

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

Thèse de Doctorat

Option : Matériaux et Structures

BELHEOUANE Fatma Imène

Magister en Génie Civil

Diplômé de l'université Saad Dahlab de Blida

Intitulé de la Thèse

**DETERMINATION DES COURBES DE VULNERABILITE
POUR LES STRUCTURES DE BETON ARME EN
ALGERIE**

Soutenu le dimanche 29/09/2013, devant le jury composé de

Dr. A. ZERZOUR
Dr. M. HADID
Dr. N. BOURAHLA
Dr. N. MEZOUER
Dr. M. BENSAIBI

Professeur, ENSTP d'Alger
Professeur, ENSTP d'Alger
Professeur, U Saad Dahleb de Blida
Maitre de recherche, CGS d'Alger
Professeur, U Saad Dahleb de Blida

Président
Examineur
Examineur
Examineur
Rapporteur

RESUME

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes en béton armé (BA) nécessite de disposer d'outils fiables permettant de cibler l'intervention afin de réduire les dommages en cas d'un tremblement de terre. A cet effet, nous avons identifié les paramètres ayant une influence sur le comportement sismique des bâtiments en BA, ainsi que leurs facteurs de pondération pour les trois classes de vulnérabilité considérées. Un indice de vulnérabilité (IV) est alors calculé permettant de classer la structure étudiée selon une classification proposée. En se basant sur le retour d'expérience sismique en Algérie, des matrices de probabilité de dommage ont été élaborées. Une écriture de ces matrices sous forme continue a permis de déterminer des courbes de vulnérabilité semi empiriques pour les structures en BA en utilisant l'IV.

Un programme dénommé PV (Program of Vulnerability) a été élaboré en Delphi. Ce programme contient deux modules : PVC (Program of Vulnerability curves) et VIP (Vulnerability Index Program). Le premier sert à déterminer le taux de dommage d'une structure et le second permet de classer une construction selon sa vulnérabilité sismique.

Une comparaison des courbes de vulnérabilité obtenues avec celles données par RISK-UE a montrée que nos courbes étaient plus conservatives.

Mots clés : Indice de vulnérabilité, séisme, béton armé, structures, matrices de probabilité de dommage, courbes de vulnérabilité.

ملخص

إن نسبة الأضرار التي يمكن أن تتعرض لها منشأة من الخرسانة المسلحة في حالة زلزال ذو شدة معلومة يمكن تقديرها من خلال منحنيات الهشاشة, تعتبر هذه المنحنيات أساسية لكل قرار تقوية أو استبدال للهياكل المعنية.

من أجل هذا قمنا بتطوير منحنيات الهشاشة معتمدين على طريقة مؤشر الهشاشة . هذه الطريقة تسمح بتصنيف المنشآت من الخرسانة المسلحة بالأخذ بعين الاعتبار العوامل الإنشائية أو الغير الإنشائية. هذه العوامل مهمة في الاستجابة الزلزالية للبناءات من الخرسانة المسلحة . بالاعتماد على مؤشر الهشاشة المحصل عليه طورت مصفوفات احتمال الضرر التي تقودنا لحساب نسبة الأضرار المتوسطة التي تسمح بإنشاء منحنيات الهشاشة النصف المجردة لبناءات الخرسانة المسلحة في الجزائر.

المنحنيات المنجزة قورنت بمنحنيات منجزة في مشروع أخطار الزلازل بلوروبا (RISK-UE)

ABSTRACT

Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete (RC) existing structures can be performed through the use of reliable tools this is in order to reduce damages in case of an earthquake event. Within this study, major parameters that have an influence on the seismic behaviour of RC buildings are identified with their weighting factors for the three considered vulnerability classes. A vulnerability Index (VI) is then calculated allowing the classification of the studied structure according a developed scale. Based on Algerian seismic feedback experience DPM (Damage Probability Matrices) are elaborated. A continuous formulation of these matrices enables the determination of semi empirical vulnerability curves.

A program called PV (Program of vulnerability) is elaborated in Delphi. This program contains two modules: PVC (Program of Vulnerability curves) and VIP (Vulnerability Index Program). The first one gives the mean damage ratio of a structure and the second classifies the structure according its seismic vulnerability.

A comparison with RISK-UE curves shows that our curves are more conservative.

Key words: Vulnerability index, earthquake, reinforced concrete, structures, damage probability matrices, vulnerability curves.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie ALLAH, qui m'a donné la santé, la volonté et le courage afin de pouvoir tracer ma vie dans le droit chemin.

Je tiens à remercier Pr. ZERZOUR, d'avoir bien voulu m'honorer en présidant le jury.

Je tiens à remercier beaucoup mon promoteur Pr. BENSAIBI, pour son soutien, ses conseils précieux et sa patience afin que je puisse terminer ce travail.

Je tiens également à remercier Pr. BOURAHILA, Pr. HADID et Dr. MEZOUER, pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Je remercie ma mère, pour son amour et son sacrifice ; mon père, pour son soutien et ses encouragements, ainsi que mes frères (Maamoune et Zakaria) et mes sœurs (Kaouthar et Soumia).

Je remercie vivement et chaleureusement mon époux, Salim, pour son encouragement, sa patience et son amour ainsi que ma belle famille.

Un grand merci à notre équipe, à tous mes amis et collègues enseignants à l'Université Saad Dahlab de Blida.

Un grand merci à tous.

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES

Figure1.1 : Eléments constitutifs du risque [Schmid, 2005] et [Schmid, 2006].	17
Figure1.2 : Notion de risque [Belheouane, 2006].	18
Figure1.3 : Courbes de fragilités [Calvi, 2006].	53
Figure1.4 : Courbes de Vulnérabilité [Spence, 1992], [Calvi, 2006].	55
Figure1.5 : Courbes de Vulnérabilité : (a) en fonction de PGA, et (b) en fonction de déplacement spectral à la période fondamentale [Rossetto, 2003].	56
 Figure3.1 : Courbes de vulnérabilité semi empiriques.	 87
Figure3.2 : Courbes de vulnérabilité développées et celles de RISK-UE.	88
 Figure 4.1 : Organigramme de calcul.	 102
Figure 4.2 : Pages d'accueil du VP.	104
Figure 4.3 : Page d'introduction des données (Analyse globale).	105
Figure 4.4 : Page d'introduction des données (Analyse approfondie).	105
Figure 4.5 : Présentation de la page Paramètre.	106
Figure 4.6 : Présentation de la page du taux de dommage.	106
Figure 4.7 : Organigramme des composants du VP.	107
Figure 4.8 : Etat actuel du bloc 13 à Boufarik.	124
Figure 4.9 : Etat actuel du bloc 01 à Koleà.	127
Figure 4.10 : Courbes de vulnérabilité des exemples de validation et des exemples d'application.	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1.1 : Classification des méthodes et positionnement des références [Lang, 2002].	21
Tableau1.2 : Différentes échelles d'analyse et leur applicabilité [AFPS, 2005].	21
Tableau1.3 : Comparaison des valeurs d'intensité entre les différentes échelles d'intensité (MMI, JMA, MSK et EMS98). [Giovinazzi, 2005], [Musson, 2009].	23
Tableau1.4 : Valeurs des indices de vulnérabilité de base pour les principales typologies de l'ATC21 en fonction des trois niveaux de sismicité.	25
Tableau1.5 : Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée [AFPS, 2005].	29
Tableau1.6 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie [AFPS, 2005].	31
Tableau1.7 : Classe de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir d'endommagements observés [AFPS, 2005], [Benedetti, 1988].	32
Tableau1.8 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé [AFPS, 2005].	34
Tableau1.9 : Paramètres de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie et en Béton armé, appliquée en Espagne [Yépèz, 1996].	36
Tableau1.10 : Description des niveaux de dommages [AFPS, 2005].	45
Tableau1.11 : Typologie RISK-UE et valeurs représentatives de l'IV [RISK-UE, 2003].	48
Tableau1.12 : Critères structuraux de vulnérabilité et leurs coefficients associés [AFPS, 2005].	49

Tableau1.13 : Format d'une matrice de probabilité des dommages proposé par Withman et al. [Withman, 1973].	51
Tableau1. 14 : Exemple de DPM pour la classe C de vulnérabilité à l'échelle EMS98 [Calvi, 2006].	52
Tableau1.15 : Matrice de probabilité de dommage pour un bâtiment simple de faible hauteur [Calvi, 2006] et [Singhal, 1996].	54
Tableau2.1 : Principaux séismes [CRAAG, 2012].	59
Tableau2.2 : Les facteurs « Ki » pour chaque paramètre en fonction de leurs classes.	77
Tableau2.3 : Les coefficients de corrélation des paramètres.	78
Tableau2.4 : Classification des structures en fonction de leur « Iv ».	79
Tableau2.5 : Description de dommages.	80
Tableau3.1 : Description de dommages pour chaque niveau de dommage [AFPS, 2005].	82
Tableau3.2 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 1.	83
Tableau3.3 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 2.	84
Tableau3.4 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 3.	85
Tableau3.5 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 4.	85
Tableau3.6 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Rouge 5.	86
Tableau3.7 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Vert1.	89
Tableau3.8 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Vert2.	89
Tableau3.9 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Orange3.	90
Tableau3.10 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Orange4.	90
Tableau3.11 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Rouge5.	91

Tableau4.1 : Résultat de l'application de l'exemple 1.	109
Tableau4.2 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 1.	110
Tableau4.3 : Résultat de l'application de l'exemple 2	111
Tableau4.4 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 2.	112
Tableau4.5 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 1	113
Tableau4.6 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 1.	114
Tableau4.7 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 02.	115
Tableau4.8 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 02.	116
Tableau4.9 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 03	117
Tableau4.10 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 3.	118
Tableau4.11 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 04.	119
Tableau4.12 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple3/ logement4.	120
Tableau4.13 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 05.	121
Tableau4.14 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple3/ logement 5.	122
Tableau4.15 : Résultat de l'application de l'exemple 01.	123
Tableau4.16 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 01.	124
Tableau4.17 : Résultat de l'application de l'exemple 02.	125
Tableau4.18 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 02.	127
Tableau4.19 : Résultat de l'exemple d'application03.	128
Tableau4.20 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 03.	129

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES	8
LISTE DES TABLEAUX.	9
INTRODUCTION	12
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	15
1.1 Introduction	15
1.2 Notions de base	16
1.3 Historique de l'étude de la vulnérabilité sismique	19
1.4 Vulnérabilité sismique des ouvrages	20
1.5 Méthodes d'estimation des dommages pour les constructions	24
1.5.1 Méthode de l'ATC21	24
1.5.2 Méthodologies ATC14 et ATC40	25
1.5.3 Méthodologie d'IZIIS	27
1.5.4 Méthodologie EPM	27
1.5.5 Méthodologie EMS [European Macrosiesmic Scale]	28
1.5.6 Méthode italienne GNDT	30
1.5.7 Méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Espagne	34
1.5.8 Méthode Canadienne	37
1.5.9 Méthode Japonaise	38
1.6 Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes	42
1.6.1 Méthode de l'ATC13	42
1.6.2 Méthode de HAZUS	43
1.6.3 Méthode de RADIUS	44
1.6.4 Méthode probabiliste italienne	44
1.6.5 Méthodologie RISK-UE	45
1.7 Matrices de probabilité des dommages	50
1.8 Courbes de Capacité (fragilité)	52
1.9 Courbes de Vulnérabilité empiriques	54
1.10 Conclusion	56

2. INDICE DE VULNERABILITE SISMIQUE DES STRUCTURES EN BETON ARME	58
2.1 Introduction	58
2.2 Historique de la sismicité en Algérie	58
2.3 Evolution de la réglementation en Algérie	60
2.3.1 Les règles de calculs	60
2.3.2 Les règles parasismiques	61
2.4 Méthode de l'indice de vulnérabilité	62
2.4.1 Principe de la méthode de l'indice de vulnérabilité	62
2.4.2 Définitions des paramètres identifiés	64
2.4.3 Détermination des coefficients de pondération	76
2.4.4 Détermination des coefficients de corrélation	77
2.4.5 Classification	78
2.5 Echelle de description des dommages	79
2.6 Conclusion	80
3. COURBES DE VULNERABILITE DES STRUCTURES EN BETON ARME	81
3.1 Introduction	81
3.2 Niveaux de dommages	81
3.3 Principe de la méthode	82
3.3.1 Matrices de probabilité de dommage (DPM)	83
3.3.2 Courbes de vulnérabilité empiriques	87
3.4 Validation des courbes de vulnérabilité empiriques	88
3.5 Conclusion	92
4. MISE EN ŒUVRE NUMERIQUE	93
4.1 Introduction	93
4.2 Elaboration de la fiche technique	93
4.3 Présentation du programme développé	101
4.3.1 Organigramme de calcul	102
4.3.2 Description du programme VP	103
4.4 Validation	108
4.4.1 Exemple 1	108
4.4.2 Exemple 2	110
4.4.3 Exemple 3	112
4.5 Exemples d'application	122
4.5.1 Exemple 01	122
4.5.2 Exemple 02	125
4.5.3 Exemple 03	128
4.6 Courbes de vulnérabilité	130
4.7 Conclusion	131

CONCLUSION

REFERENCES

132

ANNEXES

ANNEXE 01 « Calcul du paramètre capacité sismique ».

ANNEXE 02 « Calcul du poteau court ».

ANNEXE 03 « Articles publiés ».

INTRODUCTION

Les séismes sont un phénomène naturel. Ils surviennent brusquement avec des intensités variables. Lorsque ces intensités sont importantes, ces derniers peuvent provoquer des dégâts importants dans les structures et infrastructures urbaines et rurales. Afin de protéger la population ainsi que les actifs économiques il convient de conduire des études de réduction du risque sismique.

Ces études passent par la connaissance du comportement sismique des structures. Actuellement les structures les plus répandues sont en béton armé. Or ces dernières sont vulnérables à l'action sismique, preuve est les pertes enregistrées dans ce type de constructions aussi bien en Algérie (Ain Temouchent 1999, Zemouri 2003) qu'à travers le monde (Turquie 1999, Kobé 2005, Italie 2009, Fukushima 2010, etc.). La réduction des pertes sismiques devient alors une nécessité et un enjeu politique. Cette réduction passe obligatoirement par l'étude de la vulnérabilité sismique de ce type de construction.

La vulnérabilité sismique des constructions en béton armé peut être réduite par l'application des règlements parasismiques actualisés. Ceci pour de nouvelles structures, par contre pour le bâti existant, des études de vulnérabilité sismique doivent être menées afin de prendre les décisions adéquates quant au renforcement ou le remplacement de ces bâtiments.

Notre étude porte sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en béton armé (BA). A cet effet deux niveaux d'évaluations ont été développés. Un niveau analyse globale et un niveau analyse approfondie.

L'analyse globale utilise l'indice de vulnérabilité comme outil de diagnostique. Cet outil permettra une classification des bâtiments étudiés.

L'analyse approfondie se base sur les courbes de vulnérabilité. Ces dernières ont été développées pour le bâti algérien afin d'estimer les pertes qui pourraient résulter d'un tremblement de terre d'une intensité donnée.

Ces analyses ont été élaborées et nous les présentons dans le cadre de ce manuscrit sous quatre chapitres plus une introduction générale et une conclusion générale.

Dans l'introduction générale nous donnons le contexte de l'étude ainsi que l'organisation de la thèse.

Le premier chapitre porte sur l'étude bibliographique des méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des constructions et des centres urbains, les plus répandues à travers le monde.

Dans le deuxième chapitre, et après avoir présenté l'évolution des règles de calcul et de la réglementation parasismique, en Algérie, nous avons développé une méthode d'estimation de vulnérabilité des constructions en béton armé basée sur la méthode de l'indice de vulnérabilité. Les paramètres les plus influant sur le comportement sismique des structures en BA ont été identifiés et présentés ainsi que leurs coefficients de pondération, suite à une étude statistique. Cet indice, nous a permis de proposer une classification des constructions selon leurs degrés de vulnérabilité. Cinq classes de vulnérabilité ont été alors proposées.

Dans le troisième chapitre, nous avons utilisé une approche statistique et probabiliste pour l'estimation de la vulnérabilité à grande échelle. Cette approche consiste à identifier des matrices de probabilité de dommage pour chaque classe de vulnérabilité proposée. Ces matrices expriment la quantification de niveau de dommage correspondant à différentes intensités sur l'échelle MMI. Nous avons utilisé la loi de probabilité « bêta » pour calculer des matrices de probabilité de dommage continues. Le taux de dommage moyen est calculé en fonction de l'indice de vulnérabilité moyen pour chaque classe de vulnérabilité et l'intensité sismique. A partir de ce taux de dommage, nous avons tracé les courbes de vulnérabilité semi-empiriques pour chaque classe de vulnérabilité.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté le programme développé en Delphi et appelé VP (Vulnerability Program). Ce dernier se compose de deux autres programmes le VIP (Vulnerability Index Program) et le PVC (Program for Vulnerability curves). Le VIP permet de calculer l'indice de vulnérabilité d'une construction et donne sa classification vis à vis de l'action sismique. Le PVC calcule le taux de dommage moyen pour une intensité donnée, ce qui permet de réaliser des scénarii d'endommagement sismique des structures étudiées et de tracer leur courbe de vulnérabilité. Le VIP et le PVC peuvent s'utiliser indépendamment l'un de l'autre ou bien consécutivement l'un après l'autre (le VIP puis le PVC) selon l'étude voulue.

La validation du VP s'est faite à travers l'étude de plusieurs exemples dont les résultats obtenus ont été comparés à ceux fournis par un organisme de contrôle. Des exemples d'application ont été présentés également. Les résultats obtenus sont en adéquation avec et les conclusions des expertises et la réalité du terrain.

Enfin, une conclusion générale est donnée. Cette dernière comprend les principaux résultats présentés ainsi que quelques recommandations à la présente étude.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Depuis toujours la civilisation et les constructions des villes ont une relation très liée, car fonder des villes et construire des lieux d'habitation est une des impulsions que l'on reçoit dans la vie sédentaire [Ibn Khaldoun, 1377]. Les grandes villes sont des emplacements dans lesquels les peuples s'installent pour vivre à demeure fixe; ce qui a lieu lorsqu'ils ont atteint le but qu'ils avaient en vue, celui de jouir du bien-être et de satisfaire aux exigences du luxe. Ce désir de la tranquillité et du repos les porte à construire des habitations avec l'intention d'y rester. Or, ces villes doivent servir de lieux de résidence et de refuge aussi [Ibn Khaldoun, 1377].

Ces villes peuvent être exposées aux catastrophes naturelles telles que les volcans, les inondations, les séismes... etc. [AFPS, 2005]. Ces catastrophes naturelles provoquent des pertes en vies humaines et économiques [Schmid, 2006], [N U, 1998]. La réduction du risque sismique devient, alors, une priorité dans les politiques de gestion des pays afin de protéger les citoyens, les propriétés et les infrastructures.

L'Algérie comme d'autres pays au monde est exposée à ces catastrophes. La majeure partie de la population est concentrée dans les villes du nord du pays, et la plupart de ces villes sont implantées dans des zones à forte intensité sismique d'où le risque grandissant de pertes importantes en vie humaines et en infrastructures. Cette dernière décennie, plusieurs séismes importants ont causé des pertes conséquentes à certaines de ces agglomérations (Ain Timouchent 1999, Zemouri 2003). La réduction des pertes sismiques devient alors une nécessité et un enjeu politique. Cette réduction passe obligatoirement par l'étude de la vulnérabilité sismique des sites urbains.

Afin d'étudier cette vulnérabilité, il est important de définir et de préciser certaines notions de base. C'est ce qu'on se propose de faire dans le paragraphe suivant.

1.2 Notions de base

Le terme vulnérabilité peut être interprété de diverses manières suivant les milieux professionnels (assureurs, ingénieurs structures, sismologues...) et doit donc être défini de façon très précise avant d'initier tout travail sur ce thème.

Dans la littérature, la définition de la vulnérabilité sismique des bâtiments varie d'un auteur à un autre.

Ambraseys la définit comme étant le degré d'endommagement qu'infligerait un séisme de paramètre X (magnitude, intensité, amplitude,...) à une construction donnée. En d'autres termes c'est la mesure du pourcentage d'endommagement relatif à chaque élément structural exprimée dans une échelle allant de zéro (pas d'endommagement) à l'unité (perte totale de l'élément) [N U, 1998], [AFPS, 2005].

Selon Sandi, la distinction est nécessaire entre la vulnérabilité observée, V_0 , qui est évaluée à partir de l'observation de l'effet du séisme sur une construction, et la vulnérabilité prédite, V_p , qui est estimée à partir de la prédiction de l'effet qu'induirait un séisme futur sur le bâtiment. Cette définition est basée sur l'analyse du comportement de la structure en tenant compte de ses caractéristiques [N U, 1998], [AFPS, 2005].

Alors que selon Madelaigue, Nocevski, Petroveski et Milutinovic, pour exprimer la vulnérabilité d'une construction, on doit tenir compte de ses caractéristiques intrinsèques (capacité, déformation, caractéristiques des matériaux,...), d'un ou plusieurs paramètres relatifs au séisme (intensité, magnitude,...) et faire appel à une échelle d'endommagement [N U, 1998], [AFPS, 2005].

En d'autres termes la vulnérabilité est le degré de perte occasionnée à un élément ou à un ensemble d'éléments soumis à une probabilité donnée d'occurrence d'un phénomène naturel (le séisme) de magnitude donnée [N U, 1998], [AFPS, 2005].

Alors que, le terme vulnérabilité physique des bâtiments exprime que si nous avons deux (2) groupes de bâtiments soumis exactement à la même agression sismique (même distance à l'épicentre et même condition de sol) et que l'un des groupes se comporte mieux que l'autre, on dira que les bâtiments qui ont été le moins endommagés avaient une vulnérabilité plus faible que ceux qui ont été plus endommagés, on peut aussi déclarer que les bâtiments qui ont été moins endommagés étaient plus résistants aux tremblement de terre et vice-versa [Djaalali, 1997].

Les différentes définitions de la vulnérabilité expriment que cette dernière ne peut être dissociée du risque et de l'aléa. On définit, généralement, un risque comme étant une corrélation entre l'aléa (le phénomène) et la vulnérabilité.

Les définitions données lors de la décennie Internationale pour la prévention des catastrophes naturelles [Boukri, 2003], [Giovinazzi, 2005], [Schmid, 2006] sont :

- **Risque** : C'est l'expression mathématique de perte en vies humaines, blessés, dommage aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée pour un aléa particulier.
- **Vulnérabilité** d'un élément est définie comme étant le degré de perte (de 0 % à 100 %) qu'il subit lors d'une catastrophe naturelle. Sa nature et son estimation varient selon que l'élément représente une population, des structures sociales, des structures physiques, ou des actifs économiques.
- **Aléa** : il est défini comme étant l'événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région (un site) et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

Ces notions sont mises en exergue à travers la figure 1.1.

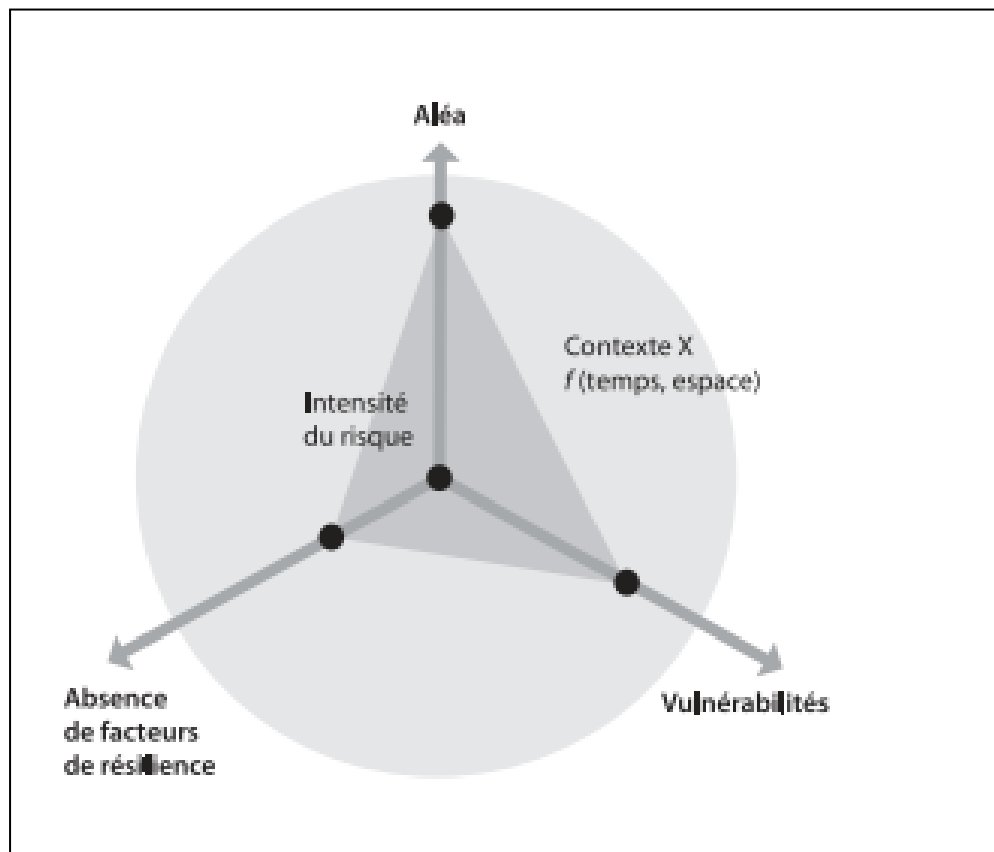


Figure1.1 : Eléments constitutifs du risque [Schmid, 2005] et [Schmid, 2006]

Sur cette base nous pouvons énoncer que le risque est une corrélation entre l'Aléa et la Vulnérabilité (Figure1.2).

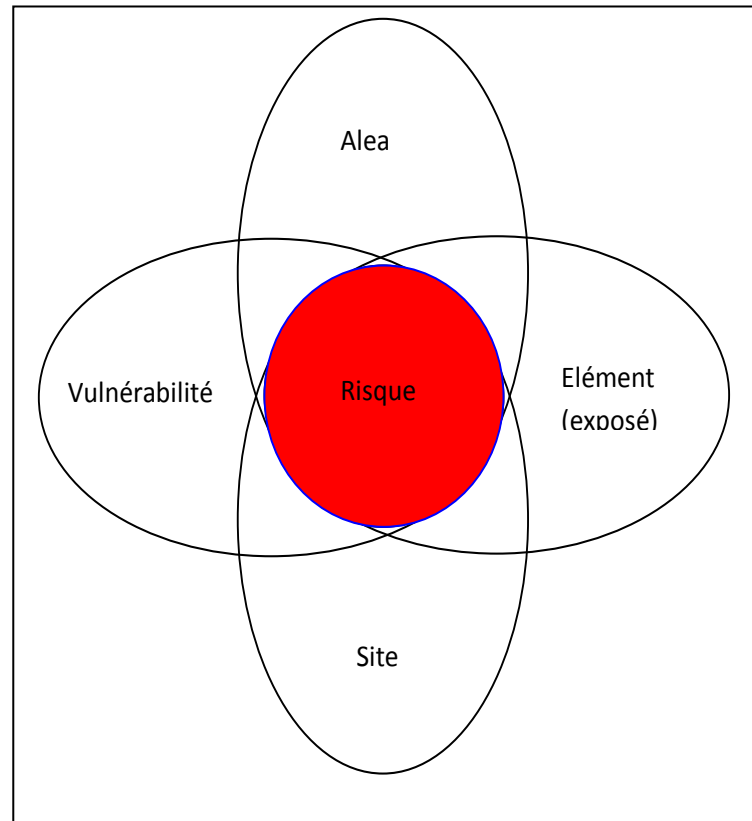


Figure1.2 : Notion de risque [Belheouane, 2006].

