

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie civil

ELABORATION DE COURBES DE VULNERABILITE POUR DES STRUCTURES MIXTES MAÇONNERIE - CHARPENTE METALLIQUE

Par

YOUSFI Nacim

Devant le jury composé de

B. MENADI	Professeur, U. BLIDA 1, BLIDA	Président
N. BOURAHLA	Professeur, U. BLIDA 1, BLIDA	Examineur
A. BRAHMA	Professeur, U. BLIDA 1, BLIDA	Examineur
M. HADID	Professeur, E.N.S.T.P., Alger	Examineur
F. FEDGHOUCHE	Maître de conférences, E.N.S.T.P., Alger	Examineur
M. BENSABIBI	Professeur, E.N.S.T.P., Alger	Rapporteur
M. BELAZOUGUI	Maître de recherche, Directeur du CGS, Alger	Invité

Blida, 29 Juin 2017

الملخص

في الجزائر، الهياكل الموجودة من نوع الاجر المقوي هشة بالنسبة لزلزال، لذا ينبغي امتلاك ادوات موثوقة تسمح استهداف التدخل للحد من الاضرار في حالة الزلزال. لهذا الغرض، تم تعيين العوامل التي لها تأثيرا على التصرف الزلزالي لهذه البنيات. عناصر الوزن لهذه العوامل لثلاث فئات من الهشاشة المعتبرة حددت بتحليلات ديناميكية غير المرنة. مؤشر الهشاشة (م.ه) يحتسب اذن للسماح لتصنيف الهيكل المدروس حسب التصنيف المقترح.

اعتمادا على عودة الخبرة الزلزالية في الجزائر، تم تصميم مصفوفات احتمال الاضرار. كتابة هذه المصفوفات بشكل متواصل سمح بتعيين منحنيات الهشاشة نصف التجريبية لهياكل الاجر المقوي باستعمال مؤشر الهشاشة المحسوب و ذلك باستعمال برنامج صمم بدلفي.

تم ايضا مقارنة منحنيات الهشاشة التي تم الحصول عليها مع التي انجزت بريسك يو.

RESUME

En Algérie, les structures existantes en maçonnerie chaînée sont vulnérables vis-à-vis de l'action sismique, aussi il convient 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 de ces structures. Les facteurs de pondération de ces paramètres pour les trois classes de vulnérabilité considérées ont été déterminés par analyses dynamiques non linéaire. 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 maçonnerie chaînée en utilisant l'IV calculé et en utilisant un programme élaboré en Delphi.

Une comparaison des courbes de vulnérabilité obtenues avec celles données par RISK-UE a été réalisée aussi.

ABSTRACT

In Algeria, the existing reinforced masonry structures are vulnerable to earthquake, so it will be necessary to get reliable tools allowing to target the intervention in order to mitigate damages in case of an earthquake. For this purpose, parameters having an influence on the seismic behaviour of such structures are identified. Weighting factors of these parameters for the three vulnerability classes considered are determined by non-linear dynamic analyses. A vulnerability index (VI) is calculated allowing classifying the studied structure according to a suggested classification.

According to the seismic feedback experience in Algeria, damage probability matrices have been developed. Writing these matrices in a continuous form allowed determining the semi empirical vulnerability curves for the reinforced masonry structures using the calculated VI and using an elaborated Delphi program.

A comparison of obtained vulnerability curves with those given by RISK-UE was carried out too.

REMERCIEMENTS

Louange à DIEU le tout puissant qui nous a donné santé, courage, prospérité et de nous avoir guidé vers le savoir.

Je tiens à remercier mes parents, pour leur soutien et leur disponibilité durant toutes ces années d'études. Merci Maman, Merci Papa.

Je tiens aussi à remercier mon frère YACINE, et ma sœur YASMINE pour leurs encouragements durant mes études.

Je remercie mon encadreur Pr. BENSAIBI, pour sa disponibilité, ses conseils et sa patience pour que je puisse arriver au terme de ma thèse.

Je remercie mon chef d'équipe Dr. BOUKRI, pour sa disponibilité et serviabilité durant ce travail.

Je remercie aussi le président ainsi que les membres de jury, pour avoir acceptés de juger mon travail.

Une pensée pour toute ma famille et mes amis qui m'ont soutenu et encouragé pour finir mes études.

Un grand merci à tous du fond du cœur.

NACIM YOUSFI

DEDICACE

Par la présente je tiens à rendre hommage à mon grand père décédé le 02 Novembre 2014 à l'âge de 91 ans à Bejaia. Je ne pouvais pas faire passer cet événement particulier dans ma vie sans saluer les efforts et les sacrifices qu'ont fait des hommes comme M. YOUSFI Loucif pour que nous vivions aujourd'hui libres et indépendants. Ma sincère gratitude à toi grand père pour tout ce que tu as transmis durant toutes tes années d'instituteur, aux générations qui nous ont précédés. C'est grâce aux hommes comme toi que l'Algérie a pu former des Ingénieurs, Médecins, enseignants...etc. Toi qui es amateur du livre, et qui nous encourage toujours à faire des études et à être ambitieux dans la vie. Je suis très content aujourd'hui et fier d'arriver à un stade aussi avancé et important de mes études. Je tiens à te dédier ce travail, et te dire que tous les efforts, les sacrifices et souffrances que tu as subis n'ont pas été vain et que la ou tu es tu peux être fier de ta descendance qui a réussi grâce à un homme comme toi.

ALLAH YERAHMAK CHER GRAND PERE!

TABLE DES MATIERES

ملخص	2
RESUME	3
ABSTRACT	4
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	7
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	11
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	15
INTRODUCTION	17
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	19
1.1. Introduction	19
1.2. Historique des constructions en maçonnerie chaînée	19
1.2.1. Les types de maçonnerie et d'appareil	20
1.2.1.1. Maçonnerie ancienne	20
1.2.1.1.1. Appareil grec	20
1.2.1.1.2. Appareil romaine	20
1.2.1.2. Maçonnerie de pierre de taille	22
1.2.1.3. Maçonnerie de moellons	22
1.2.1.4. Maçonnerie de briques	22
1.2.1.5. Maçonnerie de blocs béton	22
1.2.1.6. Maçonneries composites	24
1.2.2. Historique des constructions en maçonnerie chaînée	25
1.2.2.1. La fonte, un matériau de moulage	26
1.2.2.2. La colonne en fonte	26
1.2.2.3. L'acier	27
1.3. Comportement sismique des constructions en maçonnerie	29
1.3.1. Dommages et mécanismes de ruine après séisme	30

1.4. Objectifs d'une étude de la vulnérabilité sismique des constructions	34
1.5. Estimation de la vulnérabilité sismique des bâtiments	35
1.5.1. La méthode IZIIS	35
1.5.2. Méthode EPM	36
1.5.3. Méthode GNDT	36
1.5.4. Méthode EMS [European Macrosiesmic Scale]	39
1.5.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions	41
1.5.6. Méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en charpente métallique Appliquée en Algérie	42
1.6. Analyse de la vulnérabilité sismique à grande échelle	43
1.6.1. Méthode HAZUS	44
1.6.2. Méthode RADIUS	44
1.6.3. Méthode RISK-UE	45
1.6.4. Courbes de vulnérabilité	49
1.6.5. Matrice de probabilité de dommages (DPM)	51
1.6.6. Courbes de fragilité	51
1.7. Conclusion	54
2. INDICE DE VULNERABILITE SISMIQUE PAR MODELISATION NUMERIQUE	55
2.1. Introduction	55
2.2. Méthode développée	55
2.3. Choix des paramètres	56
2.4. Définition des paramètres	56
2.4.1. Connexions des murs	57
2.4.2. La capacité sismique	57
2.4.3. Type de sol	58
2.4.4. Ductilité	58
Etablissement du coefficient de comportement R d'une structure	59
2.4.5. Qualité des assemblages	60
2.4.6. Diaphragme horizontal	60
2.4.7. Modifications	61
2.4.8. Régularité en plan	61
2.4.9. Régularité en élévation	63

2.4.10. Maintenance	65
2.4.11. Implantation de l'ouvrage	65
2.4.12. Entrechoquement	66
2.4.13. Toiture	66
2.4.14. Détails	67
2.5. Définition des classes de vulnérabilité	67
2.6. Coefficients de pondérations obtenus par la méthode statistique	68
2.7. Coefficients de pondération obtenus par la modélisation numérique	69
2.7.1. Accélérogrammes utilisés	70
2.7.2. Modélisation des paramètres	71
Paramètre connexions des murs	73
Paramètre capacité sismique	73
Paramètre type de sol	73
Paramètre ductilité de l'acier	74
Paramètre qualité des assemblages	75
Paramètre diaphragme horizontal	75
Paramètre modification	75
Paramètre régularité en plan	76
Paramètre régularité en élévation	76
Paramètre maintenance	76
Paramètre implantation de l'ouvrage	77
Paramètre entrechoquement	77
Paramètre toiture	78
Paramètre détail	78
2.7.3. Calcul des coefficients	79
2.8. Calcul de l'indice de vulnérabilité et classification des structures	88
2.9. Conclusion	89
3. COURBES DE VULNERABILITE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE CHAINEE	90
3.1. Introduction	90
3.2. Niveaux de dommages	90
3.3. Principe de la méthode	93
3.3.1. Matrices de probabilité de dommages	93

3.3.2. Courbes de vulnérabilité semi – empiriques	95
3.4. Validation des courbes de vulnérabilité semi empiriques	97
3.4.1. Comparaison entre les pourcentages de dommage pour les classes de vulnérabilité	98
3.5. Conclusion	100
4. APPLICATION DE LA METHODE AUX STRUCTURES EN MAÇONNERIE CHAINEE	101
4.1. Introduction	101
4.2. Elaboration de la fiche technique des constructions en maçonnerie chainée	101
4.3. Présentation du logiciel	105
4.4. Organigramme de calcul	105
4.5. Présentation du logiciel VIP	106
4.5.1. Partie interface utilisateurs	107
4.5.1.1. Page d'accueil	107
4.5.1.2. Page d'accès aux différents programmes	107
4.5.1.3. Page des manipulations	108
4.5.2. Partie programme	111
4.6. Application de la méthode aux structures en maçonnerie chainée	112
4.6.1. Exemple d'application 01	112
4.6.1.1. Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité de l'exemple 1	112
4.6.1.2. Calcul de dommage moyen de l'exemple 1	113
4.6.2. Exemple d'application 02	115
4.6.2.1. Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité de l'exemple 2	115
4.6.2.2. Calcul de dommage moyen de l'exemple 2	116
4.6.3. Applications sur d'autres exemples	118
4.6.3.1. Résultats de calcul de l'indice de vulnérabilité	118
4.6.3.2. Courbes de vulnérabilité sismique des différents exemples	119
4.7. Conclusion	121
CONCLUSION	123
REFERENCES	125
ANNEXES	133

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 Appareils utilisés pendant l'antiquité	19
Figure 1.2 Maçonnerie en adobe, Thermes de Caracalla, Rome, Italie	19
Figure 1.3 Maçonnerie de moellons	21
Figure 1.4 Différents types de murs en moellons	21
Figure 1.5 Maçonnerie de briques	22
Figure 1.6 Maçonnerie de blocs en béton (agglomérés)	23
Figure 1.7 Exemples de maçonnerie composite	23
Figure 1.8 Montréal 1870, Great Scottish Life Insurance, fonte et murs porteurs en maçonnerie à 4 étages	25
Figure 1.9 1894, Montréal Canada Life Insurance Building Rue St Jacques 8 étages, ossature murs de maçonnerie porteuse	26
Figure 1.10 Lausanne (1931-1932) La Tour Bel-Air Métropole	27
Figure 1.11 Types de modes de rupture des bâtiments en maçonnerie porteuse	30
Figure 1.12 Fissuration et ruine des murs de contreventement sollicités perpendiculairement à leur plan	30
Figure 1.13 Rupture à l'angle d'un bâtiment construit en adobe	31
Figure 1.14 Rupture de murs perpendiculairement à leurs plans de maisons de deux niveaux construites en adobe	31
Figure 1.15 Rupture de mur d'une maison en maçonnerie	31
Figure 1.16 Rupture de murs en maçonnerie par cisaillement	32
Figure 1.17 Concept de courbes de vulnérabilité	47
Figure 1.18 Courbes de vulnérabilité en fonction des déplacements latéraux	48
Figure 1.19 Courbes de vulnérabilité en fonction de l'intensité sismique	48
Figure 1.20 Exemple de DPM pour une classe de vulnérabilité selon l'intensité sismique	50

Figure 1.21 Courbes de fragilité en fonction du PGA	51
Figure 1.22 Courbes de fragilité en fonction du déplacement spectral	51
Figure 2.1 Influence de la forme du bâtiment sur les effets dus à la torsion concentration de contraintes dans les angles rentrants	60
Figure 2.2 Régularité en élévation	61
Figure 2.3 A gauche : régularité en élévation. A droite : niveau rez de chaussée flexible	61
Figure 2.4 Bâtiments avec niveaux transparents	62
Figure 2.5 Accélérogramme de Boumerdes 21 Mai 2003	68
Figure 2.6 Contenu fréquentiel du séisme de Boumerdes 21 Mai 2003	69
Figure 2.7 Types de bâtiments modélisés selon les hauteurs	70
Figure 2.8 Diagramme contrainte – déformation de l'acier	73
Figure 2.9 Diagramme contrainte – déformation de la maçonnerie	75
Figure 2.10 Comparaison entre l'évolution des coefficients K_n pour les deux méthodes	86
Figure 3.1 Courbes de vulnérabilité semi empirique pour des constructions en maçonnerie chaînée	94
Figure 3.2 Comparaison entre les courbes de vulnérabilité	95
Figure 4.1 Organigramme de calcul	104
Figure 4.2 Page d'Accueil	105
Figure 4.3 Page d'accès aux différentes applications	106
Figure 4.4 Remplissage de la Fiche Technique 1/3	107
Figure 4.5 Remplissage de la Fiche Technique 2/3	107
Figure 4.6 Remplissage de la Fiche Technique 3/3	108
Figure 4.7 Affichage des coefficients et de l'indice de vulnérabilité	108
Figure 4.8 Affichage du rapport	109
Figure 4.9 02 impasse Mohamed Tounani (ex Isidore Tachet)	110
Figure 4.10 Courbes de vulnérabilité pour un $I_v = 0.50$	112
Figure 4.11 04 Rue Abou hamou moussa (ex Daguerre)	113
Figure 4.12 Courbes de vulnérabilité pour un $I_v = 0.69$	115
Figure 4.13 Courbes de vulnérabilité pour les constructions classées Vert	117
Figure 4.14 Courbes de vulnérabilité pour un $0.61 \leq I_v \leq 0.67$	118
Figure 4.15 Courbes de vulnérabilité pour un $0.68 \leq I_v \leq 0.71$	118

Figure 4.16 Courbes de vulnérabilité pour un $0.74 \leq I_v \leq 0.82$	119
Tableau 1.1 Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie	35
Tableau 1.2 Classe de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir d'endommagements observés	36
Tableau 1.3 Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée	38
Tableau 1.4 Les paramètres appliqués dans la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie	40
Tableau 1.5 Les facteurs « K_i » proposés pour chaque paramètre en fonction de la classe	41
Tableau 1.6 Typologie RISK-UE et valeurs représentatives de l'IV	45
Tableau 1.7 Critères structuraux de vulnérabilité et leurs coefficients associés	46
Tableau 1.8 Classification des dégâts aux constructions en maçonnerie (EMS98)	49
Tableau 2.1 Valeurs des coefficients K_n ($n = 1$ à 14) en fonction de paramètres de données	67
Tableau 2.2 Fréquences des séismes	68
Tableau 2.3 Dimensions des bâtiments modélisés	69
Tableau 2.4 Fréquences fondamentales des différents modèles	77
Tableau 2.5 Valeurs de déplacements maximum (d_{max}) pour le paramètre maintenance	79
Tableau 2.6 Valeurs des coefficients K_i pour le paramètre « maintenance »	80
Tableau 2.7 Valeurs des coefficients K_j dans chaque classe de vulnérabilité pour le paramètre « maintenance »	80
Tableau 2.8 Valeurs du facteur K_I non normalisés selon les classes de vulnérabilités	81
Tableau 2.9 Valeurs des facteurs K_n selon les classes de vulnérabilités	82
Tableau 2.10 Pourcentage d'écart des coefficients de pondération K_n pour la classe A	83
Tableau 2.11 Pourcentage d'écart des coefficients K_n	84

pour la classe B	
Tableau 2.12 Pourcentage d'écart des coefficients K_n	85
pour la classe C	
Tableau 2.13 Classes de vulnérabilité	87
Tableau 2.14 Différents niveaux de vulnérabilité selon "lv"	87
Tableau 3.1 Classification de Niveaux de dommages	89
Tableau 3.2 Echelle d'intensité sismique EMS 98	90
Tableau 3.3 Matrice de probabilité de dommages pour la classe VERT	91
Tableau 3.4 Matrice de probabilité de dommages pour la classe ORANGE	92
Tableau 3.5 Matrice de probabilité de dommages pour la classe ROUGE	93
Tableau 3.6 Ecart moyen des taux de dommages pour la classe VERT	96
Tableau 3.7 Ecart moyen des taux de dommages pour la classe ORANGE	97
Tableau 3.8 Ecart moyen des taux de dommages pour la classe ROUGE	98
Tableau 4.1 Résultat de l'application de l'exemple 1	111
Tableau 4.2 Résultat de dommages moyens de l'exemple 1	112
Tableau 4.3 Résultat de l'application de l'exemple 2	114
Tableau 4.4 Résultat de dommages moyens de l'exemple 2	115
Tableau 4.5 Résultat de l'indice de vulnérabilité des différents exemples	116

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

B: Largeur de la fondation

DPM : matrice de probabilité de dommage (Damage Probability Matrix)

Dk : niveau de dommage

E : module d'élasticité

EMS : échelle macrosismique européenne (european macroseismic scale)

G: Module de cisaillement

H : hauteur de bâtiment

I : intensité sismique

Iv : indice de vulnérabilité

Ki : coefficient de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour chaque accélérogramme et pour un type de bâtiment

Kj : coefficient de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour chaque accélérogramme et pour les trois types de bâtiments

Kl : coefficient de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour les dix accélérogramme et pour les trois types de bâtiments

Kn : coefficients de pondération normalisé

L : longueur de bâtiment

L : longueur de la fondation

M1 : méthode statistique

M2 : méthode par modélisation numérique

PGA : accélération maximum au sol (Peak Ground Acceleration)

R : coefficient de comportement

RPA : règles parasismiques algériennes

S1 : sol rocheux

S2 : sol ferme

S3 : sol meuble

S4 : sol très meuble

V_s : vitesse moyenne de l'onde de cisaillement

VIP : programme de l'indice de vulnérabilité (Vulnerability Index Program)

W : largeur de bâtiment

W_i : facteur de pondération

d_{min} : déplacement minimum calculé selon le RPA 99 V. 2003

e : épaisseur de mur

f : fréquence sismique

f : résistance à la compression

ν : Coefficient de poisson

μ_d : niveau de dommage moyen

ε : déformation du matériau

δ_1 : déplacement maximum du bloc 1

δ_2 : déplacement maximum du bloc 2

α : rapport des facteurs de résistance sismique

INTRODUCTION

Les phénomènes naturels tels que les volcans, les inondations, les cyclones, les tsunamis et les séismes préoccupent de plus en plus les autorités et les organisations nationales, et internationales.

