensembles flous. Ces systèmes offrent les inspecteurs la possibilité d'exprimer les dommages observés

linguistiquement en utilisant des termes linguistiques afin de quantifier l'intensité des dommages observés avec plus de précision. L'approche proposée est basée sur la théorie des ensembles flous, des systèmes hiérarchiques et sur les règles floues pondérées afin de créer des outils simples et puissants avec le minimum temps et effort consommés durant la phase de développement. Les contributions principales sont décrites ci-dessous :

- Cette recherche examine la pratique actuelle de l'évaluation des dommages sismiques en examinant les principales limitations et défis de plusieurs procédures, il examine l'expérience algérienne avec les séismes et les limites de la procédure d'évaluation des dommages adoptée en Algérie. Le travail examine également les avantages de l'utilisation des outils de traitement automatique pour soutenir les décisions des inspecteurs au cours des tâches d'évaluation. Cela contribue à fournir des résultats plus rigoureux où l'avantage de la digitalisation est mis en évidence pour une pratique moderne d'évaluation des dommages sismiques.

- Le travail examine l'applicabilité, la faisabilité et l'utilité de la logique floue dans l'évaluation des dommages sismiques (notamment pour la procédure algérienne). Il explore et discute le concept des niveaux flous de dommage dans la procédure d'évaluation des dommages sismique en essayant de lier la nature qualitative des catégories de dommage et les termes linguistiques introduits dans la théorie des ensembles flous.

- L'approche adoptée propose un cadre théorique générique basé sur les ensembles flous et les systèmes hiérarchiques pour soutenir les inspecteurs pendant les procédures d'évaluation des dommages sismiques. L'approche adopte une application novatrice des règles floues de type (un seul antécédent - un seul conséquent) pour construire la base de règles au lieu de l'approche ordinaire qui est connue par le problème de malédiction de la dimension. Chaque règle a été associée à un poids pour calibrer leur influence relative dans le processus d'inférence floue. L'approche présente plusieurs avantages tels que la transparence et la compréhensibilité de tels systèmes développés, la faible consommation de temps et d'efforts durant le développement en utilisant un nombre considérablement faible des règles floues par rapport aux autres approches.

- L'utilisation de la logique floue offre l'avantage de capturer les connaissances d'experts dans le domaine de l'évaluation des dommages et d'exploiter ces connaissances pour construire des systèmes experts ou pour former des personnes non qualifiées. L'utilisation des systèmes flous offre un moyen transparent et facile de comprendre le

concept de dommages locaux et leurs influences sur le dommage global du bâtiment. Les résultats peuvent être suivis tout au long du processus et sont plus faciles à vérifier par rapport aux modèles de type « *Boîte noire* ».

- L'approche proposée considère l'optimisation et le calibrage de la performance du système par le calibrage des poids des règles floues pondérées au lieu de la modification des paramètres des fonctions d'appartenance. Ces poids des règles sont considérés comme des facteurs d'importance qui expriment l'influence relative des différents niveaux de dommage de chaque paramètre (composant) sur le niveau de dommage global. Cette opération de calibrage est beaucoup plus facile puisque les poids des règles sont des paramètres uniques comparant aux paramètres multiples des fonctions d'appartenance.

- L'approche proposée fournit un soutien aux inspecteurs pendant les tâches d'évaluation des bâtiments au moyen des outils pratiques permettant d'identifier les niveaux de dommage à l'aide des termes linguistiques. Ces outils gèrent très bien la nature approximative des observations des inspecteurs qui peuvent être subjectives, imprécises, vagues, incomplètes et incertaines grâce à la théorie des ensembles flous. Cette théorie offre donc aux inspecteurs une grande souplesse dans leur jugement par la capacité de proposer des évaluations entre les limites des catégories de dommages tout en prenant en compte cette imprécision dans le processus de décision par des mécanismes d'inférence floue.

#### Perspectives et Recommandations

Les résultats et observations recueillies dans le cadre de cette dissertation ont permis d'identifier plusieurs sujets de futurs travaux qui méritent d'être approfondis. Pour ce faire, des études supplémentaires qui peuvent être abordées sont résumées ci-dessous :

- L'approche proposée présente des bonnes estimations des niveaux de dommage global en se basant uniquement sur des paramètres « *Structurels* » et « *Non structurels* ». Cependant, l'investigation d'autres paramètres représentant des informations connexes comme les désordres géotechniques mérite d'être poursuivie afin de couvrir tous les paramètres d'influence possibles pour parvenir à une évaluation optimale.

- Les fonctions d'appartenance floues adoptées sont toutes représentées par des fonctions triangulaires avec des limites constantes. D'autres recherches peuvent être menées pour améliorer la définition et la calibration des fonctions d'appartenance floues qui représentent les niveaux de dommage. Autres formes de fonctions d'appartenance peuvent

être investigués (Trapézoïdale, Gaussienne...) à l'avenir et une analyse de sensibilité peut être effectuée pour vérifier la sensibilité du modèle au changement de la forme et des limites fonctions d'appartenance. Les opinions d'experts et les données post-sismiques sont alors des points de départ plausibles.

- L'utilisation des règles floues de type (un seul antécédent – un seul conséquent) pour construire la base de règles nécessite plus d'investigations dans d'autres contextes. Également, la combinaison de ce type de règles avec d'autres types type (multi antécédents – un seul conséquent, multi antécédents – multi conséquents) mérite d'être investiguée.