Dans ce qui suit, nous considérons l'aléa sismique uniquement. Il existe quatre (04) moyens classiques de représenter l'aléa sismique [AFPS, 2005], [Giovinazi, 2005] :

1) La Magnitude sismique est une mesure objective et quantitative de la taille du tremblement de terre. L'échelle la plus connue est celle de Richter [Richter, 1935] et [Musson, 2009]. Elle est définie comme le logarithme (base 10) de l'amplitude maximal (en micron) enregistrée sur un sismographe de Wood-Anderson localisé à 100Km de l'épicentre du tremblement de terre. La magnitude locale ML est définie pour (une distance d'épicentre de moins de 600 kilomètres, et une période de la secousse de 1 à 2 sec). Pour des sismographes différents et des distances appropriées des calibrages sont employés. La formule 1.1 donne le calcul de la magnitude.

$$M = \text{Log } A - \text{Log } A_0 \quad (1.1)$$

Où A est l'amplitude maximale enregistrée, LogA0 est le facteur de calibrage. D'autres échelles de Magnitude existent aussi.

2) L'intensité : c'est la mesure des effets du séisme sur les bâtiments. Purement qualitative, elle reste très utilisée car c'est la seule donnée accessible pour les séismes historiques et de nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du bâti sont basées sur ce paramètre dans des pays très sismiques comme l'Italie ou la Grèce. Ce paramètre présente l'avantage d'être parfaitement défini en Europe grâce à l'échelle d'intensité européenne EMS98. Les échelles d'intensité comportent des degrés notés en nombres romains, de I à XII. Cependant, le niveau de l'intensité n'est pas totalement indépendant de la vulnérabilité bien qu'il soit évalué à partir des dommages observés sur les constructions réparties suivant leurs typologies en sept classes de vulnérabilité [ESC,2001].

3) L'accélération maximale du sol (ou PGA, Peak Ground Acceleration) : bien qu'il représente les accélérations maximales observées lors des séismes, ce paramètre est de moins en moins utilisé car il est restrictif dans sa représentation de l'aléa. Cependant, quelques courbes d'endommagement sont encore exprimées en fonction du PGA. Il est progressivement abandonné au profit du spectre de réponse qui intègre d'autres paramètres importants tels que le contenu fréquentiel, la vitesse maximale, le déplacement maximal.

4) Le spectre de réponse : c'est la représentation de l'accélération subie par une série d'oscillateurs à un degré de liberté soumis à un accélérogramme donné. Ce paramètre est de plus en plus utilisé grâce à l'utilisation de plus en plus importante des méthodes en déplacement.

Lors de cette étude, nous nous intéresserons à l'étude de la vulnérabilité sismique des villes en considérant l'intensité sismique comme moyen de mesure de l'aléa sismique, ceci est dicté par le fait que nous ne disposons pas d'enregistrements sismiques historiques.

1.3 Historique de l'étude de la vulnérabilité sismique

Whitman et al. étaient parmi les premiers à avoir des statistiques systématiquement compilées sur les dommages aux bâtiments après des séismes réels. A partir d'un aperçu des dommages provoqués par le séisme de San Fernando, du 9 février 1971, ils ont développé des matrices de probabilité des dommages (Damage Probabilistic matrix, DPM) pour différents types de bâtiments [Lang, 2002], [Lang, 2003], [Whitman, 1973].

Chaque nombre de la matrice exprime la probabilité qu'un bâtiment d'une certaine classe atteigne un niveau de dommages pour une intensité particulière du tremblement de terre. Ce format de matrice de probabilité des dommages est devenu la forme la plus largement répandue pour définir la distribution probable des dommages [Lang, 2002].

Des fonctions de vulnérabilité pour différents types de constructions, ont été développées par Coburn et Spence [Lang, 2002]. Elles sont basées sur des données rassemblées pendant différentes études de cas de dommages provoqués par un certain nombre de séismes dans différents pays. Cinq catégories différentes de dommages sont considérées pour chaque type de bâtiments. La distribution des dommages est exprimée graphiquement par la probabilité d'une certaine catégorie de dommages donnée.

Swiss Reinsurance Company (SRC) a étudié les effets de deux séismes : celui d'Albstadt, en Allemagne, du 3 septembre en 1978, et celui du Chili centre, du 3 mars 1985. L'ampleur des dommages est exprimée par le rapport des dommages moyens des bâtiments affectés, sur le type et la dimension de la construction. Les dommages moyens sont définis comme la quantité des pertes de tous les bâtiments provoquée par le séisme. Les résultats ont été employés pour estimer le montant total des pertes en fonction de la densité des bâtiments [Lang, 2002].

L'évolution de l'étude de la vulnérabilité dans le monde a donné naissance à plusieurs méthodes d'évaluation des dommages. Ainsi, il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité des centres urbains et des constructions individuelles. Elles diffèrent les unes des autres en coût, en moyens utilisés et en précision. Le type de la méthode choisie dépend de l'objectif de l'évaluation, mais également de la disponibilité des données, du matériel et de la technologie utilisés.

1.4 Vulnérabilité sismique des ouvrages

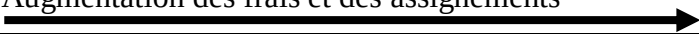
L'estimation des pertes sismiques a connue une progression importante. Après les tremblements de terre aux Etats-Unis et au Japon, durant les années 90, et le développement de la technologie des systèmes d'information géographique (SIG) ont donné de nouveaux outils puissants pour l'évaluation des pertes.

En outre, l'expérience des séismes récents a fourni beaucoup de données qui ont été utilisées dans le développement des modèles pour mieux estimer les pertes économiques dans les bâtiments et les infrastructures.

Donc, il apparaît évident que l'étude de la vulnérabilité ait fait l'objet de plusieurs recherches. Aussi, nous allons tenter d'en donner les principales.

Le tableau (1.1) ci-dessous fait la synthèse du positionnement des différentes méthodes et reflète la plupart des approches qui concernent la vulnérabilité sismique. Ces méthodes peuvent être classées suivant leur échelle d'analyse ou suivant l'approche d'analyse.

Tableau 1.1 : Classification des méthodes et positionnement des références [Lang, 02].

Dépenses	Augmentation des frais et des assignements 				
Application	Agglomération		Constructions individuelles		
Méthodes	Vulnérabilité Observée	Opinions d'expert	Les méthodes analytiques simples	score assignment	Procédures d'analyses détaillées

Ces méthodes peuvent être classées suivant leur échelle d'analyse. Elles dépendent de l'échelle : pays, région, commune, du nombre de bâtiments à analyser ainsi que du budget et du temps disponibles. On distingue plusieurs échelles d'investigation [AFPS, 2005] données dans le tableau (1.2).

Tableau 1.2 : Différentes échelles d'analyse et leur applicabilité (AFPS, 2005).

	Augmentation des moyens mis en œuvre  Temps et difficulté de calcul				
Echelle d'analyse	Plusieurs centaines de bâtiments		Quelques bâtiments		Bâtiment individuel
Méthodes	Vulnérabilité - Hazus - Radius - EMS98 - RISK-UE	Indice de vulnérabilité	Avis d'expert Calculs	analytiques simples	Analyse numérique modélisation
Applicabilité	Ville – Commune – quartier – parcs immobiliers – bâtiments stratégiques				
Moyen humain	Sans formation - Etudiant- technicien – Ingénieur - ingénieur confirmé				

D'après le tableau (1.2), la représentation de la vulnérabilité de la zone d'étude sera d'autant plus fine que la méthode sera précise et donc le coût important. Il faut donc trouver un compromis entre le coût de l'analyse, l'échelle de précision et la qualité de l'évaluation. Selon le besoin, le budget et le temps disponibles, il faut premièrement déterminer l'échelle d'analyse pour estimer de façon approchée les dommages engendrés par un séisme. Il existe trois échelles d'analyses qui sont :

a- Les analyses très globales

Les analyses des pertes très globales, utilisent directement les répartitions statiques des dommages des échelles d'intensité. Différentes échelles d'intensité Macroséismique sont utilisées partout dans le monde. Les pays anglo-saxon font référence à l'échelle de Mercalli modifiée (MMI) à l'origine développée par le sismologiste italien Mercalli et modifiée en 1931 pour représenter mieux des conditions en Californie [Richter, 1958]. L'agence météorologique du Japon (JMA) a sa propre échelle d'intensité. Il y a aussi l'échelle EMS 98 développée comme clé de référence pour les pays européens, remplaçant l'échelle de Medvedev-Spoonheuer-Karnit (MSK). Le tableau (1.3) représente une comparaison des valeurs d'intensité entre les différentes échelles d'intensités citées.

Tableau 1.3 : Comparaison des valeurs d'intensité entre les différentes échelles d'intensité (MMI, JMA, MSK et EMS98). [Giovinazzi, 2005] [Musson, 2009].

MMI	JMA	MSK	EMS 98
I	0	I	I
II	I	II	II
III		III	III
IV	II	IV	IV
V	III	V	V
VI	IV	VI	VI
VII	V	VII	VII
VIII		VIII	VIII
IX	VI	IX	IX
X		X	X
XI	VII	XI	XI
XII		XII	XII

b- Les analyses globales

Les bâtiments ne sont pas analysés individuellement, mais de façon statique. Le traitement des données recueillies sur le parc immobilier, vise généralement à classer les bâtiments dans les typologies prédéfinies. Ces analyses sont désignées généralement par méthodes de niveau 1 [AFPS, 2005].

c- Les analyses précises

Les bâtiments sont analysés individuellement avec des méthodes simplifiées. Ces analyses sont désignées généralement par méthodes de niveau 2 [AFPS, 2005].

Une fois l'échelle de l'analyse définie. Nous pouvons passer à l'estimation des pertes et des dommages dans les constructions. Dans ce qui suit, nous allons donner les principales méthodes.

1.5 Méthodes d'estimation des dommages pour les constructions

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'estimation des dommages dans les bâtiments, nous avons :

1.5.1 Méthode de l'ATC21

L'analyse d'un bâtiment par la méthode de l'ATC21, développée par l'ATC (Applied Technology Council), doit permettre de déterminer son type en le rattachant à une typologie précise. Les principales typologies publiées dans l'ATC21 [ATC21, 1988], puis reprise dans le rapport 154 de la FEMA en 1988 [FEMA154, 1988] sont :

- Bâtiment en bois (W-wood frame).
- Portique en charpente métallique (S1-Steel MRF).
- Charpente métallique contreventée (S2-Braced Steel Frame).
- Structures métalliques légères (S3- Light Metal).
- Portique métallique avec murs en béton armé (S4- Steel Frame W/ Concrete SW)
- Portique en béton armé (C1- RC MRF).
- Murs porteurs en béton armé (C2- RCSW NO MRF)
- Portique avec remplissage en maçonnerie non armée (C3/S5).
- Bâtiment à murs porteurs préfabriqués (PC- Tilt up).
- Portique en béton préfabriqué (PC2 - PC Frame).
- Maçonnerie armée (RM- Reinforced Masonry)
- Maçonnerie non armée (URM- Unreinforced Masonry)

L'ATC21 comporte plus de 90 typologies différentes en fonction des hauteurs de l'ouvrage et de l'année de sa construction. Ce qui rend difficile son utilisation [AFPS, 2005], [Giovinazzi, 2005] et [Rossetto, 2003].

Une fois la typologie définie, l'indice de vulnérabilité de base de chacune de ces typologies, appelé BSH (Basic Structural Hazard), est donné en fonction des critères structuraux relevés lors de l'expertise visuelle et qui dépend de la sismicité du site. L'indice BSH est d'autant plus faible que la sismicité est forte. Dans cette méthode, on définit trois niveaux de sismicité : faible, moyen et fort. Le tableau (1.4) suivant exprime

les valeurs des indices de vulnérabilité de base pour les principales typologies de l'ATC21, en fonction des trois niveaux de sismicité :

Tableau 1.4 : Valeurs des indices de vulnérabilité de base pour les principales typologies de l'ATC21 en fonction des trois niveaux de sismicité.

Typologie	Sismicité		
	Faible	Moyenne	Forte
W : Bois	8.5	6.0	4.5
S1 : Acier	3.5	4.0	4.5
S2 : Acier avec contreventement	2.5	3.0	3.0
S3 : Métal. Légère	6.5	6.0	5.5
S4 : Portique acier avec murs béton	4.5	4.0	3.5
C1 : Portique béton armé	4.0	3.0	2.0
C2 : Murs béton armé	4.0	3.0	2.0
C3/S5 : Remplissage maçonnerie	3.0	2.0	1.5
PC1 : Voiles préfabriqués	3.5	3.5	2.0
PC2/ Portiques préfabriqués	2.5	2.0	1.5
RM : Maçonnerie armée	4.0	3.5	3.0
URM : Maçonnerie non armée	2.5	2.0	1.0

Les typologies définies dans l'ATC21 représentent des bâtiments construits en Amérique du nord, ce qui rend difficile leurs utilisations dans d'autres régions du monde.

1.5.2 Méthodologies ATC14 et ATC40

C'est le conseil de la technologie appliquée ATC qui a développé la première méthodologie complète pour l'évaluation des bâtiments existants (ATC14). La méthodologie vise à identifier les faiblesses qui pourraient causer la défaillance de la structure. Ces faiblesses ont été déterminées à partir d'un examen détaillé des bâtiments endommagés lors de séismes passés. 15 types de modèles de bâtiments sont distingués comportant principalement tous les types de matériaux de construction [Lang, 2002].

Quelques années après, la FEMA a conçu un manuel pour l'évaluation des bâtiments existants (FEMA178) utilisant l'information et les procédures développées dans le rapport de l'ATC14 [Lang, 2002] et [Giovanezzi, 2005].

La société américaine des ingénieurs en génie civil (ASCE : American Society of Civil Engineering) a passé un contrat avec la FEMA pour convertir le manuel (FEMA178) en pré-standard comme première étape pour le transformer, ensuite, en norme nationale approuvée. Le document résultant a été élaboré en 1998 et édité comme (FEMA310) [Lang, 2002] et [Giovanezzi, 2005].

Dans la méthodologie FEMA310, trois niveaux d'évaluation sont proposés [AFPS, 2005]:

- Le premier, dit le niveau 1 : Présomption de vulnérabilité, il vise à identifier les bâtiments qui n'atteignent pas un niveau de performance requis. Deux niveaux de performances sont proposés à savoir la Sauvegarde des Vies Humaines (SVH) et la Fonctionnalité Immédiate (FI). L'analyse du niveau 1 est menée en relevant pour chaque structure une série d'indicateurs qualifiant la structure, portant principalement sur :
 - Le type de structure et des systèmes porteurs ;
 - Les éléments non structuraux ;
 - L'état de la structure ;
 - L'interface sol- fondation.
- Le deuxième, dit niveau 2 : C'est l'approche quantitative. Elle consiste à appliquer une méthode élastique linéaire simplifiée aux bâtiments déclarés non conformes par la méthode de niveau 1, qui ne nécessitent pas de réhabilitation, et qui sont, donc, réellement vulnérables. Une analyse de niveaux trois est alors envisagée.
- Le troisième, dit de niveau 3 : C'est l'analyse approfondie. Elle consiste à employer des méthodes statiques ou dynamiques linéaires ou non linéaires, au choix du responsable du diagnostic. Ces méthodes s'inspirent des travaux de l'ATC40. Applicable pour les constructions en béton armé, elle a été publiée aux Etats-Unis en 1996 [ATC40, 1996].

L'application de la méthodologie FEMA310 pour évaluer des bâtiments publics en Suisse, est passée par les trois niveaux proposés dans cette méthodologie [Lang, 2002].

Ces méthodes sont particulièrement appréciées et très en vogue depuis leur publication. Mais il apparaît évident que leur complexité et les méthodes de calcul pour obtenir les courbes de capacité imposent des compétences élevées en dynamique des structures. Car ces courbes de capacité expriment la capacité d'une structure à atteindre ou non un point de performance en fonction des déplacements. La vulnérabilité exprimée par ces courbes de capacité ne dépend que des caractéristiques des bâtiments et non d'une agression sismique [AFPS, 2005].

1.5.3 Méthodologie d'IZIIS

La 'Méthodologie d'IZIIS' a été développée à l'institut d'engineering et de sismologie (institut IZIIS en Macédoine) et adoptée dans le règlement parasismique de l'ex-Yougoslavie. Cette méthodologie permet d'estimer la vulnérabilité sismique des structures en se basant sur l'évaluation de la capacité portante de celles-ci en termes d'effort et de déplacement ainsi que sur l'analyse de leur comportement linéaire et non linéaire lorsqu'elles sont soumises à une sollicitation sismique [Boukri, 2003]. Cette méthode a été appliquée à l'étude de 52 bâtiments avec un model simplifiée [Belmouden, 2006], elle a été appliquée aussi à l'étude de la vulnérabilité des bâtiments stratégique de la ville d'Alger menée par le Centre Nationale de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) [Mehenni, a, 2000], [Belarbi-Mehenni, 2000] [Mehenni, b, 2000].

1.5.4 Méthodologie EPM

La Méthodologie EPM a été élaborée à l'Ecole Polytechnique de Milan. Elle consiste à évaluer la capacité de la structure ainsi que la corrélation entre les résultats de l'analyse capacitaire et ceux donnés par le code parasismique en vigueur, ce qui permet une estimation du facteur de sécurité de la structure [Boukri, 2003], [Djaalali, 1997].

1.5.5 Méthodologie EMS [European Macrosiesmic Scale]

La définition de l'échelle d'intensité macro-sismique Européenne EMS98 permet d'estimer les dommages observés sur différents types de structure. Cette méthode utilise l'intensité comme donnée d'entrée du séisme. Elle a été définie à l'origine pour caractériser les régions autour des épicentres des séismes en fonction des effets sur les constructions, les objets et les personnes. Dans le cadre d'une analyse de vulnérabilité, son application est détournée en ce sens qu'on décrit les dommages probables en fonction de l'intensité, sur la base des répartitions statistiques des dommages observés par typologie [Lang, 2002], [Giovanezzi, 2005].

Afin de mesurer la force du mouvement au sol dans une région par l'échelle macro-sismique européenne (EMS) ainsi que la description des dommages, différentes fonctions de vulnérabilité ont été déduites par l'étude d'un petit projet de scénario de tremblement de terre de la ville de Bâle. Ce projet a servi à l'étude préliminaire du scénario de séisme pour la Suisse. Quinze (15) types de structures et six (06) classes de vulnérabilité sont distingués pour chaque ville étudiée en Suisse. Le pourcentage des bâtiments d'une classe de vulnérabilité était estimé par une enquête de rue [Lang, 2002], [Giovanezzi, 2005].

Les différentes typologies sont présentées dans le tableau (1.5), et pour chaque type de construction est attribuée une classe de vulnérabilité la plus probable et son incertitude [AFPS, 2005], [ESC, 2001].

Tableau 1.5 : Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée
[AFPS, 2005].

Typologie des Structures		Classe de Vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut - pierre tout-venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	—	○				
	Pierre Massive		—	○	—		
	Maçonnerie non armée avec des éléments préfabriqués	—	○	—			
	Maçonnerie non armée avec des planchers en béton armée		—	○	—		
	Maçonnerie renforcée ou chaînée			—	○	—	
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique	—		○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de conception parasismique		—		○	—	
	Ossature avec un bon niveau de conception parasismique			—		○	—
	Murs en béton armé sans conception parasismique	—	○	—			
	Murs en béton armé avec un niveau moyen de conception parasismique		—	○	—		
	Murs en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique			—		○	—
					—	○	—
BOIS ACIER	Bâtiments en charpente métallique			—		○	—
BOIS	Bâtiments en bois de charpente		—		○	—	

○ classe de Vulnérabilité — gamme la plus probable
--- gamme la moins probable, cas exceptionnel

On constate que cette méthode est certes très sommaire mais, dans le cas où une typologie détaillée de la zone d'étude est disponible avec sa répartition spatiale de bâtiments, il est possible d'avoir une première identification des zones les plus vulnérables, ainsi qu'une première estimation des dommages. Cette évaluation peut se définir comme le niveau 0 de l'analyse. L'EMS98 acceptée comme un standard en Europe met aussi à

disposition une typologie générique pour la plupart des constructions que l'on trouve en Europe [AFPS, 2005].

1.5.6 Méthode italienne GNDT

Une méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité et des dommages pour des scénarii de tremblements de terre a été également développée et appliquée avec succès à la ville de Catane, en Italie, appelée GNDT, du nom de ses promoteurs : le Groupe National pour la Défense contre les Séismes (National Group for Défense from Earthquakes ou Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti) [GNDT, 2000] [Lang, 2002] et [Giovanezzi, 2005].

La méthode GNDT a été établie en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé [GNDT, 2000] et [AFPS, 2005]. Nous donnons ci-après leurs principales caractéristiques :

a. La méthode GNDT pour les constructions en maçonnerie

La méthode GNDT pour les constructions en maçonnerie est basée sur les travaux de Beneditti et Petrini [Giovanezzi, 2005] et [Beniditti, 1988].

La caractérisation de la vulnérabilité d'une structure en maçonnerie a été définie sur les dommages observés essentiellement dans deux villes italiennes, Venzone et Barrea, après le séisme destructeur d'Irpinia. Le nombre de constructions en maçonnerie ayant subi des dommages fut suffisamment important pour pouvoir établir des relations entre les caractéristiques structurales et le taux d'endommagement. Deux niveaux d'analyse étaient utilisés qui traduisaient la qualité et la quantité d'informations disponibles à partir du diagnostic visuel effectué par les enquêteurs [AFPS, 2005].

- Le niveau 1 ou Level I : consistait à rechercher des informations générales facilement repérables sur la structure. Ils traitent de la localisation de la structure, de son usage, de son état de conservation, de sa géométrie et de ses matériaux de construction. Les paramètres relatifs à la géométrie et aux matériaux de construction regroupent les données concernant la surface, la hauteur de chaque étage, ainsi que la hauteur totale de la structure, et la nature des systèmes porteurs verticaux et des planchers.

- Le niveau 2 ou Level II: Cette méthode est fondée sur l'approche de Benedetti et Petrini [Benedetti, 1984], [Benedetti, 1988]. Elle est basée sur des observations visuelles pour identifier le système structural primaire des bâtiments et leurs caractéristiques sismiques rassemblées par des enquêtes sur terrain. Ce niveau caractérisait de façon plus précise la structure grâce aux paramètres (11 paramètres) donnés par la méthode. Quand certains paramètres du niveau 2 ne pouvaient être renseignés, ils étaient évalués sur la base des informations de niveau 1. La définition d'un indice de vulnérabilité, à partir des onze (11) paramètres structuraux identifiés à priori comme participant à la vulnérabilité globale de la structure, permettait de donner une estimation de la qualité sismique de la construction. Les 11 paramètres identifiés sont reportés dans le tableau (1.6) suivant:

Tableau 1.6 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie [AFPS, 2005].

1	Type et organisation du système résistant
2	Qualité du système résistant
3	Résistance conventionnelle sous chargement horizontal
4	Localisation de la structure et fondation
5	Caractéristiques des planchers
6	Irrégularité en plan
7	Irrégularité en élévation
8	Distance entre murs
9	Caractéristiques des toitures
10	Eléments non structuraux
11	Etat de conservation ou maintenance

Pour chaque paramètre on définit la classe de vulnérabilité comprise entre A et D. La moins vulnérable est la classe A. Elle traduit la conformité de ce paramètre vis à vis de l'intégrité de la structure. La plus vulnérable est la classe D, qui traduit la situation la plus

défavorable, tandis que les classes B et C représentent des situations intermédiaires [AFPS, 2005].

L'indice de vulnérabilité de base IV se calcule comme la somme pondérée des coefficients identifiés. Le tableau (1.7) suivant montre que chaque paramètre structural est caractérisé par une classe de vulnérabilité, noté entre A et D, et par une pondération (W_i) pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement global de la structure [AFPS, 2005].

Tableau 1.7 : Classe de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir d'endommagements observés [AFPS, 2005], [Benedetti, 1988].

Paramètre	A	B	C	D	<u>W_i</u>
1	0	5	20	45	1.00
2	0	5	25	45	0.25
3	0	5	25	45	1.50
4	0	5	25	45	0.75
5	0	5	15	45	var
6	0	5	25	45	0.50
7	0	5	25	45	var
8	0	5	25	45	0.25
9	0	15	25	45	var
10	0	0	25	45	0.25
11	0	5	25	45	1.00

Pour les paramètres 5,7 et 9, la pondération W_i varie entre 0.5 et 1, suivant la classe de vulnérabilité [AFPS, 2005].

Cette méthodologie présente l'avantage de reposer sur des analyses statistiques du comportement des structures en maçonnerie lors de l'occurrence sismique. Mais, l'application de cette méthode demande un expert pour le choix des valeurs de pondération des paramètres 5,7 et 9 [AFPS, 2005].

b. La méthode GNDT pour les constructions en béton armé

Cette méthode est basée sur l'approche de l'index de vulnérabilité développée par l'institut de la recherche sur le risque sismique (Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico), et appliquée à la région de Lombardie [IRS, 1996], [Giovanezzi, 2005].

Comme pour les bâtiments en maçonnerie, deux niveaux de relevés ont été établis pour l'estimation de la vulnérabilité des bâtiments en béton armé [AFPS, 2005]

Le niveau 1 : est très similaire à celui de la maçonnerie, si ce n'est la définition de la nature des éléments porteurs verticaux, horizontaux, des étages et de la toiture. Cette différence se traduit dans la définition des classes de vulnérabilité du paramètre I : type et organisation de système résistant. Mis à part cette évolution, les autres informations recherchées dans l'analyse de niveau 1 sont identiques à la maçonnerie.

Le niveau 2 : était à l'origine similaire à celui des bâtiments en maçonnerie. Les seules différences portent sur les paramètres : *distance entre murs* et *type de toiture* (paramètres 8 et 9), qui sont remplacés par les paramètres suivants [AFPS, 2005]:

- *Connections et éléments critiques.*
- *Poteaux courts (ou éléments fragiles)*

Ainsi, la nouvelle version prend en compte différents types d'informations concernant la géométrie du bâtiment, la géométrie et la position des éléments résistants, le type de matériaux et l'état d'entretien. Ces paramètres se distinguent suivant qu'ils sont qualitatifs ou quantitatifs. Cependant, ces informations restaient imprécises pour rendre compte, le mieux possible, des caractéristiques de renforcement du béton. D'autres incertitudes résidaient, en particulier, sur la recherche d'informations sur la dimension et le nombre de poteaux et de poutres, ainsi que sur la qualité des matériaux et sur la présence ou non de fondation. Tous ces paramètres contrôlant fortement la résistance de la structure. Cette méthode a été testée sur 400 bâtiments publics localisés dans la région d'Emilia Romagna en l'Italie. A partir de ces 400 bâtiments analysés, une typologie, composée de 8 types de constructions, a été proposée avec les courbes de capacité associées à chaque type [AFPS, 2005].

A la base de cette analyse, la vulnérabilité des bâtiments en béton armé repose donc, comme pour la maçonnerie, sur la recherche de points structuraux particuliers, présentés dans le tableau (1.8) suivant [AFPS, 2005] :

Tableau 1.8 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé [AFPS, 2005].

1	Type et organisation du système résistant
2	Qualité du système résistant
3	Résistance conventionnelle sous chargement horizontal
4	Localisation de la structure et fondation
5	Caractéristiques des planchers
6	Régularité en plan
7	Régularité en élévation
8	Connections et éléments critiques
9	Eléments fragiles (poteaux courts)
10	Eléments non structuraux
11	Maintenance
12	Qualité des matériaux

La méthode GNDT est un outil d'évaluation de la vulnérabilité des constructions en maçonnerie ou en béton armé. Donc, cette méthode peut être appliquée pour les villes. Mais, pour une bonne évaluation, cette méthode nécessite une auscultation visuelle plus exhaustive de chaque bâtiment, rendant la méthode d'évaluation à grande échelle coûteuse.

1.5.7 Méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Espagne

Cette méthode est basée aussi sur l'approche de Benedetti et Petrini, et a été développée par F. Yapéze et al. en 1995. C'est une méthode qui permet d'obtenir des matrices de probabilité de dommages et des fonctions de vulnérabilité pour des bâtiments. Le comportement de la maçonnerie non-renforcée typique et des bâtiments en béton armé existant dans la région spécifique, est simulé pour différents niveaux d'action sismique prévue dans cette région. La qualité sismique structurale des bâtiments est évaluée en employant l'indice italien de vulnérabilité, utilisé pour des études à grande échelle. Cet indice a été amélioré par l'analyse probabiliste et par le procédé de calibrage des résultats, en employant l'information de dommages réels de la région endommagée. Les matrices et les fonctions de vulnérabilité sont obtenues et appliquées à l'étude de la région de

Barcelone, en Espagne. Des scénarii de dommages pour cette région ont été développés [Yépèz, 1996].