Parmi les phénomènes les plus dévastateurs sur la planète nous distinguons le séisme. L'impact des séismes majeurs conduit généralement vers des pertes économiques et humaines considérables. Plusieurs exemples peuvent être cités qui ont marqués la population du monde comme le séisme de Chili en 1960 et en 2015, Chleff en 1980, Kobe en 1995, Boumerdes en 2003, Sumatra en 2004, Tohoku en 2011...etc.

Afin de réduire les pertes économiques et humaines, plusieurs méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique ont été développées dans le monde. Ainsi nous distinguons l'analyse de la vulnérabilité à grande échelle tel que la méthode RISK – UE qui a été appliquées à un certain nombre de villes en Europe (Barcelone, Nice...etc.), le programme HAZUS développé aux USA, la méthode RADIUS développée par les Nations Unis lors de la décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles.

L'Algérie qui est située dans une zone sismique, possède des centres urbains anciens qui n'ont pas été construits selon les règles parasismiques en vigueur. Aussi des études de vulnérabilité ont été conduites sur certaines villes comme Alger, Constantine et Blida.

D'autre part des études sur les structures et les infrastructures ont aussi été développées aussi bien en Algérie qu'à travers le monde.

Les études effectuées en Algérie visaient le bâti ancien en maçonnerie, en béton armé et en charpente métallique, ainsi que les infrastructures telle que le réseau d'alimentation en eau potable, les ponts et le réseau routier.

Dans la présente thèse, nous nous intéresserons au bâti ancien en maçonnerie chaînée et l'estimation de la vulnérabilité sismique de ces constructions.

Pour ce faire nous avons divisés notre thèse en quatre chapitres, la première partie concerne l'étude bibliographique où nous allons présentés un bref historique des constructions en maçonnerie chaînée, leurs comportements sismiques ainsi que les différentes approches utilisées dans le monde et en Algérie pour évaluer la vulnérabilité sismique des constructions.

Dans le deuxième chapitre, la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique pour les constructions en maçonnerie chaînée sera développée. Le principe consiste à choisir des paramètres qui ont une influence sur le comportement sismique de ce type de structures et les définir. Ensuite définir des classes de vulnérabilité, et affecter un coefficient pour chaque paramètre dans ces différentes classes de vulnérabilité. Cela conduit à déterminer l'indice de vulnérabilité des structures en maçonnerie chaînée et les classer. Le développement de la méthode se fera à l'aide d'une analyse dynamique non linéaire. Une comparaison entre les résultats trouvés par l'approche analytique et ceux trouvés précédemment par une méthode statistique sera opérée aussi.

Le troisième chapitre de cette thèse, sera consacré au développement des matrices de probabilité de dommage (DPM). Ces matrices expriment la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage pour un certain nombre de bâtiments, en fonction de l'intensité sismique. Ensuite des courbes de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie chaînée à l'aide d'une approche qui est basée sur l'indice de vulnérabilité sismique seront développées aussi. Les résultats trouvés par la méthode développée pour le contexte Algérien seront comparés à ceux trouvés par les européens.

Le dernier chapitre sera consacré à la mise en œuvre informatique et des applications sur un certain nombre d'exemples. Deux programmes développés seront présentés. Le premier appelé « Vulnerability Index Program » (VIP), est conçu sous un environnement DELPHI. Le second programme développé sous Excel, permet de calculer et de tracer des courbes de vulnérabilité pour les structures en maçonnerie chaînée.

Enfin une conclusion générale termine ce travail, dans cette dernière sont reprise les principales conclusions et recommandations.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Les centres urbains algériens sont constitués d'ensembles de constructions datant souvent de périodes différentes. Parmi ces ensembles nous distinguons les bâtiments en maçonnerie, en béton armé, en aciers et les constructions mixtes. Ces dernières sont souvent considérées comme maçonnerie chaînée. Ces ensembles lorsqu'ils sont soumis à l'action sismique peuvent subir des dommages importants d'autant plus qu'ils ont été construits en des périodes différentes selon des règlements parasismiques différents, certains ont même été construits selon aucune norme.

Aussi afin de réduire les pertes qui peuvent survenir, il convient d'étudier leur comportement vis-à-vis du séisme. Plusieurs études ont été effectuées en Algérie et à travers le monde sur ces constructions. Il est à noter le peu d'études effectuées sur les constructions en maçonnerie chaînées, objet de la présente investigation.

1.2. Historique des constructions en maçonnerie [3]

Par définition, la maçonnerie est une composée de briques de terre cuite ou d'agglomérés liés entre eux par un mortier. Aussi bien que dans le bâtiment que dans les ouvrages d'art, la maçonnerie fut l'une des techniques de construction prépondérantes jusqu'à l'apparition des structures métalliques et du béton armé. Actuellement, la maçonnerie s'utilise presque exclusivement pour des éléments verticaux tels que murs porteurs, ou cloisonnements, généralement pour des constructions de petites dimensions. Si la maçonnerie garde encore un attrait certain dans la construction, c'est que la manutention sur chantier des briques peut être réalisée avec des moyens légers et que la mise en œuvre ne nécessite aucun équipement lourd, il suffit d'une truelle, d'une caisse à mortier, d'un niveau

et d'un fil à plomb. Il existe plusieurs types de maçonnerie et de murs utilisés dans les constructions, nous allons en présenter les plus connus.

1.2.1. Les types de maçonnerie et d'appareil [4]

Il existe une très grande variété de maçonnerie en raison du nombre de matériaux utilisés:

Pierres naturelles, briques crues ou en terre cuite trouées ou non trouées, blocs de béton (agglomérés), mortiers de chaux ou de ciments, ainsi que différentes dispositions possibles dans les plans des murs (appareils) ou dans les épaisseurs.

1.2.1.1. Maçonnerie ancienne

Cette dernière remonte à la période antique (Grec et Romaine), et peut être résumé comme suit :

1.2.1.1.1. Appareil grec [5]

- L'appareil polygonal : Les pierres sont taillées pour s'imbriquer les unes dans les autres et les espaces sont réduits au minimum. Elles ont néanmoins plusieurs côtés. (ce type commence à être employé au VII^{ème} siècle) (voir figure 1.1).
- L'appareil isodome et pseudo isodome (figure 1.1) : il est caractérisé par des assises de pierres de même hauteur disposées en quinconce. Les pierres sont obligatoirement rectangulaires. Ces pierres peuvent être décorées par la technique du bossage: on bombe la partie visible. [VI^{ème} siècle avant J-C].

Pour le pseudo isodome, les assises sont de même hauteur, mais les pierres n'ont pas les mêmes formes, ou le contraire, ou les deux.

Ces appareils ont été repris par les Romains qui les ont adaptés ensuite. Mais chez les Romains, on privilégie la brique à la pierre, contrairement aux Grecs.

1.2.1.1.2. Appareil romaine [5]

- L'opus incertum : assemblage de petits moellons, non taillés, disposés les uns au-dessus des autres pour former le mur. [III^{ème} - I^{er} siècle avant J-C. Rome], (voir figure 1.1).

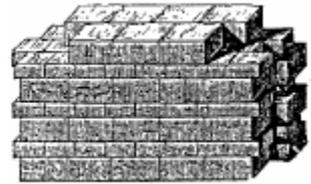
- L'opus reticulatum / quasi-reticulatum. Les moellons sont parallélépipédiques de forme apparente en damier. Les pierres s'imbriquent régulièrement. (I^{er} - ½ II^{ème} siècle après J-C). Le quasi, est une transition entre l'incertum et le reticulatum, (voir figure 1.1 et figure 1.2).
- L'opus Mixtum : c'est un mélange entre le pseudo isodome, le reticulatum et la construction en brique, (voir figure 1.1 et figure 1.2).



Appareil polygonal



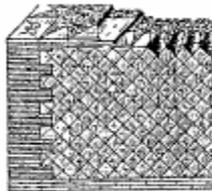
appareil isodomum



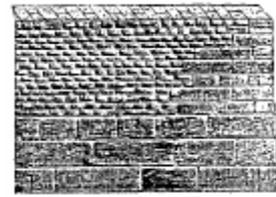
appareil pseudo isodomum



Opus incertum



opus reticulatum, appareil réticulé



appareil mixte



Petit appareil en brique crue

Figure 1.1: Appareils utilisés pendant l'antiquité [4]



Figure 1.2: Maçonnerie en adobe, Thermes de Caracalla, Rome, Italie

1.2.1.2. Maçonnerie de pierre de taille [4]

Les appareils de la maçonnerie de pierre de taille sont généralement réguliers (genre appareils "isodom" des grecs), l'esthétique résidant essentiellement dans la taille et la finition des parements.

1.2.1.3. Maçonnerie de moellons [4]

On distingue en gros quatre types d'appareils dont chacun peut comporter des variantes régionales liées soit à des habitudes locales, soit aux caractéristiques des matériaux disponibles.

Les maçonneries de moellons bruts peuvent comporter deux parements (Figure 1.3) formés des moellons les plus réguliers, l'intérieur du mur contenant des pierres et matériaux de toutes dimensions (tout venant). On parle alors souvent de murs à double épaisseur ou murs doubles.

Le niveau de cohésion entre les deux parements dépend de la présence de pierres taillées (boutisses ou parpaings) dans l'épaisseur du mur. Les désordres se traduisent souvent par un bouffement consécutif à une désolidarisation des deux parements.

Les maçonneries de moellons assises sont exécutées comme les maçonneries de moellons bruts mais par assises horizontales dont les hauteurs peuvent être régulières ou irrégulières.

En principe, dans ces maçonneries, l'épaisseur des joints doit être régulière et réduite de 2 ou 3 cm à 1 ou 1.5 cm à selon la finesse de taille des moellons.

L'épaisseur des murs en moellons varie suivant le nombre d'appareils ou de couches dans l'épaisseur (Figure 1.4).

Généralement, pour des raisons d'isolation, les murs extérieurs sont formés de deux parements et leur épaisseur varie de 45 à 80 cm. Les murs intérieurs ou les murs des combles peuvent être des murs simples dont l'épaisseur est de l'ordre de 15 à 30 cm suivant les matériaux utilisés.

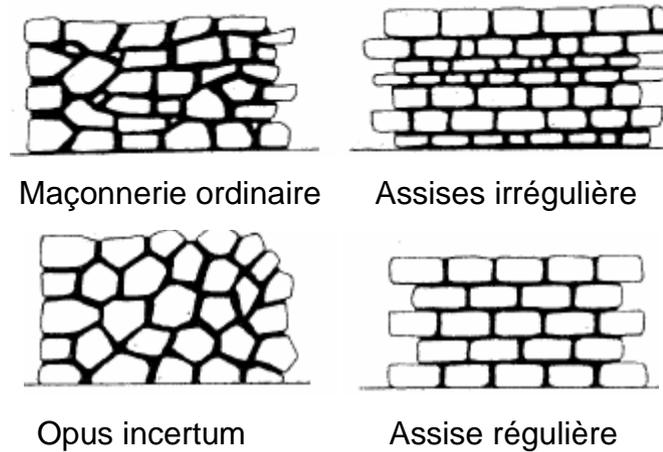


Figure 1.3: Maçonnerie de moellons [4]

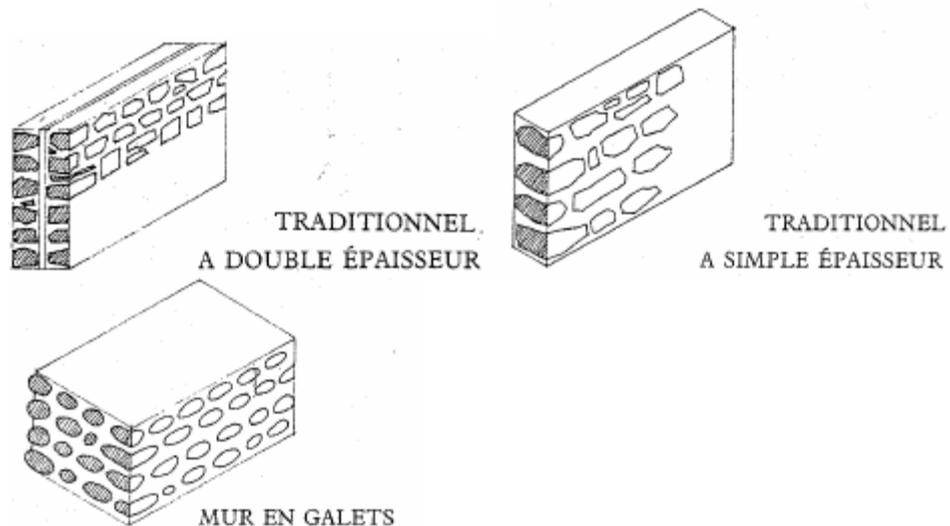


Figure 1.4: Différents types de murs en moellons [4]

1.2.1.4. Maçonnerie de briques [4]

Les appareils de briques sont extrêmement nombreux. Ils sont étudiés en fonction de l'épaisseur cherchée (6, 11, 22, 34, 45 cm, etc.), le croisement des joints verticaux devant toujours être au moins de 5 cm (voir figure 1.5).

1.2.1.5. Maçonnerie de blocs béton [4]

Des blocs béton (parpaings ou agglomérés) sont employés dans des murs simples de maisons individuelles ou immeubles contemporains de faibles

hauteurs. L'isolation thermique est souvent assurée par un autre matériau n'ayant aucun rôle structurel (figure 1.6).

1.2.1.6. Maçonneries composites [4]

Ce sont des maçonneries de plusieurs sortes de matériaux dont la disposition relative peut avoir un but purement esthétique ou, plus généralement, être étudiées avec un souci de résistance de l'ensemble. Dans ce cas, les matériaux les plus résistants seront disposés en chaînages verticaux et/ou horizontaux assurant la liaison des matériaux moins nobles utilisés en remplissage. Cette liaison est réalisée par l'appareillage en harpe des chaînes qui présentent des redans dans lesquels s'engage la maçonnerie de remplissage (figure 1.7).

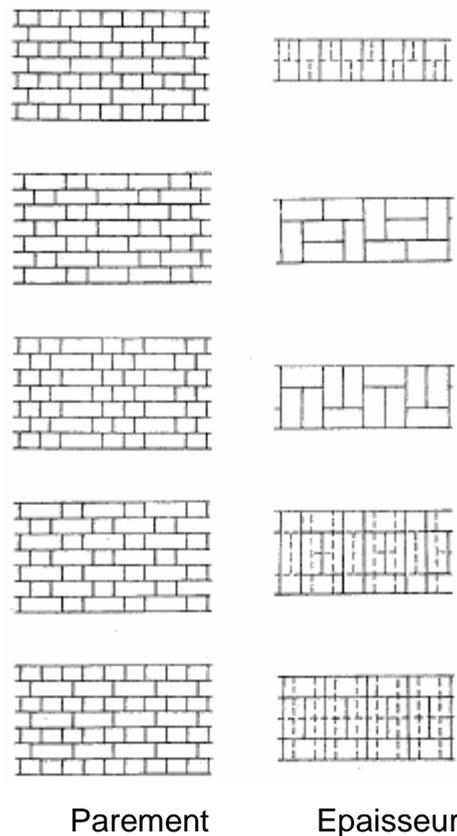


Figure 1.5 : Maçonnerie de briques [4]

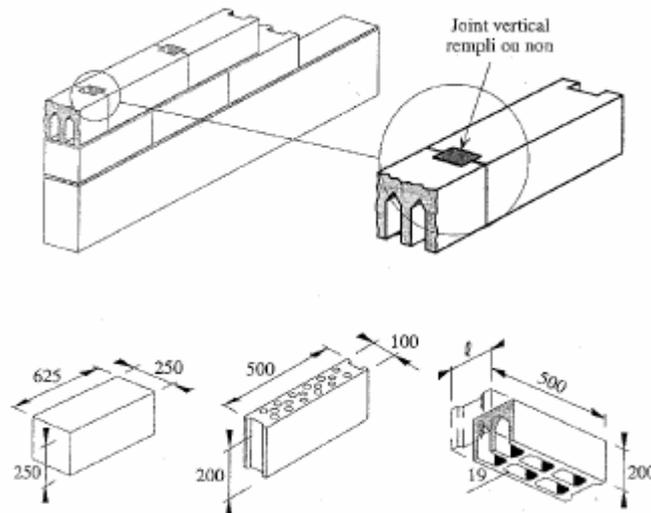


Figure 1.6: Maçonnerie de blocs en béton (agglomérés) [4]

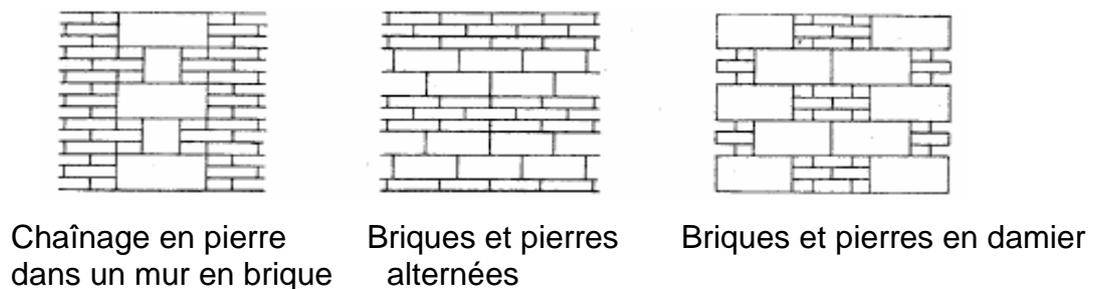


Figure 1.7: Exemples de maçonnerie composite [4]

La maçonnerie a toujours été utilisée et pendant plusieurs siècles dans la construction des ouvrages, mais vu les limites en terme de résistance et en hauteur des ouvrages construits en maçonnerie, on a commencé à chercher à introduire des matériaux, pour pouvoir aller plus loin dans les constructions : construire solide et grand.

Cette technique ingénieuse au 19^{ème} siècle a abouti à la naissance de la « maçonnerie chaînée », en introduisant des matériaux comme la fonte, le fer puis l'acier.