- Finalement, la méthodologie proposée a été utilisée pour évaluer l'état des constructions en termes de *dommage*. Pour investiguer la faisabilité et généraliser l'applicabilité du cadre théorique proposé, la méthodologie peut être adoptée pour répondre aux autres objectifs tels que l'évaluation de la *vulnérabilité* des constructions et le *risque sismique* en utilisant des règles floues pondérées.

## APPENDICE A

### ESSENTIEL DES ENSEMBLES FLOUS

#### A.1. Ensembles flous

Un ensemble classique  $S$  est défini par des limites nettes et non équivoques, soit  $x$  un élément de l'univers du discours  $X$ . Un ensemble classique  $S \subseteq X$  est défini comme une collection des éléments  $x \in X$ , chaque élément  $x$  est soit un membre  $x \in S$  soit un non-membre  $x \notin S$  de l'ensemble  $S$  :

$$S = \{(x, \mu_S(x)) | x \in X\}$$

$$\mu_S(x) = \begin{cases} 1, & x \in S \\ 0, & x \notin S \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Avec  $\mu_S$ : Fonction caractéristique.

Un ensemble flou  $A$ , est défini par des limites floues, il fournit différents degrés d'appartenance à ses éléments dans un intervalle de  $[0, 1]$  où : 0 se réfèrent que l'élément n'appartient pas à l'ensemble et 1 que l'élément appartient totalement à l'ensemble [107]. Soit  $x$  un élément de l'univers du discours  $X$ , un ensemble flou  $A \subseteq X$  est défini comme suit:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$$

$$\mu_A(x) \in [0, 1] \quad (\text{A.2})$$

Avec  $\mu_A(x)$  : Fonction d'appartenance (Fonction caractéristique généralisée).

Il existe plusieurs formes de fonctions d'appartenance telles que : triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ... (voir Figure A.1).

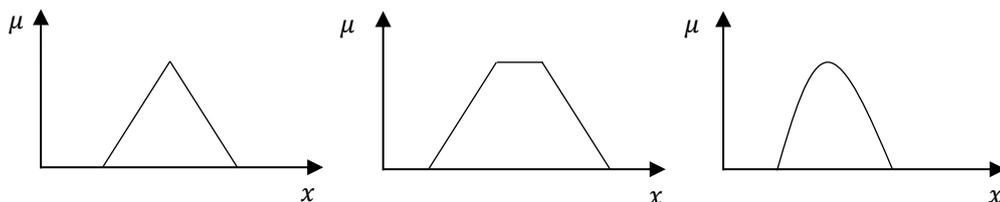


Figure A.1 : Différentes formes de fonctions d'appartenance

## A.2. Opérateurs flous

Les trois opérateurs principaux dans les théories des ensembles flous sont : l'*union*, l'*intersection* et le *complément*. Plusieurs approches ont été développées pour définir ces opérateurs en tant que fonctions de **t-norme** et de **t-conorme** [145], voir Figure A.2. La bien connue définition de Zadeh [146] a été adoptée dans cette thèse :

- Opérateur « **AND** » définit l'union (disjonction) de deux ensembles flous  $A \cup B$  :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.3})$$

- Opérateur « **OR** » définit l'intersection (conjonction) de deux ensembles flous  $A \cap B$  :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.4})$$

- Opérateur « **NOT** » signifie le complémentaire  $C_A$  (négation) de l'ensemble flou  $C$  caractérisé par  $\mu_{C_A}(x)$ :

$$\mu_{C_A}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.5})$$

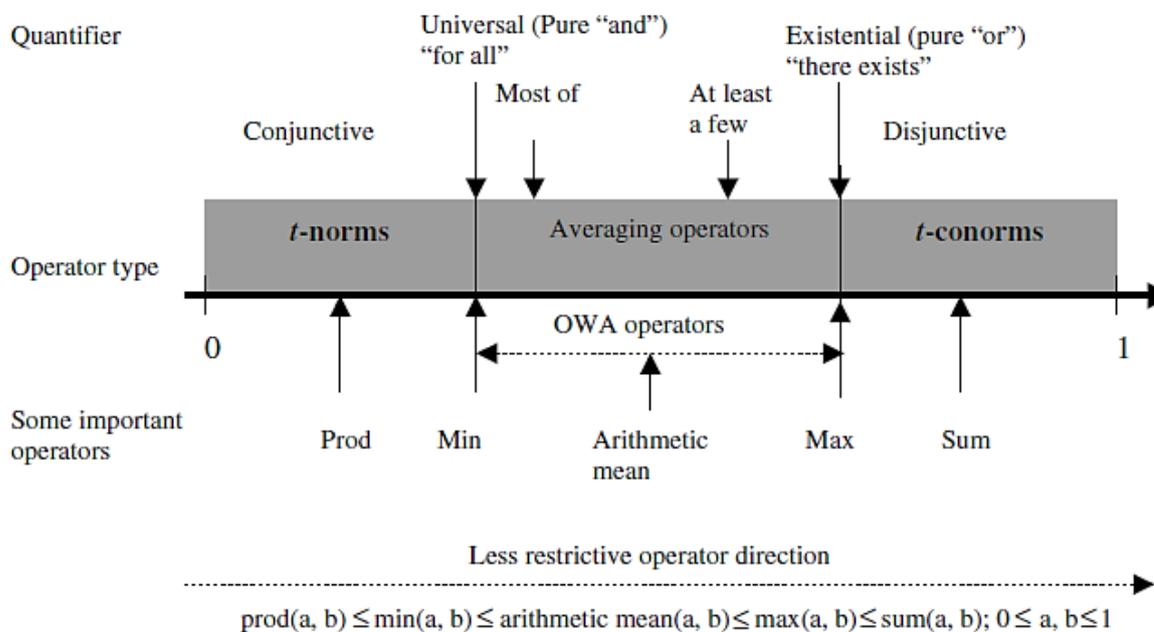


Figure A.2 : Certains des opérateurs les plus connus [147]