La méthode de l'indice de vulnérabilité a été choisie pour les évaluations sismiques structurales. Les paramètres les plus importants ayant une influence sur les dommages dans les bâtiments sont clairement identifiés et individuellement quantifiés, dans une échelle numérique. Pour souligner l'importance relative de ces paramètres, on emploie les valeurs observées (tableau 1.8). La classification finale du bâtiment est faite en fonction de l'indice de vulnérabilité, I_v , pour les structures en maçonnerie [Yépèz, 1996].

L'indice des dommages est défini comme une combinaison des valeurs assignées aux différents composants structuraux et non-structuraux, données comme pourcentage. Cependant, l'étude du tremblement de terre du 23 décembre 1993 et celui du 4 janvier 1994, produits en Espagne du sud, a permis la classification de beaucoup de structures en maçonnerie et en béton armé qui ont été sérieusement endommagées [Yépèz, 1996].

Les indices de vulnérabilité et de dommages ont été déterminés pour chaque bâtiment de maçonnerie étudié et les fonctions de vulnérabilité pour les intensités VII et VIII sur l'échelle MSK ont été obtenues au moyen d'une analyse statistique [Yépèz, 1996] et [Barbat, 1996].

Le tableau (1.9) représente les facteurs utilisés dans la méthode ainsi que leurs coefficients :

Tableau 1.9 : Paramètres de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie et en Béton armé, appliquée en Espagne [Yépèz, 1996].

n°	Type de la structure	Maçonnerie					Béton armé		
	Les paramètres	Ki=A	Ki=B	Ki=C	Ki=D	Wi	Ki=A	Ki=B	Ki=C
1	Système de contreventement	0	5	20	45	1.00	0.00	-1.00	-2.00
2	Qualité du système de contreventement	0	5	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
3	La capacité sismique	0	5	25	45	1.50	0.25	0.00	-0.25
4	Type du sol	0	5	25	45	0.75	0.00	-0.25	-0.50
5	Diaphragme horizontal	0	5	25	45	1.00	0.00	-0.25	-0.50
6	Régularité en plan	0	5	25	45	0.50	0.00	-0.25	-0.50
7	Régularité en élévation	0	5	25	45	1.00	0.00	-0.50	-1.50
8	Qualité des nœuds	0	5	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
9	Phénomène du poteau court	0	15	25	45	1.00	0.00	-0.25	-0.50
10	Eléments non structuraux	0	5	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
11	Maintenance	0	5	25	45	1.00	0.00	-0.50	-1.00

Le calcul de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie est donné par la formule suivante [Yépèz, 1996] :

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i * W_i \quad (1.2)$$

Les formules normalisées pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des constructions en béton armée sont données comme suit [Yépèz, 1996] :

$$I_c = \sum_{i=1}^{11} K_i$$

$$I_v = -10.07 * (I_c - 0.25) \quad \text{si} \quad I_c \geq -6.5 \quad (1.3)$$

$$I_v = 67.972 - 1.31 * (I_c + 6.5) \quad \text{si} \quad I_c < -6.5 \quad (1.4)$$

Les taux d'indice sont précédés du signe moins (-) mais l'indice de vulnérabilité de la construction est déterminé par la valeur absolue des nombres, sans tenir compte du signe, sinon, cela n'aurait pas de sens.

1.5.8 Méthode Canadienne

Cette méthode, présentée par l'Institut de Recherche en Construction (IRC) du Conseil National de Recherches Canadien (CNRC), s'inspire de l'ATC21, l'ATC22 et l'ATC14.

Cette méthode comporte deux (2) niveaux d'analyse [CETE, 2008] :

- Le premier niveau : est une méthode de sélection des bâtiments en attribuant un indice de vulnérabilité à chaque bâtiment dans le but de les classer, en vue de déterminer la nécessité d'une évaluation sismique plus détaillée.

Cette méthode est basée sur une inspection intérieure et extérieure rapide de chaque bâtiment ou de ses plans. On consigne les renseignements relatifs à chaque bâtiment sur un formulaire standard de sélection sismique, en vue d'obtenir un pointage qui sert à déterminer l'Indice de Priorité Sismique (IPS) de chaque bâtiment. Plus l'IPS est élevé, plus le degré de priorité pour une évaluation ultérieure est élevé. On utilise ensuite les indices pour classer tous les bâtiments de l'inventaire en vue d'une évaluation sismique détaillée (niveau 2), en éliminant ceux qui n'exigent pas un examen plus approfondi. Les valeurs suggérées pour classer les bâtiments sont :

- < 10 : faible priorité pour une évaluation plus détaillée
- entre 10 et 20 : priorité moyenne
- > 20 : priorité élevée.

Les facteurs clés pris en compte dans la détermination de l'IPS sont la sismicité de la zone, les conditions du sol, le type de structure, les irrégularités de structure et la présence d'éléments non structuraux présentant un danger. Elle est basée également sur l'importance du bâtiment qui dépend de son utilisation et de sa catégorie d'occupations.

- Le deuxième niveau est une méthode d'évaluation sismique des bâtiments consistant non seulement à déceler les faiblesses du système structural, mais aussi à évaluer les dangers pour la sécurité des personnes. Elle est centrée sur un ensemble de questions visant à détecter les défauts et les faiblesses du bâtiment. Les questions sont posées sous forme d'énoncés d'évaluation positifs décrivant des caractéristiques de bâtiment essentielles

pour éviter les défaillances observées lors de séismes passés. L'ingénieur évaluateur examine chaque énoncé et détermine s'il est vrai ou faux. Les énoncés vrais reflètent des situations qui sont acceptables. Les énoncés faux signalent des problèmes ou des préoccupations exigeant une étude plus approfondie.

Ce second niveau se divise donc en deux phases. La première phase consiste à effectuer une évaluation initiale rapide du bâtiment par une étude sur place et un examen des plans du bâtiment. La seconde phase de la méthode d'évaluation met l'accent sur une étude des lieux et des analyses structurales détaillées en vue de déterminer si les énoncés « faux » indiquent des faiblesses réelles.

La méthode canadienne est utilisable pour tous les types de bâtiment : maçonnerie, béton armé, structure métallique, structure en bois. Cependant elle ne vise pas les petits bâtiments couverts par la partie 9 du code national du bâtiment du Canada, comme les maisons unifamiliales ou les petites maisons plurifamiliales. Les grandes tours et les bâtiments spéciaux sont également exclus.

1.5.9 Méthode Japonaise

Le Japon fut en 1977 le premier pays à publier une méthode normalisée pour la réévaluation sismique des bâtiments existants, appelée JSIM (Japanese Seismic Index Method) [Calvi et al., 2006]. Cette norme a été mise à jour en 1990 et 2001 pour tenir compte des derniers développements scientifiques. La méthode a été développée pour les bâtiments courants, en béton armé, de faible hauteur. [JBDPA, 2001], [CETE, 2008].

La performance sismique du bâtiment est représentée par un indice de performance sismique « I_s » qui doit être calculé pour chaque étage et dans les deux directions principales, selon l'équation [CETE, 2008] :

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \quad (1.5)$$

où :

- E_0 est appelé indice structural de base.

- S_D l'indice d'irrégularité du bâtiment. Il quantifie l'effet des diverses irrégularités structurelles et géométriques sur le comportement de la structure, il prend les caractéristiques particulières du bâtiment comme :
 - La régularité géométrique et les dimensions en plan,
 - Les dimensions des joints de construction,
 - La présence d'un sous-sol partiel,
 - L'uniformité des hauteurs d'étages,
 - La présence d'un étage souple, aggravé éventuellement d'un excentrement.
- T est un indice de vieillissement relatif à la dégradation de la structure au cours du temps. Il est introduit pour tenir compte de l'influence de défauts structurels tels que la fissuration, le vieillissement des matériaux, etc.

Cet indice est également obtenu d'une vérification qualitative :

- des déformations observées (inclinaison, tassement différentiels, flèche importante de certains éléments structurels),
- de la fissuration des murs et des poteaux, corrosion des aciers,
- de l'âge du bâtiment
- de l'état de revêtement.

Une fois l'indice de performance sismique « I_s » calculé, celui-ci doit être comparé avec l'indice de demande sismique « I_{s0} » calculé selon la formule [CETE, 2008]:

$$I_{s0} = E_s \times Z \times G \times U \quad (1.6)$$

Avec :

- E_s est un coefficient qui vaut 0.8 pour le premier niveau et 0.6 pour les niveaux suivants, pour tenir compte de la plus grande incertitude portant sur le premier niveau d'évaluation.
- Z caractérise le niveau d'aléa selon la localisation du bâtiment.
- G est un paramètre de sol qui tient compte de l'interaction sol/ structure ainsi que des effets de site lithologiques et topographiques,
- U dépend de l'usage du bâtiment et doit être considéré comme facteur d'importance.

Dans la pratique, le facteur ZG est choisi égal à l'accélération spectrale (en g) correspondant à la période fondamentale du bâtiment considéré. Une répartition triangulaire est suggérée pour répartir cet indice sur la hauteur du bâtiment.

Donc trois possibilités sont envisagées :

- Si $I_s > I_{s0}$: le bâtiment est considéré comme sûr.
- Si $I_s \ll I_{s0}$: le bâtiment est à haut risque. Le renforcement ou la démolition doit être envisagée.
- Si $I_s < I_{s0}$: l'évaluation est incertaine et un diagnostic plus poussé doit être effectué à l'aide d'une approche de niveau supérieur.

Donc, on peut dire que cette méthode prend en compte un grand nombre de paramètres influant sur le comportement sismique du bâtiment, et chaque facteur de vulnérabilité est étudié en détail. Mais l'inconvénient de cette méthode est qu'elle n'est applicable qu'aux structures de faibles hauteurs en béton armé. De plus la comparaison de I_s par rapport à I_{s0} nécessite de préciser la frontière entre petit et très petit, or ceci n'est pas spécifié.

D'autres méthodes ont été développées au Japon, comme la méthode d'estimation de vulnérabilité sismique des bâtiments irréguliers en béton armé par le Professeur Otani Shunsuke [Otani, a, 2000] et [Otani, b, 2000].

Remarques

D'autres méthodes ont été développées dans le monde [Solomon, 2010]. Ainsi en Turquie, il a été développé une méthode probabiliste appliquée [Askan, 2010], une méthode d'estimation de vulnérabilité et évaluation des risques de 170 bâtiments historiques à Istanbul [Ansal, 2010], ainsi qu'une méthode d'évaluation de performance des structures existantes selon le code sismique en Turquie de 2007 et la FEMA 440 [Erdem, 2011]. Citons aussi, l'approche systématique de simulation basée sur l'évaluation des pertes des structures en charpente métallique et des structures mixtes (béton/charpente) localisées à Los Angeles [Jayaram, 2012]. Nous avons aussi les travaux de Lagomarsino et Podesta pour l'évaluation des dommages et de vulnérabilité sismiques des lieux de cultes en Italie [Lagomarsino, 2004] ainsi que l'estimation de la vulnérabilité des

structures historiques et lieu de culte en maçonnerie sous l'action sismique au Portugal [Lurenço, 2006].

Au Pays-Bas nous avons les travaux lancés par l'Institut International des sciences Géo-information et l'observation des terres (ITC International Institute for Geo-information Sciences and Earth Observation). Au Costa Rica nous avons une étude sur l'évaluation du risques sismique et la vulnérabilité de la ville de Turialba effectuée par Marfai et Njagih, [Marfai, 2004] et au Népal nous avons un programme continu de NSET (National Society for Earthquake Technology) pour l'évaluation sismique de vulnérabilité des bâtiments et des résidences à Kathmandu [NSET, 2011].

En Algérie, plusieurs travaux sur l'étude de vulnérabilité des bâtiments ont été effectués, citons l'étude de vulnérabilité des structures en maçonnerie. Cette méthode permet d'évaluer la vulnérabilité sismique des constructions en maçonnerie, en tenant compte de l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction [Boukri, 2003], [Djaalali, 2003], [Djaalali, a, 2012] et [Djaalali, 2013]. Trois classes de vulnérabilité (P1, P2 et P3) ont été déterminées. La classe P1 exprime que la construction est résistante sans réparations ou renforcement, La classe P2, exprime que la construction est modérément résistante et elle exige le renforcement. La classe P3, exprime que la construction a une faible et basse résistance d'où la structure exige la démolition. [Djaalali, b, 2012]. Le développement d'une méthode d'estimation de vulnérabilité des structures en Charpente métallique a été effectué par Ammellal et Bensaïbi. Cette méthode a pour but de déterminer les paramètres ayant une influence sur le comportement sismique de ce type de structure [Ammellal, 2011]. Aussi, nous trouvons une méthode développée pour les structures mixtes (Maçonnerie/Charpente métallique) [Bensaïbi, 2011]. D'autres travaux existent aussi [Lazzeli, 2012].

Il est à signaler que les méthodes citées GNDT, FEMA310 et l'ATC 40 sont des approches déterministes, et les méthodes ATC 21, FEMA 154 et EMS 98 sont des approches probabilistes. Ces méthodes sont à deux niveaux (niveau 1 et niveau 2). Le niveau 1 est applicable à l'estimation de la vulnérabilité des structures selon les typologies prédéfinies et le niveau 2 pourra être appliqué pour l'étude de vulnérabilité à grande échelle. Nous présentons dans la suite, des méthodes pour l'estimation de la vulnérabilité des agglomérations.

1.6 Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes

Depuis plusieurs années, les régions du monde qui ont subi de forts séismes ayant provoqué d'importantes destructions ont initié des méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle. Issues des retours d'expérience, elles dépendent donc de l'échelle : pays, région, communes, nombre de bâtiments à analyser ainsi que du budget et du temps disponibles. Elles peuvent être utilisées pour estimer de façon approchée les pertes engendrées par le séisme [AFPS, 2005].

L'estimation des pertes dues aux séismes, dans une région donnée, nécessite la classification des bâtiments de cette région en catégories. Ces catégories sont établies généralement en fonction du système constructif et de quelques facteurs pris en compte comme le type du système structural, les matériaux de construction, les dimensions du bâtiment, la résistance de conception au séisme, l'âge de la construction, etc. l'élément âge de la construction est utilisé, des fois, comme indicateur du niveau de résistance sismique dans les régions où les codes sismiques ont été adoptés. La disponibilité des données relatives au mouvement sismique et aux dommages des différents types de constructions est limitée, ce qui rend la classification plus difficile.

Dans le monde, il existe de nombreuses méthodes pour estimer les dommages dus aux séismes à grandes échelles. Les premiers à avoir évalué la vulnérabilité sismique des villes ont été les Américains. Maintenant, les Japonais et les Européens ont développé d'autres méthodes.

1.6.1 Méthode de l'ATC13

Un des premiers rapports traitant le calcul de la vulnérabilité sismique des constructions est celui du Conseil de la Technologie Appliquée (Applied Technology Council, « ATC »), puis repris par l'Agence Fédérale de la Gestion des Risques (Fédéral Emergency Management Agency, « FEMA »). Ce rapport a été établi en 1971 et récapitulé dans le rapport ATC13 [Lang, 2002] et [AFPS, 2005].

Les matrices de probabilité des dommages (DPM), dus aux tremblements de terre, de l'ATC13, sont développées pour 78 classes différentes, dont 40 se rapportent aux bâtiments, par 58 experts (ingénieurs, constructeurs,...) se basant sur leurs connaissances et leurs expériences personnelles, les experts ont complété un questionnaire formel, pour estimer le pourcentage prévu des dommages qui résulterait à un type structural spécifique soumis à une intensité sismique donnée [ATC13, 1987].

L'inconvénient de l'approche ATC13, est que les matrices de probabilité des dommages sont exclusivement basées sur l'opinion des experts : par conséquent, en plus des incertitudes de l'évaluation des dommages dues à la variabilité dans l'exécution réelle des constructions, on a les incertitudes liées à l'opinion des experts, sans oublier que les matrices DPM, basées sur les avis des experts, sont également difficiles à modifier afin d'incorporer de nouvelles données ou technologies [ATC13, 1987], [Lang, 2002] et [AFPS, 2005].

En outre, il est difficile d'appliquer l'ATC13 à d'autres types de constructions et à d'autres régions. Néanmoins, c'était la première étude relativement complète sur l'évaluation des pertes et des dommages sismiques qui est devenue la référence standard pour d'autres méthodes jusqu'au milieu des années 90 [ATC13, 1987].

1.6.2 Méthode de HAZUS

La deuxième tentative principale de développer une autre méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité a été faite par l'Institut National de la Science du Bâtiment (National Institute of Building Science, « NIBS »), aux Etats Unis, fondée encore par l'Agence Fédérale de la gestion des risques (Fédéral Emergency Management Agency, « FEMA ») [FEMA HAZUS, 1999], [Withman, 1997] et [Calvi, 2006]. Le résultat a été le logiciel 'HAZUS', interactif, pour l'évaluation des risques, lancé pour la première fois en 1997 et mis à jour en 1999. Dans cette méthode, on trouve les déplacements spectraux et les accélérations spectrales comme mesures d'entrées sismiques. Cependant, l'étude de HAZUS continue à se fonder sur l'opinion d'experts pour estimer l'état des dommages qui résulteraient d'un déplacement et d'une accélération spectrale donnés [FEMA HAZUS, 1999] et [FEMA, 2003]

Trente six (36) types de modèles de bâtiments sont considérés par la méthodologie et quatre (04) niveaux sismiques sont considérés (Niveau haut, Niveau modéré, Niveau bas et Niveau pré-code). Le pré-code se rapporte à des bâtiments sans aucune conception sismique. Pour chaque niveau sismique et chaque type de bâtiment, on définit les paramètres suivants [FEMA HAZUS, 1999] :

- la capacité du bâtiment.
- Le spectre de déplacement.
- le seuil des différents états de dommages dans la construction.

1.6.3 Méthode de RADIUS

Avec l'assistance du gouvernement Japonais, le Secrétariat des Nations-Unies a lancé le projet RADIUS (Risk Assessment Diagnosis of Urbain Areas Against Seismic), pour renforcer mondialement la réduction des risques sismiques frappant les zones urbaines. Trois instituts internationaux ont travaillé sur le projet RADIUS : le GHI (géo-hazards international), le « INCEDE » (international center for Disaster-mitigation engeneering) et le BRGM (le Bureau de Recherche Géologique et Minière) [Radius, 1999]. Cette méthode a été appliquée à neuf villes sélectionnées dans le monde. Ces villes sont Addis Ababa (Ethiopie), Antofagasta (Chilie), Bandung (Indonesie), Guayaquil, (Equateur), Izmir (Turquie), Skopje (Macedoine), Tashkent (Uzbekistan), Tijuana (Mexique) et Zigong (Chine). Elle a été appliquée par la suite à la ville de Téhéran (Iran), Alger (Algérie) [Bensaibi, 2004] et Blida (Algérie) [Bensaibi, 2007], [Bensaibi, 2010], [Tadjer, 2012].

1.6.4 Méthode probabiliste italienne

En Italie plusieurs matrices de probabilité de dommages DPM, ont été adaptées aux typologies courantes italiennes. Elles ont été établies au départ suite aux relevés de dommages effectués après le séisme d'Iprinia du 23 novembre 1980, et elles ont été adoptées ou modifiées suite à plusieurs séismes italiens. Une première classification des typologies a été proposée en tenant compte des matériaux et des techniques de constructions ainsi que de leur comportement sismique observé pendant des séismes destructeurs [AFPS, 2005].

La classification des dommages a été définie sur une échelle comportant 7 degrés, proches de ceux proposés dans l'EMS98 (European Macrosismic Scale).

Le tableau (1.10) présente la description des niveaux de dommages [AFPS, 2005].

Tableau 1.10 : Description des niveaux de dommages [AFPS, 2005].

Niveau de dommage	Description
1	Aucun
2	Insignifiant
3	Léger
4	Considérable
5	Sérieux
6	Très sérieux
7	Destruction partielle

Une fois les typologies et la description des dommages établis, les matrices de probabilité de dommages (DPM), ont été produites sur la base des observations post-sismiques. Elles dépendent de l'intensité de l'échelle sismique MSK. L'échelle MSK, publiée en 1964 par Medvedev, Sponheuer et Karnik, [Medvedev, 1962] et [Medvedev, 1977] fut la première à apporter des précisions sur les ouvrages et a servi de point de départ à la définition de l'Echelle Macrosismique Européenne EMS [ESC, 2001], et du taux de dommages atteint. Il est ainsi possible de définir la probabilité qu'a une structure de subir un niveau de dommage pour une intensité donnée [AFPS, 2005].

L'estimation de la vulnérabilité de la ville de Potenza (au Sud de l'Italie) est faite en se basant sur cette méthodologie et sur une méthode similaire développée à l'université de Thessaloniki (Grèce) où la distribution des probabilités de dommages était évaluée et les matrices de probabilité des dommages sont attribuées pour les classes A, B, C et D de l'échelle MSK. [Dolece, 2006].

1.6.5 Méthodologie RISK-UE

Le projet RISK-UE consistait à traiter la vulnérabilité sismique de sept (7) grandes villes européennes: Barcelone (Espagne) [Lantada, 2009], [Lantada, 2008] et [Aguilar, 2010], Bitola (Macédoine), Bucarest (Roumanie) [Sandi, 2007], Catane (Italie), Nice (France), Sofia (Bulgarie) et Thessaloniki (Grèce) [Dolece, 2006], de façon à permettre l'émergence d'une classification des bâtiments commune plus détaillée que celle de l'EMS98 et des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Chaque partenaire avait à sa charge une ville [AFPS, 2005], [RISK-UE, 2003].

RISK-UE est un projet utilisé pour l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments courants où l'équipe de l'université de Gènes, partenaire du projet a joué un rôle important. Ce projet repose sur l'évaluation d'un indice de vulnérabilité pour un bâtiment donné, indice qui est fonction de la typologie constructive ainsi que de différents facteurs susceptibles de modifier son comportement. A partir de cet indice, il est possible de définir, en fonction de l'intensité macrosismique EMS98, des courbes de vulnérabilité et de fragilité qui permettent d'évaluer la répartition des probabilités de dommages sur un bâtiment. Deux niveaux d'évaluation des constructions ont été développés : le niveau 1 ou LM1 et le niveau 2 ou LM2 [AFPS, 2005], [RISK-UE, 2003].

La méthode de niveau 2, dite LM2, est basée sur l'analyse de la capacité d'une structure à dissiper de l'énergie. Cette méthode nécessite des moyens et des compétences plus larges pour une analyse à grande échelle [AFPS, 2005].

La méthode du niveau 1, dite LM1, est très proche de la méthode du GNDT (méthode présentée par la suite), à laquelle participa activement l'équipe de Gènes. Elle consiste à définir, pour chaque élément de la typologie RISK-UE, un indice de vulnérabilité la plus probable IV^* qui représente l'appartenance d'un bâtiment à une classe de vulnérabilité. Cette méthode a surtout l'avantage de donner les limites de l'intervalle probable de l'indice de vulnérabilité IV^+ et IV^- et aussi les limites minimales $IV^{\min}$ et maximale $IV^{\max}$ de chaque élément de la typologie. Cette méthode revient à définir un indice de vulnérabilité de base et un intervalle de confiance quant à la définition de cette vulnérabilité. Cet indice est compris entre 0 et 1. A partir de cet indice, des courbes de vulnérabilité ont été proposées par l'université de Gènes [AFPS, 2005] et [RISK-UE, 2003].

En d'autres termes, la méthode LM1 est utilisée pour l'estimation de vulnérabilité des bâtiments. C'est une approche empirique de vulnérabilité. Elle est basée sur la classification des structures en fonction de leur système de contreventement et sur les modèles de chargement afin d'avoir des types de dommages semblables lors d'un séisme. Ainsi, une série de fonctions standards de vulnérabilité peut être développée pour ces classes des bâtiments. La référence généralement utilisée pour de telles classifications sont les matrices de vulnérabilité de l'ATC-13 [ATC13, 1985], car elles jouent un rôle indispensable dans les études de développement des courbes de fragilité, et peuvent être employées pour calibrer les rapports de vulnérabilité développés analytiquement. La méthode du niveau 1 (LM1) est en grande partie basée sur la corrélation entre l'intensité macrosismique et les dommages observés lors d'un séisme passé. Elle est dérivée à partir

de l'échelle macrosismique européenne (EMS-98). Le passage du taux de dommage moyen aux degrés de dommages EMS98 se fait en définissant une distribution de dommages qui tienne compte des incertitudes et imprécisions dans le calcul. La méthode LM1 est basée sur 5 catégories de dommages [Lang, 2002].

Les principaux inconvénients de la méthodologie RISK-UE résident :

- Pour la LM2 : Les estimations faites surestiment les pertes qui peuvent être réellement occasionnées. C'est ce qui ressort des principales validations faites de la méthode.
- Pour LM1 : Le problème réside dans le fait que pour certaines constructions leur indice de vulnérabilité peut être négatif ou bien supérieur à un (1). Or dans cette méthode, l'indice est compris, par hypothèse, entre zéro (0) et un (1), d'où la difficulté d'interpréter des valeurs négatifs ou supérieur à un (1).

Le tableau (1.11) suivant représente les différentes typologies de bâtiments de RISK-UE en fonction des valeurs représentatives de l'IV [AFPS, 2005], [RISK-UE, 2003].

Tableau 1.11 : Typologie RISK-UE et valeurs représentatives de l'IV [RISK-UE, 2003].

Typologie RISK-UE			Valeurs représentatives de IV				
			IV ^{min}	IV ⁻	IV	IV [*]	IV ^{max}
Maçonnerie	M1	Murs porteurs en maçonnerie de pierre					
	M11	Moellons	0.620	0.810	0.873	0.980	1.020
	M12	Pierres appareillées	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M13	Pierre de taille	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	M2	Adobe	0.620	0.687	0.840	0.980	1.020
	M3	Murs porteurs en maçonnerie non armée					
	M31	Plancher bois	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M32	Voûtes en maçonnerie	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
	M33	Plancher avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0.460	0.527	0.704	0.830	1.020
	M34	Plancher béton armé	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	M4	Murs porteurs avec maçonnerie armée ou confinée	0.140	0.330	0.451	0.633	0.700
	M5	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	0.300	0.490	0.694	0.953	1.020
Béton Armé	RC1	Système poteaux / poutres	-0.020	0.047	0.442	0.800	1.020
	RC2	Murs de refend en béton	-0.020	0.047	0.386	0.670	0.860
	RC3	Système poteaux/ poutres avec murs de remplissage en maçonnerie non armée					
	RC3.1	Structure régulière avec remplissage	-0.020	0.007	0.402	0.760	0.980
	RC3.2	Structures irrégulières (système porteur ou remplissage irrégulier ou niveau souple)	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
	RC4	Structures mixtes en béton armé (portiques et murs en béton)	-0.020	0.047	0.386	0.670	0.860
	RC5	Murs en béton préfabriqué	0.140	0.207	0.384	0.510	0.700
	RC6	Structure en béton préfabriqué avec murs de refond en béton	0.300	0.367	0.544	0.670	0.860
Acier	S1	Système poteaux/ poutres en acier	-0.020	0.047	0.363	0.640	0.860
	S2	Structure en acier contreventé	-0.020	0.047	0.287	0.480	0.700
	S3	Système poteaux /poutres en acier avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
	S4	Système poteaux /poutres en acier avec murs de refend en béton coulé en place.	-0.020	0.047	0.224	0.350	0.540
	S5	Système de composants acier et béton armé	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020
Bois	W	Structure en bois	0.140	0.207	0.447	0.640	0.860

L'indice de vulnérabilité de base lié à la typologie va ensuite être modulé en fonction de critères structuraux propres à chaque structure, selon qu'elle soit en maçonnerie ou en béton armé [AFPS, 2005], voir tableau (1.12) suivant :

Tableau 1.12 : Critères structuraux de vulnérabilité et leurs coefficients associés [AFPS, 2005].