1.2.2. Historique des constructions en maçonnerie chaînée [6]

Au cours du 19^{ème} siècle nous assistons à une diversification sans précédent des techniques de construction. Au sein de cet ensemble de

transformations, le développement de l'architecture métallique constitue le phénomène le plus marquant. Aux premiers édifices faisant appel à la fonte succèdent des constructions en fer puis en acier. Tandis que la fonte, qui résiste mal aux efforts de traction est principalement utilisée sous forme de colonnes et d'arcs. Le fer et l'acier vont conduire alors à des dispositions originales.

1.2.2.1. La fonte, un matériau de moulage [6]

La fonte, produit brut du haut fourneau (l'antique méthode du bas fourneau permettait d'obtenir directement le fer, mais en petites quantités), sort liquide du creuset; on peut la couler dans des moules; on en fait des éléments décoratifs, car on la moule facilement.

Au début du 19^{ème} siècle, la fonte sera considérée comme un matériau neuf et merveilleux qui sera employée universellement.

1.2.2.2. La colonne en fonte [6]

Grâce à sa grande résistance à la compression, soixante fois supérieure à celle d'un calcaire, elle est utilisable pour les supports: piliers, colonnes ou poteaux.

Parmi les éléments constituant la nouvelle structure métallique, la colonne en fonte a été le premier élément à être employé sans problèmes étant donné qu'elle résiste bien à la compression. A partir de la moitié du 18^{ème} siècle, bien avant l'invention de la machine à vapeur. La charpente en bois des structures des anciens ateliers anglais de tissage va être remplacée par des éléments structuraux en fer de fonte pour répondre à la nécessité des grands espaces qu'exigeaient les nouvelles machines.

C'est ainsi que la fonte et le fer forgé vont être intégrés dans les constructions (voir figure 1.8) où ils constitueront les seuls éléments pouvant résister au feu, permettre de grandes portées et faciliter l'édification de bâtiments à étages, nécessaires à la production en masse ou au stockage de grandes quantités de marchandises.



Figure 1.8: Montréal 1870, Great Scottish Life Insurance, fonte et murs porteurs en maçonnerie à 4 étages [7]

En 1970, des incendies à Chicago démontrent que la fonte est vulnérable et démontrent aussi un problème de stabilité au niveau des connexions poutres – poteaux.

On veut construire plus haut, mais on doit assurer la protection contre le feu et augmenter la rigidité : on enrobe les colonnes de fontes de briques ou terracotta. La production de poutres en fer forgé par laminage débute aux Etats Unis.

1.2.2.3. L'acier [6]

L'acier, obtenu par un affinage particulier, est plus homogène que le fer, et sa résistance à la traction est deux fois plus grande, trois fois pour l'acier fondu. Dans tous les cas où l'allègement des structures est nécessaire. L'acier prend à la fin du 19^{ème} siècle, peu à peu la place du fer.

L'assemblage des éléments en acier difficile à réaliser avec le fer forgé a pu être industrialisé au milieu du 19^{ème} siècle par le rivetage à chaud des tôles et des cornières laminées: cette technique sera remplacée plus tard par celle de la soudure.

Les ingénieurs tout au long du 19^{ème} siècle essayeront diverses méthodes dans le but d'augmenter la portée des éléments de support métalliques en

construisant des membrures épaisses et en utilisant des cornières et des tôles avec le même matériau. Signalons que ce procédé était généralement employé dans la construction navale. Ainsi W. Fairbairn a jeté en grande partie les bases d'une nouvelle évolution. Comme constructeur de navires, de ponts et de bâtiments industriels, il entreprendra dans son laboratoire de Manchester des expériences avec des tubes et permettant ainsi la réalisation du Britania Tubular Bridge.

Dans un livre écrit par W.Fairbairn "*Applications de la fonte et du fer forgé à la construction*" (1854), il divulguera un système perfectionné pour la construction de manufactures à plusieurs étages où des poutres laminées en fer de 40.5 cm d'épaisseur supportaient des voûtes basses en tôles, le tout recouvert avec du béton. Dans ce même ouvrage, Fairbairn rapporte l'exemple d'une remarquable construction de quatre étages à la charpente métallique qui fut érigée par l'ingénieur Greene en 1860 dans le chantier navale de Sheerness en Grande-Bretagne. Dans son utilisation systématique de sections métalliques en « I » de la fonte pour les poteaux et du fer forgé pour les poutres - ce hangar à navires de Sheerness anticipait à la fois la section normalisée et la méthode d'assemblage des constructions modernes à ossatures en acier (voir figure 1.9 et 1.10).



Figure 1.9: 1894, Montréal Canada Life Insurance Building Rue St Jacques 8 étages, ossature murs de maçonnerie porteuse [7]

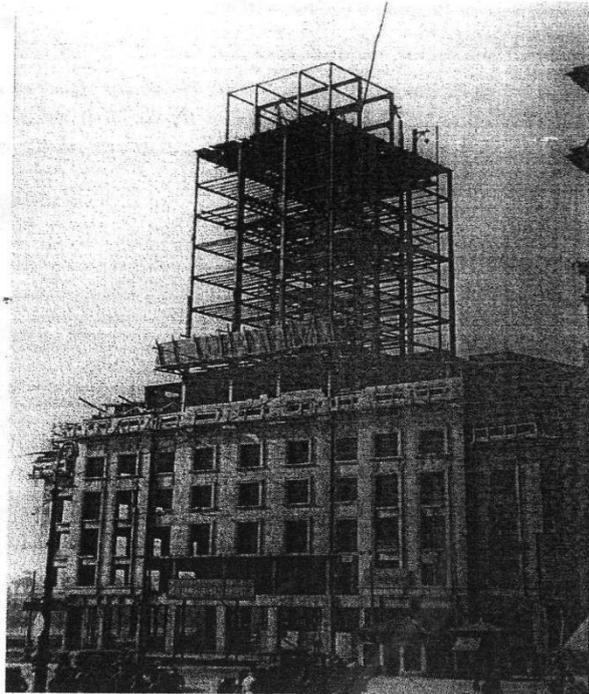


Figure 1.10 : Lausanne (1931-1932) La Tour Bel-Air Métropole [8]
 Cette construction fut parmi les premières construites entièrement en acier.

1.3. Comportement sismique des constructions en maçonnerie [4]

L'effet d'un séisme sur une maison ou un immeuble en maçonnerie peut être appréhendé en analysant les mécanismes de résistance de la structure soumise à des forces horizontales proportionnelles à la masse des différents éléments (planchers, toitures...etc.). Si les connexions sont suffisantes pour rendre solidaires les éléments de la structure et si les planchers et la toiture jouent leur rôle de diaphragme horizontal, les forces horizontales qui s'appliquent aux éléments les plus lourds (principalement les planchers, la toiture et les murs) sont transmises aux éléments horizontaux (planchers) puis aux éléments verticaux (murs de contreventement). Les murs cisailés dans leur plan transmettent alors ces efforts vers les fondations.

Une tenue correcte aux chargements sismiques exige:

1. Les éléments verticaux (contreventements) et horizontaux (planchers et toiture) soient solidaires entre eux. De bonnes connexions entre planchers et murs porteurs ainsi qu'entre murs porteurs perpendiculaires permettent ainsi d'éviter le basculement des murs perpendiculairement à leur plan et de transmettre les forces d'inertie des planchers vers les murs de contreventement.

2. Les contreventements horizontaux (planchers et toiture) soient assez rigides et résistants pour assurer leur rôle de diaphragmes horizontaux et transmettre les efforts sismiques.

3. Les contreventements verticaux (murs porteurs, portiques, panneaux de remplissage rigides) soient suffisants dans les deux directions. La qualité du contreventement dépend de la section des murs participant au contreventement dans chaque direction en plan ainsi que de la qualité de la maçonnerie.

1.3.1. Dommages et mécanismes de ruine après séisme [4]

Les dégâts observés sur les éléments structuraux peuvent être classés en différentes catégories et niveaux :

- Première catégorie

Le mouvement des éléments de construction tels que les façades perpendiculairement à leur plan entraînent une fissuration verticale plus ou moins complète de l'angle entre la façade et le mur de refend. Ces fissures sont plus ouvertes vers le haut de la construction.

Ces dommages sont causés principalement par la flexion hors plan des murs et mettent en évidence les défauts suivants :

- Absence de diaphragmes horizontaux ;
- Absence de liaisons des murs aux diaphragmes horizontaux ;
- Murs de portée importante entre les éléments transversaux tant horizontaux que verticaux.

- Deuxième catégorie

Le mouvement des éléments de contreventement parallèlement à leur plan provoque la fissuration de ces éléments. On peut observer des fissures inclinées à 45 degrés partant des angles des ouvertures, portes ou fenêtres et/ou des fissurations horizontales dans les joints.

Ces dommages sont causés principalement par :

- Des efforts de traction dus à la flexion des murs (fissures horizontales) ;
- Des efforts de cisaillement dans le plan des murs (fissures en croix) ;
- Désolidarisation des deux parements des murs doubles.

Ces dommages mettent en évidence les défauts suivants :

- Dimensions insuffisantes des trumeaux ou dimensions exagérées des ouvertures ;
- Absence de chaînages et d'encadrement des ouvertures ;
- Absence de liens entre les deux parements assurant la cohésion des murs.

- Troisième catégorie

Effondrement de la toiture causé par :

- Les forces d'inertie engendrées dans la toiture ;
- Des déformations importantes des murs perpendiculairement à leur plan.

Ces dommages mettent en évidence les défauts suivants :

- Absence de liaison efficace des murs à la toiture et aux diaphragmes des planchers, toiture trop lourde ;
- Toiture incorrectement contreventée ;
- Ancrage de charpente insuffisant.

- Quatrième catégorie

Les trois familles de dommage précédentes peuvent évidemment apparaître simultanément et entraîner l'effondrement complet de la structures en raison de :

- Une action sismique très importante ;
- La rupture de la maçonnerie par traction ou cisaillement ;
- L'arrachement des solives et charpentes ;
- L'absence ou la faiblesse des éléments horizontaux et verticaux ;
- L'absence de diaphragme horizontal ;
- La toiture lourde et insuffisamment contreventée ;
- L'exécution médiocre ;
- Le délabrement de la construction (Maintenance).

- Cinquième catégorie : Interaction entre les bâtiments mitoyens d'un îlot.

La juxtaposition de plusieurs bâtiments au sein d'un îlot rend le comportement sismique de chaque bâtiment plus complexe et peut être à l'origine de dégâts supplémentaires causés par:

- Les chocs entre deux constructions en raison d'une largeur de joint insuffisante ou d'un joint rempli de matériaux ;
- Une différence de dimensions (hauteur, largeur) de deux bâtiments ayant un mur mitoyen unique ;
- Une inhomogénéité de matériaux et de comportements structurels en raison, par exemple, de phases de construction successives.

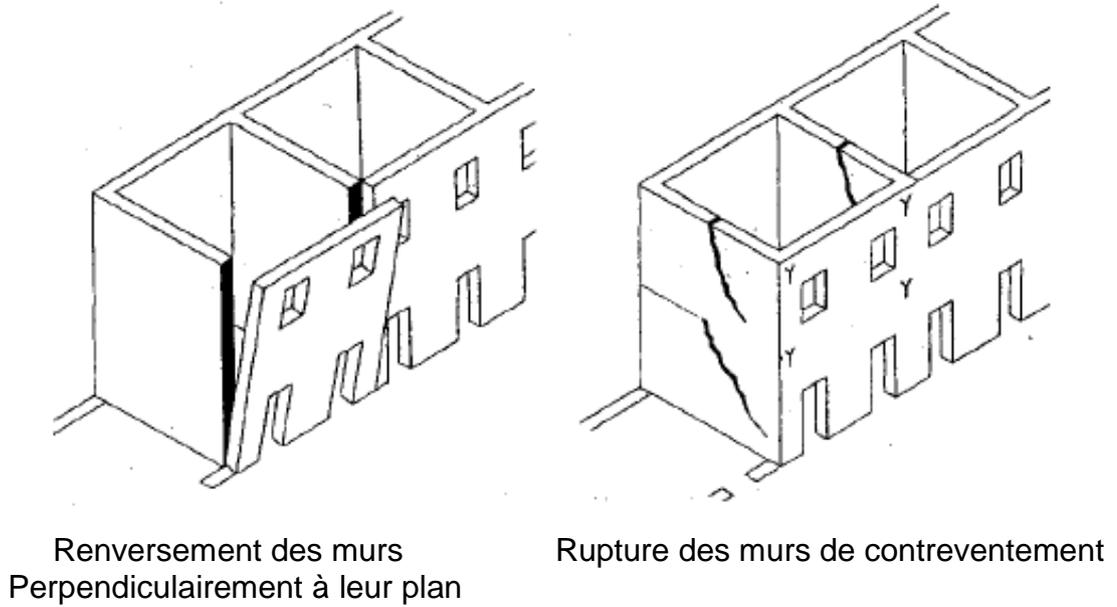


Figure 1.11 : Types de modes de rupture des bâtiments en maçonnerie porteuse [4]

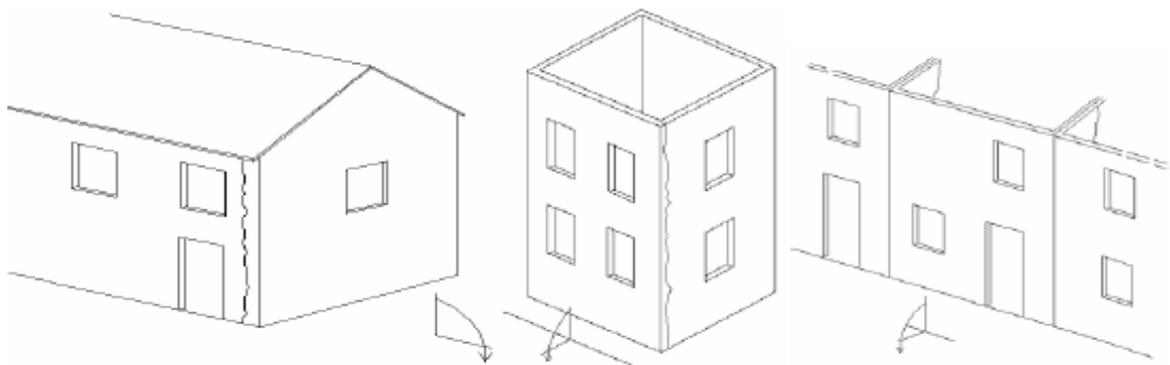


Figure 1.12 : Fissuration et ruine des murs de contreventement sollicités perpendiculairement à leur plan [4]

Dans les figures 1.11, 1.12, 1.13, 1.14, 1.15 et 1.16 on peut remarquer les désordres qui peuvent se produire au niveau des intersections des murs, ce qui remet en cause généralement les liaisons entre ces derniers.



Figure 1.13: Rupture à l'angle d'un bâtiment construit en adobe [9]



Figure 1.14: Rupture de murs perpendiculairement à leurs plans de maisons de deux niveaux construites en adobe [9]



Figure 1.15: Rupture de mur d'une maison en maçonnerie [9]



Figure 1.16: Rupture de murs en maçonnerie par cisaillement [10]

1.4. Objectifs d'une étude de la vulnérabilité sismique des constructions [11]

Les études de vulnérabilité peuvent avoir deux objectifs :

1. Estimer les dommages prévisibles aux personnes et aux biens, juste après le séisme pour décider des moyens de secours à mettre en place. En effet, les zones touchées par un séisme majeur sont généralement isolées dans les heures qui suivent un séisme en raison des dommages matériels et de la désorganisation engendrée par la catastrophe, c'est l'étude post – sismique.
2. Identifier les bâtiments les plus vulnérables aux séismes de façon à planifier et 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, c'est l'étude pré – sismique.

Purement relatif, cet objectif, une fois atteint, améliore la connaissance du bâti de la zone étudiée, et donne les bases d'une étude de vulnérabilité exhaustive. L'échelle étudiée peut être celle d'un pays, d'une région, d'une commune ou d'un parc immobilier.

Une étude de vulnérabilité sismique est donc le premier pas vers la détermination des bâtiments nécessitant un diagnostic approfondi et des confortements éventuels.

Pour remplir ces objectifs, il existe différentes méthodes permettant l'estimation de la vulnérabilité sismique des structures.

1.5. Estimation de la vulnérabilité sismique des bâtiments

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des bâtiments sont nombreuses et sont fonction de plusieurs facteurs tels que le système constructif. Il y a plusieurs sources de fonctions de vulnérabilité dans la littérature pour différentes classes de structure se basant sur l'observation des séismes passés et/ou sur l'estimation théorique et expérimentale. On peut citer les méthodes : IZIIS, EPM, GNDT (level 1), GNDT (level 2), EMS, ainsi que les méthodes de l'indice de vulnérabilité [12].

D'autres analyses ont été développées dans le monde, en Italie, une analyse par élément finis a été développée pour les bâtiments historique, tenant compte de la déformation hors plan des murs en maçonnerie ainsi que leur rupture dans le plan [21, 22, 23, 24, 25, 26], aux Etats Unis, Espagne, Portugal, Europe de l'Est, Mexique, Australie et l'Inde, des études expérimentales et numériques ont été utilisées pour les construction en maçonnerie non – chaînée spécialement pour le comportement en plan et hors plan des murs en maçonnerie [27, 28, 85, 86, 29, 30, 32, 33, 34, 36, 87] . En Ireland et en Iran une analyse par éléments finis a été appliquée aussi tenant compte des paramètres d'irrégularité en plan et en élévation [31, 35].

1.5.1. La méthode IZIIS

La Méthode « IZIIS » a été développée à l'institut d'engineering et de sismologie 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 [13]. Cette méthode a été appliquée à l'étude de 52 bâtiments avec un model simplifié, 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) [14, 15].

1.5.2. Méthode EPM

La Méthode 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 [13].

1.5.3. Méthode GNNT

Une méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité et des dommages pour des scénarios de tremblements de terre a été également développée et appliquée avec succès à la ville de Catane en Italie, appelée GNNT, du nom de ses promoteurs : le Groupe National pour la Défense contre les Séismes (National Group for Defense from Earthquakes) [16, 17 et 18].

La méthode GNNT a été établie en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé [11, 16]. Nous donnons ci-après les principales caractéristiques de la méthode pour les constructions en maçonnerie.

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 structurelles 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 [11].

- 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 [19, 20]. Elle est basée sur des observations visuelles

pour identifier le système structurel 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 (1.1).

Tableau 1.1 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie [11].

N°	Paramètres
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.

L'indice de vulnérabilité de base I_v se calcule comme la somme pondérée des coefficients identifiés. Le tableau (1.2) suivant montre que chaque paramètre structurel 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 chaque paramètre dans le comportement global de la structure [11].

Tableau 1.2 : Classe de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir d'endommagements observés [11,19]

Paramètre	A	B	C	D	W_i
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

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 [11].

1.5.4. Méthode 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 épices 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 [17, 18].

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 a été estimé par une enquête de rue [17, 18].

Les différentes typologies sont présentées dans le tableau (1.3), et pour chaque type de construction est attribuée une classe de vulnérabilité la plus probable et son incertitude [11].