### A.3. Propriétés floues

Les propriétés les plus fréquemment utilisées dans la théorie des ensembles flous sont décrites brièvement comme suit [126, 148] :

Tableau A.1 : Quelques propriétés valides dans la théorie des ensembles flous

Propriété	Description
Ensemble vide	$A = \emptyset \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0$
Égalité	$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x)$
Inclusion	$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$
Lois de De Morgan	$\begin{cases} \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \end{cases}$
Commutativité	$\begin{cases} A \cup B = B \cup A \\ A \cap B = B \cap A \end{cases}$
Associativité	$\begin{cases} A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C \\ A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C \end{cases}$
Distributivité	$\begin{cases} A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \\ A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \end{cases}$
Idempotence	$\begin{cases} A \cup A = A \\ A \cap A = A \end{cases}$
Identité	$\begin{cases} A \cup \emptyset = A \\ A \cap \emptyset = \emptyset \\ A \cap X = A' \\ A \cup X = X \end{cases}$

Cependant, la loi du milieu exclu (tiers exclu) et la loi de la contradiction ne sont pas valides dans la théorie des ensembles flous, ce qui signifie que :

$$\begin{cases} A \cup \overline{A} \neq X \Leftrightarrow \mu_{A \cup \overline{A}}(x) \neq 1 \\ A \cap \overline{A} \neq \emptyset \Leftrightarrow \mu_{A \cap \overline{A}}(x) \neq 0 \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

### A.4. Raisonnement flou

Afin d'effectuer le raisonnement approximatif dans les systèmes flous, les méthodes classiques de raisonnement (fondé sur différentes tautologies) ont été adoptées et généralisées pour effectuer le raisonnement flou comme le classique *Modus Ponens* [149, 150]. Ces genres d'implication floue sont connus par *Modus Ponens Généralisé* « *GMP* », considérant l'exemple suivant d'une règle floue :

$$\begin{array}{l} \mathbf{P}_1: \text{Si } x \text{ est } A \text{ Alors } y \text{ est } B \\ \mathbf{P}_2: x \text{ est } A' \\ \hline \mathbf{C}_1: \qquad \qquad \qquad y \text{ est } B' \end{array} \quad (\text{A.7})$$

Avec :  $P_1$ : Règle floue (Implication),  $P_2$ : Prémisse,  $C_1$ : Conclusion,  $x$  et  $y$  sont des variables,  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  et  $B'$  sont des ensembles flous.

Dans le raisonnement classique, la proposition (prémisse)  $x$  est  $A$  doit être observée *complètement* pour considérer la conclusion  $y$  est  $B$ . Cependant, dans le raisonnement flou, une proposition  $x$  est  $A'$ , approximative à la prémisse  $x$  est  $A$  peut être observée afin de fournir une conclusion approximative  $y$  est  $B'$  qui se rapproche de la conclusion  $y$  est  $B$ . Ce raisonnement est considéré comme un *Modus Ponens Généralisé* qui peut être réduit au *modus ponens classique* si  $A' = A$  et  $B' = B$ .

#### A.5. Structure générale des systèmes flous [126, 148]

En raison des différentes applications des systèmes flous, plusieurs types d'inférences floues ont été développés, le modèle de Mamdani et Assilian (1975) [114] a été adopté dans cette thèse. La structure générale d'un système flou de Mamdani se compose de quatre composantes conceptuelles (voir Figure A.3).

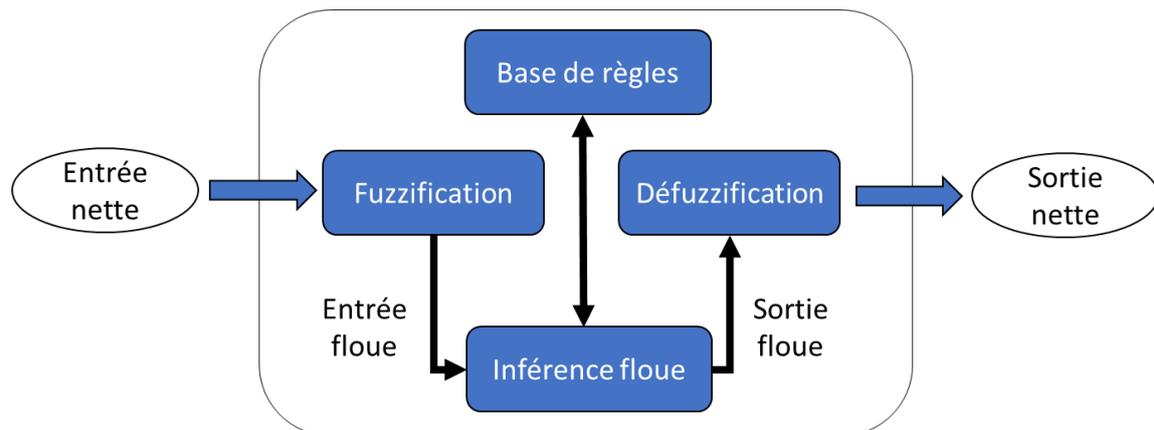


Figure A.3 : Structure générale d'un système flou de Mamdani et Assilian (1975)