	Facteurs de vulnérabilité		Code Bas	Code Haut
	Nombre d'étages	Bas(1,2 ou3)	-0.04	-0.04
		Moyen (4,5 ou6)	0	0
		Haut (7 ou plus)	+0.08	+0.06
Irrégularité en plan	Forme (L,C)	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Protubérance	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
Irrégularité en élévation	Saillie	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Retrait	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Joint insuffisants	Oui	+0.04	0
		Non	0	0
	Poteaux courts	Oui	+0.04	+0.01
		Non	0	0
	Règles PS	Avant 1982	+0.16	
		Après 1982		0

Puis, la recherche des indices de vulnérabilité se fait bâtiment par bâtiment. L'application du projet RISK-UE à la ville de Nice, en France, consistait à diviser la ville en quartiers structurellement homogènes sur la base de données historiques et urbanistiques. Ensuite, des itinéraires aléatoires y étaient réalisés le long desquels des facteurs de vulnérabilité étaient repérés pour un certain nombre de bâtiments. Ces itinéraires étaient ensuite considérés comme représentatifs de l'ensemble du quartier et par

là même la vulnérabilité. Alors, il était possible de caractériser la répartition des indices de vulnérabilité par quartier. [AFPS, 2005].

Remarque :

Nous pouvons dire que, les méthodes citées pour l'étude de vulnérabilité à grande échelle sont soit de type empirique, soit de type analytique [Calvi, 2006]. Les méthodes empiriques se basent sur les matrices de probabilité de dommages (DPM) et les courbes de vulnérabilités empiriques. Les méthodes analytiques se basent sur les DPM et les courbes de fragilité ou de capacité.

1.7 Matrices de probabilité des dommages

Les matrices de probabilité de dommages DPM, sont issues directement du retour d'expérience et des estimations de dommages après plusieurs séismes. En général, le niveau sismique est exprimé par une intensité pour laquelle l'importance des dommages suivant la typologie est donnée par un degré de l'échelle considérée. A chaque type de construction correspond une DPM qui exprime la fréquence d'atteindre un taux de dommage si un séisme d'un certain niveau se produisait [AFPS, 2005].

Whitman et al étaient les premiers à proposer des matrices de probabilité des dommages pour les méthodes américaines. Ces matrices prédisent les dommages des constructions pour un séisme donné. Le format d'une DPM suggéré par Whitman et al., [Whitman, 1973] est présenté dans le tableau (1.13), où des proportions d'exemple de bâtiments avec un niveau indiqué des dommages structuraux et non-structuraux sont fournies en fonction de l'intensité et pour différentes typologies structurales endommagées de plus de 1600 bâtiments après le tremblement de terre de San Fernando en 1971. [Calvi, 2006].

Tableau 1.13 : Format d'une matrice de probabilité des dommages proposé par Withman et al. [Withman, 1973].

Damage State	Structural damage	Non-structural Damage	Damage Ratio (%)	Intensity of Earthquake				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	None	None	0-0,05	10,4	–	–	–	–
1	None	Minor	0,05-0,3	16,4	0,5	–	–	–
2	None	Localised	0,3-1,25	40,0	22,5	–	–	–
3	Not noticeable	Widespread	1,25-3,5	20,0	30,0	2,7	–	–
4	Minor	Substantial	3,5-4,5	13,2	47,1	92,3	58,8	14,7
5	Substantial	Extensive	7,5-20	–	0,2	5,0	41,2	83,0
6	Major	Nearly total	20-65	–	–	–	–	2,3
7	Building condemned		100	–	–	–	–	–
8	Collapse		100	–	–	–	–	–

Une des premières versions européennes d'une matrice de probabilité de dommages a été produite par Braga et al. [Braga, 1982] elle est basée sur les données de dommages italiens des bâtiments après le tremblement de terre d'Irpinia en 1980, qui a utilisé la loi binomiale pour décrire la distributions de dommages des trois classes de vulnérabilité proposées A, B et C et pour l'échelle MSK. Ce type de méthode a une relation directe avec les travaux de Corsanego et Petrini, [Corsanego, 1994], car il y a une relation directe entre la typologie des bâtiments et les dommages observés. Ces matrices sont très utilisées en Italie et des propositions ont été faites pour mettre à jour la DPM originale de Braga et al., par Di Pasquale et al., qui ont changé la DPM de l'échelle MSK à l'échelle MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg), parce que le catalogue sismique italien est principalement basé sur cette intensité, et le nombre de bâtiments été remplacé par le nombre de logements de sorte que les matrices aient pu être employées en même temps que les données de 1991 fournies par l'office statistique national italiennes (ISTAT : Italian National Statistical Office). [Di Pasquale, 2005] et [Calvi, 2006]. Dolce et al., ont également adapté les matrices originales pour le projet d'ENSERVES (European Network on Seismic Risk, Vulnerability and Earthquake Scenarios) pour la ville de Potenza, en Italie [Dolce, 2003]. Une classe additionnelle D de vulnérabilité a été incluse, en utilisant l'échelle EMS98,

pour expliquer les bâtiments qui ont été construits depuis 1980. Ces bâtiments devraient avoir une vulnérabilité inférieure [Grünthal, 1998].

Une méthode macrosismique a été proposée par Giovinazzi et Lagomarsino cela mène à la définition des fonctions de probabilité de dommages basées sur l'échelle EMS98 [Giovinazzi, 2004]. L'échelle EMS98 définit des descriptions qualitatives de "peu", de "beaucoup" et de "la plupart" pour cinq catégories de dommages à des niveaux de l'intensité s'étendant de V à XII pour six classes de vulnérabilité décroissante (de A à F) [Grünthal, 1998]. Dans le tableau (1. 14), nous présentons un exemple de DPM contenant une description qualitative de la proportion de bâtiments qui appartient à chaque catégorie de dommages pour différents niveaux de l'intensité pour la classe C de vulnérabilité [Calvi, 2006].

Tableau 1. 14 : Exemple de DPM pour la classe C de vulnérabilité à l'échelle EMS98 [Calvi, 2006].

Damage Level Intensity	Damage Grade				
	1	2	3	4	5
V					
VI	Few				
VII		Few			
VIII		Many	Few		
IX			Many	Few	
X				Many	Few
XI					Many
XII					Most

1.8 Courbes de Capacité (fragilité)

Les approches analytiques ou approches statistiques qui utilisent des courbes de vulnérabilité, appelées courbes de fragilité, sont identiques aux matrices de probabilité de dommage mais ont l'avantage d'avoir des expressions analytiques. Chaque courbe de vulnérabilité est associée à un niveau de dommage. Donc, chaque type de construction est défini suivant sa vulnérabilité et la nature des dommages est classée dans une échelle à plusieurs degrés [AFPS, 2005],

Singhal et Kiremidjian ont développé des courbes de fragilité (ou vulnérabilité) et des matrices de probabilité de dommages pour trois catégories des structures en béton renforcées d'armature en utilisant la simulation de Monte Carlo. Les probabilités des dommages structuraux ont été déterminées en utilisant l'analyse dynamique non-linéaire avec un ensemble de mouvements au sol, tandis que l'accélération spectrale était employée pour la génération des fonctions de fragilité. Les composants principaux de la méthodologie se composent : 1) caractérisation de la structure une fois elle est soumise aux charges dynamiques ; 2) caractérisation des mouvements au sol potentiels ; et 3) quantification de la comptabilité structurale de réponse pour la variabilité dans le mouvement au sol et l'incertitude dans la réponse structurale. [Singhal, 1996] et [Calvi, 2006], nous donnons dans la figure (1. 3) les courbes de fragilités et dans le tableau (1. 15) la matrice de probabilité de dommage pour un bâtiment simple de faible hauteur [Calvi, 2006] et [Singhal, 1996]

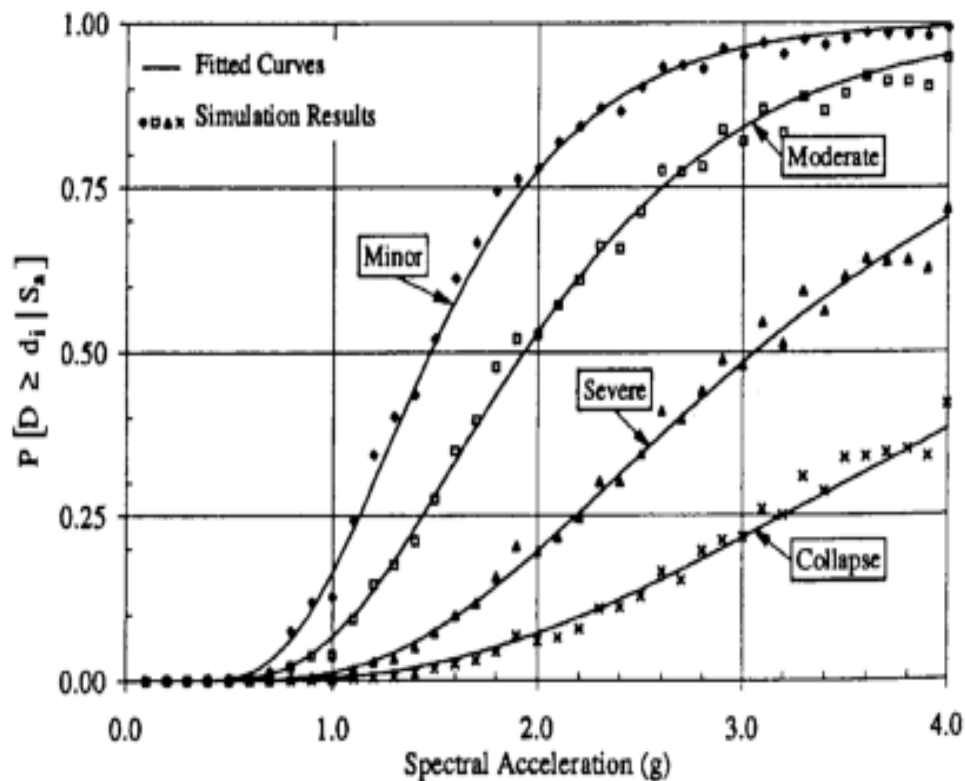


Figure1.3 : Courbes de fragilités [Calvi, 2006].

Tableau 1.15 : Matrice de probabilité de dommage pour un bâtiment simple de faible hauteur [Calvi, 2006] et [Singhal, 1996].

Damage State (1)	Modified Mercalli Intensity						
	VI (2)	VII (3)	VIII (4)	IX (5)	X (6)	XI (7)	XII (8)
None	99,5	97,0	85,4	52,9	14,1	0,9	–
Minor	0,3	1,6	6,9	16,9	15,5	3,4	0,1
Moderate	0,2	1,1	5,4	18,5	30,5	17,6	2,8
Severe	–	0,2	1,4	7,0	20,7	28,0	14,6
Collapse	–	0,1	0,9	4,7	19,2	50,1	82,5

Plusieurs travaux sur les courbes de fragilité ont été effectués citons : [Rossetto, 2003], [Dumova-Jovanoska, 2004], [Rossetto, 2005], [Kwon, 2006], [Güneyisi, 2008], [Verderame, 2010], [Buratti, 2010], [Cardona, 2010], [Vargas, 2010].

1.9 Courbes de Vulnérabilité empiriques

Les courbes de vulnérabilité empiriques se basent sur les approches déterministes. Cette approche utilise une seconde famille de courbes de vulnérabilité qui donnent le dommage moyen en fonction du niveau sismique. Ce dommage moyen permet de connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné [AFPS, 2005]. Ces Fonctions de vulnérabilité, sont basées directement sur les dommages des bâtiments pour des tremblements de terre passés, ont été présentés légèrement plus tard que les DPM [Calvi, 2006]. Les fonctions de vulnérabilité, présentées par Spences et al., sont basées sur les dommages observés dans les bâtiments par l'échelle MSK [Spence, 1992]. La figure (1.4) présente les courbes de vulnérabilités proposées par ces derniers.

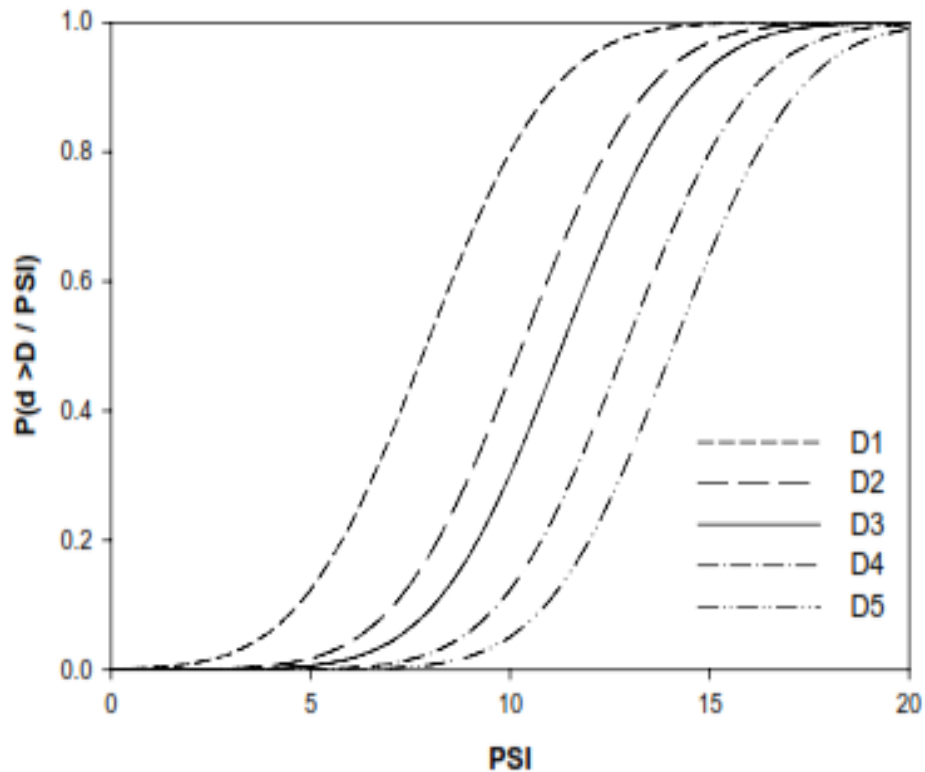


Figure1.4 : Courbes de Vulnérabilité [Spence, 1992], [Calvi, 2006].

Sabetta et al., ont employé des expertises post-sismiques d'environ 50000 bâtiments endommagés par des tremblements de terre destructifs en Italie afin de dériver des courbes de vulnérabilité pour trois classes de vulnérabilité et six niveaux de dommages selon l'échelle MSK [Sabetta, 1998]. Un indice moyen de dommages est calculé pour chaque classe de vulnérabilité et des courbes empiriques de vulnérabilité avec une distribution binomiale ont été dérivées en fonction de l'intensité et de l'accélération maximale [Calvi, 2006]. Rota et al., ont également employé des données, obtenues à partir des expertises post-sismique effectuées dans diverses municipalités au cours des 30 dernières années en Italie, afin de dériver les courbes typologiques de vulnérabilité pour les classes typiques de bâtiments (par exemple : bâtiments en béton armé, conçus de 1-3 étages) [Rota, 2006]. En général, les courbes de vulnérabilité montrent la corrélation entre l'excitation sismique et l'endommagement (voir la figure 1.5).

Rossetto et Elnashai en 2003, Scawthorn et al., en 1981 et Shinozuka et al., en 1997, ont également proposé des fonctions de vulnérabilité empiriques alternatives, généralement avec les distributions normales ou lognormal. Ces fonctions n'emploient pas l'intensité

macrosismique ou le PGA pour caractériser le mouvement au sol mais sont liées à l'accélération spectrale ou au déplacement spectral ou à la période fondamentale [Rossetto, 2003], [Scawthorn, 1981] et [Shinozuka, 1997] (voir figure 1.5).

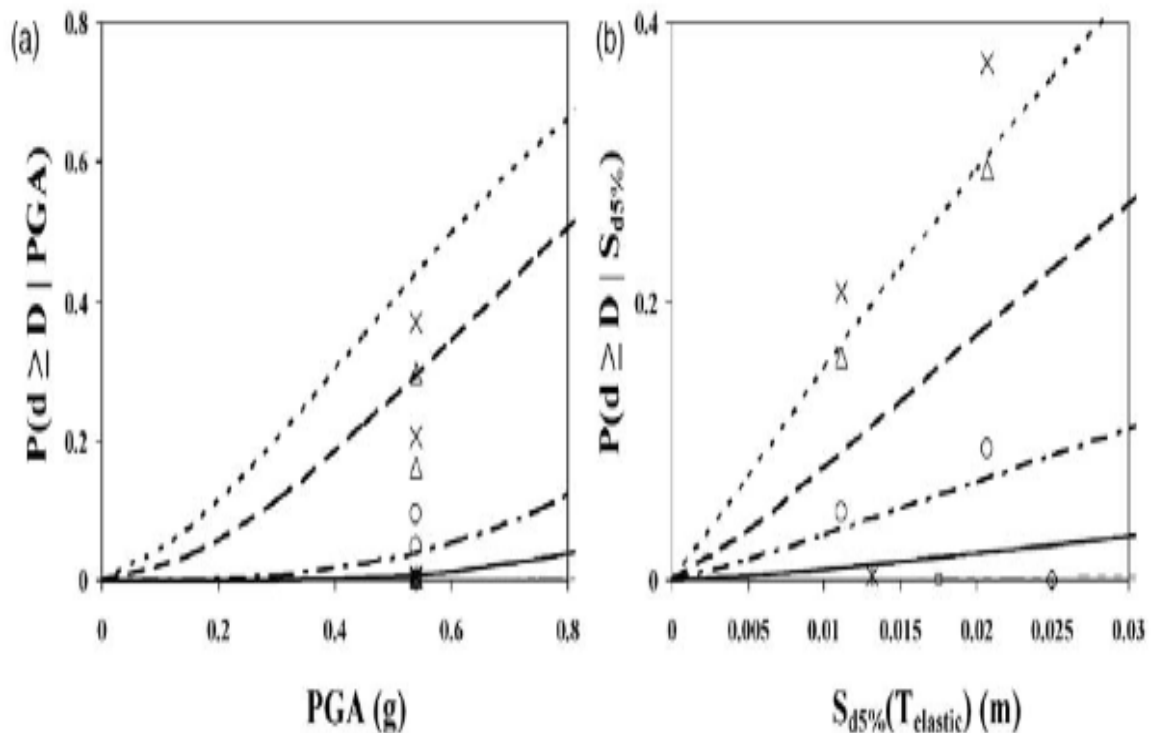


Figure 1.5 : Courbes de Vulnérabilité : (a) en fonction de PGA, et (b) en fonction de déplacement spectral à la période fondamentale [Rossetto, 2003].

1.10 Conclusion

Ces dernières décennies, des séismes de moyenne et/ou de forte intensité ont frappé plusieurs pays du monde. Pour cela, et afin de réduire les pertes et les dommages dus à ces tremblements de terre, des études de la vulnérabilité sismique des structures et infrastructures sont nécessaires.

Plusieurs méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique ont été développées à travers le monde. Nous avons présenté, dans ce chapitre, les principales méthodes.

Après avoir passé en revue les avantages et les inconvénients de chaque méthode, nous pouvons dire que ces méthodes sont soit à un niveau (LM1), soit à deux niveaux (LM1 et LM2). Le niveau 1 exprime que l'application de la méthode est favorisée pour

l'évaluation de la vulnérabilité des dommages et des pertes des environnements urbains qui n'ont pas une estimation sismique détaillée. Le niveau 2 des méthodes (LM2), est utilisé pour les zones urbaines possédant des études détaillées de la micro-séismicité exprimées en quantités spectrales telles que l'accélération spectrale, et le déplacement spectral.

Etant donné que nous ne disposons pas de données sismiques très détaillées, nous avons opté pour l'utilisation des méthodes de niveau 1. Ces méthodes seront appliquées pour l'étude de la vulnérabilité des structures en béton armé. Les structures en béton armé étant très répandues d'où notre choix pour ce type de structure.

CHAPITRE 2

INDICE DE VULNERABILITE SISMIQUE

DES STRUCTURES EN BETON ARME

2.1 Introduction

La quantification de l'état d'une construction avant et/ou après un séisme fait souvent l'objet d'une expertise. Cette dernière devra déterminer si la structure a subi des dommages et de quelles natures et si elle est en mesure de remplir sa fonction correctement. Ceci nécessite un personnel qualifié, qui prend en compte tout les paramètres structuraux et non structuraux pouvant jouer un rôle dans le comportement de la structure expertisée. Il n'est pas toujours évident de disposer des ressources humaines nécessaires ayant les qualifications voulues surtout en temps de crise c'est-à-dire juste après l'occurrence d'un séisme, car la zone impactée peut être très étendue et le nombre de constructions très élevé. Ceci est vrai aussi avant une crise, où souvent les zones urbaines à étudier sont vastes et contiennent un bâti dense et diversifié. Aussi il convient de disposer d'un outil d'aide à la décision qui regroupe l'ensemble des informations nécessaires à l'expertise et qui peut donner une classification objective de la structure considérée. Cet outil devra être simple d'utilisation afin de permettre à des ingénieurs même non chevronnés de pouvoir établir un diagnostic correcte de l'état de la construction.

2.2 Historique de la sismicité en Algérie

Selon le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG) plusieurs tremblements de terre ont frappés l'Algérie. Le tableau (2.1) regroupe les principaux séismes enregistrés en fonction de leur intensité.

Tableau 2.1 : Principaux séismes [CRAAG, 2012].

Localité	Date	Io
Alger	03.01.1365	Forte
Gouraya	15.01.1891	X
El kalaâ	29.11.1887	IX-X (VIII)
Sour. El Ghouzlène (Aumale)	24.06.1910	X (VIII)
A. El hassan (Cavaignac)	25.08.1922	IX-X
El Attaf (Carnot)	07.09.1934	IX (VII)
Béjaia	12.02.1960	VIII- IX
Chlef (Orléansville-elasnam)	09.09.1954	X-XI
M'sila	21.02.1960	VIII
M'sila	01.01.1965	VIII
Mansourah	24.11.1973	VII
Chlef	10.10.1980	IX
Constantine	27.10.1985	VIII
El affroun	31.10.1988	VII
Dj. Chenoua	29.10.1989	VIII
Mascara	18.08.1994	VII
Alger	04.09.1996	VII
Ain-temouchent	22.12.1999	VII
Béni-ouartilane	10.11.2000	VII
Zemmouri	21.05.2003	X
Lâalam (Kherrata)	20.03.2006	VII
Médéa	22.08.2007	VII
Mostaganem	08.08.2007	VII
Touggourt	08.07.2007	VII
Béni ilmane (Sétif)	14.05.2010	VII
Damous (Tipaza)	10.06.2012	VI

La tenue des constructions vis-à-vis d'un séisme dépend de plusieurs facteurs. Entre autre l'application ou non des règles parasismiques en vigueur lors de la construction. Dans ce qui suit nous allons donner l'historique de l'évolution de la réglementation en Algérie.

2.3 Evolution de la réglementation en Algérie

Les tremblements de terre peuvent causer des dommages aux constructions. C'est ainsi que les dégâts causés aux constructions à Orléans-ville (El-Asnam, Chlef actuellement), par le séisme de 1954, ont obligé les bâtisseurs à prendre en compte, dans les constructions futures, le paramètre sismique et les aspects ayant trait (efforts, contraintes, dispositions constructives, etc.). Ceci a conduit l'administration coloniale à créer toute une batterie de règlements concernant les calculs techniques et les calculs sismiques en l'occurrence les PS (Prescriptions sismiques) qui sont restés en vigueur bien après l'indépendance du pays. A noter que le PS54 a été le premier règlement parasismique à être élaboré.

2.3.1 Les règles de calculs

A l'indépendance du pays, et jusqu'en 1967, les règlements, concernant les calculs techniques et les calculs sismiques, créés par l'administration coloniale sont restés en vigueur.

En 1968, l'Etat Algérien s'est doté d'un règlement de Calculs des Constructions en Béton Armé 1968 [CCBA, 1968], inspiré du règlement français Béton Armé 60 [BA, 1960], en vigueur à cette période là. Ce règlement était basé sur le calcul de la contrainte admissible.

Cependant, en Europe, les règles de calculs qui étaient en application, étaient basées sur la méthode des états limites. Alors, la France a créé de nouveaux règlements appelés Béton Armé aux Etats Limites 83 [BAEL, 1983], puis Béton Armé aux Etats Limites 91 [BAEL, 1991]. Ces règlements sont inspirés de la méthode, dite méthode des états limites, ceci afin de tendre vers une réglementation unifiée dans ce domaine, avec les autres pays européens.

Devant le besoin de plus en plus important en diverses sortes de constructions et le manque d'assiettes dans les zones urbaines, ainsi que l'évolution des techniques de constructions dans le monde, l'Algérie, en s'inspirant du (BAEL91) Français, a créé le règlement : Calculs des Constructions en Béton Armé 93 [CCBA, 1993], dont les calculs se basent sur les états limites et non sur les contraintes admissibles comme auparavant.

2.3.2 Les règles parasismiques

Après le séisme de Chlef de 1954 et vu les dégâts causés aux constructions de la ville d'Orléansville, les autorités coloniales, pour la reconstruction de la ville et de la région, se sont inspirées des méthodes antisismiques américaines et japonaises, et ont créé le règlement Anti-Sismique 55 [AS, 1955], qui plus tard a été remplacé par le règlement Parasismique Algérien 62 [PA, 1962], puis le Parasismique Algérien 69 [PA, 1969].

Cependant, après l'indépendance et devant l'absence de séismes de grandes intensités, les Algériens ont négligé l'application des normes antisismiques dans leurs constructions. Les bâtisseurs n'étaient plus obligés de calculer d'après ces normes bien qu'on les leurs **recommandaient**.

Devant cette carence, en 1976, les soumissionnaires américains, pour la construction d'un grand projet de torchère à Arzew, sont entrés en contact avec l'organisme de Contrôle Technique de la Construction algérien « CTC » d'une part, et l'université de Stanford (Californie, Etats-Unis) d'autre part, afin de réaliser un règlement parasismique algérien.

C'est ainsi qu'une convention de deux ans fut signée pour réaliser ce projet qui comprenait deux volets :

- Etudier la sismicité algérienne (aléa et zonage).
- Proposer un projet d'un règlement parasismique algérien basé sur la force statique équivalente, règlement inspiré de ce qui se faisait en Californie alors.

Cependant, sa mise en pratique a rencontré différentes difficultés concernant :

- La compréhension du règlement lui-même en suivant la méthode américaine.
- La compréhension du phénomène sismique.
- Et enfin, son adaptation sur les ouvrages tout en considérant que la force sismique du règlement parasismique doit être comparable à celle du « CCBA 68 ».

Ce n'est qu'après le séisme de Chlef, en 1980, que le calcul parasismique est devenu obligatoire pour les futures constructions. Ce qui a donné naissance au premier Règlement Parasismique Algérien : « le RPA81 », puis « le RPA83. » qui, lui, a été enrichi lors de sa révision, en 1988, par une annexe. Appelée « RPA88 », il permettait aux ingénieurs de faire des calculs dynamiques par des méthodes approchées pour palier au manque d'outils puissants de calculs.

A partir de 1996, et avec l'évolution de l'outil informatique, les calculs par la méthode statique équivalente étaient devenus moins performants et étaient de plus en plus remplacés par les calculs par la méthode dynamique, puisque cette dernière était dans le corps du « RPA99 » avec ses conditions d'application.

Mais après le séisme de Boumerdes en 2003, et vu l'étendue de la catastrophe et l'importance des dégâts humains et matériels, ceci a nécessité la révision du « RPA99 » qui a porté, après sept séances de travail, sur une nouvelle carte sismique et sur des conditions d'exécution plus sévères.

L'évolution de la réglementation et des méthodes de calcul de la force sismique ont fait que les nouveaux centres urbains et les agglomérations récentes ont été le siège de constructions différentes de part leur conception, les matériaux utilisés, les techniques de leurs constructions et leur âge. Ce qui les rend plus ou moins vulnérables à l'action sismique. Afin de permettre aux décideurs de prendre les décisions adéquates (démolition, réfection, confortement, etc.) de ces constructions, nous allons développer une méthode pour étudier la vulnérabilité des structures en béton armé.

2.4 Méthode de l'indice de vulnérabilité

La méthode de l'indice de vulnérabilité, nous permet de faire un diagnostic préliminaire sur le comportement des constructions en béton armé vis-à-vis de l'action sismique. Cette méthode permet d'estimer la qualité sismique de ces constructions puis d'effectuer leur classification selon une échelle proposée.