Tableau 1.3 : Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée

	Typologie de structure	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 armé			└—○—			
• 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				└—○—		
Acier	• Bâtiments en charpente métallique			-----○—			
Bois	• Bâtiments en charpente bois		-----○—				

○ Classe de vulnérabilité — gamme la plus probable

--- Gamme la moins probable, cas exceptionnel

On constate que cette méthode est sommaire, toute fois 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 [11].

1.5.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions

Inspirée des travaux de Benedetti et Petrini, 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 qui ne peuvent être pris en compte dans les classifications typologiques qui se basent sur la nature du matériau de construction.

La méthode de l'indice de vulnérabilité consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment dite « Indice de vulnérabilité » ou « Iv », qui est une représentation de sa qualité sismique. Cette valeur numérique représente la somme pondérée des valeurs numériques exprimant la qualité sismique des éléments structuraux et non structuraux.

Dans le monde la méthode de l'indice de vulnérabilité a été largement utilisée pour les constructions en maçonnerie [88, 89, 90]. D'autre part, cette méthode a été appliquée pour les constructions en maçonnerie tenant compte de quelques paramètres séparément. Elle a été aussi appliquée pour le contexte algérien pour les constructions en maçonnerie [13, 37, 38, 39], pour les constructions en béton armé [37, 40, 41, 42, 43], pour les constructions en acier [37, 44, 45] et pour les constructions en maçonnerie chaînée [37, 46, 47, 48, 49, 50].

Pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie, les paramètres considérés sont regroupés avec leurs classes dans le tableau 1.4 donné ci – après.

Tableau 1.4 : Les paramètres appliqués dans la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie [38]

Eléments	Classes/Ki			
	A	B	C	D
Résistance totale au cisaillement	0	0.05	0.12	0.21
Régularité en plan	0	0.01	0.04	0.07
Régularité en élévation	0	0.01	0.04	0.07
Connexion des murs	0	0.03	0.07	0.10
Type de murs	0	0.01	0.03	0.05
Plancher	0	0.01	0.03	0.05
Toiture	0	0.01	0.03	0.05
Conditions du sol	0	0.02	0.06	0.10
Entrechoquement	0	0.01	0.04	0.07
Modification	0	0.01	0.04	0.07
Détails	0	0	0.02	0.03
Maintenance	0	0.03	0.08	0.13

Il est à noter que l'élément détail, dans cette méthodologie, regroupe plusieurs facteurs qui sont :

Etat du remplissage, du bardage, des cloisons, des balcons, du garde-corps, des corniches, acrotère, des cheminées, vide sanitaire (murs porteurs), vide sanitaire (poteaux), du réseau électrique, du réseau gaz, du réseau eau, du réseau d'assainissement et du réseau téléphonique.

Dans cette méthode, une classification des bâtiments est proposée en fonction de leur « Iv ». Ainsi quatre classes de vulnérabilité sont distinguées.

1.5.6. Méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en charpente métallique Appliquée en Algérie

De même que pour les structures en maçonnerie [13], la méthode de l'indice de vulnérabilité « Iv » a été développée pour les structures en charpente métallique [44].

Pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des constructions en charpente métallique, les paramètres considérés sont regroupés avec leurs classes dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Les facteurs « Ki » proposés pour chaque paramètre en fonction de la classe [44, 45]

Eléments	Classes/ Ki		
	A	B	C
Ductilité	0.00	0.08	0.15
Capacité sismique	0.02	0.07	0.09
Qualité des assemblages	0.02	0.08	0.15
Maintenance	0.02	0.06	0.08
Type de sols	0.03	0.04	0.05
Diaphragme horizontal	0.03	0.04	0.05
Flambement de la structure	0.03	0.06	0.08
Régularité en plan	0.03	0.04	0.05
Modification	0.03	0.04	0.05
Régularité en élévation	0.03	0.04	0.05
Entrechoquement	0.03	0.04	0.05
Implantation de l'ouvrage	0.03	0.04	0.05
toiture	0.03	0.04	0.05
détails	0.03	0.04	0.05

Le choix des paramètres pour cette méthode tient compte des phénomènes qui peuvent être observés dans les constructions métalliques, tel que le flambement des structures, ou bien la qualité des nœuds. Trois classes de vulnérabilité ont été définies (A, B et C), dans la classe A, la décroissance des coefficients « Ki », diminue selon l'importance des paramètres, c'est-à-dire que le paramètre le plus important (ductilité) aura la plus petite des valeurs zéro (0) comme l'indique le tableau 1.5.

Dans les classes B et C, la croissance des coefficients augmente selon l'importance des paramètres, car dans ces deux classes les états de ces derniers sont jugés respectivement du moins au plus sévère.

1.6. Analyse de la vulnérabilité sismique à grande échelle

Plusieurs méthodes ont été développées dans le monde afin d'évaluer la vulnérabilité sismique à grande échelle (Villes, communes, régions...etc.), permettant ainsi de faire des scénarii sismique et d'identifier les zone les plus

vulnérable. Les programmes les plus connus ont été développés aux Etats Unis (Hazardus), en Europe (Risk – UE) et par les Nations Unis (Radius).

1.6.1. Méthode HAZUS

Cette méthodologie a été développée par l’Institut National de la Science du Bâtiment (National Institute of Building Science, « NIBS », aux Etats Unis, en collaboration avec l’Agence Fédérale de la gestion des risques (Fédéral Emergency Management Agency, « FEMA ») [51]. A cet effet Le programme ‘ HAZUS’, interactif, pour l’évaluation des risques, a vu le jour en 1997 et a été mis à jour en 1999. Dans cette méthode, on trouve les déplacements spectraux et les accélérations spectrales comme mesures d’entrées sismiques. Cependant, la méthodologie HAZUS continue à se baser sur l’opinion d’experts pour estimer l’état des dommages qui résulteraient d’un déplacement et d’une accélération spectrale donnée [51, 52].

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 [51] :

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

1.6.2. Méthode RADIUS

Avec l’assistance du gouvernement Japonais, le Secrétariat des Nations-Unies a lancé le projet RADIUS (Risk Assessment Diagnosis of Urban 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 centre for Disaster-mitigation engineering) et le BRGM (le Bureau de Recherche Géologique et Minière) [53]. Cette méthode a été appliquée à neuf villes sélectionnées dans le monde. Ces villes sont Addis Abeba (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) [54, 55], Blida (Algérie) [56, 57, 58, 59] et Constantine [59].

1.6.3. Méthode RISK-UE

Le projet RISK-UE consistait à traiter la vulnérabilité sismique de sept (7) grandes villes européennes: Barcelone (Espagne), Bitola (Macédoine), Bucarest (Roumanie), Catane (Italie), Nice (France), Sofia (Bulgarie) et Thessaloniki (Grèce), 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 [11, 60].

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 [11, 60].

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 [11].

La méthode du niveau 1, dite LM1, est très proche de la méthode GNDT, à laquelle participa activement l'équipe de Gènes. La LM1 consiste à définir, pour chaque élément de la typologie RISK-UE, un indice de vulnérabilité le 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 [11, 60].

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 leurs systèmes 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 [61], 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 [17].

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 la 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 (1.6) représente les différentes typologies de bâtiments de RISK-UE en fonction des valeurs représentatives de l'IV [11, 60].

Tableau 1.6 : Typologie RISK-UE et valeurs représentatives de l'IV

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 refend 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, qu'elle soit en maçonnerie ou en béton armé [11], voir tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Critères structuraux de vulnérabilité et leurs coefficients associés

	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
Joints insuffisants	Oui	+0.04	0	
	Non	0	0	
	Non	0	0	
Règles PS	Avant 1982	+0.16		
	Après 1982		0	

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 la même vulnérabilité sismique. Alors, il était possible de caractériser la répartition des indices de vulnérabilité par quartier [11].

1.6.4. Courbes de vulnérabilité

Les courbes de vulnérabilité sont définies comme la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain état limite de résistance d'une construction sous une intensité sismique donnée (Voire figure 1.17).

Sous l'action sismique, la probabilité de dépasser un certain état limite augmente généralement avec le niveau d'intensité. Cette probabilité peut être calculée si la distribution de probabilité de dommages structuraux sous la charge sismique est obtenue en tenant compte des variations stochastiques des propriétés des matériaux et des différents enregistrements sismiques.

Les courbes de vulnérabilité seront tracées en fonction de l'intensité sismique et le niveau de dommage moyen qui sera infligé à une construction. (Voir figure 1.19).

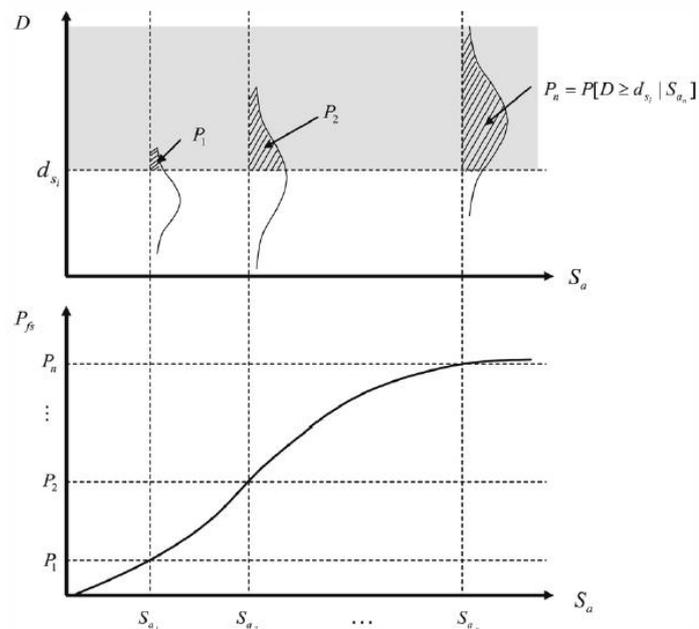


Figure 1.17 : Concept de courbes de vulnérabilité [27]

D'autre part, les courbes de vulnérabilité expriment la probabilité de dépasser un certain niveau de dommage, basé sur le déplacement sous la charge sismique d'une construction (Voir figure 1.18). Les dommages sont conditionnés par les déplacements maximums inter-étages. Il existe plusieurs méthodes pour développer les courbes de vulnérabilité des structures telles que les modélisations numérique utilisant des accélérogrammes ou par des essais expérimentaux. Les études ayant pour but de développer des courbes de vulnérabilité en se basant sur la modélisation numérique devront être calibrées aux essais expérimentaux pour consolider les résultats obtenus.

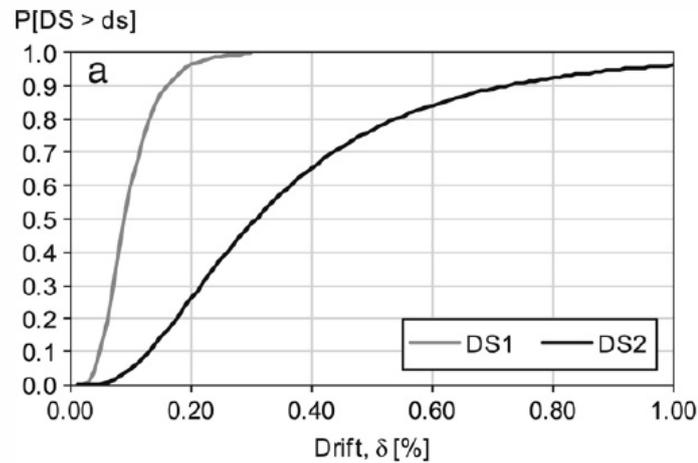


Figure 1.18 : Courbes de vulnérabilité en fonction des déplacements latéraux [62]

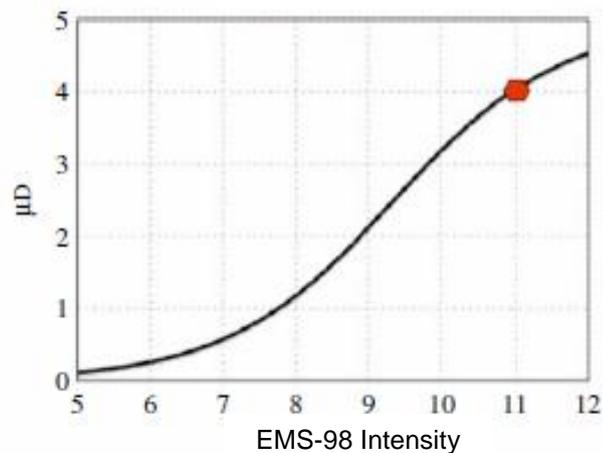


Figure 1.19 : Courbes de vulnérabilité en fonction de l'intensité sismique [30]

Les niveaux de dommages sont en nombre de cinq (05) donnés par l'échelle EMS sont présentés dans le tableau 1.8.

Tableau 1.8 : Classification des dégâts aux constructions en maçonnerie (EMS98)

[63]

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

1.6.5. Matrice de probabilité de dommages (DPM)

Les matrices de probabilité de dommages ont pour but de déterminer le nombre de constructions pouvant atteindre un niveau de dommage selon l'intensité sismique.

L'échelle EMS98 définit des descriptions qualitatives de "peu", de "beaucoup" et de "la plupart" pour cinq catégories de dommages à des niveaux d'intensité s'étendant de V à XII, pour six classes de vulnérabilité décroissante (de A à F) [64]. Dans la figure 1.20, 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 d'intensité pour une classe de vulnérabilité donnée [64].

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

Figure 1.20 : Exemple de DPM pour une classe de vulnérabilité selon l'intensité sismique [60]

1.6.6. Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité, sont identiques aux matrices de probabilité de dommage mais ont l'avantage d'avoir des expressions analytiques. Chaque courbe de fragilité est associée à un pourcentage de dommage. Par conséquent, chaque type de construction est défini suivant sa vulnérabilité et la nature des dommages occasionnés, et classé dans une échelle à plusieurs degrés [11],

Il existe différentes procédures pour tracer les courbes de fragilité (PGA, intensité sismique, déplacement spectral...etc.), ayant pour objectif de donner un pourcentage de dommage que peut atteindre une construction (voire figure 1.20 et 1.21).

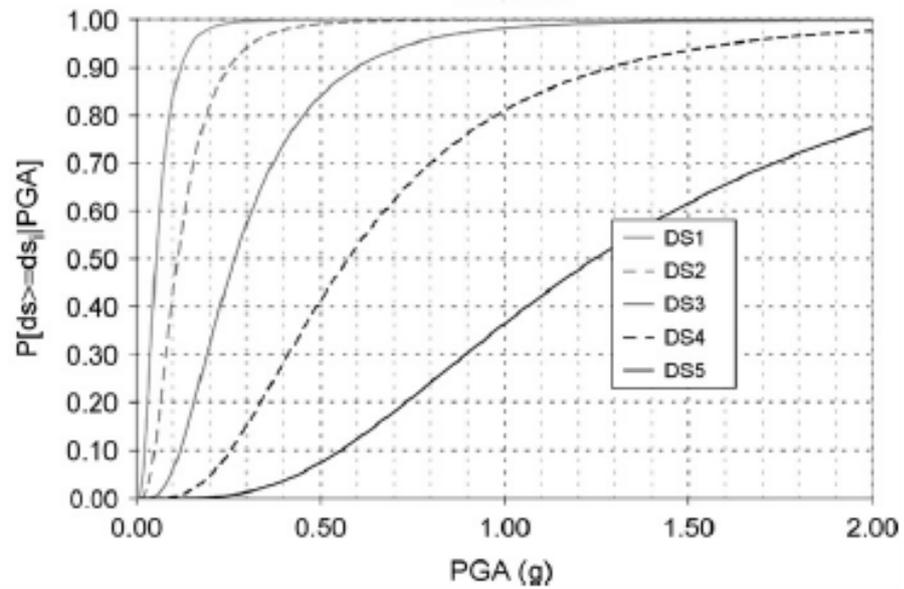


Figure 1.21 : Courbes de fragilité en fonction du PGA [65]

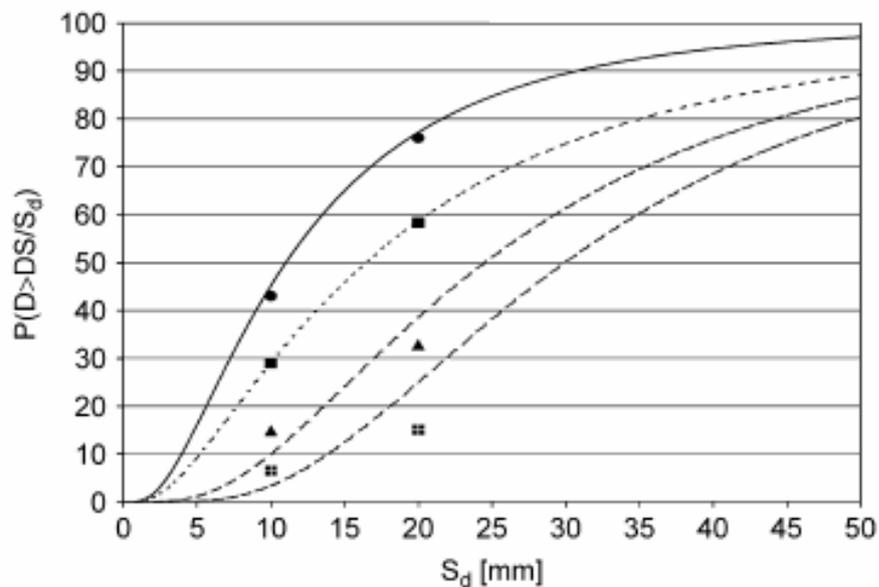


Figure 1.22 : Courbes de fragilité en fonction du déplacement spectral [65]

1.7. Conclusion

Le retour d'expérience sismique a clairement montré que les bâtiments en maçonnerie chaînée sont vulnérables aux tremblements de terre. Cette vulnérabilité est essentiellement due à la vétusté de ce type de constructions et à leur mode de conception qui ne répond pas aux normes exigées par les règlements parasismiques en vigueur.

Aussi, il est nécessaire d'analyser le comportement sismique de ce type de structure, afin de comprendre les degrés des désordres qui peuvent apparaître ainsi que leur mécanisme suite à un séisme et intervenir pour les réduire.

Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes qui ont été développées à travers le monde. Parmi ces méthodes nous distinguons la méthode de l'indice de vulnérabilité qui a été déjà utilisée sur plusieurs types de constructions en Algérie. Cette méthode allie la simplicité à la précision des résultats en associant des paramètres observables et des paramètres calculables mais de manière assez succincte. Aussi elle sera développée dans le cadre de la présente étude.

CHAPITRE 2

INDICE DE VULNERABILITE SISMIQUE PAR MODELISATION NUMERIQUE

2.1. Introduction

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions sont diverses et utilisées selon le niveau d'analyse. Toutes ces méthodes se basent principalement sur l'analyse des éléments structuraux des constructions.