- **Fuzzificateur** : Transforme les entrées nettes en degrés de compatibilité avec les termes linguistiques des fonctions d'appartenance utilisées dans les règles floues.
- **Base de règles** : Contient une collection de déclarations linguistiques conditionnelles sous forme de « *IF-THEN* » pour représenter la connaissance humaine.
- **Inférence floue** : Effectue des opérations d'inférence en utilisant des opérateurs flous et méthodes d'implication et d'agrégation sur la base de règles floues.
- **Défuzzicateur** : Transforme les résultats flous du processus d'inférence floue en une sortie compréhensible (valeur nette).

**APPENDICE B**  
**LISTE DES SYMBOLES**

EMS 98 : Echelle Macrosismique Européenne 1998

MSK : Echelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik

PGA : Peak Ground Acceleration

PGV : Peak Ground Velocity

PGD : Peak Ground Displacement

PESH : Potential Earth Science Hazards

HAZUS : Hazard United States

SIG : Système d'Information Géographique

HRC : Homogenized reinforced concrete scale

SDOF : Système à un seul degré de liberté

MDOF : Système à plusieurs degrés de liberté

ATC : Applied Technology Council

DPM : Damage probability matrix

RNA : Réseau de Neurones Artificiels

CTC : Contrôle Technique de la Construction

CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique

MSE : Mean Square Error

GMP : Modus Ponens Généralisé

$A_k$  : Ensemble flou

$\mu_k$  : Fonction d'appartenance floue

$\omega_k$  : Poids de règle floue

$\alpha_i$  : Degré de *compatibilité*

$\psi_k$  : Coefficient de pondération

$d_k$  : Niveau de dommage local

$D'$  : Ensemble flou solution

$D^*$  : Niveau de dommage cible

$D_G^*$  : Niveau de dommage global

$D_S^*$  : Niveau de dommage structurel

$D_{nS}^*$  : Niveau de dommage non-structurel

## RÉFÉRENCES

1. Liao S-H. “Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004”, *Expert systems with applications*, V. 28, n° 1, (2005), 93-103.
2. Guha Sapir D, Vos F, Below R, Ponserre S. “Annual Disaster Statistical Review 2010. The numbers and Trends”, (2011), Cred, Brussels, Belgium.
3. Karimi Iman. “Risk management of natural disasters: A fuzzy-probabilistic methodology and its application to seismic hazard”, (2006), Fakultät für Bauingenieurwesen.
4. Ohnaka Mitiyasu. “The physics of rock failure and earthquakes”, (2013), Cambridge University Press.
5. Coburn Andrew, Spence Robin. “Earthquake protection”, (2003), John Wiley & Sons.
6. Richter CF. “An instrumental earthquake magnitude scale”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 25, n° 1, (1935), 1-32.
7. Thomas C. Hanks, Kanamori H. “A moment magnitude scale”, *journal of geophysical research*, V. 84, n° B5, (1979), 2348-2350.
8. Kramer Steven L. “Geotechnical Earthquake Engineering Prentice Hall”, (1996), Upper Saddle River, NJ.
9. GRUNTHAL Gottfried. “European macroseismic scale 1998”, (1998), European Seismological Commission (ESC).
10. Park Y-J, Ang AH-S. “Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete”, *Journal of structural engineering*, V. 111, n° 4, (1985), 722-739.
11. Federal Emergency Management Agency. “FEMA 306: Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings : Basic procedures manual”, (1998), Redwood City, California, USA.
12. Banon H, Irvine HM, Biggs JM. “Seismic damage in reinforced concrete frames”, *Journal of the Structural Division*, V. 107, n° 9, (1981), 1713-1729.
13. Wang ML, Shah SP. “Reinforced concrete hysteresis model based on the damage concept”, *Earthquake engineering & structural dynamics*, V. 15, n° 8, (1987), 993-1003.
14. Sinha R, Shiradhonkar S. “Seismic damage index for classification of structural damage-closing the loop”, *The 15th world conference on earthquake engineering*, (2012), Lisboa, Portugal.
15. Park Y, Ang AH, Wen Y. “Damage-limiting aseismic design of buildings”, *Earthquake spectra*, V. 3, n° 1, (1987), 1-26.
16. Abbasi L, Ghafory-Ashtiany M. “Floor Response Modification Factors for Nonstructural Components due to Near-Field Pulse-Like Earthquakes”, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, V. 17, n° 4, (2016), 249-263.
17. Singhal A, Kiremidjian AS. “Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage”, *Journal of Structural Engineering*, V. 122, n° 12, (1996), 1459-1467.