2.4.1 Principe de la méthode de l'indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité « I_v » est un indicateur de l'état de la structure qui peut être estimé avant comme après l'occurrence de l'évènement sismique. Il nous permet de connaître l'état des constructions d'une région et de les classer selon leur vulnérabilité.

En tenant compte de l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction. Les différents paramètres, pris en compte pour cette méthode, sont classés en trois catégories. Chaque paramètre a une valeur numérique exprimant la qualité sismique des éléments structuraux et non structuraux

influant sur le comportement sismique de la construction. La somme de ces valeurs numériques, représente l'indice de vulnérabilité « I_v » de la construction étudiée.

Le paramètre ne peut prendre qu'une seule valeur et représente ainsi la classe à laquelle il appartient. Nous avons distingué trois classes à savoir :

- Classe A : Dans cette catégorie, sont classés les paramètres ou les éléments réalisés selon le code parasismique en vigueur et donc présentant une bonne résistance au séisme.
- Classe B : Sont classés, dans cette catégorie, les éléments conçus selon les anciens codes ou sans tenir tout à fait compte des normes parasismiques lors de leur construction et qui présentent au moment de leur classification une assez bonne résistance.
- Classe C : Dans cette classe nous avons les paramètres vétustes ou ayant une mauvaise résistance au séisme.

Dans ce qui suit nous présentons les paramètres choisis. Ces paramètres sont, en partie, tirés de la bibliographie auxquels nous avons ajouté d'autres paramètres supplémentaires. Ces paramètres sont déduits du retour d'expérience sismique en Algérie [Belheouane, 2006] et [Belheouane, a, 2012].

2.4.2 Définitions des paramètres identifiés

Les paramètres pris en considération pour les structures en béton armé sont déterminés comme suit:

- 1) Système de contreventement.
- 2) Qualité du système de contreventement.
- 3) Capacité sismique.
- 4) Type de sol.
- 5) Diaphragme horizontal.
- 6) Régularité en plan.
- 7) Régularité en élévation.
- 8) Qualité des nœuds.
- 9) Phénomène du poteau court.
- 10) Détails ou état des éléments non structuraux.
- 11) Maintenance.
- 12) Modifications
- 13) Entrechoquement.
- 14) Conditions du sol.

Ces paramètres sont soit de type descriptif ou typologique (comme le type du système de contreventement, la régularité en plan et en élévation, le type de sol, le type de plancher), soit de type qualificatif c'est-à-dire concerne la qualité de l'exécution, le respect des normes en vigueur et l'état de ces éléments (comme la qualité du système de contreventement, la qualité des nœuds, l'état des éléments non structuraux).

La définition des paramètres choisis pour l'application de la méthode de l'indice de vulnérabilité est basée sur le Règlement Parasismique Algérien RPA99 modifié en 2003[RPA, 1999]. Dans ce qui suit, nous allons expliciter ces paramètres.

1. Système de contreventement

Ce paramètre étudie le type du système de contreventement, qui est défini comme étant le système de résistance principale. L'évaluation du système de résistance principale est définie en trois classes :

- Classe A : Structure Rigide- Résistante.
- Classe B : Structure Rigide- Fragile.
- Classe C : Structure Déformable – Fragile.

Ces classes se définissent par rapport au système de contreventement. Les types de système de contreventement pour les structures en béton armé d'après le RPA 99 sont :

- 1-a) Portiques auto-stables sans remplissage en maçonnerie rigide.
- 1-b) Portiques auto-stables avec remplissage en maçonnerie rigide.
- 2) Voiles porteurs.
- 3) Noyau.
- 4-a) Mixte : portiques/voiles avec interaction.
- 4-b) Portiques contreventés par des voiles.
- 5) Console verticale à masse répartie.
- 6) Pendule inverse.

La classification se fera sur la base du coefficient de comportement « R » donné dans le RPA 99.

Classe A : Structure Rigide- Résistante.

Cette classe regroupe les systèmes de contreventement suivants :

- 1-b) Portiques auto-stables avec remplissages en maçonnerie rigide.
- 2) Voiles porteurs.
- 3) Noyau.
- 4-b) Portiques contreventés par des voiles.

Classe B : Structure Rigide- Fragile.

Sont regroupés, dans cette classe, les types des systèmes de contreventement suivants :

- 1-a) Portiques auto-stables sans remplissages en maçonnerie rigide.
- 4-a) Mixte : portiques/ voiles avec interaction.

Classe C : Structure Déformable – Fragile.

Dans cette classe, on trouve les autres types de systèmes de contreventement, qui ne sont classés ni dans la classe A, ni dans la classe B.

2. Qualité du système de contreventement

Pour ce paramètre, la classification est faite selon :

- Le type et la qualité des matériaux utilisés.
- La qualité d'exécution et l'état du système.

Selon le RPA99, le comportement des matériaux aux séismes ne peut être dissocié du type de structure qu'ils constituent :

- Les matériaux avec un rapport résistance/ masse volumique.
- La rigidité des matériaux permet de limiter les problèmes de stabilité de forme.
- La ductilité est la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement.

Donc, trois groupes de classification sont définis :

Classe A :

Dans cette classe, nous trouvons les structures dont la qualité du système de contreventement est très bonne. C'est-à-dire, le paramètre respecte toutes les conditions citées par le RPA 99.

Classe B :

Cette catégorie regroupe les constructions dont la qualité du système de contreventement est moyenne. C'est-à-dire au moins un des critères n'est pas respecté.

Classe C :

Quand la qualité du système de contreventement est mauvaise, le paramètre est classé dans ce groupe. Donc, tous les critères ne sont pas respectés.

3. La capacité sismique

La classification de ce facteur se fait en fonction d'un coefficient « α » qui est défini comme étant le rapport entre la force résistante des éléments structuraux de la structure et la force sismique du règlement RPA99.

La classification de ce paramètre, se fait comme suit:

Classe A :

Dans cette classe, la capacité sismique de la structure est plus forte que la force sismique.

Classe B :

Nous trouvons dans cette classe les constructions dont la résistance à la force sismique est moyenne.

Classe C :

Quand la structure présente une faible résistance à la force sismique, ce paramètre est classé dans cette classe.

Les étapes de calcul sont données dans l'annexe 1.

4. Type de sol

La classification de ce paramètre repose sur les caractéristiques du sol.

Selon le RPA 99 [RPA, 1999], les types des sols existants sont :

S1- Sol rocheux

S2- Sol ferme

S3- Sol meuble

S4- Sol très meuble

La classification, dans notre cas, se fera comme suit :

Classe A :

Nous trouvons, dans cette classe, la catégorie S1 (Sol rocheux) dont la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement est $V_s \geq 800m/s$

Classe B :

Cette catégorie regroupe le type du sol S2 (sol ferme), c'est à dire les dépôts, très denses, de sables ou de graviers et/ou d'argile sur consolidée sur 10 à 20 m avec une vitesse moyenne de l'onde de cisaillement $V_s \geq 400m/s$.

Classe C :

Sont classés ici les sols de catégorie S3 (Sol meuble) et de catégorie S4 (Sol très meuble). On trouve, dans cette classe, les dépôts de sables et de graviers moyennement denses ou lâches ainsi que les dépôts d'argile moyennement raide ou molle.

5. Diaphragme horizontal

Par le paramètre diaphragme horizontal est désigné le type du plancher. La classification de ce paramètre est fonction du type et de l'état du plancher, ainsi que des matériaux utilisés.

Classe A : Plancher rigide.

Cette classe regroupe les planchers qui se déforment uniquement dans leur plan. C'est à dire tous les points du plancher ont la même déformation. Donc, la déformation de ces planchers est une translation ou une rotation.

Classe B : Plancher semi- rigide.

Dans ce groupe, sont classés les planchers qui n'appartiennent ni à la classe A ni à la classe C.

Classe C : Plancher souple.

Nous y trouvons les planchers qui se déforment dans les deux plans. C'est à dire que chaque point de ces planchers a une déformation indépendante de l'autre point.

6. Régularité en plan

La définition de la régularité en plan est fonction de :

- La distribution de la masse et de la rigidité.
- La forme géométrique en plan.

Selon le RPA 99 [RPA, 1999], la régularité en plan est assurée par les critères suivants :

a1) : Le bâtiment doit représenter une configuration sensiblement symétrique dans les deux directions, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.

a2) : A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique.

a3) : La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur / largeur du plancher inférieur ou égal à 4.

a4) : Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante, vis-à-vis de celle des contreventements verticaux, pour être considérés comme indéformables dans leurs plans.

La surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de la surface totale du plancher.

Ainsi, pour notre méthode, nous allons définir trois classes qui sont :

Classe A : Forme régulière :

Dans cette classe, nous trouvons les structures qui respectent tous les critères cités auparavant.

Classe B : Forme faiblement irrégulière :

Sont classées, dans cette catégorie, les constructions partiellement irrégulières. C'est à dire les structures qui n'appartiennent ni à la classe A ni à la classe C.

Classe C : Forme irrégulière :

Dans cette classe, sont regroupés les bâtiments irréguliers en plan, donc, qui ne respectent aucun critère cité précédemment

7. Régularité en élévation

L'importance de ce paramètre, dans la méthode de l'indice de vulnérabilité, réside dans le fait que l'étude de ce facteur touche deux aspects essentiels :

- La variation de la distribution de la masse entre deux niveaux successifs.
- La variation de la résistance du système résistant, entre deux étages successifs.

Pour ce facteur, les critères de classification, selon le RPA 99 [RPA, 1999], sont :

b1) : Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation.

b2) : La raideur et la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.

b3) : Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment, entre deux niveaux successifs, ne doit pas dépasser 20% dans les deux directions.

La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1,5 fois sa plus petite dimension

La classification selon ce paramètre se fera comme suit :

Classe A : Forme régulière.

La structure est classée, dans ce groupe, si tous les critères de classification pour la régularité en élévation sont respectés.

Classe B : Forme faiblement irrégulière.

Dans cette catégorie, on trouve les constructions partiellement irrégulières en élévation, donc les structures qui n'appartiennent ni à la classe A, ni à la classe C.

Classe C : Forme irrégulière.

Dans cette classe, sont regroupés les bâtiments irréguliers en élévation, c'est à dire ceux qui ne respectent pas les critères cités auparavant.

8. Qualité des nœuds

On définit les nœuds, par la zone de connexion entre les éléments structuraux, c'est à dire la zone de jonction : fondation-poteau, poteau-poutre, fondation-voile, etc.

L'importance de ce paramètre est que l'application de la force sismique se fait dans ces zones de connexion.

L'étude et la classification de ce paramètre sont fonction de l'état et de la qualité des zones de connexion des éléments structuraux (poteau/poutre, voile/fondation, etc.).

On propose trois catégories de classification pour ce paramètre :

Classe A : *Bonne*.

Cette classe regroupe les constructions dont l'état des zones de connexion de leurs éléments structuraux est bon.

Classe B : *Moyenne*

Dans cette catégorie, on trouve les bâtiments dont la qualité de ses nœuds est moyenne.

Classe C : *Mauvaise*.

Sont classées, ici, les constructions dont la qualité des zones de connexion des éléments structuraux est mauvaise.

9. Le phénomène du poteau court

Ce phénomène se manifeste selon deux aspects :

- Aspect structural : dans ce cas, le poteau court existe dans la conception de la structure (ex. : vide sanitaire). Le calcul du poteau court doit être alors conforme aux règlements en vigueur.
- Aspect provoqué en cours de réalisation : Dans ce cas, la création du poteau court se fait pendant la construction de la structure, ou après, lors des changements apportés à la construction, le long des années de sa vie (ex ouverture de vasistas).

La définition des classes se fait, dans ce cas, selon le rapport entre l'élément provoquant le phénomène du poteau court (h_i) et la hauteur initiale de l'élément (H) :

$$\beta = \frac{h_i}{H}$$

Dans la référence [IRS, 1999], trois intervalles sont définis pour le rapport β , ainsi nous avons :

Classe A :

Dans cette classe, sont classés les éléments dont β est tel que : $1 \leq \beta < 0.66$. Dans ce cas, on n'a pas de risque de présence de poteau court.

Classe B :

Elle regroupe les éléments dont : $0.66 \leq \beta < 0.50$.

Classe C :

On y trouve les éléments dont : $\beta \leq 0.50$.

10. Détails

On entend par le paramètre détail, l'état et la qualité des éléments non structuraux qui peuvent influencer sur le comportement de la structure lors d'un séisme, ainsi que l'état des divers réseaux qui influent sur la fonctionnalité de la structure.

Les éléments, à prendre en considération, s'ils existent, sont :

- L'état des cloisons.
- L'état des balcons.
- L'état du garde corps.
- L'état de l'escalier.
- L'état de l'acrotère.
- L'état du réseau électrique.
- L'état du réseau gaz.
- L'état du réseau d'assainissement.
- L'état du réseau téléphonique.
- L'état de la toiture.

Les trois groupes de classification pour ce paramètre sont :

Classe A : *Satisfaisant* :

C'est la classe où plus des trois quarts des éléments existants sont en bon état.

Classe B : *Partiellement satisfaisant* :

Le paramètre « détails » est classé dans cette catégorie, si la moitié ou le trois quarts des éléments des éléments existants le composant sont en bon état.

Classe C : *Insatisfaisant* :

Dans ce groupe, on trouve que parmi l'ensemble des éléments existants, moins de leur moitié est en bon état.

11. Maintenance

Les expériences sismiques ont montré l'importance de l'étude de ce facteur, car ce paramètre touche l'ensemble des éléments de la structure :

- Les éléments résistants en élévation.
- Les éléments non structuraux.

Trois classes sont à distinguer :

Classe A : Nous y trouvons, les bâtiments dont :

- Tous les éléments résistants ne sont pas fissurés.
- La stabilité des éléments non structuraux est assurée.

Classe B :

Dans cette classe, on regroupe les bâtiments qui ne sont classés ni dans la classe A, ni dans la classe C.

Classe C :

Cette classe regroupe les bâtiments dont plus de 30% des éléments résistants sont fissurés ou l'état de la structure est très mauvais.

12. Modifications

L'introduction de ce paramètre, dans notre étude, a été déduite à partir des expériences sur site et des observations concernant notre société, car ce facteur tient compte des changements ou des anomalies apportés à la construction. Parmi ces changements, on peut citer les ajouts et/ou les suppressions des éléments dans les constructions, le changement de l'usage de la structure, l'augmentation importante de la charge permanente ou d'exploitation, etc. Ces facteurs ont pour effet d'engendrer une modification des forces appliquées à la structure. Ce qui peut provoquer un changement dans le centre de masse et qui se traduira par une altération dans la réponse de la structure.

Nous proposons de classer ce paramètre en trois classes, comme indiqué ci-suit :

Classe A :

Dans cette classe, nous regroupons les structures qui n'ont subi aucune modification ou changement

Classe B :

Sont regroupées, dans cette classe, les structures dont des changements ou des modifications sont moyennement observés, comme le changement dans la fonctionnalité de la construction si cette dernière ne provoque pas de mouvement de torsion.

Classe C :

Dans ce groupe, nous trouvons les constructions qui ont subi des modifications importantes. On entend par modifications importantes, les modifications qui touchent les éléments structuraux, donc, qui peuvent provoquer un changement dans le centre de masse et/ou le centre de rigidité.

13. Entrechoquement

L'entrechoquement est l'interaction, entre deux structures adjacentes, dont l'effet du comportement sismique de l'une par rapport à l'autre, durant l'occurrence sismique, est important. Dans le RPA99, nous trouvons l'expression suivante pour la justification des joints sismiques :

$$d_{\min} = 15 \text{ mm} + (\delta_1 + \delta_2) \text{ mm} > 40 \text{ mm}.$$

avec :

- δ_1 et δ_2 : déplacement maximum des deux blocs, au niveau du sommet du bloc le moins élevé.

Trois classes de classification sont définies pour ce paramètre:

Classe A :

C'est la classe où les bâtiments ne représentent pas de risque d'entrechoquement. En effet, ces structures sont soit isolées, soit séparées par des joints de rupture d'une épaisseur suffisante. Pour cette classe, l'épaisseur définie est de 10cm.

Classe B :

Sont regroupées, dans cette classe, les structures dont le risque d'interaction entre les structures adjacentes est moyen ou l'épaisseur du joint de rupture est insuffisante.

Donc l'épaisseur est : $4\text{cm} < d < 10\text{cm}$.

Classe C :

Dans ce groupe, nous trouvons les constructions où le risque de l'entrechoquement est fort, donc les structures ne possédant pas de joint de rupture.

Pratiquement, c'est le respect, ou non, de la dimension du joint sismique, définie dans le RPA 99 version 2003 [RPA, 1999], qui déterminera la classification.

14. Conditions du sol

Vu l'importance de ce facteur dans les dégâts sismiques, nous avons introduit ce facteur dans notre étude.

Classe A :

Nous trouvons, dans cette classe, les structures qui sont implantées dans des sites qui ne présentent aucun risque.

Classe B :

Pour cette catégorie, sont regroupées les constructions qui n'appartiennent ni à la classe A, ni à la classe C.

Classe C :

Dans ce groupe, nous trouvons les structures implantées dans des sites à risque. Les bâtiments qui représentent des risques sont les bâtiments implantés :

- Aux abords d'une falaise.
- En haut ou en bas d'une colline.
- Aux abords d'une rivière ou d'un oued.
- Sur un terrain accidenté avec changement de pente important.

Les paramètres, que nous venons de définir, sont classés en trois classes (A, B et C). À chaque classe nous associons un coefficient « Ki » qui exprime la qualité sismique du paramètre. Dans le paragraphe suivant nous déterminons les valeurs de coefficient « Ki », appelé coefficient de pondération, pour chaque paramètre défini auparavant.

2.4.3 Détermination des coefficients de pondération

Le coefficient « Ki » exprime le degré de vulnérabilité du paramètre. Dans notre méthode, les coefficients de pondération sont des chiffres positifs et augmentent avec l'augmentation de la vulnérabilité du paramètre.

La détermination des valeurs « Ki » est basée sur le retour d'expérience sismique en Algérie, et les données statistiques du tremblement de terre d'Ain Timouchent en 1999 ($M=5,8$) et le séisme de Zemouri en 2003 ($M=6,8$). L'analyse statistique est faite sur 87 bâtiments pour le cas du séisme d'Ain Timouchent et sur 567 bâtiments pour le cas du séisme de Zemouri. Ceci nous a permis de donner les coefficients « Ki » donnés dans le tableau (2.2), [Belheouane, b, 2012].

Tableau 2.2 : Les facteurs « Ki » pour chaque paramètre en fonction de leurs classes.

N°	Paramètre	Classe / Ki		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Système de contreventement	0	0.01	0.03
2	Qualité du système de contreventement	0.01	0.03	0.06
3	La capacité sismique	0	0.09	0.16
4	Type de sol	0.01	0.03	0.06
5	Diaphragme horizontal	0.01	0.03	0.06
6	Régularité en plan	0.01	0.03	0.06
7	Régularité en élévation	0	0.06	0.12
8	Qualité des nœuds	0.01	0.03	0.06
9	Phénomène du poteau court	0.01	0.03	0.06
10	Détails	0.01	0.03	0.06
11	Maintenance	0	0.06	0.09
12	Modifications	0.01	0.03	0.06
13	Entrechoquement	0.01	0.03	0.06
14	Conditions du sol	0.01	0.03	0.06

Trois classes sont définies pour chaque paramètre. Un paramètre peut appartenir à l'une des trois classes définies A, B et C.

2.4.4 Détermination des coefficients de corrélation

Afin d'identifier l'effet de chaque paramètre sur l'indice de vulnérabilité d'un bâtiment des coefficients de corrélation ont été calculés (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Les coefficients de corrélation des paramètres.

Séisme Paramètre	Ain Temouchent (1999)	Boumerdes (2003)
Système de contreventement	22	54
Qualité du système de contreventement	13	33
La capacité sismique	25	67
Type de sol	15	49
Diaphragme horizontal	14	47
Régularité en plan	17	45
Régularité en élévation	23	60
Qualité des nœuds	13	29
Phénomène du poteau court	18	46
Détails	11	23
Maintenance	21	50
Modifications	15	48
Entrechoquement	17	44
Condition du sol	12	27

La détermination des coefficients de corrélation, basé sur l'analyse statistique des bâtiments expertisés après le séisme d'Ain Timouchenet et de Zemouri, nous a confortés dans notre choix des paramètres d'étude. En effet, les paramètres rajoutés ont des coefficients de corrélation aussi importants sinon plus que les paramètres déduit de la bibliographie.

2.4.5 Classification

La classification de la structure est pouvoir dire qu'une structure présente une bonne, moyenne ou mauvaise tenue au séisme en utilisant l'indice de vulnérabilité de cette dernière.

Pour ce faire, nous devons calculer cet indice. L'indice de vulnérabilité « Iv » s'exprime comme la somme des coefficients « Ki » que chaque paramètre prend en fonction de sa vulnérabilité. Ainsi :

$$Iv = \sum_{i=1}^{14} Ki \quad (2.1)$$

L'indice de vulnérabilité est compris entre la valeur zéro (0) et la valeur un (1), où quand on se rapproche de la valeur zéro, la construction aura une bonne tenue au séisme, et quand on se rapproche de la valeur un, la structure sera classée plus vulnérable. Nous proposons la classification présentée dans le tableau (2.4).

Tableau 2.4 : Classification des structures en fonction de leur « Iv ».

Classe	Verte		Orange		Rouge
	1	2	3	4	5
Iv	0,10 - 0,25	0,25 - 0,40	0,40 - 0,55	0,55 - 0,70	0,70 - 1,00
Iv moy	0,150	0,300	0,475	0,625	0,850

Cinq classes de vulnérabilité sont proposées : Vert (1 et 2), Orange (3 et 4) et Rouge. Où dans les classes Vertes (1 et 2) nous trouvons les constructions qui ne nécessitent pas d'intervention. Dans les classes Oranges (3 et 4), les structures qui nécessitent un renforcement, une étude dans ce sens devra être effectuée. Quant à celles appartenant à la classe rouge, elles doivent être évacuées immédiatement et reconstruites. Un indice moyen est donné pour chaque classe de vulnérabilité proposée. Ce dernier sera utilisé par la suite pour la détermination des courbes de vulnérabilité.

Les niveaux de dommages donnés ci-dessus se basent sur une description de ces derniers. La description des dommages pour chaque classe de vulnérabilité est donnée ci-après.

2.5 Echelle de description des dommages

Cette échelle comprend cinq (5) degrés de dommage. Le tableau (2.5) donne la définition qualitative de ces 5 degrés de dommage.

Tableau 2.5 : Description de dommages.

Classe/ Degré		Description de dommage
Vert 1	1	Dommages négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux).
Vert 2	2	Dommages légers à modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
Orange 3	3	Dommages modérés à importants (Dégâts sensibles et dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)
Orange 4	4	Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)
Rouge	5	Dégâts très importants pour les éléments structuraux, effondrement partiel ou total.

Les Cinq degrés de dommages sont définis et arrangés dans un ordre croissant de vulnérabilité.

2.6 Conclusion

Un indice de vulnérabilité sismique a été déterminé pour les structures en béton armé. Cet indice a été calculé en fonction de plusieurs paramètres identifiés à partir de la bibliographie et du retour d'expérience sismique. Chaque paramètre peut prendre une des trois valeurs en fonction de la classe à laquelle il appartient. Ceci nous a permis de proposer une classification des constructions selon leurs degrés de vulnérabilité.

CHAPITRE 3

COURBES DE VULNERABILITE

DES STRUCTURES EN BETON ARME

3.1 Introduction

L'étude de vulnérabilité à grande échelle consiste à identifier les bâtiments les plus vulnérables aux séismes de façon à planifier et à organiser une politique de renforcement du bâti existant. Cette approche, sans aucune évaluation des dommages et des pertes, a l'avantage de pouvoir hiérarchiser les priorités en termes d'aménagement et d'identifier les secteurs les plus sensibles aux secousses sismiques. Cette étape d'étude de la vulnérabilité a un aspect d'expertise plus précis et permet de produire les scénarii sismiques pour la gestion des risques d'une ville ou d'un site.

Ces scénarii se basent sur les courbes de vulnérabilité afin de déterminer les taux de dommages qui pourraient survenir en cas d'un tremblement de terre d'intensité donnée.

3.2 Niveaux de dommages

Afin de construire les courbes de vulnérabilité des structures en béton armé, nous allons définir des matrices de probabilité de dommage. Ces matrices se basent sur la description des niveaux de dommages que peuvent subir ce type de construction.

Nous considérerons six niveaux de dommages. Un niveau de dommage est présenté par la notation « D_k », sachant que k varie de 0 à 5. Les descriptions des différents niveaux de dommages sont données dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Description de dommages pour chaque niveau de dommage [AFPS, 2005].

Niveau de dommage « D_k »	Description de dommage
Niveau 0	Pas de dommage.
Niveau 1	Dommages négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux).
Niveau 2	Dommages légers à modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
Niveau 3	Dommages modérés à importants (Dégâts sensibles et dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)
Niveau 4	Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)
Niveau 5	Dégâts très importants pour les éléments structuraux, effondrement partiel ou total.

Ce descriptif est extrait de celui proposé dans RISK-UE. Dans ce qui suit, nous présentons l'approche adoptée pour l'estimation de la vulnérabilité à grande échelle.

3.3 Principe de la méthode

A partir de l'indice de vulnérabilité, défini dans le chapitre 2, compris entre 0 et 1 et l'intensité MMI, nous avons défini le taux de dommage moyen qui permet de connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné.

Les courbes de vulnérabilité empiriques se basent sur les approches déterministes, exprimant le taux de dommage moyen en fonction du niveau sismique.

Nous avons donc défini les matrices de probabilité de dommage, issues des retours d'expérience sismique en Algérie en se basant sur les définitions données dans le tableau (3.1).

3.3.1 Matrices de probabilité de dommage (DPM)

Les matrices de probabilité de dommages sont la quantification des dommages en fonction de différentes intensités pour chaque classe de vulnérabilité, sachant qu'il existe plusieurs échelles d'intensité, comme présentées au chapitre 1, telle que l'échelle de « Rossi-Forel » (RF), l'échelle de « Medvedev-Sponheuer-Karník » (MSK), l'échelle de « Mercalli » (MMI), modifiée de l'échelle RF, et l'échelle « European Macroseismic Scale » (EMS). Pour notre étude, nous utiliserons l'échelle MMI.

Pour chaque classe de vulnérabilité, nous avons défini la matrice de probabilité de dommage pour les cinq niveaux de dommages présentés auparavant.

Nous proposons les matrices de probabilité de dommage suivantes pour chaque classe de vulnérabilité définie dans le chapitre précédent.

– Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert1

Pour la classe Vert 1, nous proposons la matrice de dommage présentée dans le tableau (3.2).

Tableau 3.2 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 1.

Vert 1					
Dommage	1	2	3	4	5
Intensité					
3					
4					
5					
6					
7					
8	rare				
9	quelques	rare			
10	nombreux	quelques	rare		
11		nombreux	quelques	rare	
12			nombreux		

Pour la classe de vulnérabilité Vert 1, nous constatons que les bâtiments classés dans cette classe subiront des dégâts à partir de l'intensité 8 sur l'échelle MMI.

– Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 2

La matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 2 est donnée dans le tableau (3.3).

Tableau 3.3 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 2.

Vert 2					
Domage	1	2	3	4	5
Intensité					
3					
4					
5					
6					
7	rare				
8	quelques				
9	nombreux	quelques			
10		nombreux	quelques		
11			nombreux	rare	
12					

Selon les retours d'expériences sismiques en Algérie, de rares à quelques bâtiments classés en Vert 2 peuvent subir des dégâts de niveau 1 de dommage pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI. Rares sont les bâtiments à subir des dommages de niveau 4 et cela pour une intensité de 11 sur l'échelle MMI.

– Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 3

Le tableau (3.4) présente la matrice de probabilité de dommage définie pour les bâtiments de classe Orange 3.

Tableau 3.4 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 3.

Orange 3					
Dommage	1	2	3	4	5
Intensité					
3					
4					
5					
6	rares				
7	quelques	rares			
8	nombreux	quelques	rares		
9		nombreux	quelques	rares	
10			nombreux	quelques	
11				nombreux	
12					

Nous pouvons dire que quelques bâtiments classés en orange 3 peuvent subir des dégâts de niveau 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI et des dégâts de niveau 4 pour une intensité de 10 sur cette échelle.

– Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 4

Nous proposons dans le tableau (3.5) la matrice de probabilité de dommage pour les bâtiments classés Orange 4.

Tableau 3.5 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 4.

Orange 4					
Dommage	1	2	3	4	5
Intensité					
3					
4					
5	rares				
6	quelques				
7	nombreux	quelques			
8		nombreux	quelques		
9			nombreux	quelques	
10			la plupart	nombreux	quelques
11				la plupart	nombreux
12					

Dans cette matrice, nous observons des dégâts de niveau 1 à une intensité de 6 et des dégâts de niveau 5 à une intensité de 10 pour quelques structures classées en Orange 4.

– Matrice de probabilité de dommage de la classe rouge 5

Finalement pour la classe de vulnérabilité Rouge 5, nous proposons la matrice de probabilité des dommages donnée dans le tableau (3.6)

Tableau 3.6 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Rouge 5.

Rouge 5					
Dommage	1	2	3	4	5
Intensité					
3	rares				
4	quelques	rares			
5	nombreux	quelques			
6		nombreux	quelques		
7			nombreux	quelques	
8			la plupart	nombreux	quelques
9				la plupart	nombreux
10					la plupart
11					
12					

Nous constatons pour cette matrice que quelques bâtiments classés en Rouge 5 peuvent subir des dégâts de niveau 1 à l'intensité 4 sur l'échelle MMI et la plupart de ces bâtiments subiront des dégâts de niveau 5 pour l'intensité 10 de cette échelle.

Bien sur, les notions de rares, quelques, nombreux et la plupart expriment le pourcentage des bâtiments endommagés lors d'un séisme d'une intensité donnée, ils sont exprimés comme suit :

- De 0 à 5% pour la notion de rares.
- De 0 à 20% pour la notion de quelques bâtiments.
- De 20 à 60% des bâtiments pour la notion de nombreux.
- Plus que 60% des bâtiments pour la notion la plupart.

3.3.2 Courbes de vulnérabilité empiriques

Les courbes de vulnérabilité empiriques sont obtenues à partir de la détermination du taux de dommage moyen « μd ». Ce taux est la probabilité associée à chaque degré de dommage que le bâtiment est susceptible de subir. De plus, le taux de dommage moyen permet d'exprimer le pourcentage de bâtiments endommagés à l'aide de la loi béta.

Le taux de dommage moyen est estimé par l'indice de vulnérabilité des bâtiments et l'intensité sismique sur l'échelle MMI. Le taux de dommage moyen est donné par l'expression suivante :

$$\mu d = 2,55 \times \left(1 + \tanh \frac{I + (7 \times I_{vmoy}) - 13}{2,5} \right) \quad (3.1)$$

avec :

I : Intensité sur l'échelle MMI

I_{vmoy} : Indice de vulnérabilité moyen de chaque classe de vulnérabilité sismique.

Ce dernier a été donné au chapitre précédent.

Les courbes de vulnérabilité obtenues sont les fonctions de vulnérabilité semi empiriques et sont représentées dans la figure (3.1) pour chaque classe de vulnérabilité.

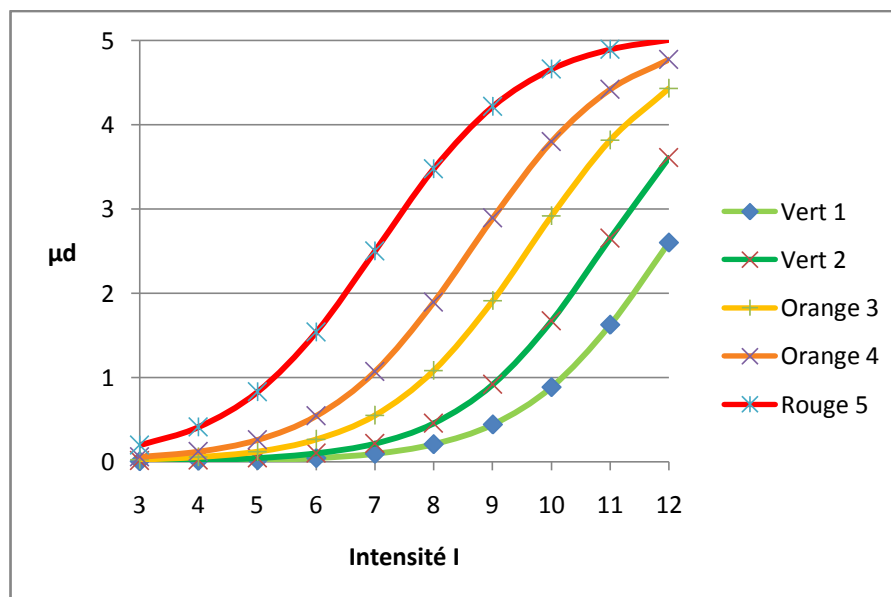


Figure3.1 : courbes de vulnérabilité semi empiriques

3.4 Validation des courbes de vulnérabilité empiriques

Les courbes présentées ci-dessus et qui représentent les courbes de vulnérabilité des structures en béton armé en Algérie ont été validées à travers une comparaison avec celles produites par la méthode RISK-UE.

Nous avons donc tracé les courbes données par RISK-UE sur le même graphe que les courbes que nous avons développées. Ces courbes sont données en figure 3.2.

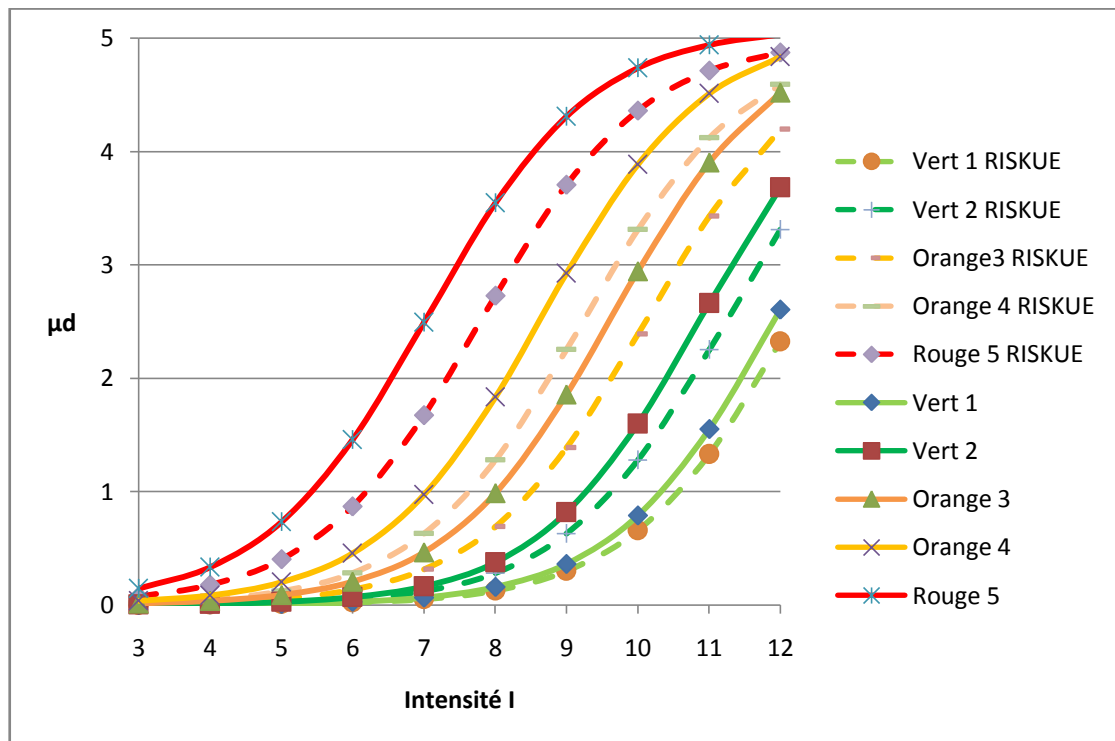


Figure3.2 : Courbes de vulnérabilité développées et celles de RISK-UE.

D'après la figure (3.2), nous constatons qu'il y a un écart entre les valeurs obtenues par notre méthode et celles données par RISK-UE. Ces écarts sont calculés ci-après.

- Classe Vert 1

Nous donnons dans le tableau (3.7) l'écart moyen et la moyenne de l'écart moyen pour la classe Vert1 en ce qui concerne les taux de dommages obtenus par notre méthode et celle de RISK-UE.

Tableau 3.7 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Vert1.

Taux de dommage		Ecart moyen	Moyenne
Risk- UE	Proposé		
0,00173231	0,00212542	0,00019656	0,04065016
0,00413109	0,00506806	0,00046849	
0,00984498	0,01207512	0,00111507	
0,02342495	0,02871548	0,00264527	
0,05552842	0,06798103	0,00622631	
0,13047561	0,15925224	0,01438831	
0,30043325	0,36419506	0,0318809	
0,66169471	0,79067325	0,06448927	
1,33404855	1,5528128	0,10938212	
2,32366288	2,60542605	0,14088159	

Nous constatons que la moyenne de l'écart moyen entre les deux méthodes est de 4%.

- Classe Vert 2

Nous donnons dans le tableau (3.8) l'écart moyen et la moyenne de l'écart moyen pour la classe Vert2 en ce qui concerne les taux de dommages obtenus par notre méthode et celle de RISK-UE.

Tableau 3.8 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Vert2.

Taux de dommage		Ecart moyen	Moyenne
Risk- UE	Proposé		
0,00391273	0,00529304	0,00069015	0,07040722
0,00932517	0,01261038	0,0016426	
0,02219133	0,02998402	0,00389634	
0,05262202	0,07095989	0,00916893	
0,12374461	0,1660985	0,02117695	
0,2854484	0,37917566	0,04686363	
0,63111081	0,82015831	0,09452375	
1,28156834	1,60016542	0,15929854	
2,25621197	2,66079976	0,2022939	
3,311894	3,68436678	0,18623639	

Nous constatons que la moyenne de l'écart moyen entre les deux méthodes est de 7%.

- Classe Orange 3

Nous donnons dans le tableau (3.9) l'écart moyen et la moyenne de l'écart moyen pour la classe Orange 3 en ce qui concerne les taux de dommages obtenus par notre méthode et celle de RISK-UE.

Tableau 3.9 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Orange 3.

Taux de dommage		Ecart moyen	Moyenne
Risk- UE	Proposé		
0,01039369	0,01579953	0,00270292	0,09237684
0,0247268	0,03753452	0,00640386	
0,05859344	0,08864843	0,0150275	
0,13756242	0,20652879	0,03448318	
0,316152	0,4665668	0,0752074	
0,69352544	0,98791648	0,14719552	
1,3878757	1,85819848	0,23516139	
2,39137279	2,94590262	0,27726492	
3,43121038	3,9036243	0,23620696	
4,19592322	4,51945219	0,16176448	

Nous constatons que la moyenne de l'écart moyen entre les deux méthodes est de 9%.

- Classe Orange 4

Nous donnons dans le tableau (3.10) l'écart moyen et la moyenne de l'écart moyen pour la classe Orange 4 en ce qui concerne les taux de dommages obtenus par notre méthode et celle de RISK-UE.

Tableau 3.10 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Orange 4.

Taux de dommage		Ecart moyen	Moyenne
Risk- UE	Proposé		
0,02219133	0,03689207	0,00735037	0,0992548
0,05262202	0,08714616	0,01726207	
0,12374461	0,20310984	0,03968262	
0,2854484	0,4592471	0,08689935	
0,63111081	0,97413722	0,1715132	
1,28156834	1,83770545	0,27806856	
2,25621197	2,92423449	0,33401126	
3,311894	3,88762519	0,28786559	
4,11984897	4,51044475	0,19529789	
4,58908271	4,83511083	0,12301406	

Nous constatons que la moyenne de l'écart moyen entre les deux méthodes est de 10%.

- Classe rouge 5

Nous donnons dans le tableau (3.11) l'écart moyen et la moyenne de l'écart moyen pour la classe Rouge 5 en ce qui concerne les taux de dommages obtenus par notre méthode et celle de RISK-UE.

Tableau 3.11 : Ecart des valeurs de taux de dommage moyen pour la classe Rouge5.

Taux de dommage		Ecart moyen	Moyenne
Risk- UE	Proposé		
0,0766086	0,14636988	0,03488064	0,11696793
0,17897801	0,33586125	0,07844162	
0,40683645	0,73430469	0,16373412	
0,87229597	1,460525	0,29411452	
1,67597356	2,49457395	0,4093002	
2,73032328	3,5471872	0,40843196	
3,70804463	4,30932675	0,30064106	
4,36287077	4,73580494	0,18646709	
4,71161191	4,94074776	0,11456792	
4,87493683	5,03201897	0,07854107	

Nous constatons que la moyenne de l'écart moyen entre les deux méthodes est de 12%.

.

Nous constatons que l'écart entre les deux méthodes augmente au fur et à mesure que la vulnérabilité des structures étudiées augmente. Ceci est explicable par le fait que les constructions algériennes peuvent subir des dommages plus importants en cas de séisme que les structures européennes.

Nous observons donc que les courbes de vulnérabilité proposées sont plus conservatives que celles données par RISK-UE, ceci est dû au manque d'entretien et les transformations effectuées qui ne sont pas en accord avec le Règlement Parasismique Algérien. D'ailleurs l'importance de ces deux paramètres a été soulignée dans l'étude de corrélation effectuée dans le chapitre précédent. Ceci souligne donc l'importance de ces deux paramètres.

Notons enfin que ces courbes prennent en compte implicitement les irrégularités qui peuvent exister dans une structure (ceci à travers les paramètres considérés dans le

calcul de l'indice de vulnérabilité), ce qui constitue un avantage et une caractéristique de la méthode utilisée et qui donne donc un rendu des courbes de vulnérabilité d'un bon niveau de précision.

3.5 Conclusion

La nécessité d'évaluer la vulnérabilité du bâti existant est devenue une priorité dans les pays sismiques, pour évaluer et identifier les bâtiments les plus vulnérables dans une perspective de renforcement. Pour l'estimation de la vulnérabilité à grande échelle, nous avons utilisé une approche statistique et probabiliste. Cette approche consiste à proposer des matrices de probabilité de dommage pour chaque classe de vulnérabilité. Ces matrices expriment la quantification de niveau de dommage correspondant à différentes intensités sur l'échelle MMI. Les notions de rares, quelques, nombreux et la plupart, exprimant le pourcentage des bâtiments qui ont subi un niveau de dommage pour une intensité donnée, ont été également définies. Ceci a permis la construction des matrices de probabilité de dommage (DPM : Damage probability Matrices).

Nous avons utilisé la loi de probabilité « Béta » pour calculer des matrices de probabilité de dommage continues. Le taux de dommage moyen est calculé en fonction de l'indice de vulnérabilité moyen pour chaque classe de vulnérabilité et l'intensité sismique. A partir de ce taux de dommage, nous avons tracé les courbes de vulnérabilité empiriques pour chaque classe de vulnérabilité.

Enfin une validation de ces courbes par celles proposées dans la méthode RISK-UE a été effectuée. Nous avons obtenu une bonne corrélation entre les deux méthodes.

CHAPITRE 4

MISE EN ŒUVRE NUMERIQUE

4.1 Introduction

La théorie élaborée précédemment a fait l'objet d'un développement numérique. A cet effet un programme spécifique a été développé en Delphi. Ce programme se compose de deux parties. La première partie permet de calculer l'indice de vulnérabilité de la structure étudiée, ainsi que sa classification. Alors que la deuxième partie, calcul le taux de dommage moyen, en utilisant les courbes de vulnérabilité développées, pour une intensité donnée.

Nous pouvons utiliser la première partie ou la deuxième partie du programme développé indépendamment l'une de l'autre ou complémentirement l'une après l'autre selon les besoins de l'étude et le type d'analyse voulue, une analyse globale ou une analyse approfondie.

Ces analyses sont basées sur l'identification de paramètres de vulnérabilité et sur la détermination de leur niveau de vulnérabilité pour une structure donnée. Pour faire cela, une fiche d'identification concernant la structure étudiée, devra être renseignée pour obtenir les renseignements nécessaires à l'analyse. La fiche élaborée sera remplie in situ aussi elle devra être aussi concise et précise que possible.

4.2 Elaboration de la fiche technique

Notre fiche d'enquête regroupe l'ensemble des informations permettant le calcul de l'indice de vulnérabilité. Cette fiche comprend les parties principales suivantes :

1er Partie : Données générales :

Dans cette partie, nous trouvons les renseignements généraux de la construction :

- L'adresse de la construction ;
- L'âge ;
- L'usage de la structure ; ...Etc.

2eme Partie : Caractéristiques géométriques : Nous trouvons:

- Le nombre de niveaux dans la structure ;
- La longueur et la largeur totales de la structure ;
- Le nombre des poteaux, des poutres et des voiles ;
- La forme en plan et en élévation ;...Etc.

3eme Partie : Système structural :

Cette partie désigne le type et la qualité du système structural.

4eme Partie : Le sol :

Nous trouvons dans cette partie :

- Le type de sol (rocheux, ferme, meuble,...)
- L'implantation de l'ouvrage (sur terrain accidenté, sur terrain instable, au bord d'une rivière...).

5eme Partie : Eléments non structuraux :

Cette partie regroupe les informations sur l'état et la qualité des éléments non structuraux (état des balcons, état de l'acrotère, état du garde corps...), ainsi que l'état des divers réseaux qui agissent sur la fonctionnalité de la structure (état du réseau gaz, état du réseau électrique, état du réseau d'assainissement...).

6eme Partie : Maintenance :

Dans cette partie, nous trouvons les informations indiquant l'état général de la structure et de son entretien. A la fin de cette fiche, Nous trouvons une légende comprenant des schémas explicatifs du phénomène du poteau court, avec la façon de calculer la hauteur minimale de ce poteau court (voir annexe 3).

La fiche technique élaborée se présente comme suit:

**Fiche Technique pour les
Constructions en Béton Armé**

N° :

Date...../...../.....

Wilaya :

Commune:

Adresse :

Type de la construction

Bâtiment ☐ Maison individuelle ☐ Hangar ☐ Usine ☐ Précaire ☐
Autre (préciser)

Usage de la construction

Habitation ☐ Hospitalier ☐ Commercial ☐ Administration ☐
Sportif ☐ Industriel ☐ Scolaire ☐ Socioculturel ☐
Hydraulique ☐ Lieu de culte ☐ Autre (préciser).....

Date de la construction (approximativement)

Conçue :

En Période coloniale ☐ Après : 1983 ☐ 1988 ☐ 1999 ☐ 2003 ☐

Qualité du sol

Rocheux ☐ Ferme ☐ Meuble ☐ Très meuble ☐ Inconnu ☐

Implantation de l'ouvrage

L'ouvrage est-il implanté :

- Sur un terrain instable (tassant, etc.)	Oui ☐	Non ☐
- Abords d'une falaise	Oui ☐	Non ☐
- En haut ou en bas d'une colline	Oui ☐	Non ☐
- Abords d'une rivière ou d'un oued	Oui ☐	Non ☐
- Sur un terrain accidenté avec changement de pente important	Oui ☐	Non ☐

Système de contreventement

- Portique Auto-stable sans remplissage de la maçonnerie ☐
- Portique Auto – stable avec remplissage de la maçonnerie ☐
- Voiles porteurs ☐
- Mixte portique / voile ☐
- Mixte portique / voile, avec interaction ☐
- Ossature contreventée par noyau ☐
- Autre (préciser) :

Plancher en

Béton armé ☐ Charpente métallique ☐ Bois ☐ Autre (préciser).....

Type de Toiture

Accessible ☐ Inaccessible ☐

Toiture en

Béton armé ☐ Charpente métallique ☐ Bois ☐ Tuile ☐ Ternit ☐
Autre (préciser) :

Caractéristiques de la construction

Nombre de niveaux : SS + RDC + ...

Longueur totale (m) :

Largeur totale (m) :

Hauteur inter-étage (m) :

Hauteur totale (m) :

Nombre de poteaux par étage :

Dimensions min des poteaux (a x b) en cm :

Dimensions min des poutres longitudinales (b x h) en cm :

Dimensions min des poutres transversales (b x h) en cm :

Nombre de voiles dans le sens de la largeur :

Epaisseur des voiles en cm :, Longueur minimale du voile en m :

Nombre de voiles dans le sens de la longueur :

Epaisseur des voiles en cm :, Longueur minimale du voile en m :

- Présence d'ascenseur Oui ☐ Non ☐

- Type d'ascenseur :

- Présence de monte-charge Oui ☐ Non ☐

- Type de monte-charge :

La contrainte f_{c28} estimée : (en MPa).

La construction a-t-elle fait l'objet d'un contrôle ?

Oui ☐

Non ☐

Régularité de la construction

Régularité en plan :

Régulière ☐

Faiblement irrégulière ☐

Irrégulière ☐

Régularité en élévation :

Régulière ☐

Faiblement irrégulière ☐

Irrégulière ☐

Y a-t-il des décrochements en plan ?

Oui ☐

Non ☐

Si oui, mesurer

les dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment dans les deux directions :

Les dimensions dans le sens de la largeur (m) :

Les dimensions dans le sens de la longueur (m) :

Y a-t-il des décrochements en élévation ?

Oui ☐

Non ☐

Si oui, mesurer :

La variation des dimensions en plan du bâtiment entre chaque deux niveaux successifs (m) :

La construction est

A l'angle ☐

Au milieu ☐

Isolée ☐

Présence du joint de rupture

Oui ☐

Non ☐

Si oui, épaisseur du joint de rupture : (cm)

Détails (Etats des éléments suivants)

- Etat des cloisons :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat des balcons :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du garde corps :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat de l'escalier :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat de l'acrotère :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du réseau électrique :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du réseau gaz :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du réseau eau :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du réseau d'assainissement :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
- Etat du réseau téléphonique :	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐
-Toiture légère (tuile, ternet, etc.)	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐

Changement dans la construction

- Y a- t-il des rajouts ou des suppressions dans la construction (EX rajout de cloisons ou élimination d'un voile) ? :	
Oui ☐	Non ☐
- Y a- t- il des transformations dans la construction (EX transformer le balcon en une chambre) ? :	
Oui ☐	Non ☐
- Y a- t- il un changement de fonctionnalité dans la construction (EX changement de la chambre en bloc de stockage ou changement de la structure à usage d'habitation en usine) ? :	
Oui ☐	Non ☐
- Autres transformations (préciser) :	

Présence de poteau court

Oui ☐	Non ☐	Inconnue ☐
<i>Si inconnue, Voir la dernière page (Voir l'annexe3)</i>		

Observations Générales

- Présence de fissuration dans le plancher	Oui ☐	Non ☐		
- Présence de fissuration dans les murs	Oui ☐	Non ☐		
- Présence de fissuration dans les voiles	Oui ☐	Non ☐		
- Qualité des Nœuds	Bonne ☐	Moyenne ☐	Mauvaise ☐	
- L'état général de la construction :				
Très bon ☐	Bon ☐	Moyen ☐	Mauvais ☐	Très Mauvais ☐

Remarques générales :

.....

.....

.....

.....

Nom et Prénom de l'ingénieur

La fiche présentée ci-dessus nous permet d'acquérir toutes les données nécessaires pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions en béton armé. Ces données seront introduites dans le programme développé, appelé VP (Vulnerability Program). Une brève présentation de ce dernier est donnée dans ce qui suit.

4.3 Présentation du programme développé

Un programme en Delphi, appelé « Vulnérability Program » (VP), a été développé. Il se compose de deux modules. Le premier module appelé VIP (Vulnerability Index Program) sert à calculer l'indice de vulnérabilité des structures étudiées et le second module est appelé PVC (program for Vulnerability Curves) et sert pour le calcul du taux de dommage des constructions en béton armé afin de tracer les courbes de vulnérabilité de ces structures. Les deux modules peuvent s'utiliser indépendamment l'un de l'autre ou l'un à la suite de l'autre (VIP puis PVC) selon les besoins.

Delphi est un langage de programmation intégré à un environnement de développement performant, destiné au développement d'application compatible à plusieurs tâches, tel que Windows. En d'autres termes, c'est un outil de programmation visuel qui permet la conception d'objets graphiques directement à l'écran.

Nous avons choisi Delphi comme langage de programmation, car c'est un outil de programmation qui permet de créer rapidement d'importantes applications sous Windows, et son Environnement de Développement Intégré (EDI) apporte au développeur une distance lui permettant de travailler dans des conditions optimales.

Le VIP permet de calculer l'indice de vulnérabilité des structures en béton armé puis de les classer selon la classification proposée. Quant au PVC il permet de calculer le taux de dommages moyen et de déterminer le pourcentage d'endommagement des structures pour des intensités différentes, ce qui permet de réaliser des scénarii sismiques.

4.3.1 Organigramme de calcul

Le programme VP permettant l'analyse de vulnérabilité sismique des constructions en béton armé suit les étapes données dans l'organigramme suivant (figure4.1) :

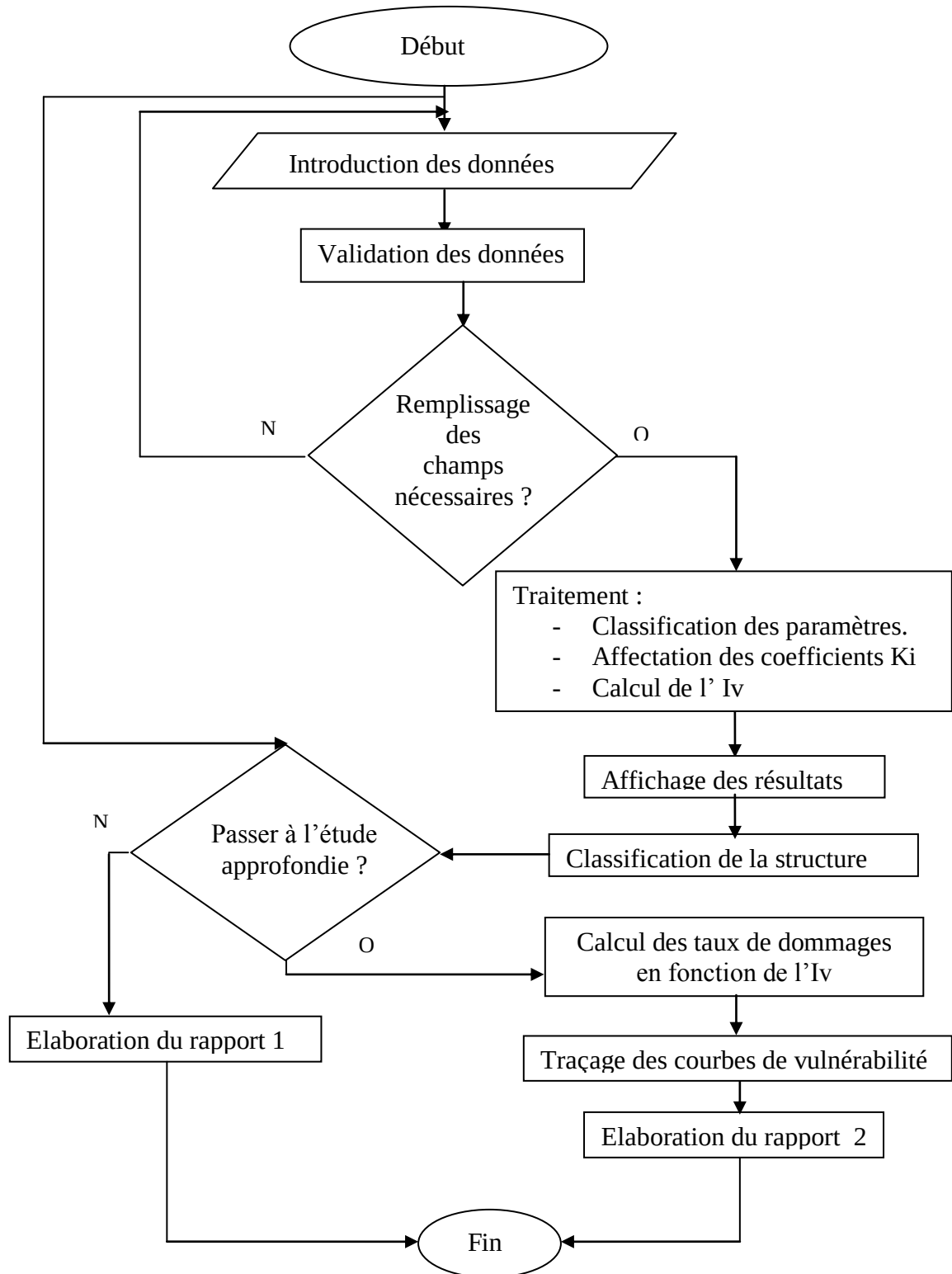


Figure4.1 : Organigramme de calcul.