La méthode de l'indice de vulnérabilité sismique des constructions a été utilisée en Algérie et appliquée au contexte algérien pour les constructions en maçonnerie, en béton armé, en charpente métallique et les constructions en maçonnerie chaînée. Pour ce dernier type de structures la méthode a été développée en se basant sur des données statistiques des séismes passés. Toute fois ce type d'analyse nécessite un grand nombre de données pas toujours disponibles.

Dans le présent chapitre la méthode de l'indice de vulnérabilité sera développée en utilisant une analyse dynamique non linéaire pour les différents paramètres déjà définis pour les structures en maçonnerie chaînée.

2.2. Méthode développée

La méthode développée pour les constructions en maçonnerie chaînée, est inspirée des méthodes développées auparavant [13, 37 à 50].

Le principe de la méthode se base les étapes suivantes :

1. Choisir les paramètres influant sur le comportement sismique des constructions en maçonnerie chaînée ;
2. Définir des paramètres de vulnérabilité ;
3. Définir des classes de vulnérabilité ;
4. Attribuer à chaque paramètre un coefficient « K » dans chaque classe de vulnérabilité, en utilisant l'analyse dynamique non linéaire ;

5. Calculer l'indice de vulnérabilité et classer la structure.

Nous allons voir en détail dans ce qui suit, chacune de ces étapes.

2.3. Choix des paramètres

En se basant sur les études effectuées sur la maçonnerie [13], sur la charpente métallique et celles sur les constructions en maçonnerie chaînée [37 à 50], nous avons défini un certain nombre de paramètres considérés comme paramètre influant sur la vulnérabilité des constructions en maçonnerie chaînée. Ces paramètres se déclinent comme suit :

1. Capacité sismique ;
2. Connexions des murs ;
3. Type de sol ;
4. Ductilité de l'acier ;
5. Qualité des assemblages ;
6. Diaphragme horizontal ;
7. Modifications ;
8. Régularité en plan ;
9. Régularité en élévation ;
10. Maintenance ;
11. Implantation de l'ouvrage ;
12. Entrechoquement ;
13. Toiture ;
14. Détails.

La définition de chacun de ces paramètres est donnée ci-après, cette définition est essentielle par la suite, car elle permet d'identifier les classes de vulnérabilité.

2.4. Définition des paramètres

Chacun des paramètres identifiés est défini en fonction de son action sur le comportement sismique des constructions concernés.

2.4.1. Connexions des murs

Les connexions des murs sont définies comme la liaison entre les murs porteurs, c'est le chaînage au niveau des angles entre les murs.

Ce paramètre et un paramètre observable, la classification de ce dernier est fonction de l'état du chaînage des murs porteurs.

- Classe A :

Dans cette classe on trouve les structures dont les connexions entre les murs sont bonnes.

- Classe B :

Dans cette classe on trouve les structures dont les connexions entre les murs présentent un risque, l'état du chaînage est moyen.

- Classe C :

Tandis que dans cette classe, sont classées les structures dont les connexions sont très mauvaise, ou celles qui se caractérisent par une absence du chaînage.

2.4.2. La capacité sismique

La capacité sismique est définie comme la résistance au cisaillement à la base de la structure, le calcul de cette dernière est présentée en annexe 1.

La classification de ce facteur se fait en fonction d'un coefficient « α » présenté en annexe 1.

La classification de ce paramètre, se fait comme suit:

- Classe A :

Dans cette classe, la capacité sismique de la structure est plus grande que la force sismique, autrement dit $\alpha > 1$.

- Classe B :

On y trouve, les constructions dont la capacité sismique de la structure est proche de la force sismique où $0.4 < \alpha \leq 1$.

- Classe C :

Quand à cette classe, on trouve les structures dont la capacité sismique est inférieure à la force sismique : $\alpha \leq 0.4$.

2.4.3. Type de sol

Ce paramètre repose sur les caractéristiques du sol, décrites dans le règlement parasismique algérien RPA99 modifié 2003, les types des sols sont :

S1- Sol rocheux

S2- Sol ferme

S3- Sol meuble

S4- Sol très meuble

La classification dans notre cas, se fait comme suit :

- Classe A :

On trouve, dans cette classe, la catégorie S1 (Sol rocheux) dont la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement est : $V_s \geq 800 \text{ m/s}$.

- 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 : $V_s \geq 400 \text{ m/s}$.

- Classe C :

On y trouve 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.

2.4.4. Ductilité de l'acier [66]

On dit "ductile" une structure qui peut subir sans perte de résistance des déformations plastiques alternées. La ductilité peut avoir une influence positive sur l'économie d'un projet, car :

- la structure ductile est capable de subir avec succès le même déplacement qu'une structure qui répondrait de façon purement élastique, mais elle atteint ce résultat avec des éléments structuraux de section moindre ;
- les sollicitations à la fondation sont réduites.

Cette capacité de se déformer plastiquement sans perte de résistance est traduite par l'attribution d'un "coefficient de comportement" R dont la valeur dépend du type de structure résistante. La valeur du coefficient R est comprise

entre 1,5 pour les structures peu ou non dissipatives et 6 pour les structures très dissipatives.

Etablissement du coefficient de comportement R d'une structure

Diverses méthodes ont été utilisées dans le but d'établir la valeur de coefficients de comportement « R », caractéristiques de divers types d'ossature et permettant une prise en compte globale de leur capacité de dissipation d'énergie par des déformations plastiques. Ces méthodes se différencient par le type d'analyse de structure effectué et par le critère considéré pour associer réponse purement élastique et réponse élasto-plastique.

Des valeurs normatives maximales de R sont fournies pour chaque type structurel dans les codes de calcul parasismiques. Ces valeurs sont des bornes inférieures des résultats établis dans des recherches.

Elles placent dans la sécurité les projets de constructions nouvelles, mais le niveau de sécurité atteint est en fait variable, de sorte que ces valeurs ne permettent pas une évaluation très précise de structures existantes. Les ordres de grandeur des valeurs normatives de R sont :

- R = 5 à 6 pour les structures à comportement dissipatif.
- R = 3 à 4 pour les structures à comportement moyennement dissipatif.
- R = 1,5 à 2 pour les structures non ou peu dissipatives. [67]

On peut classer ce paramètre comme suit:

- Classe A :

Dans cette classe, on y trouve les chainages ductiles qui se déforment dans le domaine élastique;

- Classe B :

Dans cette classe, on y trouve les chainages moyennement ductiles qui se déforment dans le domaine plastique;

- Classe C :

On y trouve les ossatures métalliques atteignant la limite de rupture.

2.4.5. Qualité des assemblages

Le rôle d'un assemblage est d'assurer la transmission des efforts entre les éléments en charpente métallique, une défaillance dans un assemblage met en cause la stabilité et le comportement de ces derniers.

La classification de ce paramètre est donnée comme suit :

- Classe A :

Dans cette classe, on trouve les structures dont les assemblages sont en bon état;

- Classe B :

Dans cette classe, sont classés les cas qui n'appartiennent ni à la classe A ni à la classe C;

- Classe C :

On y trouve les assemblages qui sont dans un mauvais état.

2.4.6. Diaphragme horizontal [68]

Les diaphragmes d'un bâtiment sont les structures horizontales qui reportent l'action horizontale vers les structures verticales de contreventement. Ils doivent être peu déformables dans leur plan. Idéalement, ils assurent à chaque niveau où ils sont présents une absence de déplacement horizontal relatif entre les structures verticales. Le rôle de diaphragme est joué par la toiture et par les planchers. Les liaisons d'un diaphragme aux contreventements verticaux assurent le transfert de l'action horizontale du niveau considéré.

La classification de ce paramètre est fonction de :

1. L'état du plancher.
2. L'état des liaisons aux systèmes de contreventements.

- Classe A :

Cette classe regroupe les planchers qui satisfont les conditions citées ci-dessus ;

- Classe B :

Dans ce groupe, sont classés les planchers qui ne se trouve ni dans la classe A ni dans la classe C ;

- Classe C :

On y trouve les planchers qui ne satisfont aucune condition.

2.4.7. Modifications

Tout changement apporté à une structure peut influencer sur le comportement de la structure vis-à-vis de l'action sismique. Un changement d'usage dans un bâtiment remet en cause la distribution des masses au niveau des étages, ainsi que les changements dans le système structurel.

On entend par modifications importantes, les modifications qui touchent les éléments structuraux, donc qui provoquent un changement dans le centre de masse et/ou le centre de rigidité.

La classification de ce paramètre est comme suit:

- Classe A :

Dans cette classe, on regroupe les structures qui n'ont subi aucune modification ;

- Classe B :

Sont regroupées, dans cette classe, les structures dont des changements ou des modifications sont moyennement observées dans le système structurel ou au niveau de l'usage ;

- Classe C :

Dans ce groupe, on trouve les constructions qui ont subi des modifications importantes dans le système structurel et au niveau de l'usage.

2.4.8. Régularité en plan [69]

Le mouvement sismique horizontal est un phénomène généralement bidirectionnel. La structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent avoir des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques. La forme idéale n'est pas seulement symétrique suivant deux axes, mais se rapproche de l'axisymétrie car des dégâts importants ont souvent été observés à la jonction des pans dans des structures composées de plusieurs pans perpendiculaires.

Des considérations purement flexionnelles expliquent ce phénomène : les raideurs flexionnelles suivant les directions principales sont très différentes dans un bâtiment rectangulaire. Il en résulte des périodes propres différentes de deux ailes perpendiculaires soumises à une action sismique d'orientation donnée, d'où une réponse (fonction du temps) différente, et une concentration de problèmes à la jonction des ailes perpendiculaires. Ce fait était particulièrement remarquable à

Bucarest après le séisme de 1977 où tous les immeubles formant coin de rue étaient effondrés ou nettement plus dégradés que les autres (voir figure 2.1). Cette observation s'applique aussi aux bâtiments en H, pourtant deux fois symétriques.

Ce qui est vrai pour la flexion d'ensemble l'est aussi pour la torsion: les éléments reprenant la torsion doivent être distribués assez symétriquement. Le non respect de ce principe peut conduire à une déformation permanente gauchie de la structure.

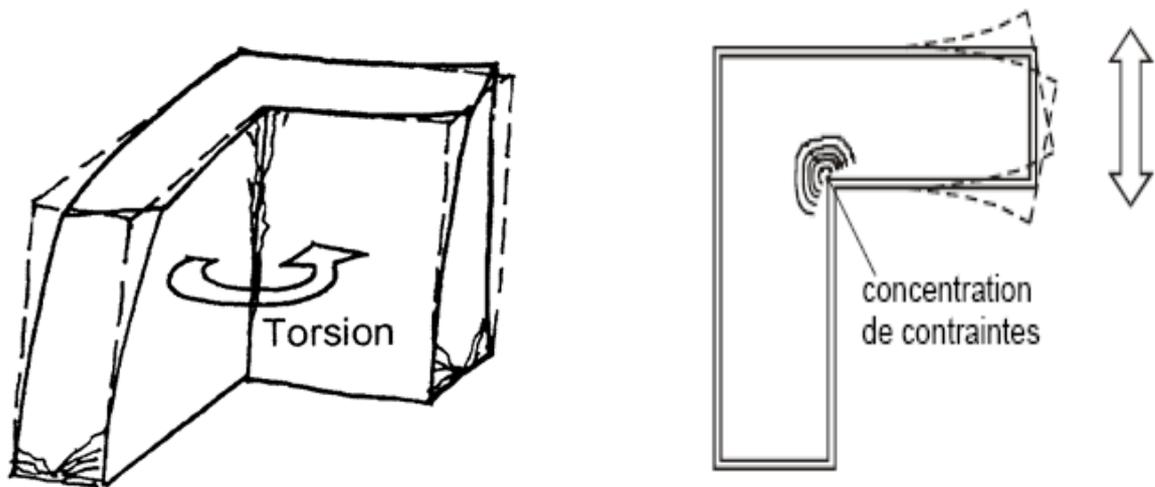


Figure 2.1 : Influence de la forme du bâtiment sur les effets dus à la torsion
concentration de contraintes dans les angles rentrants [69]

Donc ce phénomène d'irrégularité a un lien direct avec la distribution des rigidités et des masses.

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 Version 2003, la régularité en plan est assurée par des critères cités en annexe 2.

Pour notre méthode, nous allons définir trois classes qui sont :

- Classe A : Forme régulière

Dans cette classe, on trouve les structures qui respectent tous les critères cités en annexe 2.

- Classe B : Forme faiblement irrégulière

Dans cette catégorie sont classées, 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 en annexe 2.

2.4.9. Régularité en élévation [69]

Dans la vue en élévation, les principes de simplicité et de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure primaire, sans variation brutale de raideur. De telles variations entraînent des sollicitations locales élevées comme l'indique la figure suivante :

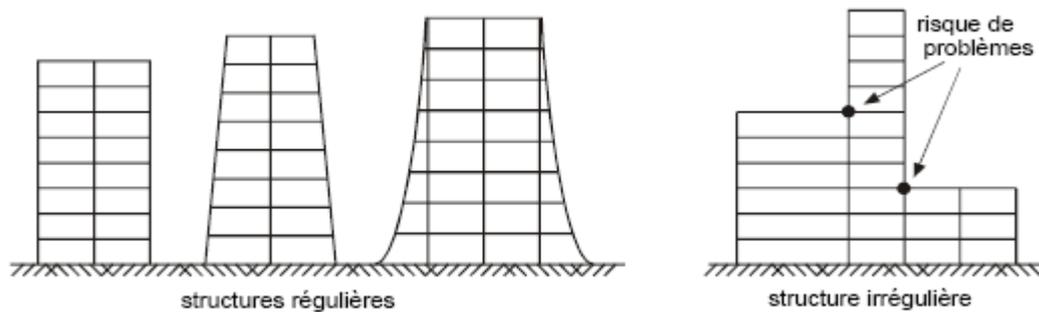


Figure 2.2 : Régularité en élévation

Le principe de distribution continue et uniforme des éléments résistants de la structure primaire demande d'assurer une continuité des colonnes et des murs structuraux, sous peine de créer la situation de l'étage souple ou transparent (voir figure 2.3).

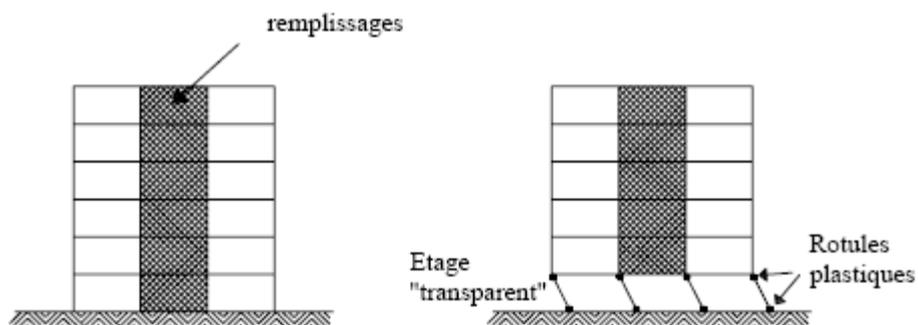


Figure 2.3 : A gauche : régularité en élévation. A droite : niveau rez de chaussée flexible

Les niveaux transparents sont très courants dans les bâtiments parce qu'on laisse le rez de chaussée ouvert en raison de l'usage : commerces, bureaux, réception dans les hôtels, parkings. Les niveaux transparents sont fortement déconseillés dans les zones sismiques car ils peuvent constituer des niveaux flexibles, dans lesquels se concentrent toutes les déformations de la structure. Lorsque les niveaux transparents sont plus flexibles que les autres niveaux, les poteaux de ces niveaux subissent de grandes déformations qui peuvent provoquer la ruine du bâtiment (voir figure 2.4).

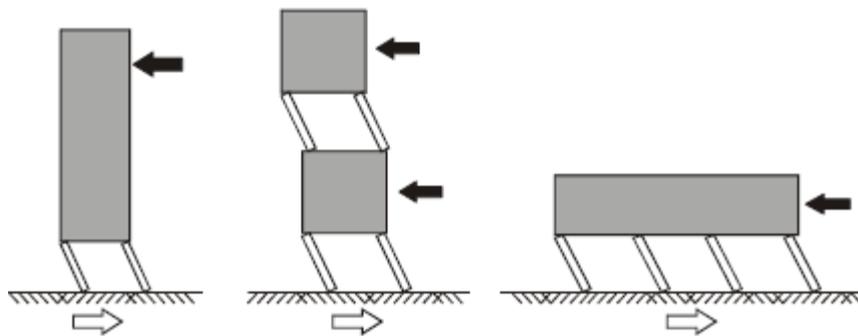


Figure 2.4 : Bâtiments avec niveaux transparents

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 structurel, entre deux étages successifs.

Pour ce facteur, nous nous sommes basés sur les critères du règlement parasismique algérien RPA99 version 2003 (Voir annexe 2).

Ce paramètre sera classé 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.

2.4.10. Maintenance

L'entretien du bâtiment est important voir nécessaire, car les dégradations qui apparaissent dans les éléments structuraux ou non structuraux peuvent influencer sur leurs tenue vis-à-vis de l'action sismique.

Ce paramètre est classé comme suit:

- Classe A :

Dans cette classe, on retrouve les structures qui sont entretenues régulièrement (pas de fissures) ;

- Classe B :

Sont classées, les structures qui ne sont entretenues qu'occasionnellement (fissures modérées ou localement observées) ;

- Classe C :

Cette classe regroupe les structures abandonnées ou délaissées (fissures généralisées).

2.4.11. Implantation de l'ouvrage

Ce sont les implantations susceptibles de déstabiliser les constructions sous l'action sismique. Ces implantations peuvent se situer :

1. Sur un terrain instable ;
2. A l'extrémité d'une falaise ;
3. En haut ou en bas d'une colline ;
4. Sur les abords d'une rivière ;
5. Sur un terrain accidenté, avec changement de pente.

- Classe A :

On trouve dans cette classe, les structures qui sont implantées dans des sites qui ne présentent aucun risque. C'est-à-dire qui ne sont pas implantées sur des sites cités ci-dessus ;

- 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 on trouve les structures implantées dans des sites à risque cités auparavant.

2.4.12. Entrechoquement

L'interaction de deux structures voisines est un phénomène fréquent, car on a remarqué qu'au niveau des planchers ces derniers s'entrechoquaient, ce qui a causé des dégâts, parfois l'effondrement des étages. La présence d'un joint entre deux constructions mitoyenne est donc nécessaire.

Les trois classes de classification pour ce paramètre selon le règlement parasismique algérien RPA99 Version 2003 sont :

- 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 sismique d'une épaisseur suffisante : $d > 40 \text{ mm}$;

- Classe B :

Dans cette classe sont regroupées, les structures dont le risque de leur interaction est moyen, ou l'épaisseur du joint sismique est insuffisante :

$$0 < d \leq 40 \text{ mm} ;$$

- Classe C :

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

2.4.13. Toiture

La toiture, constitue la partie supérieure de la structure. Sa fonction est d'une part d'assurer la reprise des charges tout en assurant son rôle et d'avoir un comportement diaphragme, et d'autre part d'assurer la fermeture du bâtiment.