18. Kircher CA, Nassar AA, Kustu O, Holmes WT. "Development of building damage functions for earthquake loss estimation", *Earthquake spectra*, V. 13, n° 4, (1997), 663-682.
19. Rojahn Christopher, Sharpe Roland L. "Earthquake damage evaluation data for California", (1985), Applied Technology Council, Washington, D.C., USA.
20. McCormack TC, Rad FN. "An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21", *Earthquake Spectra*, V. 13, n° 4, (1997), 605-621.
21. Porter K, Kennedy R, Bachman R. "Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering", *Earthquake Spectra*, V. 23, n° 2, (2007), 471-489.
22. McGuire Robin K. "Seismic hazard and risk analysis", (2004), Earthquake Engineering Research Institute.
23. Calvi GM, Pinho R, Magenes G, Bommer JJ, Restrepo-Vélez LF, Crowley H. "Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years", *ISET journal of Earthquake Technology*, V. 43, n° 3, (2006), 75-104.
24. Whitman RV, Reed JW, Hong S. "Earthquake damage probability matrices", *Proceedings of the Fifth World conference on earthquake engineering*, (1973), Rome, Italy: Palazzo DEI CONGRESSI (EUR).
25. Braga F, Dolce M, Liberatore D. "A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale", *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, (1982), Athens, Greece.
26. Di Pasquale G, Orsini G, Romeo RW. "New developments in seismic risk assessment in Italy", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 3, n° 1, (2005), 101-128.
27. Dolce M, Masi A, Marino M, Vona M. "Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 1, n° 1, (2003), 115-140.
28. Corsanego A, Petrini V. "Seismic vulnerability of buildings—work in progress", *Proceedings of Workshop II on Seismic Risk Vulnerability and Risk Assessment*, (1990), Trieste, Italy.
29. Spence R, Coburn A, Pomonis A, Sakai S. "Correlation of ground motion with building damage: the definition of a new damage-based seismic intensity scale", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, (1992), Madrid, Spain.
30. Rossetto T, Elnashai A. "Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data", *Engineering structures*, V. 25, n° 10, (2003), 1241-1263.
31. Sabetta F, Goretti A, Lucantoni A. "Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion", *11th European Conference on Earthquake Engineering*, (1998), Rotterdam, Netherlands.
32. Rota M, Penna A, Strobbia C. "Typological fragility curves from Italian earthquake damage data", *Proceedings 1st European conference on earthquake engineering and seismology*, (2006), Geneva, Switzerland.
33. Milutinovic Zoran V, Trendafiloski Goran S. "Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns", (2003), Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings.

34. Benedetti D, Petrini V. "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings", *L'industria delle Costruzioni*, V. 149, n° 1, (1984), 66-74.
35. Earthquakes CNR-National Group for the Defence against. "Seismic Risk of Public Buildings, Part I: Methodology", (1993), Rome, Italy.
36. Goretti A, Di Pasquale G. "An overview of post-earthquake damage assessment in Italy", EERI invitational workshop, An action plan to develop earthquake damage and loss data protocols, (2002), California, USA.
37. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : A handbook", (1998), Redwood City, California, USA.
38. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : Supporting documentation", (1995), Redwood City, California, USA.
39. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : A handbook", (2002), Redwood City, California, USA.
40. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : Supporting documentation", (2002), Washington, D.C., USA.
41. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : A handbook", (2015), Washington, D.C., USA.
42. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 154: Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : Supporting documentation", (2015), Washington, D.C., USA.
43. Nanda R, Majhi D. "Review on Rapid Seismic Vulnerability Assessment for Bulk of Buildings", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, V. 94, n° 3, (2013), 187-197.
44. Shome Nilesh. "Seismic Loss Assessment", (2014), *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg.
45. Bernardini A, Gori R, Modena C. "An application of coupled analytical models and experiential knowledge for seismic vulnerability analyses of masonry buildings", (1990), *Engineering aspects of earthquake phenomena*, Omega Scientific, Oxon, U.K.
46. Bernardini Alberto. "Seismic Damage to Masonry Buildings: Proceedings of the International Workshop on Measures of Seismic Damage to Masonry Buildings: Monselice, Padova, Italy, 25-26 June, 1998", (1999), Taylor & Francis.
47. D'ayala D, Speranza E. "An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings", In *12th European Conference on Earthquake Engineering*, (2002), Barbicon Centre, London, UK.
48. D'Ayala D, Speranza E. "Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings", *Earthquake Spectra*, V. 19, n° 3, (2003), 479-509.