Dans ce qui suit, nous donnons la description du programme et le rôle de chacun de ses composants.

4.3.2 Description du programme VP

Le programme se compose de deux parties, la partie visuelle dite 'Interface utilisateur' et la partie programme, appelée 'code source'.

1- Partie 'Interface Utilisateur' : Cette partie comporte essentiellement les composants suivants:

a- Page d'accueil : cette page regroupe les principaux menus qui nous aident à manipuler les applications sur l'étude de la vulnérabilité, telles que :

- Le menu fichier : Ce menu nous permet :
 - De lancer des nouvelles saisies.
 - De restaurer ou modifier une étude déjà traitée.
 - De faire des enregistrements des données saisies et des résultats obtenus.
 - D'imprimer le rapport obtenu pour la classification des bâtiments.
- Le menu consultation : Ce menu nous permet de consulter :
 - La base de données regroupant le zonage sismique des communes algériennes selon la réglementation parasismique RPA99, modifiée en 2003.
 - Les rapports d'expertise traités préalablement.
 - Les fiches techniques remplies et enregistrées auparavant.
- Le menu aide : C'est le menu, où nous trouvons les renseignements sur l'utilisation de notre programme.

La figure (4.2) regroupe les différents composants de la page d'accueil.

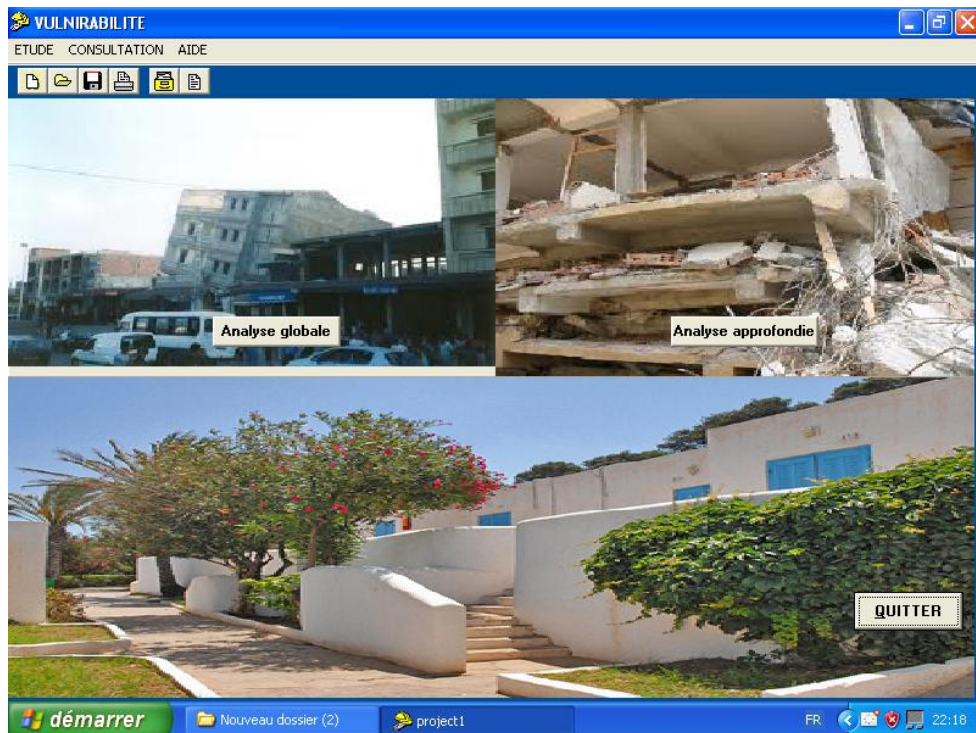


Figure 4.2 : Pages d'accueil du VP.

b- Pages d'Introduction des données :

Deux pages de traitement ont été développées la première est pour le VIP et l'autre pour le PVC.

Pour le traitement d'une application, nous devons saisir toutes les données nécessaires pour l'estimation de vulnérabilité de la construction étudiée ou de l'agglomération étudiée.

Par la suite, nous passons à la validation de ces données qui ne sont validées que si et seulement si le remplissage de tous les champs principaux est vérifié. Une fois que la validation est faite, notre programme passe au traitement des données dans la partie Programme.

La présentation de la page d'introduction des données pour une analyse globale (VIP) est donnée dans la figure (4.3), comme suit :

Figure 4.3 : Page d'introduction des données (Analyse globale).

La page d'introduction des données pour l'analyse approfondie (PVC) est présentée dans la figure (4.4).

Figure 4.4 : Page d'introduction des données (Analyse approfondie).

2- Partie Programme : C'est une partie cachée à l'utilisateur, appelée 'Code Source'. Dans cette partie, nous avons le traitement automatique des données, comme exemple, nous avons :

- Le calcul du poids de la structure.
- Le calcul des données sismiques spécifique à la construction.
- Le calcul des différentes forces exercées sur le bâtiment étudié.
- L'élaboration des différents paramètres d'évaluation de la vulnérabilité.

- L'affectation des coefficients « K_i » correspondant à chaque paramètre.
- Le calcul de l'indice de vulnérabilité « I_v » de la construction étudiée.
- Ainsi que le calcul du taux de dommage « μ_d » pour une intensité donnée.

Les résultats obtenus en appliquant le programme VP, sont regroupés dans deux rapports, le premier rapport édite la page des paramètres où les coefficients de pondération pour chaque paramètre sont déterminés ainsi que la classification de la structure étudiée. Le deuxième rapport donne le taux de dommage et le tracé des courbes de vulnérabilité des exemples étudiés. Une présentation de la page Paramètre est donnée dans la figure (4.5).

NOUVELLE ETUDE

FICHE TECHNIQUE | **PARAMETRES** | RAPPORTS

Coefficient de comportement global de la structure 'R' :

Facteur d'amplification dynamique moyen 'D' :

Zone sismique : Coefficient d'accélération de la zone 'A' :

Poids total de la structure 'W' (KN) :

Facteur de qualité 'Q' : $F_s = 232,356923$ $F_r = 0$ $\alpha = 0$

Système de contreventement :

Qualité du système :

Capacité sismique :

Type du sol :

Diaphragme horizontal :

Régularité en plan :

Régularité en élévation :

Qualité des noeuds :

Phénomène du poteau court :

Détails :

Maintenance :

Modifications :

Figure 4.5: Présentation de la page Paramètre.

La page des résultats du taux de dommage moyen est donnée en figure (4.6).

Analyse approfondie

Données | **Taux de dommage** | Rapport

$I_v =$	Intensité :	Taux de dommage μ_D :
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	

Figure 4.6: Présentation de la page du taux de dommage.

Les principaux composants de notre programme sont regroupés dans l'organigramme suivant (figure 4.7):

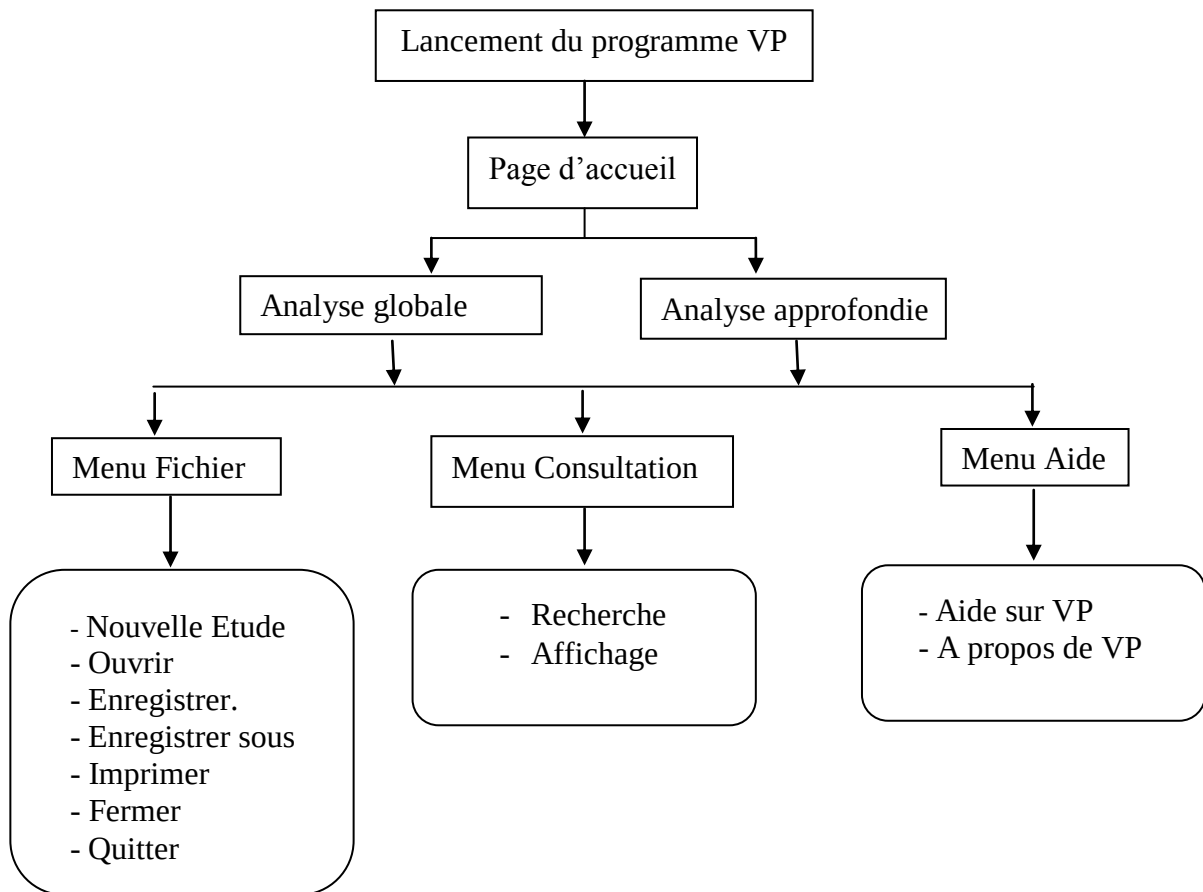


Figure 4.7 : Organigramme des composants du VP.

Le programme développé a été validé sur un certains nombre d'exemples que nous allons présentés.

4.4 Validation

Nous donnons ci-après quelques exemples traités par notre programme et dont les résultats seront comparés à ceux fournis par un organisme de contrôle à savoir le CTC.

4.4.1 Exemple 1

Il s'agit d'un hôtel à usage commercial, situé dans la ville de Marssa Ben M'hidi (Tlemcen), à proximité de la plage, implanté sur un terrain meuble d'une assiette de 3000 m². La réalisation de cet hôtel a débuté courant de l'année 1989 et il a été achevé vers la fin des années 90.

Le bâtiment présente une emprise au sol en forme de 'V' orienté vers la mer, il est en Rez-de-chaussée avec deux étages (RDC+2étages) aménagé comme suit :

- Une cage d'escalier centrale et deux cages d'escaliers de secours latérales, permettant l'accès aux étages supérieurs.
- Le RDC comporte des salles communes (Salon, Cafétéria, Cuisine, restaurant,...).
- Le premier et le deuxième étage comportent, au total, 36 chambres avec un hall de dégagement.
- Les planchers sont en corps creux avec une dalle de compression de 5 cm.
- Les cloisons extérieures sont en doubles parois de 15 + 10 cm d'épaisseur.
- Les cloisons intérieures sont en simples parois de 15 cm d'épaisseur.
- Les fondations sont de type radier nervuré.

Les résultats de calcul, en utilisant le programme VIP, sont comme suit :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné une classification des paramètres comme l'indique le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Résultat de l'application de l'exemple 1.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0.01
Capacité sismique.	C	0.16
Type de sol.	C	0.06
Diaphragme horizontal.	A	0.01
Régularité en plan.	A	0.01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	B	0.03
Phénomène du poteau court.	B	0.03
Détails	C	0.06
Maintenance.	C	0.09
Modifications	C	0.06
Entrechoquement.	A	0.01
Implantation de l'ouvrage.	C	0.06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble : ($IV = 0.59$), il est donc compris entre [0.55 et 0.75[.

Il sera classé dans la classe orange 4. Cela est parfaitement conforme avec les commentaires inscrits dans le rapport technique qui recommande des mesures de renforcements.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Le code PVC a donné les résultats suivants :

Tableau 4.2 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 1.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I » sur l'échelle MMI	Le taux de dommage « μ_d »
0,59	3	0,03
	4	0,07
	5	0,17
	6	0,39
	7	0,84
	8	1,63
	9	2,69
	10	3,71
	11	4,41
	12	4,79

Nous remarquons que cette structure ne subira pas d'endommagement pour les intensités 3 et 4, elle atteindra le niveau de dommage 1 à partir de l'intensité 7, alors qu'elle atteindra le niveau d'endommagement 2 pour une intensité de 8 et le niveau 3 pour l'intensité 9. Cette structure atteindra le niveau 4 c'est à dire sa ruine partielle à l'intensité 10 et sa ruine totale aux intensités 11 et 12 sur l'échelle MMI.

4.4.2 Exemple 2

L'exemple présenté est composé de 48 bungalows à usage d'habitation, sises à Rachgoun, wilaya de Ain Timouchenet. Ces bungalows sont composés de 24 blocs individuels en R+0 séparés par des joints et comportant chacun deux bungalows.

Les résultats trouvés, à l'aide de VIP, sont présentés comme suit :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité :

L'application de cet exemple a donné une classification des paramètres comme l'indique le tableau 4.3 :

Tableau 4.3 : Résultat de l'application de l'exemple 2.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	A	0
Type de sol.	C	0,16
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	C	0,06
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	B	0,03
Phénomène du poteau court.	A	0,01
Détails ou état des éléments non structuraux.	A	0,01
Maintenance.	A	0
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	A	0,01
Implantation de l'ouvrage.	A	0,01

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,32$), il est donc compris entre $[0.25 \text{ et } 0.40[$.

Ces bungalows sont classés en classe verte 2, ce qui est conforme à la conclusion du rapport d'expertise qui stipule que les éléments structuraux sont aptes à supporter les efforts auxquels ils sont soumis.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Le code PVC a donné les résultats suivants :

Tableau 4.4 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 2.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,32	3	0,01
	4	0,01
	5	0,03
	6	0,08
	7	0,19
	8	0,42
	9	0,91
	10	1,74
	11	2,82
	12	3,81

Nous remarquons que cette structure atteindra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 9 sur l'échelle MMI, le niveau d'endommagement 2 pour une intensité de 10, le niveau 3 pour l'intensité 11 et cette structure atteindra le niveau 4 pour l'intensité 12 sur cette échelle.

4.4.3 Exemple 3

Pour l'exemple trois, il s'agit de vingt-quatre (24) logements individuels situés à la commune de Fellaoussene dans la wilaya de Tlemcen. Le calcul de l'indice de vulnérabilité, pour ces vingt-quatre (24) logements, concernera seulement les constructions en béton armé, aussi notre étude ne portera que sur quelques logements.

Les vingt-quatre (24) logements sont, tous, situés aux abords immédiats d'un talus boisé, présentant une forte déclivité orientée Sud-Nord. Ces logements ont été réalisés au courant des années 1980, sur des lots de terrain de superficie avoisinant les 150m² chacun.

a) Logement 1 :

Ce logement est en R+0, à un (1) niveau. Il est constitué de poteaux en béton armé sur plots, les longrines et la dalle sont en béton armé.

Les résultats de calcul sont donnés comme suit :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné une classification des paramètres comme l'indique le tableau 4.5:

Tableau 4.5 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 01.

Paramètre	Classe	Coefficient Ki
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	A	0
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	A	0,01
Détails ou état des éléments non structuraux.	B	0,03
Maintenance.	C	0,09
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	C	0,06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,41$). Il est donc compris entre [0,40 et 0,55[.

Cette construction est classée «orange 3», ce qui est conforme avec la conclusion du rapport d'expertise qui préconise des opérations de reprise en sous œuvre des fondations avec renforcement des éléments d'infrastructure.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Les résultats obtenus par le programme PVC, sont présentés dans le tableau (4.6).

Tableau 4.6 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 01.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I » sur l'échelle MMI	Le taux de dommage « μ_d »
0,41	3	0,01
	4	0,02
	5	0,06
	6	0,14
	7	0,31
	8	0,69
	9	1,39
	10	2,41
	11	3,47
	12	4,26

Nous remarquons que cette structure atteindra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 8 sur l'échelle MMI. Elle atteindra le niveau de dommage 2 pour une intensité de 9, le niveau 3 pour l'intensité 10 et le niveau 4 à l'intensité 11. Cette structure atteindra le niveau 5 à l'intensité 12 sur l'échelle MMI.

b) Logement 2 :

Ce logement comporte un (1) niveau réalisé et le deuxième niveau en cours de réalisation c'est à dire, qu'il est en R+1. Il est en poteaux- poutres en béton armé. Lors de notre visite nous avons constaté de larges fissures sur les murs et les dalles et des dislocations des cloisons.

Le VIP a donné les résultats présentés comme suit :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple à donné les résultats regroupés dans le tableau 4.7:

Tableau 4.7 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 02.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	C	0,16
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	B	0,03
Maintenance.	C	0,09
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	C	0,06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,62$). Il est donc compris entre [0,55 et 0,70 [.

Cette construction est classée en orange 4, ce qui est conforme avec la conclusion du rapport d'expertise qui dit que la nature des désordres recensés confirme l'inadaptation des mesures préventives recommandées pour les ouvrages fondés sur des terrains marneux.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Les résultats obtenus par le programme PVC, sont donnés dans le tableau (4.8), comme suit :

Tableau 4.8 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 02.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,62	3	0,04
	4	0,09
	5	0,20
	6	0,46
	7	0,97
	8	1,84
	9	2,92
	10	3,89
	11	4,51
	12	4,84

Cette structure atteindra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI, alors qu'elle atteindra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 8, le niveau 3 pour l'intensité 9 et le niveau 4 à l'intensité 10. Cette structure atteindra le niveau 5 à l'intensité 11 et 12 sur l'échelle MMI, c'est à dire la ruine totale de la construction.

c) Logement 3 :

Ce logement est constitué de un (01) niveau en poteaux- poutres et une dalle pleine en béton armé. Il a été constaté des fissures sur les dallages et des fissurations inclinées à 45° sur les murs.

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau 4.9:

Tableau 4.9 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 03.

Paramètre	Classe	Coefficient Ki
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	A	0
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	B	0,03
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	B	0,03
Maintenance.	C	0,09
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	C	0,06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,43$). Il est donc compris entre $[0,40 \text{ et } 0,55]$.

Cette construction est classée « orange 3 », ce qui est conforme avec la conclusion du rapport d'expertise qui précise qu'il faut réparer ou remplacer les murs et les cloisons fissurés.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Le tableau 4.10 regroupe les résultats obtenus par le programme PVC.

Tableau 4.10 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple 3/ logement 03.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,43	3	0,01
	4	0,03
	5	0,07
	6	0,16
	7	0,35
	8	0,77
	9	1,52
	10	2,56
	11	3,60
	12	4,34

D'après les résultats obtenus, Nous concluons que la structure étudiée, attendra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 8 sur l'échelle MMI, alors qu'elle attendra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 9, le niveau 3 pour l'intensité 10 et le niveau 4 à l'intensité 11. Cette structure attendra le niveau 5 à l'intensité 12 sur cette échelle.

d) Logement 4 :

C'est un logement en RDC+01, tel que le rez de chaussée est achevé et le premier est en cours de réalisation.. Il est constitué de poteaux- poutres en béton armé, avec dalle pleine en béton armé.

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 04.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	B	0,09
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	B	0,03
Maintenance.	C	0,09
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	C	0,06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,55$). Il est, donc, compris entre $[0,55 \text{ et } 0,70[$.

Cette construction est classée « orange 4 », ce qui est conforme avec la conclusion du rapport d'expertise qui dit qu'une étude devrait être confiée à un BET qualifié avec un avis de control par le CTC avant la mise en exécution par des entreprises spécialisées en travaux de réparation et de renforcement.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Les taux de dommage calculé, en fonction de l'indice de vulnérabilité calculé ci-dessus et les intensités sur l'échelle MMI, par notre programme, PVC, sont présentés dans le tableau (4.12).

Tableau 4.12 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple3/ logement04.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,55	3	0,02
	4	0,06
	5	0,13
	6	0,31
	7	0,68
	8	1,37
	9	2,38
	10	3,45
	11	4,25
	12	4,76

Nous dirons que la structure étudiée, attendra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI, alors qu'elle attendra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 8, le niveau 3 pour l'intensité 9 et le niveau 4 à l'intensité 10. Cette structure attendra le niveau 5 aux intensités 11 et 12 sur cette échelle.

e) Logement 5 :

C'est un logement en RDC+01, tel que le rez de chaussée est achevé, destiné pour l'habitation et le premier est en cours de réalisation. Il est constitué de poteaux- poutres en béton armé, avec dalle pleine en béton armé, fondé sur des semelles isolées.

Les résultats obtenus, par l'utilisation de notre programme, sont présentés ci-après.

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.13):

Tableau 4.13 : Résultat de l'application de l'exemple 3/ logement 05.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	B	0,09
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	B	0,06
Maintenance.	C	0,06
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	C	0,06

Le calcul donne l'indice de vulnérabilité de cet immeuble ($IV = 0,55$). Il est donc compris entre $[0,55 \text{ et } 0,70[$.

Cette construction est classée « orange 4 », ce qui est conforme avec la conclusion du rapport d'expertise qui stipule qu'il faut prévoir des chemisages pour les poteaux et les poutres et prévoir aussi une étude de renforcement de la structure.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Les résultats du taux de dommage, obtenus par le programme PVC, sont présentés dans le tableau (4.14).

Tableau 4.14 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple3/ logement 5.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,55	3	0,02
	4	0,06
	5	0,13
	6	0,31
	7	0,68
	8	1,37
	9	2,38
	10	3,45
	11	4,25
	12	4,71

Nous pouvons donc dire que la structure étudiée, atteindra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI, alors qu'elle atteindra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 8, le niveau 3 pour l'intensité 9 et le niveau 4 à l'intensité 10. Cette structure atteindra le niveau 5 aux intensités 11 et 12 sur cette échelle.

Les exemples traités ci-dessus ont montré la fiabilité des résultats de notre programme aussi dans la suite nous nous proposons d'étudier quelques cas que nous avons traités.

4.5 Exemples d'application

Afin d'effectuer des applications de notre méthode, nous sommes sortis sur site, et nous avons rempli la fiche d'évaluation de deux ouvrages en béton armé, afin de pouvoir estimer leur indice de vulnérabilité « Iv ».

4.5.1 Exemple 01

Il s'agit d'un bloc à usage d'habitation collective, situé à la cité du stade à Boufarik (bloc n°13), wilaya de Blida.. Ce bloc se situe au milieu de quatre (04) blocs répartis en

forme d'un « U », il est en rez de chaussé + quatre (4) étages. Chaque étage comporte deux (2) appartements avec un système constructif en poteaux / poutres (portique auto-stable avec remplissage en maçonnerie). Les planchers sont en corps creux (16+4) cm.

Les résultats de cet exemple sont présentés comme suit :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.15):

Tableau 4.15 : Résultat de l'application de l'exemple 01.

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	B	0,09
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	A	0,01
Maintenance.	B	0,06
Modifications	C	0,06
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	A	0,01

Après calcul, nous trouvons un indice de vulnérabilité de ($IV = 0,50$), donc il est compris entre $[0,40 \text{ et } 0,55[$.

Cette construction est classée en Orange 3, ce qui est conforme à l'état constaté in situ de la construction. La figure (4.8) représente des photos de la construction :

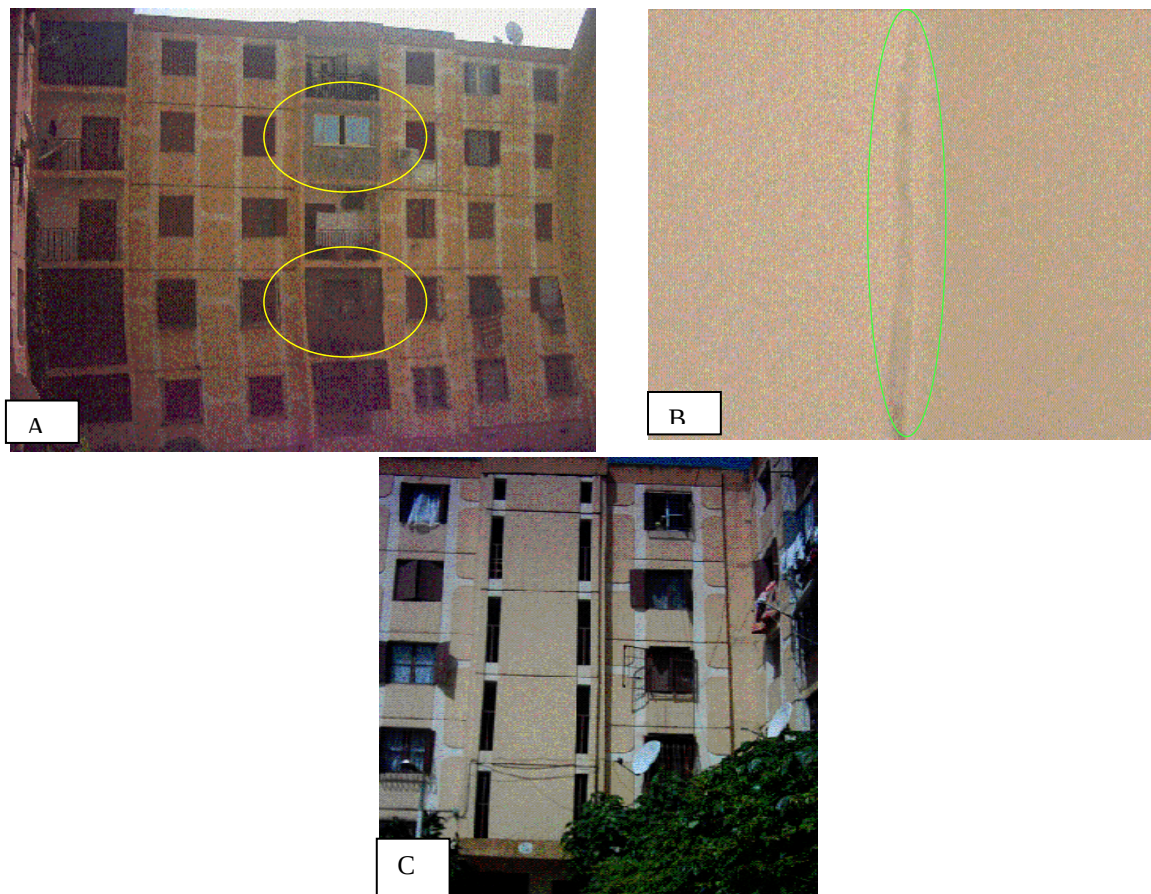


Figure 4.8 : Etat actuel du bloc 13 à Boufarik.

A : Présence de modifications.

B : Présence de fissurations.

C : Etat général.

Nous avons calculé le taux de dommage moyen « μd » de cet exemple d'application à l'aide du programme PVC, les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit :

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Le tableau (4.16) regroupe les résultats obtenus pour l'exemple d'application 01.

Tableau 4.16 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 01.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,50	3	0,02
	4	0,04
	5	0,10
	6	0,23
	7	0,52
	8	1,09
	9	2,00
	10	3,09
	11	4,01
	12	4,58

Donc, cette structure, attendra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI, alors qu'elle attendra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 8, le niveau 3 pour l'intensité 9 et le niveau 4 à l'intensité 10. Cette structure attendra le niveau 5 aux intensités 11 et 12 sur cette échelle.