Ce paramètre sera classé comme suit :

- Classe A :

La toiture est classée en classe A, Si elle est en bon état ;

- Classe B :

Dans cette classe, on retrouve les toitures qui ne sont ni dans la classe A, ni dans la classe C.

- Classe C :

La toiture est classée en classe C, si la toiture est en mauvais état.

2.4.14. 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 :

Les cloisons, les balcons, les gardes corps, les escaliers, l'acrotère, le réseau électrique, le réseau gaz, le réseau d'assainissement, le réseau téléphonique et les ascenseurs.

Les trois groupes de classification pour ce paramètre sont : [40]

- Classe A : Satisfaisant

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

- Classe B : Partiellement satisfaisant

Le paramètre est classé dans cette catégorie, si plus de la moitié et moins de trois quarts des éléments qui existent sont en bon état.

- Classe C : Insatisfaisant

Dans ce groupe, moins de la moitié des éléments existant sont en bon état.

2.5. Définition des classes de vulnérabilité

La méthode que nous avons développé, consiste à classer des constructions selon l'état de ces dernières, de ce fait trois classes de vulnérabilité ont été définis : VERT, ORANGE et ROUGE.

Si la construction expertisée se situe dans la classe verte, cela veut dire que la construction aura un bon comportement au séisme, et qu'elle ne nécessite pas un confortement pour le moment.

Si la construction expertisée se situe dans la classe orange, cela veut dire que la construction est moyennement vulnérable, un confortement est donc nécessaire ou souhaitable.

Si la construction se situe dans la classe rouge, la structure peut être démolie, sauf si elle appartient à un patrimoine préservé, dans ce cas une étude particulière devra être faite.

Des coefficients ont été affectés dans chacune de ces classes et pour chaque paramètre, afin de déterminer l'indice de vulnérabilité « Iv » des structures en maçonnerie chaînée, et juger de leurs états généraux.

2.6. Coefficients de pondérations obtenus par la méthode statistique [37, 46 à 50]

Les coefficients que nous avons choisis, ont été sélectionnés selon leur importance dans une structure. Dans la classe A, les paramètres les plus influents prendront les plus petites des valeurs jusqu'à la valeur 0, c'est-à-dire que dans cette classe ces paramètres ont un comportement bon vis-à-vis de l'action sismique. Pour les classes B et C, la croissance des coefficients augmentera selon l'influence des paramètres, car dans ces deux classes (B, C), les états des paramètres sont jugés respectivement moyens à mauvais. A cet effet les coefficients de pondération sont obtenus à partir des données des séismes passés, causant différents cas et niveaux de dommages aux constructions.

Le tableau suivant (tableau 2.1) représente les coefficients affectés pour chaque paramètre.

Tableau 2.1 : Valeurs des coefficients K_n ($n = 1$ à 14) en fonction de paramètres de données

N°	Paramètres	Classes		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.00	0.12	0.20
2	Capacité sismique	0.00	0.09	0.12
3	Type de sol	0.01	0.08	0.09
4	Ductilité de l'acier	0.01	0.07	0.08
5	Qualité des assemblages	0.01	0.04	0.06
6	Diaphragme horizontal	0.01	0.04	0.05
7	Modification	0.01	0.04	0.05
8	Régularité en plan	0.01	0.04	0.05
9	Régularité en élévation	0.01	0.04	0.05
10	Maintenance	0.01	0.04	0.05
11	Implantation de l'ouvrage	0.01	0.04	0.05
12	Entrechoquement	0.01	0.04	0.05
13	Toiture	0.01	0.04	0.05
14	Détails	0.01	0.04	0.05

Les valeurs données dans le tableau ci-dessus ont été obtenu à partir d'une analyse statistique [46-50].

2.7. Coefficients de pondération obtenus par la modélisation numérique

Pour déterminer les coefficients de pondération par modélisation numérique, une analyse dynamique non linéaire sera utilisée. Trois types de bâtiments en maçonnerie chaînée seront considérés à chaque fois (faible hauteur, moyenne hauteur et hauteur élevée). Chaque paramètre sera modélisé afin de voir son influence et déterminer son poids dans chacune des trois classes de vulnérabilité définies. Les coefficients affectés à chaque paramètre seront obtenus à partir d'une analyse dynamique basée sur les résultats des déplacements maximums de chaque model [70].

2.7.1. Accélérogrammes utilisés

Les accélérogrammes utilisés pour l'analyse dynamique sont en nombre de dix et sont présentés dans le tableau 1, où sont données les fréquences fondamentales des accélérogrammes introduis.

Tableau 2.2 : Fréquences des séismes

N°	Nom des accélérogrammes	Année	f (Hz)
1	TIPAZA (Algérie)	1989	8.16
2	AIN TEMOUCHENT (Algérie)	1999	3.00
3	BENIOURTHILENE (Algérie)	2000	1.624
4	BOUMERDES (Algérie)	2003	4.15
5	ALASKA (Etats Unis)	1972	7.111
6	IMPERIAL VALLEY (Etats Unis)	1979	1.202
7	OKKAIDO (Japon)	1994	3.345
8	KURIL (Japon)	2007	1.611
9	FUKUSHIMA (Japon)	2011	1.965
10	TORISHIMA (Japon)	2012	0.885

Nous donnons à titre d'exemple dans les figures 2.5 et 2.6 l'accélérogramme de Boumerdes ainsi que son contenu fréquentiel.

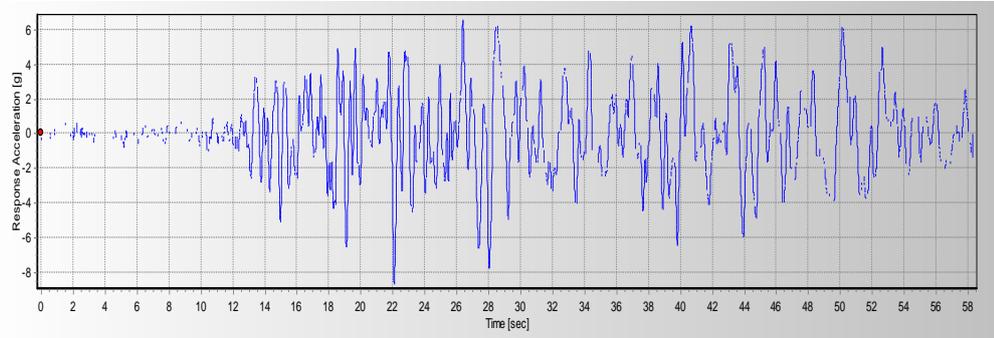


Figure 2.5 : Accélérogramme de Boumerdes 21 Mai 2003

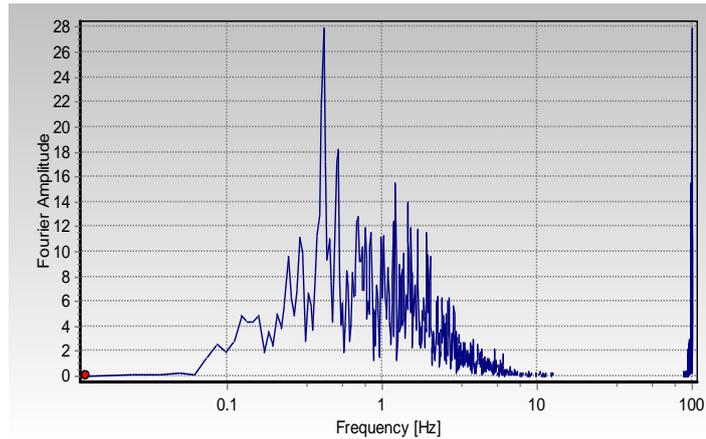


Figure 2.6 : Contenu fréquentiel du séisme de Bouterdes 21 Mai 2003

2.7.2. Modélisation des paramètres

Chaque paramètre sera modélisé dans trois classes définies A, B et C, puis une analyse sera lancée pour chaque type de bâtiment et chaque accélérogramme soit trente (30) analyses par paramètre et par classe, engendrant ainsi quatre vingt dix (90) analyses par paramètre.

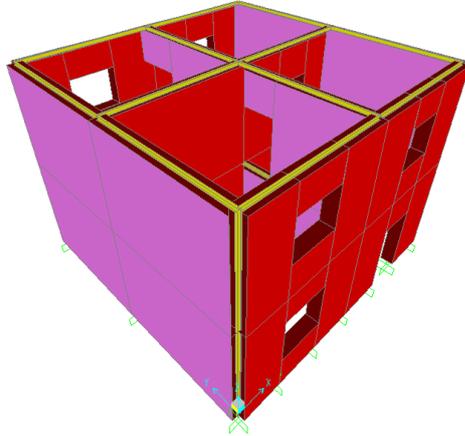
L'analyse de vulnérabilité sismique est basée sur la variation d'une classe à une autre, des déplacements des modèles représentant les différents paramètres. A chaque fois, trois types de bâtiments seront considérés lors de l'analyse d'un paramètre. A savoir, les bâtiments à faible hauteur (6.4m) ou (rez-de-chaussée plus un étage), à moyenne hauteur (12.8m) ou (rez-de-chaussée plus trois étages) et à grande hauteur (25.6m) ou (rez-de-chaussée plus sept étages) comme indiqué sur la figure 2.7. C'est à partir de cette variation des déplacements maximum, que les coefficients affectés à chaque paramètre sont obtenus [72]. Nous allons expliquer en détail dans ce qui suit la procédure de modélisation de tous les paramètres.

Selon les expertises faites pour les constructions en maçonnerie chaînée, les dimensions des bâtiments, les épaisseurs des murs en maçonnerie ainsi que la section des profilés métallique sont donnés dans le tableau 2.3.

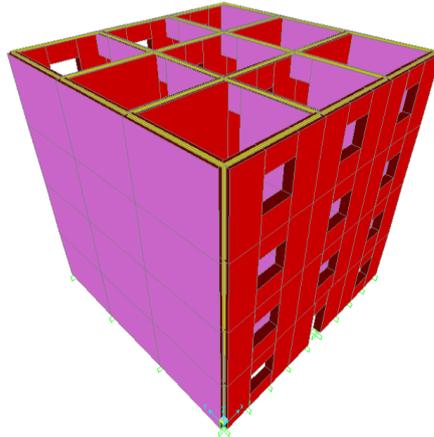
Tableau 2.3 : Dimensions des bâtiments modélisés

Dimensions	e (m)	L (m)	W (m)	H (m)	Profilés
Model 1	0.40	8.0	8.0	6.40	IPE 100
Model 2	0.50	12.0	12.0	12.80	IPE 100
Model 3	0.70	12.0	12.0	25.60	IPE 200

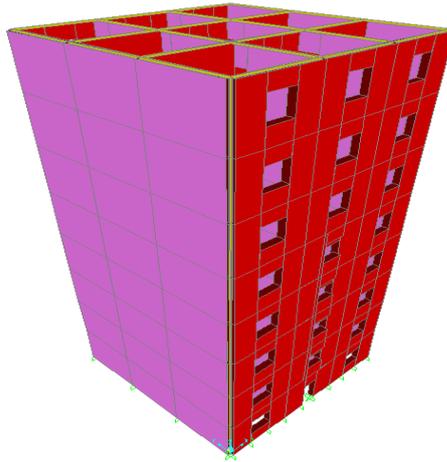
e: épaisseur des murs;
L: Longueur du bâtiment;
W: Largeur du bâtiment;
H: Hauteur du bâtiment.



Bâtiment à faible hauteur (RDC+1 étage / Model 1)



Bâtiment à moyenne hauteur (RDC+3 étages / Model 2)



Bâtiment à hauteur élevée (RDC+7 étages / Model 3)

Figure 2.7 : Types de bâtiments modélisés selon les hauteurs

Les hypothèses considérées pour la modélisation des différents paramètres sont expliquées ci – après.

➤ Paramètre connexions des murs

Les murs porteurs en maçonnerie doivent être chaînés entre eux afin d'éviter leurs déformation hors plan, ce qui entrainerai par la suite l'effondrement de la structure [78]. La modélisation de ce paramètre est faite par rapport au type des chainages qui peuvent exister pour ce type de constructions. Dans la première classe (A), la structure est modélisée avec un chaînage en acier vertical et horizontal. Dans la troisième classe (C), la structure a été modélisée avec un chaînage horizontal seulement, tandis que dans la deuxième classe (B) a été modélisée avec un chaînage vertical et horizontal atteignant le domaine plastique [72].

➤ Paramètre capacité sismique

La capacité sismique est définie par le nombre de murs pouvant résister à l'effort tranchant due au séisme. La distance entre les murs est en général de quatre à cinq mètres pour les constructions courantes. Le passage d'une classe moins vulnérable à la classe la plus vulnérable pour ce paramètre se fait en diminuant le nombre de murs. Dans la première classe (A) la construction possède des murs chaque quatre mètres suivant les deux directions en plan (X et Y), dans la troisième classe (C) la construction possède des murs périphérique

seulement, quand à la classe intermédiaire (B) on trouve des constructions qui possèdent moins de murs intermédiaire que la première classe, au moins dans un seul sens [13].

➤ Paramètre type de sol

Le paramètre type de sol est défini par sa rigidité, selon le règlement algérien qui classe les sols en quatre familles. Nous avons les sols dits rocheux dont la vitesse moyenne d'onde de cisaillement dépasse 800 m/s, les sols fermes dont la vitesse moyenne d'onde de cisaillement dépasse 400 m/s, ainsi que les sols meuble et très meuble où la vitesse moyenne d'onde de cisaillement dépasse 200 m/s [72]. La modélisation de chaque sol est faite tout en variant le facteur de rigidité de la première classe à la dernière classe. Ce facteur est calculé selon les formules 1 à 6 données par Pais et Kausel [73].

$$\text{Translation selon Z : } K_z = \frac{GB}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right] \quad (1)$$

$$\text{Translation selon Y: } K_y = \frac{GB}{1-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right] \quad (2)$$

$$\text{Translation selon X : } K_x = \frac{GB}{1-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right] \quad (3)$$

$$\text{Torsion autour Z: } K_{zz} = GB^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right] \quad (4)$$

$$\text{Torsion autour Y: } K_{yy} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right] \quad (5)$$

$$\text{Torsion autour X: } K_{xx} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right] \quad (6)$$

Où:

G: Module de cisaillement ;

L: Longueur de la fondation ;

B: Largeur de la fondation ;

ν : Coefficient de poisson.

➤ Paramètre ductilité de l'acier

Par définition la ductilité pour un matériau est la capacité de se déformer dans le domaine plastique sans atteindre la rupture. Dans les règlements parasismiques la ductilité est représentée par le coefficient de comportement affecté pour chaque système de contreventement, il varie de 2 à 6 pour les différentes typologies existantes dans le règlement parasismique algérien [72].

Pour le cas des types de constructions étudiés la ductilité concerne le matériau acier existant à l'intérieur des murs en maçonnerie. La variation de la ductilité d'une classe de vulnérabilité à une autre est en fonction de la déformation du matériau. Dans la première classe le matériau reste dans le domaine élastique, dans la dernière classe le matériau atteint la limite de la rupture, par contre dans la classe intermédiaire le matériau atteint le domaine plastique (voir figure 2.8) [74].

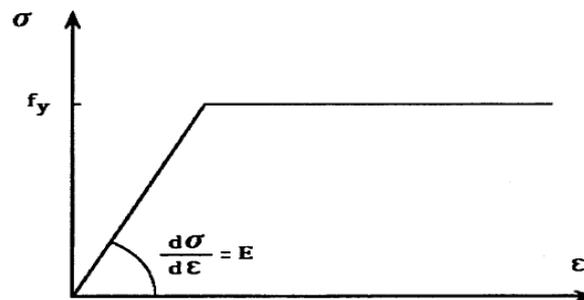


Figure 2.8 : Diagramme contrainte – déformation de l'acier

➤ Paramètre qualité des assemblages

Les assemblages doivent assurés la transmission des efforts entre les différents profilés en charpente métallique (poteaux et poutres), la modélisation a été faite en divisant les éléments frame au niveau de la zone nodale [74, 75]. Dans la première classe on trouve les assemblages qui travaillent dans le domaine élastique, dans la dernière classe on trouve les assemblages qui atteignent la limite de rupture, tandis que la seconde classe, les assemblages atteignent le domaine plastique.

➤ Paramètre diaphragme horizontal

Les planchers doivent être rigides, et bien connectés aux éléments verticaux de contreventement en jouant le rôle de diaphragme. Dans la première classe (A) tous les nœuds du plancher sont sélectionnés et affecté d'un diaphragme. Dans la dernière classe (C) les nœuds du plancher ne sont pas solidaires aux éléments

verticaux de contreventement, tandis que dans la classe (B) la moitié des nœuds sont connectés.

➤ Paramètre modification

On appelle modification tout changement apporté à la structure au niveau de l'usage, et/ou au niveau des éléments porteurs de cette dernière par rapport à son état initial. Ce paramètre a été modélisé en apportant des changements au niveau de l'usage, ainsi qu'au niveau des éléments verticaux de contreventement. Dans la première classe l'usage des constructions ainsi que le système de contreventement ne sont pas modifiés par rapport à l'état initial. Dans la troisième classe le changement se fait au niveau de l'usage (augmentation de la masse), et dans les éléments de contreventements (suppression d'un mur porteurs ou une partie de ce dernier). Dans la classe intermédiaire le changement se situe au niveau de l'usage ou bien au niveau du système de contreventement.

➤ Paramètre régularité en plan

La variation d'une classe à une autre a été considérée en changeant la masse sur un même plancher, c'est-à-dire, dans un même étage nous avons une inégalité des charges. Dans la première classe (A) les bâtiments sont modélisés avec une répartition égale des charges. Dans la deuxième classe (B) nous avons un changement au niveau des charges permanentes ou les charges d'exploitations, par contre dans la troisième classe (C) nous avons un changement dans les charges permanentes et d'exploitations [72].

➤ Paramètre régularité en élévation

Concernant la régularité en élévation c'est le même principe de modélisation que pour le paramètre régularité en plan, sauf que le changement des masses se fait d'un étage par rapport à un autre.

➤ Paramètre maintenance

Toute construction doit être entretenue régulièrement afin de préserver son état notamment les éléments porteurs de contreventements. La modélisation de ce paramètre a été consacrée aux murs porteurs en maçonnerie. Dans la

première classe (A) les murs se déforment dans le domaine élastique, dans la classe B les murs atteignent le domaine plastique quand à la troisième classe (C) les murs atteignent la limite de rupture, selon la courbe représenté dans la figure 2.9 [75, 76, 77].