49. Cosenza E, Manfredi G, Polese M, Verderame GM. "A multilevel approach to the capacity assessment of existing RC buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, V. 9, n° 01, (2005), 1-22.
50. Calvi GM. "A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, V. 3, n° 03, (1999), 411-438.
51. Priestley M. "Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings", *Journal of earthquake engineering*, V. 1, n° 01, (1997), 157-192.
52. Glaister S, Pinho R. "Development of a simplified deformation-based method for seismic vulnerability assessment", *Journal of Earthquake Engineering*, V. 7, n° 1, (2003), 107-140.
53. Pinho R, Bommer J, Glaister S. "A simplified approach to displacement-based earthquake loss estimation analysis", *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, (2002), Barbicon Centre, London, UK.
54. Crowley H, Pinho R, Bommer JJ. "A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 2, n° 2, (2004), 173-219.
55. Crowley H, Pinho R, Bommer JJ, Bird JF. "Development of a displacement-based method for earthquake loss assessment", (2006), European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Pavia, Research Report No. ROSE-2006/01.
56. Silva V, Crowley H, Pinho R, Varum H. "Extending displacement-based earthquake loss assessment (DBELA) for the computation of fragility curves", *Engineering Structures*, V. 56, n° 1, (2013), 343-356.
57. Restrepo-Vélez LF. "A simplified mechanics-based procedure for the seismic risk assessment of unreinforced masonry buildings", (2003), Individual Study.
58. Restrepo-Velez LF, Magenes G. "Simplified procedure for the seismic risk assessment of unreinforced masonry buildings", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, (2004), Vancouver, British Columbia, Canada.
59. Freeman SA. "Evaluations of existing buildings for seismic risk-A case study of Puget Sound Naval Shipyard", *Proc 1st US Nat Conf on Earthquake Engineering*, (1975), Bremerton, Washington, USA.
60. Freeman SA. "Development and use of capacity spectrum method", *The 6th US National Conference on Earthquake Engineering/EERI*, (1998), Seattle, Washington, USA.
61. Freeman SA. "Review of the development of the capacity spectrum method", *ISET Journal of Earthquake Technology*, V. 41, n° 1, (2004), 1-13.
62. Freeman SA. "Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motion", *Special Publication*, V. 55, n° 1, (1978), 589-606.
63. Whitman RV, Anagnos T, Kircher CA, Lagorio HJ, Lawson RS, Schneider P. "Development of a national earthquake loss estimation methodology", *Earthquake Spectra*, V. 13, n° 4, (1997), 643-661.
64. Federal Emergency Management Agency. "HAZUS99: Earthquake Loss Estimation Methodology : Technical manual", (1999), Washington, D.C., USA.

65. Spence R, Bommer J, Del Re D, Bird J, Aydinoglu N, Tabuchi S. "Comparing loss estimation with observed damage: a study of the 1999 Kocaeli earthquake in Turkey", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 1, n° 1, (2003), 83-113.
66. Federal Emergency Management Agency. "HAZUS-MH: Multi-hazard Loss Estimation Software", (2012), Washington, D.C., USA.
67. Reiter Leon. "Earthquake hazard analysis: issues and insights", (1991), Columbia University Press.
68. Cornell CA. "Engineering seismic risk analysis", *Bulletin of the seismological society of America*, V. 58, n° 5, (1968), 1583-1606.
69. Federal Emergency Management Agency. "FEMA 178: NEHRP Handbook for the seismic evaluation of existing buildings", (1992), Washington, D.C., USA.
70. Applied Technology Council. "ATC 40: Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", (1996), Redwood City, California, USA.
71. Federal Emergency Management Agency. "HAZUS-MH: Multi-hazard Loss Estimation Methodology : Technical manual", (2003), Washington, D.C., USA.
72. Molina S, Lang D, Lindholm C. "SELENA—An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure", *Computers & Geosciences*, V. 36, n° 3, (2010), 257-269.
73. Barbat AH, Pujades LG, Lantada N. "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V. 28, n° 10, (2008), 851-865.
74. Barbat AH, Moya FYp, Canas JA. "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones", *Earthquake spectra*, V. 12, n° 3, (1996), 371-394.
75. Dolce M, Masi A, Marino M. "EAEE-ESC Task Group 3—Seismic risk and earthquake scenarios-report of the activities", *Proc of 12th European Conference on Earthquake Engineering*, (2002), Barbicon Centre, London, UK.
76. Saraf A, Choudhury S. "Cover: Satellite detects surface thermal anomalies associated with the Algerian earthquakes of May 2003", *International Journal of Remote Sensing*, V. 26, n° 13, (2005), 2705-2713.
77. Mehani Y, Bechtoula H, Kibboua A, Naili M. "Assessment of seismic fragility curves for existing RC buildings in Algiers after the 2003 Boumerdes earthquake", *Struct Eng Mech*, V. 46, n° 6, (2013), 791-808.
78. Roussel J. "L'activité sismique en Algérie de 1951 à 1970", *Bull Soc Hist Nat Afr Nord*, V. 64, n° 3/4, (1973), 185-210.
79. Ayadi A, Bezzeghoud M. "Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: maximum observed intensity map (MOI 2014)", *Seismological Research Letters*, V. 86, n° 1, (2014), 236-244.
80. Ferdi S, Harbi A. "Roman literary and epigraphic sources for the study of historical seismicity in Algeria circa 42–420 AD", *Journal of seismology*, V. 18, n° 2, (2014), 277-287.
81. Benouar Djillali. "Materials for the investigation of historical seismicity in Algeria from the records of past earthquakes", (2004), *Annals of Geophysics*.