4.5.2 Exemple 02

Cet ouvrage est un bâtiment en béton armé, composé de réez de chaussé + seize (16) étages et un (1) sous sol. Ce bâtiment est implanté à Kolea , wilaya de Tipaza. Il est à usage d'habitation collective. La construction est composée du système mixte portiques/voiles. Avec des planchers en corps creux de : (16 + 5) cm.

Le calcul de l'indice de vulnérabilité de cet ouvrage ainsi que sa classification sont données dans le paragraphe suivant.

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.17):

Tableau 4.17 : Résultat de l'application de l'exemple 02

Paramètre	Classe	Coefficient K_i
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	A	0,01
Capacité sismique.	B	0,09
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	B	0,03
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	A	0,01
Maintenance.	A	0
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	A	0,01
Implantation de l'ouvrage.	A	0,01

Le calcul donne un indice de vulnérabilité de ($IV = 0,31$). Il est donc compris entre $[0,25 \text{ et } 0,40[$.

Cette construction est classée « Vert 2 », ce qui est conforme à l'état de la construction. La figure (4.9) suivante représente l'état actuel de la construction :



Figure 4.9 : Etat actuel du bloc 01 à Kolea.

Le calcul du taux de dommage est donné comme suit :

- Résultat de calcul du taux de dommage:

Le tableau (4.18) regroupe les résultats obtenus pour l'exemple d'application 02.

Tableau 4.18 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 02.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μ_d »
0,31	3	0,06
	4	0,01
	5	0,03
	6	0,08
	7	0,18
	8	0,40
	9	0,86
	10	1,67
	11	2,74
	12	3,75

D'après les résultats donnés dans le tableau ci-dessus, cette construction, atteindra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 9 sur l'échelle MMI, alors qu'elle atteindra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 10, le niveau 3 pour l'intensité 11 et le niveau 4 à l'intensité 12 sur cette échelle.

4.5.3 Exemple 03

Il s'agit du bloc 03 situé à la cité des 237 logements Dar El Baida, wilaya d'Alger. Ce bloc est l'un des huit (08) blocs répartis autour d'un quadrangle en R+5 (06 niveaux), il est en béton armé avec un système constructif en poteaux/poutres (portique auto stable avec remplissage en maçonnerie).

L'application du programme VP a donné les résultats présentés ci-dessous :

- Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité

Cet exemple a donné les résultats regroupés dans le tableau (4.19) :

Tableau 4.19: Résultat de l'exemple d'application03.

Paramètre	Classe	Coefficient Ki
Système de contreventement.	A	0
Qualité du système de contreventement.	C	0,06
Capacité sismique.	B	0,09
Type de sol.	C	0,06
Diaphragme horizontal.	A	0,01
Régularité en plan.	A	0,01
Régularité en élévation.	A	0
Qualité des nœuds.	C	0,06
Phénomène du poteau court.	C	0,06
Détails ou état des éléments non structuraux.	C	0,06
Maintenance.	C	0,09
Modifications	A	0,01
Entrechoquement.	C	0,06
Implantation de l'ouvrage.	A	0,01

Le calcul donne comme indice de vulnérabilité de ce bâtiment ($IV = 0,58$). Il est donc compris entre $[0,55 \text{ et } 0,70[$. Donc, cette construction est classée « Orange 4 ».

Les résultats de calcul du taux de dommage, de cette construction, en fonction de différentes intensités sont donnés comme suit.

- Résultat de calcul du taux de dommage:

L'application de l'exemple sur le programme PVC, a donnée les résultats regroupés dans le tableau (4.20).

Tableau 4.20 : Résultat du taux de dommage pour l'exemple d'application 03.

L'indice de vulnérabilité « Iv »	Intensité « I »	Le taux de dommage « μd »
0,58	3	0,03
	4	0,07
	5	0,16
	6	0,37
	7	0,80
	8	1,56
	9	2,62
	10	3,65
	11	4,37
	12	4,77

Cette structure, attendra le niveau de dommage 1 pour une intensité de 7 sur l'échelle MMI, alors qu'elle attendra le niveau de dommage 2 pour l'intensité 8, le niveau 3 pour l'intensité 9 et le niveau 4 à l'intensité 10 sur cette échelle. Donc, cette structure attendra le niveau d'endommagement 5 pour les intensités 11 et 12 sur l'échelle MMI.

Nous présentons dans ce qui suit les courbes de vulnérabilité des exemples traités ci-dessus.

4.6 Courbes de vulnérabilité

Après le calcul des taux de dommage moyen des exemples étudiés, nous avons tracés leurs courbes de vulnérabilité. Ces courbes sont présentées sur la figure (4.10) ci-après.

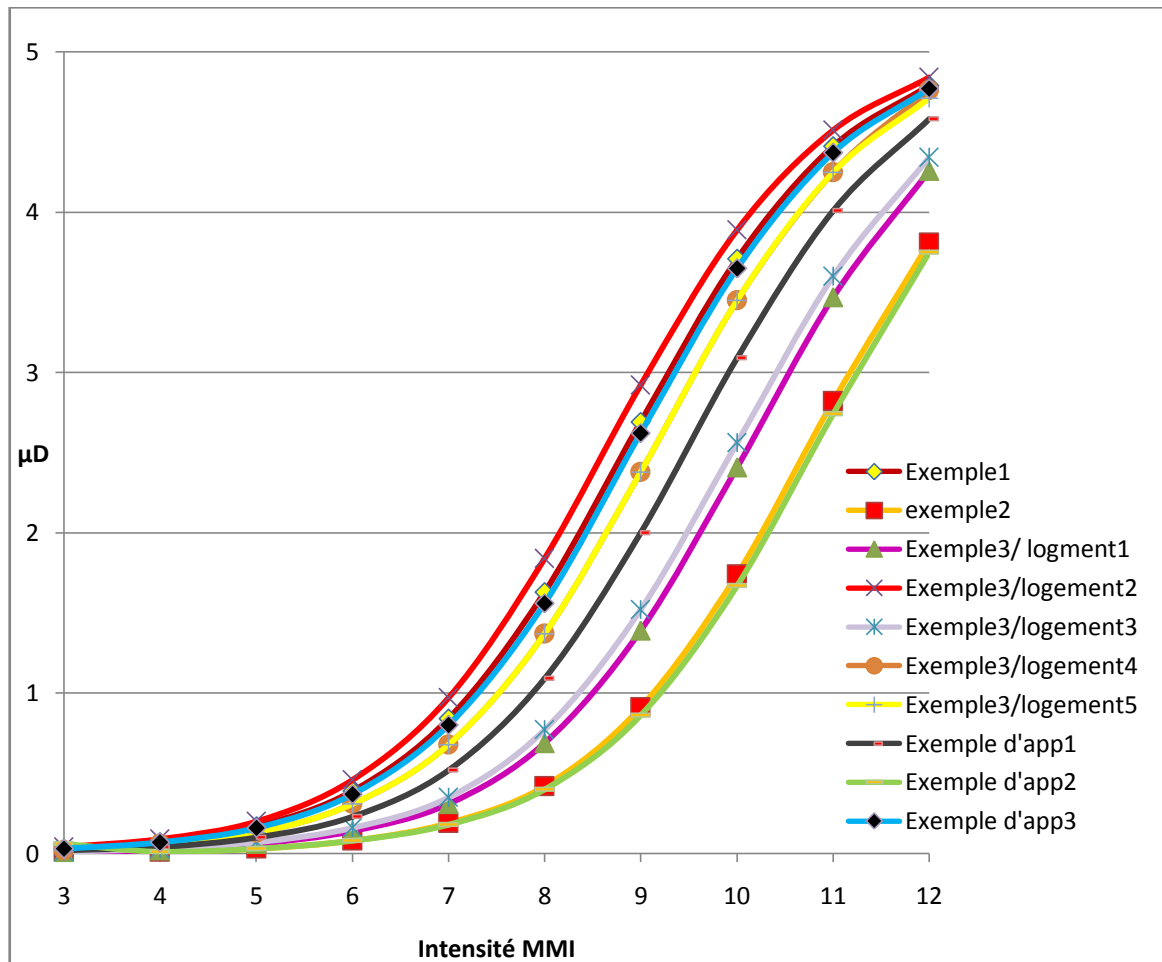


Figure 4.10 : Courbes de vulnérabilité des exemples étudiés.

Les courbes de vulnérabilité des exemples traités mettent en exergue la vulnérabilité de certaines structures et souligne l'importance de la conformité au règlement parasismique qui permet une réduction significative de la vulnérabilité sismique des constructions en béton armé.

4.7 Conclusion

Nous avons développé un programme en langage Delphi, afin de calculer l'indice de vulnérabilité d'une construction et donner sa classification en fonction de son comportement probable vis à vis de l'action sismique. Ce programme calcule aussi le taux de dommage moyen pour une intensité donnée, ce qui permet de prévoir des scénarii d'endommagement sismique des structures étudiées et de tracer leur courbe de vulnérabilité.

Le programme développé et que nous avons appelé VP «Vulnerability Program» a été validé sur quelques exemples présentés. Nous avons aussi appliqué ce programme sur d'autres exemples. Les résultats obtenus sont en bonne adéquation avec les expertises du CTC et les constatations in situ. Des scénarii sismiques peuvent être élaborés à partir des taux de dommages obtenus.

CONCLUSION

Les bâtiments en béton armé (BA) soumis aux tremblements de terre subissent des dégâts plus ou moins importants en fonction de leur conformité ou pas au règlement parasismique actualisé. Les règlements ont pour but de réduire les pertes néanmoins l'évolution de l'état des connaissances fait que des mises à jour sont réalisées régulièrement. Ceci conduit à la longue à la présence d'un patchwork de structures ayant des résistances variables et donc une vulnérabilité sismique différente.

Afin de réduire cette vulnérabilité sismique, il faut disposer d'un outil de diagnostique fiable. Le présent travail entre dans ce cadre et a conduit au développement d'un programme appelé VP (Vulnerability Program). Composé de deux programmes, le VIP (Vulnerability Index Program) et le PVC (Program of Vulnerability Curves), permet d'estimer la vulnérabilité sismique du bâtiment en béton armé. Le VIP calcule l'indice de vulnérabilité de structures en BA et les classifie en cinq classes. Le PVC détermine le taux de dommage que pourrait subir une structure pour une intensité donnée, ce qui permet de réaliser des scénarii sismiques et de donner une évaluation de leur comportement vis-à-vis de l'action sismique.

Nous avons identifié les matrices de probabilité de dommage pour chaque classe de vulnérabilité proposée. Ces matrices expriment la quantification de niveau d'endommagement correspondant à différentes intensités sur l'échelle MMI (Mercalli Modified Intensity). Les matrices de probabilité de dommage continu sont calculées par la loi de probabilité « bêta ». Un taux de dommage moyen est déterminé. Ce taux de dommage moyen est calculé en fonction de l'indice de vulnérabilité moyen pour chaque classe de vulnérabilité et l'intensité sismique. A partir de ce taux de dommage, nous avons tracé les courbes de vulnérabilité semi-empiriques pour chaque classe de vulnérabilité.

Les développements proposés ont été validés à travers plusieurs exemples. Des exemples d'applications ont été traités aussi. Ceci à l'aide d'une fiche technique élaborée spécifiquement à cet effet et programmée en Delphi. Les résultats obtenus sont en conformité avec les expertises effectuées.

La problématique de la détermination des courbes de vulnérabilité est complexe et les méthodes d'élaboration de ces dernières sont multiples. Aussi il serait intéressant de déterminer des courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en BA en utilisant la technique de la Pushover afin de les comparer avec ceux obtenus.

Un autre aspect concernerait les coefficients de pondération des paramètres intervenant dans le calcul de l'indice de vulnérabilité qui pourraient être déterminés à l'aide de la modélisation au lieu d'être déterminé empiriquement.

Des scénarii sismiques sur des sites urbains peuvent être effectués en considérant non seulement les courbes de vulnérabilités des constructions en béton armé mais aussi ceux de la maçonnerie, de la charpente métallique ainsi que ceux des constructions mixtes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

AFPS, *Vulnérabilité Sismique du Bâtis Existant : approche d'ensemble*, Cahier Technique n°25, France, 2005.

Aguilar A., Pujades L. G., Barbat A. H. et Lantada N., *A Probabilistic methodology to estimate the seismic risk of buildings in urban zones: Application to Barcelona*, Proceedings of the International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM 2010), Shanghai, China, pp. 667-673, 2010.

Amellal O., Bensaïbi M., *Indice de Vulnérabilité les Structures en Charpente Métallique*, Proceedings du 8ème Colloque National AFPS 2011, Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France, 2011.

Ansal A., D'Ayala D., Kurtuluş A., Tönük G., *Site Specific Ground Motion Estimations for the Vulnerability Assessment of Historic Buildings in Istanbul*, Proceedings 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering 3-5 March 2010 (7CUEE), Tokyo, Japan, pp. 75-80, 2010.

AS 55, règlement Anti-Sismique 55, 1955.

Askan, A., Yucemen, M.S., *Probabilistic methods for the estimation of potential seismic damage: Application to reinforced concrete buildings in Turkey*, Structural Safety, Vol. 32, pp. 262–271, 2010.

ATC 13., *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council, Redwood City, California. 1987.

ATC 21, *Rapid Visual Screening of building for Potential Seismic Hazards: a Handbook*. Applied Technology Council, FEMA-145, Redwood City, California. 1988.

ATC 40., *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

ATC13, *Earthquake Damage Evaluation Data for California, Report ATC-13*, Applied Technology Council, Redwood City, California, U.S.A. 1985.

Barbat, A.H., Yépez Moya, F. et Canas, J.A., *Damage Scenarios Simulation for Seismic Risk Assessment in Urban Zones*, Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 3, pp. 371-394. 1996.

Belarbi-Mehenni H., Bensaïbi M., *Etude post-sismique de la vulnérabilité du bâtiment logement de fonction du lycée Bachir El Ibrahimî à Aïn Temouchent*, Actes du Deuxième Colloque National de Génie Parasismique, 08-10 Octobre, Sheraton Club des Pins, Alger, Algérie, pp. 319- 325, 2000.

Belheouane F.I. *Détermination De L'indice De Vulnérabilité Pour Les Bâtiments En Béton Armé*, Mémoire de magister, Université SAAD DAHLAB de Blida, Algérie, 2006.

Belheouane F.I., Bensaïbi M., *Seismic Vulnerability Index for Reinforced Concrete Construction in Algeria*, Adv. Sci. Lett., Vol.13, pp.364-368, 2012.

Belheouane F.I., Bensaïbi M., *Evaluation of the Vulnerability Index for Reinforced Concrete Constructions in Algeria*, AES technical Reviews Part C: International Journal of Advances And Trends In Engineering Materials and their Applications IJATEMA , Vol.1, pp.101-106, 2012.

Belmouden Y., Lestuzzi P., *Évaluation De La Vulnérabilité Sismique Des Bâtiments Existants En Suisse*, Rapport de recherche, Lausanne, 2006.

Benedetti D. et al, *Seismic Vulnerability And Risk Evaluation for Old Urban Nuclei*, Department of structural Engineering Polytechnic, Milan, Italy, 1988.

Benedetti D. et Petrini V., *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure*, The industry of constructions, Vol. 18, pp. 66-78, 1984.

Bensaibi M. et al., *Seismic risk assessment of current buildings of Algiers city*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper n°3115, August 1-6, 2004.

Bensaibi M., Tadjer K. et Mezazigh B., *Scénario catastrophe de la ville de Blida*, Actes du VIIème Colloque National AFPS, 04-06 Juillet, Ecole Centrale Paris, France, 2007.

Bensaibi M. et Tadjer K., *A simplified approach to earthquake risk scenarios with application to Blida*, International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, paper N°0128, Shanghai, China, 23-26 September, 2010.

Bensaibi M., Yousefi N., *Indice de Vulnérabilité pour les Constructions Mixtes : Maçonnerie/Charpente Métallique*, Proceedings du 8ème Colloque National AFPS 2011, Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France, 2011.

Boukri M., *Détermination de l'Indice de Vulnérabilité des Constructions en Maçonnerie*, Thèse de magistère, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2003.

Braga F., Dolce M., Liberatore D. *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K76 scale*, Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, 1982.

Buratti, N. Ferracuti, B. et Savoia, M., *Response Surface with random factors for seismic fragility of reinforced concrete frames*, Structural Safety, Vol. 32, pp. 42–51, Elsevier, 2010.

Calvi G.M., Pinho R., Magenes G., Bommer J.J. , Restrepo-Vélez L.F. et Crowley H., *Development Of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over The Past 30 Years*, ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 43, No. 3, pp. 75-104, 2006.

Cardona O. D., Ordaz M. G., Reinoso E., Yamin L. E. et Barbat A. H., *Comprehensive approach for probabilistic risk assessment (CAPRA)/ International initiative for disaster risk management effectiveness*, Proceedings of the International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM 2010), Shanghai, China, pp. 268-279, 2010.

CETE, Méditerranée (DREC/SVGC-SIG), *Comparaison de méthodes qualitatives d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes : Plan séisme - action 2.4.7*. Guide des méthodes de diagnostics de la résistance des bâtiments aux séismes, projets de Service public du BRGM 2006 (fiche SP n 06RISG26), 2008.

CRAAG, www.craag.dz/surveillance.html , www.craag.dz,, 2012.

Corsanego A. et Petrini V., *Evaluation criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory*, Seismic Engineering, Patron ed., Vol. 1, pp. 16-24, 1994.

Di Pasquale, G., Orsini, G. et Romeo, R.W., *New Developments in Seismic Risk Assessment in Italy*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 101-128, 2005.

Djaalali F., *Détermination des courbes de vulnérabilité pour le bâti en maçonnerie de la capitale Alger (Algérie)*, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Alger, 2013

Djaalali F., Bensaïbi M., Bourahla N. et Davenne L., *Vulnerability curves of masonry constructions Algiers case study*, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 42, No. 4, 2012.

Djaalali F., Bensaibi M. et Bourahla N., *Evaluation of the vulnerability index for unreinforced masonry structures*, Applied Mechanics and Materials, Vols. 166- 169, pp. 1387-1390, 2012.

Djaalali F., Boukri M. et Bensaibi M., *Vulnérabilité Sismique des Bâtiments en Maçonnerie de la Ville d'Alger*, Acte du Colloque International Risques, Vulnérabilité et Fiabilité dans la construction, vers une réduction des désastres, 11 et 12 Octobre, Sheraton Club des Pins, Alger, Algérie, Vol. 2, pp. 406-415, 2003.

Djaalali F., *Etude de la Vulnérabilité Sismique des Structures en Maçonnerie*, Thèse de magistère, Ecole nationale Polytechnique, Algérie, 1997.

Dolece, M., Masi, A., Marino, M. et Vona, M., *Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) Including Site Effects*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 115-140. 2003.

Dolece M., Kappos A., Masi A., Penelis G., Vona M., *Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies*, Engineering Structures, Elsevier, Vol. 28, pp. 357–371, 2006.

Dumova-Jovanoska, E., *Fragility Curves for RC Structures in Skopje Region*, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.

Erdem R. T., Demir A., Bagci M., *Performance evaluation of an existing structure according to Turkish earthquake code-2007 and FEMA440*, 7th National Conference on Earthquake Engineering 30May-3June, Istanbul, Turkey, 2011.

European Seismological Commission (E S C), *L'Echelle Macrosismique Européenne EMS98*, Edition Française A. Levert, Luxembourg, 2001.

FEMA 154, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential seismic Hazards: Supporting Documentation*. Federal Emergency Management Agency, Washington. 1988.

FEMA, *HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology - Technical and User Manuals*, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C, USA, 1999.

FEMA, *HAZUS-MH Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC, USA, 2003.

Giovanazzi S. et Lagomarsino S., *A Macroseismic Model for the vulnerability assessment of buildings*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.

Giovanazzi S. et Lagomarsino S., *Seismic Risk Analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas*. European Safety and Reliability Conference ESREL, Maastricht, The Netherlands, 2003.

Giovinazzi S., *The Vulnerability Assessment And The Damage Scenario In Seismic Risk Analysis*, these de PH D, Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig et University of Florence, 2005.

GNDT., *The Catania Project: Earthquake Damage Scenarios for a High Risk Area in the Mediterranean*, Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, Italy. 2000.

Grünthal, G., *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Volume 15 – European Macroseismic Scale 1998*, European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg., 1998.

Güneyisi, E. M., Altay, G., *Seismic fragility assessment of effectiveness of viscous dampers in R/C buildings under scenario earthquakes*, Structural Safety, Vol. 30, pp. 461–480, 2008.

Ibn Khaldoun, *EL Muqaddima 1377, Les Prolégomènes*, traduit en français par W. Mac Guckin de Slane en 1863. Site web : <http://bibliotheque.uqac.ca>.

Instituto di Rischio Sismico (IRS), *Determinazione del Rischio Sismico a fini Urbanistici in Lombardia*, Région Lombardia –CNR, Italia, 1996.

Jayaram N., Shome N. et Rahnama M., *Development of earthquake vulnerability function for tall buildings*, Earthquake Engineering and Structural dynamics, Vol. 41, No11, pp. 1495-1514, 2012.

JBDPA (Japanese Building Disaster Prevention Association), *Standard for Seismic Capacity Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Japanese Building Disaster Prevention Association, Ministry of Construction, Tokyo, Japan. 2001.

Kwon O. S. et Elnashai A., *The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure*, Engineering Structures, Elsevier, Vol. 28, pp. 289–303, 2006.

Lagomarsino S. et Podestà S., *Damage and vulnerability assessment of churches after the 2002 Molise, Italy, earthquake*. Earthquake Spectra, 20(S1), pp. S271-S283, 2004.

Lang K. et Bachmann H., *On the seismic vulnerability of existing unreinforced masonry buildings*, Journal of Earthquake Engineering, Vol.7, No. 3, pp.407-426. 2003.

Lang K., *Seismic Vulnerability of Existing building*, Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss, 2002.

Lantada N., Pujades L. G. et Barbat A. H., *Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison*, Natural Hazards, Publisher: Springer Netherlands, Vol. 51, No. 3, pp. 501-524, 2008.

Lantada N., Irizarry J., Barbat A. H., Goula X., Roca A., Susagna T. et Pujades L. G., *Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method*, Bulletin of Earthquake Engineering, Publisher: Springer Netherlands, Vol.8, No. 2, pp 201-229, 2009.

Lazzeli F., Farsi M., *Seismic Vulnerability Assessment of buildings in Algiers Area*, Word Academy of Science, Engineering and Technology, 61, 2012.

Lurenço P.B. et Roque J.A., *Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings*, Construction and Building Material journal, Elsevier, Vol.20, No. 4, pp.200-208, 2006.

Marfai M.A. et Njagih J.K., *Vulnerability analysis and risk assessment for seismic and flood hazard in Turialba city, Costa Rica*, International Institute for Geo-information Sciences and Earth Observation (ITC) Enschede Netherlands, 2004.

Medvedev J., *Engineering Seismology*, Academia Nauk Press, Moscow, 1962.

Medvedev J., *Seismic Intensity Scale M.S.K.-76*. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. Warsaw, A-6 (117). 1977.

Mehenni Belarbi H., Bensaïbi M., *Vulnérabilité sismique et renforcement du futur pavillon des urgences du CHU Mustapha*, Proceedings en CD de la Conférence Internationale de Géoengineering IGC/USTHB, 11-13 Juin, Alger, Algérie, 2000.

Mehenni H., Bensaïbi M., *Etude de la vulnérabilité sismique de bâtiments à Alger (Algérie)*, Annales des Ponts et Chaussées, No. 94, pp. 55-64, 2000.

Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M., *The Comparison of Macroseismic Intensity Scales*, J. Seism, 2009.

Nations Unis (N U), *Vulnérabilité des grandes villes aux catastrophes naturelles*, Rapport, 1998.

NSET (National Society for Earthquake Technology), *Seismic Vulnerability Assessment of Existing Buildings*, Nepal, 2011.

Otani S., *Seismic Vulnerability Assessment Methods for Buildings in Japan*, Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol. 2, No. 2, pp. 47–56, September 2000.

Otani S., *Seismic Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Buildings*, Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol. XLVII(B), , pp. 5 - 28. October 2000.

PA 62, *Parasismique Algérien* 62, 1962.

PA 69, *Parasismique Algérien* 69, 1969.

Radius, OYO Corporation, *RADIUS Methodology*, IDNDR, 1999.

Richter C. F., *An instrumental Earthquake Scale*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 25, pp. 1- 32, 1935.

Richter C. F., *Elementary Seismology*. W. H: Freeman, San Francisco, 1958.

RISK-UE, *An advanced approach to earthquake risks scenarios with applications to different European towns*, WP4: Vulnerability of current buildings, EVK4-CT-2000-00014, 2003.

Rossetto T. et Elnashai A., *Derivation of Vulnerability Functions for European-Type RC Structures Based on Observational Data*, *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 10, pp. 1241-1263., 2003.

Rossetto, T. et Elnashai, A., *A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures*, *Engineering Structures*, Vol. 7, No. 3, pp. 397-409, 2005.

Rota, M., Penna, A. et Strobbia, C., *Typological Fragility Curves from Italian Earthquake Damage Data*, *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 2006.

RPA81, *Règlement Parasismique Algérien 81*, Algérie, 1981.

RPA83, *Règlement Parasismique Algérien 83*, Algérie, 1983.

RPA88, *Règlement Parasismique Algérien 88*, Algérie, 1988.

RPA99, *Règlement Parasismique Algérien 99*, Algérie, 1999.

RPA99, *Règlement Parasismique Algérien 99*, Algérie, 2003.

Sabetta, F., Goretti, A. et Lucantoni, A., *Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion*, Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, pp. 1-11. 1998.

Sandi H., Pomonis A., Francis S., Georgescu E. S., Mohindra R., Borcia L. S., *Seismic Vulnerability Assessment. Methodological Elements and Applications to the Case Of Romania*, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, Vol. 4, No. 6, pp. 328- 341, 2007.

Scawthorn, C., Iemura, H. et Yamada, Y., *Seismic Damage Estimation for Low- and Mid Rise Buildings in Japan*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 9, No. 2, pp. 93-115. 1981.

Schmid M. et Hegg C., *Le rôle de la science dans la gestion des dangers naturels et des risques majeurs : Compétences scientifiques en Suisse et au sein de la Genève internationale*, Série PLANAT (Plate- forme National Dangers naturels), Vol. 1, 2006.

Schmid M., *Ingénierie de crise : Vers une culture du risque et de la prévention*, Cahiers de la Coopération, N°2, EPFL, Lausanne, 2005.

Shinozuka, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Abrams, D.P., Hwang, H.H.M. et Rose, A., *Advances in Earthquake Loss Estimation and Application to Memphis, Tennessee*, Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 4, pp. 739-758, 1997.

Shinozuka, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Abrams, D.P., Hwang, H.H.M. et Rose, A., *Advances in Earthquake Loss Estimation and Application to Memphis, Tennessee*, Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 4, pp. 739-758, 1997.

Singhal, A. et Kiremidjian, A.S., *Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 1459-1467, 1996.

Solomon T. et Zheng L., *Earthquake induced damage classification for reinforced concrete building*, Structural Safety, Elsevier, Vol. 32, pp. 154–164, 2010.

Spence, R., Coburn, A.W. et Pomonis, A., *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, Madrid, Spain, Vol. 1, pp. 551-556, 1992.

Tadjer K., Bensaibi M et Chaid A., *Vulnerability assessment of Blida city*, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, paper n°1133, September 24-28, 2012.

Vargas Y. F., Pujades L. B. et Barbat A. H., *Probabilistic assessment of the damage in reinforced concrete structures*, Proceedings of the International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM 2010), Shanghai, China, pp. 478-485, 2010.

Verderame G. M., Polese M., Mariniello C. et Manfredi G., *A simulated design procedure for the assessment of seismic capacity of existing reinforced concrete buildings*, Advances in Engineering Software, Elsevier, Vol. 41, pp. 323–335, 2010.

Whitman R.V., J.W. Reed, S.T. Hong, *Earthquake Damage Probability Matrices*. Proceedings of 5th European Conference on Earthquake Engineering, Rome, pp; 2531. 1973.

Whitman, R.V., Anagnos, T., Kircher, C.A., Lagorio, H.J., Lawson, R.S. et Schneider, P., *Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology*, Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 4, pp. 643-661, 1997.

Yépez F., Barbat A.H. et Canas J.A., *A Method to perform Computer Simulations of Damage in Buildings for Seismic Risk Evaluation*, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, 1996.