Pour évaluer le paramètre maintenance le module d'élasticité E et la déformation (ϵ) de la maçonnerie ont été pris comme variable dans le cas de la non – linéarité. La résistance à la compression $f = 2 \text{ N/mm}^2$;

$$E = 1000 * f \quad (7)$$

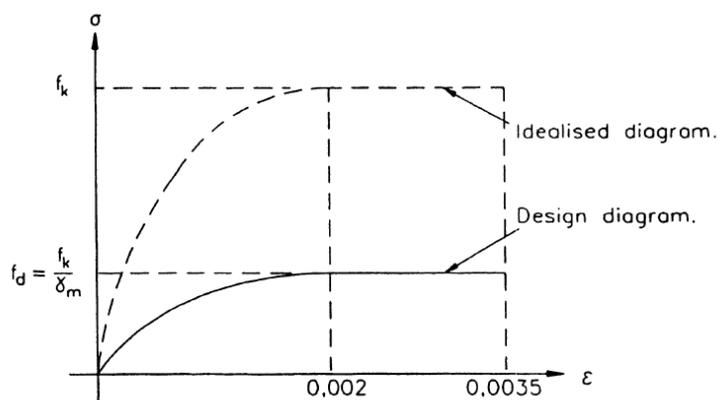


Figure 2.9 : Diagramme contrainte – déformation de la maçonnerie

➤ Paramètre implantation de l'ouvrage

Les constructions implantées aux abords d'une falaise ou d'un oued sont plus vulnérable vis-à-vis l'aléa sismique [72, 79]. Ce paramètre est modélisé pour tenir compte des phénomènes comme les glissements de terrains, la liquéfaction...etc. La modélisation est faite en considérant l'encastrement de la structure. Dans la première classe on trouve les modèles avec tous les appuis encastrent, dans la dernière classe un appui est encastrent tandis que dans la deuxième classe la moitié des appuis sont libre.

➤ Paramètre entrechoquement

Chaque structure mitoyenne avec d'autres structures doit disposée d'un joint sismique suffisamment dimensionnés selon la réglementation en vigueur. L'absence de joint sismique engendrera des désordres dans les structures

mitoyennes par entrechoquement. La vérification de ce paramètre a été faite par rapport à la formule (8) donnée par le règlement parasismique algérien RPA99 Version 2003 [72]. Cette formule donne la dimension minimum à respecter entre deux bâtiments adjacents.

Dans la classe A la structure est isolée ou est contigüe avec $d > 40$ mm. Dans ce cas le coefficient $KI = 0$.

Dans la classe B, la structure a une ou plusieurs constructions mitoyennes avec $d \leq 40$ mm. Dans ce cas le facteur de pondération est calculé selon la différence de l'épaisseur des joints donné par la formule 8 (40 mm), et l'épaisseur (d) calculée pour chaque type de bâtiment.

Dans la classe C, la structure a une ou plusieurs constructions mitoyenne avec $d = 0$ mm. Dans ce cas le coefficient $KI = 1$.

$$d_{\min} = 15 \text{ mm} + (\delta_1 + \delta_2) \geq 40 \text{ mm} \quad (8)$$

d_{\min} : largeur de joint calculée

δ_1 : déplacement maximum du bloc 1

δ_2 : déplacement maximum du bloc 2

➤ Paramètre toiture

Le principe de la modélisation de ce paramètre est le même que le paramètre diaphragme. Pour le paramètre toiture les charges permanentes et d'exploitations sont considérés différents (plus grandes) par rapport au poids des planchers courants.

➤ Paramètre détail

Le paramètre détail concerne les éléments qui ne font pas partie du système structurel tel que : les balcons, les cloisons de séparations, les gardes corps, l'acrotère, les escaliers. L'existence de ces derniers dépend de l'architecture des constructions expertisées. Pour la modélisation nous avons pris comme exemple les « balcons », en fonction de leurs déformations. Dans la première classe on trouve les balcons dont la déformation reste dans le domaine élastique, dans la deuxième classe les déformations atteignent le domaine plastique alors que dans la dernière classe nous avons les balcons dont la déformation atteint la limite de rupture [76].

Afin d'éviter la résonance, les fréquences des accélérogrammes utilisés ne doivent pas correspondre aux fréquences des modes propres des différents modèles. A cet effet les modèles ayant une fréquence similaire à celles des accélérogrammes ne seront pas pris en considération lors de l'estimation des coefficients. Le tableau 2.4 regroupe les différentes fréquences des modèles utilisés obtenus à partir d'une analyse modale.

Tableau 2.4 : Fréquences fondamentales des différents modèles

Paramètres	Fréquences (Hz)								
	Faible hauteur (6.4m)			Moyenne hauteur (12.8m)			Hauteur élevée (25.6m)		
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Connexions des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69
Capacité sismique	9.1	8.33	8.33	4.34	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	1.69	1.61	1.47
Ductilité de l'acier	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69
Assemblages	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.25	1.25
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.16	4.16	1.69	1.69	1.69
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	1.69	1.23	0.97
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.27	4.34	2.27	0.10	1.69	0.72	0.10
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23

2.7.3. Calcul des coefficients

Les coefficients de pondération affectés aux différents paramètres, sont obtenus à partir des déplacements maximum des modèles lors de l'analyse dynamique non linéaire selon la procédure suivante :

Tout d'abord un coefficient K_i de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour chaque accélérogramme et pour un type de bâtiment est calculé selon l'équation 9.

$$K_i = \frac{d_{\max}}{\sum_{i=1}^3 d_{\max i}} \quad (9)$$

d_{\max} : déplacement maximum pour chaque classe de vulnérabilité (A, B et C)

$\sum d_{\max i}$: la somme déplacements maximum des trois classes de vulnérabilité.

Ensuite pour chaque paramètre une première moyenne est calculée des coefficients « K_i » obtenus pour les trois types de modèles (faible hauteur, moyenne hauteur et hauteur élevée), selon la formule 10. Cette moyenne est obtenue pour chaque accélérogramme enregistré.

$$K_j = \frac{\sum_{j=1}^n K_i}{n} \quad (10)$$

K_j : coefficient de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour chaque accélérogramme et pour les trois types de bâtiments.

n : nombre de bâtiments considérés ($n = 1$, $n = 2$, ou $n = 3$). Voir tableau 2.4 et 2.6.

Une deuxième moyenne est calculée pour les différents paramètres de vulnérabilité à partir des coefficients K_j obtenus de la formule 10, des différents accélérogrammes introduits, selon la formule 11.

$$K_l = \frac{\sum_{l=1}^{10} K_j}{10} \quad (11)$$

K_l : coefficient de pondération obtenu pour chaque paramètre, pour les dix accélérogramme et pour les trois types de bâtiments.

Les coefficients utilisés pour la classification des structures en maçonnerie chaînée lors d'une enquête pré ou post – sismique, sont obtenus selon la formule 12 ci-après. Toutes ces valeurs seront divisées par « 6.23 » afin d'obtenir des coefficients compris entre 0 et 1 (0% et 100%). Ces derniers expriment un pourcentage de la vulnérabilité sismique totale des structures en maçonnerie chaînée.

$$K_n = \frac{K_l}{6.23} \quad (12)$$

La valeur 6.23 représente la somme des KI obtenus dans la classe C, qui est la valeur maximum que peut avoir une structure.

Nous montrons dans ce qui suit un exemple de calcul des coefficients de pondération. Le paramètre « maintenance » a été choisi pour présenter l'application de la méthode de calcul.

Dans le tableau 2.5 donné ci-après sont illustrés les résultats des déplacements pour le paramètre « maintenance » obtenus selon les différents accélérogrammes. Les résultats obtenus pour les autres paramètres sont présentés en annexe 3.

Tableau 2.5 : Valeurs de déplacements maximum (d_{max}) pour le paramètre maintenance

Accélérogrammes	Déplacements maximum (mm)								
	Modèles à Faible hauteur			Modèles à moyenne hauteur			Modèles à hauteur élevée		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
TIPAZA	0.42	0.95	0.98	0.90	1.53	1.60	1.43	1.64	3.45
AIN TEMOUCHENT	3.95	5.68	6.01	8.23	8.25	8.30	8.23	8.25	8.40
BENIOURTHILENE	1.36	2.78	6.15	16.80	41.17	41.95	16.80	41.71	42.05
BOUMERDES	0.43	7.64	18.74	19.35	48.35	146.33	120.62	163.35	232.25
ALASKA	0.03	0.04	0.07	0.07	0.10	0.46	0.27	0.52	0.52
IMPERIAL VALLEY	0.02	0.05	0.09	0.10	0.28	0.92	0.50	1.00	1.07
OKKAIDO	0.31	0.41	0.42	0.36	0.46	0.48	0.36	0.47	0.54
KURIL	4.80	5.68	13.82	23.77	42.37	47.73	76.23	77.00	77.46
FUKUSHIMA	5.47	12.34	38.58	56.75	68.51	246.33	225.84	246.34	247.00
TORISHIMA	0.25	0.68	1.67	2.53	4.53	7.92	8.43	11.00	17.03

Nous remarquons dans le tableau 2.5 que les déplacements maximums dû aux différents accélérogrammes varient dans l'ordre croissant de la classe A à la classe C. nous remarquons aussi que les effets des accélérogrammes sont différents les uns des autres, ce qui engendrent des déplacements plus au moins grands. Cependant leur évolution reste semblable pour chaque paramètre dans les différents modèles.

A partir de la formule 9 les coefficients K_i sont obtenus pour chaque paramètre et pour chaque accélérogramme introduit. Les modèles où leurs

fréquences coïncident avec celle des accélérogrammes ne sont pas pris en compte afin d'éviter l'effet de résonance comme il est indiqué dans le tableau 2.6. Les résultats obtenus pour les paramètres restants sont présentés en annexe 4.

Tableau 2.6 : Valeurs des coefficients K_i pour le paramètre « maintenance »

Accélérogrammes	COEFFICIENTS K_i								
	Modèles à Faible hauteur			Modèles à moyenne hauteur			Modèles à hauteur élevée		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
TIPAZA	-	-	-	0.22	0.38	0.40	0.22	0.25	0.53
AIN TEMOUCHENT	0.25	0.36	0.38	-	-	-	0.28	0.36	0.36
BENIOURTHILENE	0.13	0.27	0.60	0.17	0.41	0.42	-	-	-
BOUMERDES	0.02	0.28	0.70	-	0.23	0.68	0.23	0.32	0.45
ALASKA	0.21	0.29	0.50	0.11	0.16	0.73	0.19	0.37	0.43
IMPERIAL VALLEY	0.13	0.31	0.56	0.08	0.22	0.71	-	-	-
OKKAIDO	0.32	0.33	0.34	-	-	-	0.28	0.30	0.42
KURIL	0.20	0.23	0.57	0.21	0.37	0.42	-	-	-
FUKUSHIMA	0.10	0.22	0.68	-	-	-	-	-	-
TORISHIMA	0.10	0.26	0.64	0.17	0.30	0.53	0.23	0.30	0.47

A l'aide de la formule 10, une première moyenne est calculée des coefficients « K_i » obtenus dans le tableau 2.6 pour chaque accélérogramme, pour obtenir des coefficients « K_j » dans chaque classe de vulnérabilité (voir tableau 2.7).

Tableau 2.7 : Valeurs des coefficients K_j dans chaque classe de vulnérabilité pour le paramètre « maintenance »

Accélérogrammes	COEFFICIENTS K_j		
	Trois types de bâtiments		
	A	B	C
TIPAZA	0.22	0.31	0.46
AIN TEMOUCHENT	0.26	0.35	0.37
BENIOURTHILENE	0.15	0.34	0.50
BOUMERDES	0.11	0.27	0.61
ALASKA	0.17	0.27	0.55
IMPERIAL VALLEY	0.10	0.26	0.63
OKKAIDO	0.30	0.31	0.38
KURIL	0.20	0.30	0.49
FUKUSHIMA	0.09	0.29	0.68
TORISHIMA	0.16	0.28	0.54

Une deuxième moyenne est calculée permettant d'obtenir des coefficients « KI » à l'aide de la formule 11 pour chaque paramètre pour les trois modèles (faible hauteur, moyenne hauteur et hauteur élevée) sont illustrés dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Valeurs du facteur KI non normalisés selon les classes de vulnérabilités

N°	Paramètres	Classes		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.30	0.33	0.36
2	Capacité sismique	0.25	0.36	0.39
3	Type de sol	0.26	0.33	0.41
4	Ductilité de l'acier	0.30	0.34	0.36
5	Qualité des assemblages	0.30	0.34	0.36
6	Diaphragme horizontal	0.28	0.32	0.36
7	Modification	0.28	0.32	0.39
8	Régularité en plan	0.30	0.34	0.36
9	Régularité en élévation	0.30	0.34	0.35
10	Maintenance	0.18	0.30	0.52
11	Implantation de l'ouvrage	0.11	0.26	0.62
12	Entrechoquement	0	0.49	1.00
13	Toiture	0.30	0.34	0.36
14	Détails	0.31	0.33	0.35
SOMME		-	-	6.23

Les coefficients obtenus dans le tableau 2.8 ne sont pas utilisés directement dans la classification des structures en maçonnerie chaînée. Ces derniers sont traités, à l'aide de la formule 12 passant à une classification comprise entre 0 et 1 (0% à 100%), comme il est présenté dans le tableau 2.9 ci – après.

Tableau 2.9 : Valeurs des facteurs K_n selon les classes de vulnérabilités

N°	Paramètres	Classes		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.04	0.05	0.06
2	Capacité sismique	0.04	0.05	0.06
3	Type de sol	0.04	0.05	0.07
4	Ductilité de l'acier	0.04	0.05	0.06
5	Qualité des assemblages	0.04	0.05	0.06
6	Diaphragme horizontal	0.04	0.05	0.06
7	Modification	0.04	0.05	0.06
8	Régularité en plan	0.04	0.05	0.06
9	Régularité en élévation	0.04	0.05	0.06
10	Maintenance	0.03	0.05	0.08
11	Implantation de l'ouvrage	0.00	0.04	0.10
12	Entrechoquement	0.00	0.08	0.15
13	Toiture	0.04	0.05	0.06
14	Détails	0.04	0.05	0.06

Dans les tableaux 2.10, 2.11 et 2.12, est illustrée une comparaison entre les résultats obtenus pour les coefficients de pondération par les méthodes statistique et par la méthode de modélisation numérique.

Tableau 2.10 : Pourcentage d'écart des coefficients de pondération K_n pour la classe A

N°	Paramètres	Coefficients K_n	Ecart (%)
1	Connexions des murs	0.00	100
		0.04	
2	Capacité sismique	0.00	100
		0.04	
3	Type de sol	0.01	75
		0.04	
4	Ductilité de l'acier	0.01	75
		0.04	
5	Qualité des assemblages	0.01	75
		0.04	
6	Diaphragme horizontal	0.01	75
		0.04	
7	Modification	0.01	75
		0.04	
8	Régularité en plan	0.01	75
		0.04	
9	Régularité en élévation	0.01	75
		0.04	
10	Maintenance	0.01	66.67
		0.03	
11	Implantation de l'ouvrage	0.01	100
		0.00	
12	Entrechoquement	0.01	100
		0.00	
13	Toiture	0.01	75
		0.04	
14	Détails	0.01	75
		0.04	

Les coefficients obtenus par la méthode numérique varient de plus de 80% en moyenne par rapport à ceux obtenus par la méthode empirique. Cette grande variation signifie qu'il y a eu un shift des valeurs uniquement par contre l'ordre d'importance est maintenu.

Tableau 2.11 : Pourcentage d'écart des coefficients Kn pour la classe B

N°	Paramètres	Coefficients Kn	Ecart (%)
1	Connexions des murs	0.12	58.33
		0.05	
2	Capacité sismique	0.09	44.44
		0.05	
3	Type de sol	0.08	37.50
		0.05	
4	Ductilité de l'acier	0.07	28.57
		0.05	
5	Qualité des assemblages	0.04	20
		0.05	
6	Diaphragme horizontal	0.04	20
		0.05	
7	Modification	0.04	20
		0.05	
8	Régularité en plan	0.04	20
		0.05	
9	Régularité en élévation	0.04	20
		0.05	
10	Maintenance	0.04	20
		0.05	
11	Implantation de l'ouvrage	0.04	0
		0.04	
12	Entrechoquement	0.04	50
		0.08	
13	Toiture	0.04	20
		0.05	
14	Détails	0.04	20
		0.05	

L'écart des coefficients obtenus par la méthode numérique est de près de 30% en moyenne par rapport à ceux obtenus par la méthode statistique. On constate un shift de 20% pour la plupart des paramètres avec maintien de l'ordre d'importance.

Tableau 2.12 : Pourcentage d'écart des coefficients Kn pour la classe C

N°	Paramètres	Coefficients Kn	Ecart (%)
1	Connexions des murs	0.20	70
		0.06	
2	Capacité sismique	0.12	50
		0.06	
3	Type de sol	0.09	22.22
		0.07	
4	Ductilité de l'acier	0.08	25
		0.06	
5	Qualité des assemblages	0.06	0
		0.06	
6	Diaphragme horizontal	0.05	16.67
		0.06	
7	Modification	0.05	16.67
		0.06	
8	Régularité en plan	0.05	16.67
		0.06	
9	Régularité en élévation	0.05	16.67
		0.06	
10	Maintenance	0.05	37.5
		0.08	
11	Implantation de l'ouvrage	0.05	50
		0.10	
12	Entrechoquement	0.05	66.67
		0.15	
13	Toiture	0.05	16.67
		0.06	
14	Détails	0.05	16.67
		0.06	

Même constat que précédemment juste que l'écart moyen est de près de 20%.

Dans le figure 2.10 est représentée l'évolution des coefficients affectés au paramètre « maintenance » de la classe A à la classe C pour les deux procédures.

Nous remarquons que dans la seconde méthode les coefficients ont augmenté dans les trois classes de vulnérabilité.

Les graphes représentant cette évolution pour les autres paramètres sont regroupés en annexe 5.