82. Control Construction Technical. "General report on Ech-Cheliff (El Asnam) earthquake of October 10th, 1980", (1981), Algeria.
83. Belazougui M. "Boumerdes Algeria earthquake of May 21, 2003: Damage analysis and behavior of beam-column reinforced concrete structures", 14th World Conference on Earthquake Engineering, (2008), Beijing, China.
84. Harbi A, Maouche S, Ousadou F, Rouchiche Y, Yelles-Chaouche A, Merahi M, Heddar A, Nouar O, Kherroubi A, Beldjoudi H. "Macroseismic study of the Zemmouri earthquake of 21 May 2003 (Mw 6.8, Algeria)", *Earthquake spectra*, V. 23, n° 2, (2007), 315-332.
85. Ousalem H, Bechtoula H. "Inventory survey of the 2003 Zemmouri (Algeria) earthquake: Case study of Dergana City", *Journal of Advanced Concrete Technology*, V. 3, n° 1, (2005), 175-183.
86. Applied Technology Council. "ATC-20: Procedures for postearthquake safety evaluation of buildings", (1991), Redwood City, California, USA.
87. JBDPA. "Standard for seismic evaluation of existing reinforced concrete buildings", (2001), The Japan Building Disaster Prevention Association, Japan.
88. Anagnostopoulos S, Moretti M, Panoutsopoulou M, Panagiotopoulou D, Thoma T. "Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: Further development and applications", (2004), Final report. European Commission Environment, and Civil Protection, Patras, Greece.
89. Baggio Carlo, Bernardini Alberto, Colozza Riccardo, Corazza Livio, Della Bella Mariana, Di Pasquale Giacomo, Dolce Mauro, Goretti Agostino, Martinelli Antonio, Orsini Giampiero. "Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES)", (2007), European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, EUR.
90. Sextos AG, Kappos A, Stylianidis K. "Computer-Aided Pre-and Post-Earthquake Assessment of Buildings Involving Database Compilation, GIS Visualization, and Mobile Data Transmission", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, V. 23, n° 1, (2008), 59-73.
91. Vitelmo Bertero, Haresh Shah. "El-Asnam, Algeria Earthquake October 10, 1980: A Reconnaissance and Engineering Report", (1983), Earthquake Engineering Research Institute: Report CETS CND-022, Oakland, CA.
92. Farsi M, Belazougui M. "The Mont Chenoua (Algeria) earthquake of October 29th, 1989: damage assessment and distribution", *Proc of 10th World Conference on Earthquake Engineering*, (1992), Madrid, Spain.
93. McEntire David A, Cope Jill. "Damage Assessment After the Paso Robles, San Simeon, California, Earthquake: Lessons for Emergency Management", (2004), Natural Hazards Center.
94. Aldunate R, Ochoa SF, Pena-Mora F, Nussbaum M. "Robust mobile ad hoc space for collaboration to support disaster relief efforts involving critical physical infrastructure", *Journal of Computing in Civil Engineering*, V. 20, n° 1, (2006), 13-27.
95. Applied Technology Council. "ATC-20-2: Addendum to the ATC-20 postearthquake building safety evaluation procedures", (1995), Redwood City, California, USA.

96. Anagnostopoulos S, Moretti M. “Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability—Part 2: Organisation”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V. 28, n° 3, (2008), 233-244.
97. Federal Emergency Management Agency. “FEMA 351: Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings”, (2000), Washington, D.C., USA.
98. Federal Emergency Management Agency. “FEMA 307: Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings : Technical resources”, (1999), Washington, D.C., USA.
99. Hadipriono FC, Ross TJ. “A rule-based fuzzy logic deduction technique for damage assessment of protective structures”, *Fuzzy Sets and Systems*, V. 44, n° 3, (1991), 459-468.
100. Kamat VR, El-Tawil S. “Evaluation of augmented reality for rapid assessment of earthquake-induced building damage”, *Journal of computing in civil engineering*, V. 21, n° 5, (2007), 303-310.
101. Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH. “Computational tool for post-earthquake evaluation of damage in buildings”, *Earthquake Spectra*, V. 26, n° 1, (2010), 63-86.
102. Allali SA, Abed M, Mebarki A. “Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic”, *Engineering Structures*, V. 166, (2018), 117-127.
103. Anagnostopoulos S, Moretti M. “Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability—Part 1: Technical issues”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V. 28, n° 3, (2008), 223-232.
104. Kostoulas Dionysios, Aldunate Roberto, Peña-Mora Feniosky, Lakhera Sanyogita. “A decentralized trust model to reduce information unreliability in complex disaster relief operations”, (2006), *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, Springer.
105. Anagnostopoulos SA, Petrovski J, Bouwkamp J. “Emergency earthquake damage and usability assessment of buildings”, *Earthquake Spectra*, V. 5, n° 3, (1989), 461-476.
106. Feigenbaum Edward A, Buchanan Bruce G, Lederberg Joshua. “On generality and problem solving: A case study using the DENDRAL program”, (1970), Stanford University, Dept of Computer Science, California, USA.
107. Zadeh LA. “Fuzzy sets”, *Information and control*, V. 8, n° 3, (1965), 338-353.
108. Mebarki A. “Post-seismic structural damage evaluation: an integrated probabilistic proposal”, *Proc of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology*, (2006), Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
109. Mebarki A, Laribi A. “Evaluation post-sismique des dommages structuraux: Méthodologie probabiliste”, (2008), *Risques Naturels et technologiques*, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
110. Mebarki A, Boukri M, Laribi A, Farsi M, Belazougui M, Kharchi F. “Seismic vulnerability: theory and application to Algerian buildings”, *Journal of seismology*, V. 18, n° 2, (2014), 331-343.
111. Noura H, Mebarki A, Abed M. “Post-quake structural damage evaluation by neural networks: theory and calibration”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2017), 1-18.

112. Russell B. "Vagueness", *The Australasian Journal of Psychology and Philosophy*, V. 1, n° 2, (1923), 84-92.
113. Kosko B, Isaka S. "Fuzzy logic", *Scientific American*, V. 269, n° 1, (1993), 76-81.
114. Mamdani EH, Assilian S. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International journal of man-machine studies*, V. 7, n° 1, (1975), 1-13.
115. MathWorks, 2017, Available: <http://www.mathworks.com>.
116. Sanchez-Silva M, Garcia L. "Earthquake damage assessment based on fuzzy logic and neural networks", *Earthquake Spectra*, V. 17, n° 1, (2001), 89-112.
117. Tesfamariam S, Saatcioglu M. "Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modeling", *Earthquake Spectra*, V. 26, n° 1, (2010), 235-256.
118. Tesfamariam S, Saatcioglu M. "Risk-based seismic evaluation of reinforced concrete buildings", *Earthquake Spectra*, V. 24, n° 3, (2008), 795-821.
119. Demartinos K, Dritsos S. "First-level pre-earthquake assessment of buildings using fuzzy logic", *Earthquake spectra*, V. 22, n° 4, (2006), 865-885.
120. Şen Z. "Rapid visual earthquake hazard evaluation of existing buildings by fuzzy logic modeling", *Expert Systems with Applications*, V. 37, n° 8, (2010), 5653-5660.
121. Raju G, Zhou J, Kisner RA. "Hierarchical fuzzy control", *International journal of control*, V. 54, n° 5, (1991), 1201-1216.
122. Lee M-L, Chung H-Y, Yu F-M. "Modeling of hierarchical fuzzy systems", *Fuzzy sets and systems*, V. 138, n° 2, (2003), 343-361.
123. Wang L-X. "Analysis and design of hierarchical fuzzy systems", *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, V. 7, n° 5, (1999), 617-624.
124. Joo MG, Lee JS. "Universal approximation by hierarchical fuzzy system with constraints on the fuzzy rule", *Fuzzy Sets and Systems*, V. 130, n° 2, (2002), 175-188.
125. Zadeh LA. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I", *Information sciences*, V. 8, n° 3, (1975), 199-249.
126. Ross Timothy J. "Fuzzy logic with engineering applications", (2009), John Wiley & Sons.
127. Arslan A, Kaya M. "Determination of fuzzy logic membership functions using genetic algorithms", *Fuzzy sets and systems*, V. 118, n° 2, (2001), 297-306.
128. Shepard Richard B. "Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic", (2006), Springer Science & Business Media.
129. Bustince H, Fernández J, Mesiar R, Montero J, Orduna R. "Overlap index, overlap functions and migrativity", *Proceedings of IFSA/EUSFLAT Conference*, (2009), Lisbon, Portugal.
130. Ishibuchi H, Nozaki K, Yamamoto N, Tanaka H. "Selecting fuzzy if-then rules for classification problems using genetic algorithms", *IEEE Transactions on fuzzy systems*, V. 3, n° 3, (1995), 260-270.
131. Wang L-X, Mendel JM. "Generating fuzzy rules by learning from examples", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, V. 22, n° 6, (1992), 1414-1427.

132. Zadeh LA. "Fuzzy logic= computing with words", IEEE transactions on fuzzy systems, V. 4, n° 2, (1996), 103-111.
133. Ishibuchi H, Nakashima T. "Effect of rule weights in fuzzy rule-based classification systems", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, V. 9, n° 4, (2001), 506-515.
134. Lee Kwang Y, El-Sharkawi Mohamed A. "Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems", (2008), John Wiley & Sons.
135. Turksen I, Tian Y. "Combination of rules or their consequences in fuzzy expert systems", Fuzzy Sets and Systems, V. 58, n° 1, (1993), 3-40.
136. Roychowdhury Shounak. "An inquiry into the theory of defuzzification", (2001), Granular computing, Springer.
137. Hellendoorn H, Thomas C. "Defuzzification in fuzzy controllers", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, V. 1, n° 2, (1993), 109-123.
138. Van Leekwijck W, Kerre EE. "Defuzzification: criteria and classification", Fuzzy sets and systems, V. 108, n° 2, (1999), 159-178.
139. Runkler TA. "Selection of appropriate defuzzification methods using application specific properties", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, V. 5, n° 1, (1997), 72-79.
140. MATLAB 7.8, 2009, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
141. Holland JH. "Genetic algorithms", Scientific american, V. 267, n° 1, (1992), 66-72.
142. Whitley D. "A genetic algorithm tutorial", Statistics and computing, V. 4, n° 2, (1994), 65-85.
143. Eberhart R, Kennedy J. "A new optimizer using particle swarm theory", MHS'95 Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, (1995), Nagoya, Japan.
144. Hooke R, Jeeves TA. "'Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems", Journal of the ACM (JACM), V. 8, n° 2, (1961), 212-229.
145. Menger K. "Statistical metrics", Proceedings of the National Academy of Sciences, V. 28, n° 12, (1942), 535-537.
146. Klir George J, Folger Tina A. "Fuzzy sets, uncertainty, and information", (1988), Prentice Hall Englewood Cliffs.
147. Larsen Henrik Legind. "Fundamentals of fuzzy sets and fuzzy logic", (2002), Aalborg University, Esbjerg, Denmark.
148. Jang Jyh-Shing Roger, Sun Chuen-Tsai, Mizutani Eiji. "Neuro-fuzzy and soft computing; a computational approach to learning and machine intelligence", (1997), Prentice Hall, Upper Saddle River.
149. Zadeh LA. "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, V. 3, n° 1, (1973), 28-44.
150. Mizumoto M, Zimmermann H-J. "Comparison of fuzzy reasoning methods", Fuzzy sets and systems, V. 8, n° 3, (1982), 253-283.