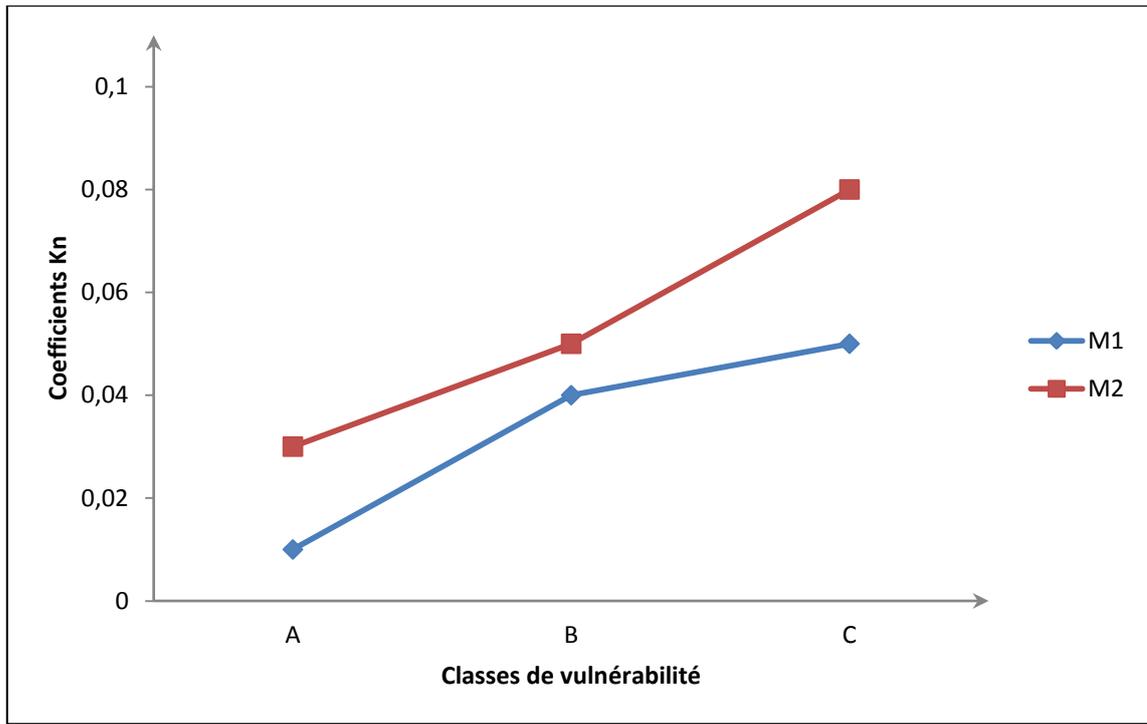


Figure 2.10 : Comparaison entre l'évolution des coefficients Kn pour les deux méthodes

M1 : méthode statistique.

M2 : méthode par modélisation numérique.

2.8. Calcul de l'indice de vulnérabilité et classification des structures

La classification des constructions passe par la détermination de la valeur de l'indice de vulnérabilité « Iv », car ce dernier nous permet de savoir si la structure aura une bonne, moyenne ou mauvaise tenue globale au séisme.

La valeur de l'indice de vulnérabilité est calculée comme suit :

$$Iv = \sum_{n=1}^{n=14} Kn \quad (13)$$

Une fois l'indice de vulnérabilité calculé nous pouvons classer la construction expertisée. A cet effet trois classes de vulnérabilité sont proposées (Vert, Orange et Rouge), la classe Vert exprime que la structure aura une bonne résistance à l'action sismique, la classe Rouge exprime que la structure aura une faible résistance au séisme tandis que la classe Orange aura une résistance moyenne.

Les trois classes de vulnérabilité proposées sont :

Tableau 2.13 : Classes de vulnérabilité

Classe	VERT	ORANGE	ROUGE
lv	0.00-0.60	0.60-0.86	0.86-1.00

Chaque classe de vulnérabilité est composée de différents niveaux. Cinq (05) niveaux de vulnérabilité sont définis dans les trois classes de vulnérabilité comme il est indiqué dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14 : Différents niveaux de vulnérabilité selon "lv"

Classe	Vert		Orange		Rouge
Niveau de vulnérabilité	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
	$lv < 0.53$	$lv \geq 0.53$	$lv < 0.72$	$lv \geq 0.72$	$lv \geq 0.86$

L'indice de vulnérabilité « lv » d'une structure, est calculé à partir d'une fiche technique, dans laquelle les données nécessaires sont consignées.

2.9. Conclusion

La méthode développée, est basée sur le principe de l'indice de vulnérabilité. Cet indice, a été calculé à partir de différents paramètres, qui ont été choisis en se basant principalement sur les études faites sur les constructions en maçonnerie et sur les constructions en charpente métallique. Ces paramètres, ont été définis et modélisés en utilisant une analyse dynamique non linéaire pour trois types de bâtiments : faible hauteur, moyenne hauteur et hauteur élevée. Les coefficients obtenus ont été comparés à ceux obtenus par la méthode statistique.

Les écarts obtenus traduisent un shift des valeurs avec un maintien de l'ordre d'importance, ceci est normal vue que les méthodes d'obtention des valeurs sont différentes néanmoins les deux méthodes traduisent l'importance des différents paramètres selon la même tendance que ce soit à l'intérieure d'une même classe ou entre les trois classes, ce qui tend à valider les coefficients obtenu.

CHAPITRE 3

COURBES DE VULNERABILITE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE CHAINEE

3.1. Introduction

Les courbes de vulnérabilité sont à la base de l'analyse de la vulnérabilité sismique à grande échelle (commune, ville, wilaya...etc.). Ce niveau d'analyse permet d'estimer le taux de dommage des ouvrages afin d'élaborer des scénarios sismiques pour des agglomérations ou des ensembles urbains, afin d'identifier les zones les plus vulnérables aux séismes. Ces scénarios permettront alors de planifier et hiérarchiser les priorités pour une meilleure résilience des centres urbains. Dans le présent chapitre l'objectif est d'élaborer des courbes de vulnérabilité pour des structures en maçonnerie chaînée.

3.2. Niveaux de dommages

L'élaboration de courbes de vulnérabilité des structures en maçonnerie chaînée, passe par la définition des matrices de probabilité de dommage. Ces matrices se basent sur la description des niveaux de dommages que peuvent subir ce type de construction en fonction de l'intensité sismique.

Six niveaux de dommages sont considérés. Le niveau de dommage (D_k) varie de 0 à 5, où le niveau 0 correspond à un cas d'absence de dommage, et le niveau 5 correspond à une destruction totale ou presque de la structure. Les niveaux de dommages ainsi que la description de l'échelle d'intensité utilisée sont présentés respectivement comme dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1 : Classification de Niveaux de dommages [63]

Niveau de dommage « D_k »	Description de dommage
Niveau 0	Aucun dégât constaté
Niveau 1	Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structurels)
Niveau 2	Dégâts modérés (dégâts structurels, légers ; dégâts non structurels modérés)
Niveau 3	Dégâts sensibles à importants (dégâts structurels modérés, dégâts non structurels importants)
Niveau 4	Dégâts très importants (dégâts structurels importants, dégâts non structurels très importants)
Niveau 5	Destruction (dégâts structurels très importants)

La forme abrégée de l'échelle d'intensité sismique EMS 98 est donnée dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Echelle d'intensité sismique EMS 98 [63]

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

XII	Catastrophe généralisés	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.
-----	-------------------------	--

3.3. Principe de la méthode [60]

Le calcul des courbes de vulnérabilité semi empiriques inclue l'échelle d'intensité européenne (EMS 98) et l'indice de vulnérabilité (Iv) qui représente et quantifie l'appartenance d'une construction à une classe de vulnérabilité donnée. Les valeurs de l'indice (domaine 0 – 1) sont données pour quantifier le comportement global de la structure. Un niveau de dommage est calculé à partir des ces paramètres cités ci-dessus, pour les constructions en maçonnerie chaînée.

La méthode en elle même utilise les matrices de probabilité de dommages (DPM). Ces matrices de probabilités de dommages représentent la probabilité d'atteindre un certain niveau de dommage pour un certain nombre de constructions en maçonnerie chaînée.

3.3.1. Matrices de probabilité de dommages

Les matrices de probabilité de dommages permettent de quantifier le niveau de dommage des structures en maçonnerie chaînée, pour chaque classe de vulnérabilité en fonction de l'intensité sismique.

Tableau 3.3 : Matrice de probabilité de dommages pour la classe VERT

Intensité	1	2	3	4	5
5					
6					
7	Peu				
8	Beaucoup	Peu			
9		Beaucoup	Peu		
10			Beaucoup	Peu	
11				Beaucoup	Peu
12					La plupart

Nous remarquons à partir du tableau 3.3, que les structures en maçonnerie chaînée, ayant un indice de vulnérabilité dans la classe Vert, ne subiront de dommages qu'à partir d'une intensité 7. Ces dommages qui sont de niveau 1, apparaissent dans « peu » de structures, qui représentent au maximum 20% du de l'ensemble des constructions en maçonnerie chaînée. Ce pourcentage augmente (20% à 60%) pour une intensité 8. Pour cette même intensité peu de constructions subiront alors un niveau de dommage 2.

Tableau 3.4 : Matrice de probabilité de dommages pour la classe ORANGE

Dommage	1	2	3	4	5
Intensité					
5					
6	Peu				
7	Beaucoup	Peu			
8		Beaucoup	Peu		
9			Beaucoup	Peu	
10				Beaucoup	Peu
11					La plupart
12					

Pour la deuxième catégorie (tableau 3.4), c.-à-d. les structures en maçonnerie chaînée, ayant un indice de vulnérabilité dans la classe Orange, subiront de dommages à partir d'une intensité 6. Ces dommages qui sont de niveau 1, apparaissent dans « peu » de structures, qui représentent au maximum 20% du de l'ensemble des constructions en maçonnerie chaînée. Par ailleurs la plus part des constructions (plus de 60%) subiront un niveau de dommage 5 pour une intensité sismique de 11.

Tableau 3.5 : Matrice de probabilité de dommages pour la classe ROUGE

Domage	1	2	3	4	5
Intensité					
5	Peu				
6	Beaucoup	Peu			
7		Beaucoup	Peu		
8			Beaucoup	Peu	
9				Beaucoup	Peu
10					La plupart
11					
12					

Pour es structures en maçonnerie chaînée, ayant un indice de vulnérabilité dans la classe Rouge, subiront de dommages de niveau 1 dès l'intensité 5. Ces dommages qui sont de niveau 1, apparaissent dans « peu » de structures. Par ailleurs la plus part des constructions (plus de 60%) subiront un niveau de dommage 5 pour une intensité sismique de 10.

Les notions de peu, beaucoup 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 20% pour la notion de peu de 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 semi – empiriques

Les courbes de vulnérabilité expriment le niveau de dommage moyen des constructions en fonction de l'intensité sismique. Les niveaux de dommages considérés sont en nombre de cinq (05). Les courbes de vulnérabilité sont tracés en fonction du niveau de dommage appelé « μ_d » et de l'échelle d'intensité sismique européenne (EMS 98).

Les courbes de vulnérabilité sont tracées selon la formule 14.

$$\mu_d = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.45 * I_v - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (14)$$

Avec :

I : intensité sismique ;

I_v : indice de vulnérabilité ;

μ_d : niveau de dommage moyen.

La valeur 2.3 représente la pente de ductilité. Cette valeur est propre aux constructions en maçonnerie.

La figure 3.1 représente les courbes de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie chaînée.

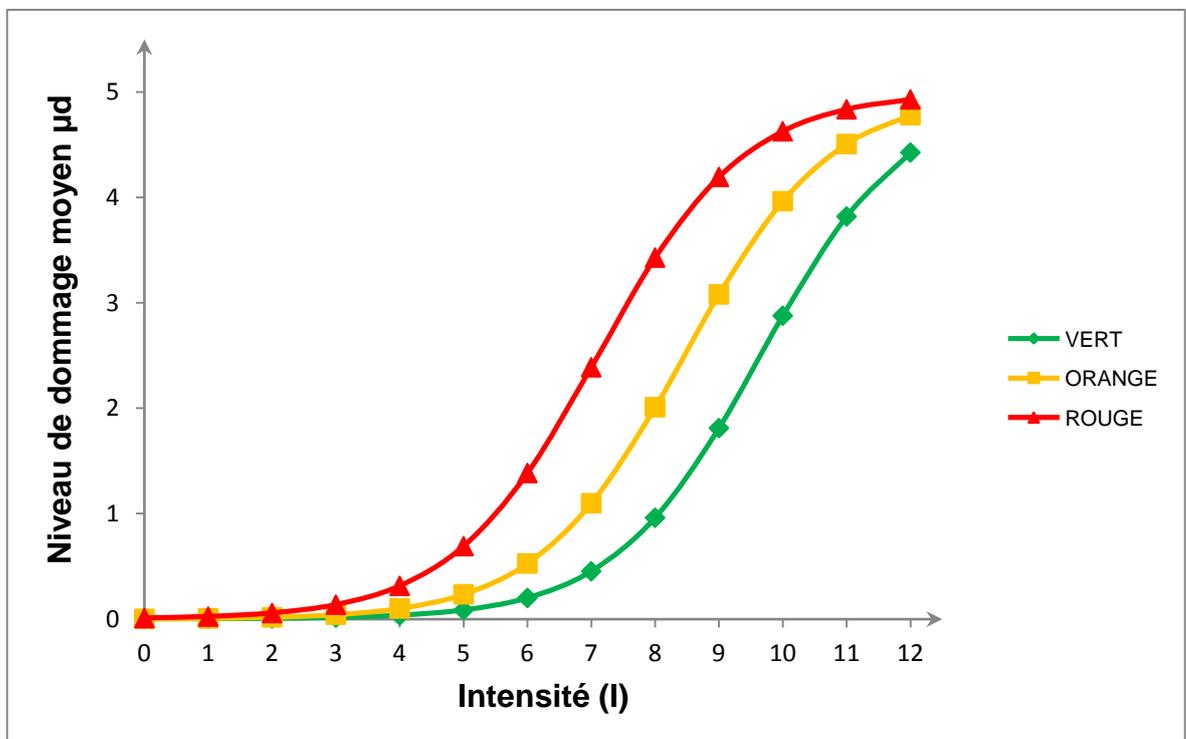


Figure 3.1 : Courbes de vulnérabilité semi empirique pour des constructions en maçonnerie chaînée

Nous remarquons à partir des résultats obtenus pour les courbes de vulnérabilité que l'inclinaison de la pente commence à partir d'une intensité sismique de (05). Cette intensité correspond à de faibles dommages apparents dans les structures en maçonnerie chaînée.

Nous allons présentés dans ce qui suit une comparaison entre les courbes de vulnérabilité obtenus pour le cas algérien des structures en maçonnerie chaînée et celles obtenus par la méthode RISK – UE.

3.4. Validation des courbes de vulnérabilité semi empiriques

Les courbes illustrées dans la figure 3.1 et qui représentent les courbes de vulnérabilité des structures en maçonnerie chaînée en Algérie ont été comparées à 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.

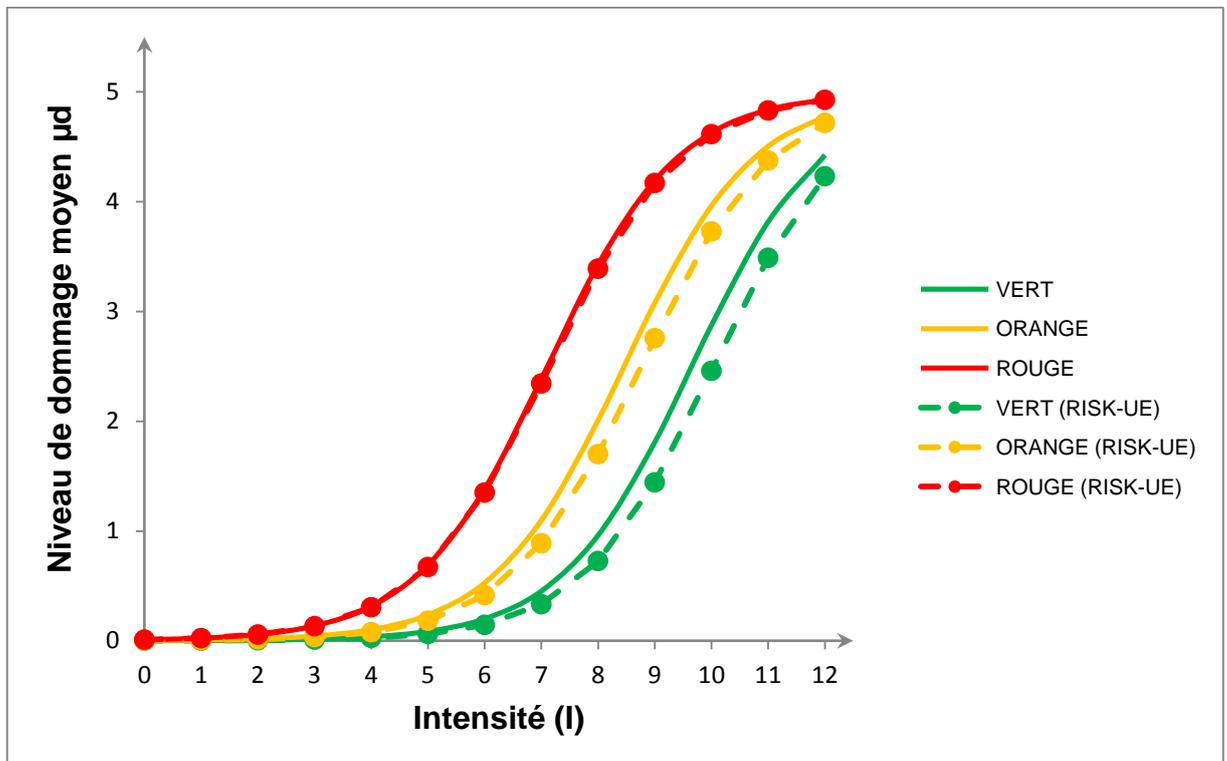


Figure 3.2 : Comparaison entre les courbes de vulnérabilité

Nous remarquons à partir des courbes de vulnérabilité obtenus pour les structures en maçonnerie chaînée et celles développées par RISK – UE, que les écarts entre les différentes courbes pour les trois classes de vulnérabilité sont

faibles. Ces écarts seront quantifiés pour chaque classe de vulnérabilité et présentés ci – après.

3.4.1. Comparaison entre les pourcentages de dommage pour les classes de vulnérabilité

Dans le tableau 3.6 sont regroupés les pourcentages de dommage pour la classe VERT.

Tableau 3.6 : Ecart moyen des taux de dommages pour la classe VERT

Niveau de dommage		Taux de dommage		Ecart moyen(%)	Moyenne(%)
RISK UE	Trouvé	RISK UE	Trouvé		
0.001	0.001	0.016	0.023	0.003	1.361
0.002	0.003	0.039	0.054	0.008	
0.005	0.006	0.092	0.129	0.018	
0.011	0.015	0.219	0.307	0.044	
0.026	0.037	0.522	0.730	0.104	
0.062	0.086	1.237	1.725	0.244	
0.145	0.201	2.900	4.018	0.559	
0.333	0.454	6.653	9.082	1.215	
0.727	0.962	14.533	19.246	2.356	
1.443	1.812	28.860	36.249	3.694	
2.459	2.878	49.185	57.566	4.191	
3.489	3.820	69.782	76.397	3.307	
4.232	4.427	84.638	88.535	1.948	

Le pourcentage de l'écart moyen entre les taux de dommage obtenus par l'approche RISK – UE et ceux pour le cas des structures en maçonnerie chaînée appliquer au contexte Algérien est de 1.36%. Cet écart est très faible d'où les résultats concordent avec ceux obtenus par l'approche européenne.

Pour la classe ORANGE les pourcentages de dommage sont regroupés Dans le tableau 3.7 ci – après.

Tableau 3.7 : Ecart moyen des taux de dommages pour la classe ORANGE

Niveau de dommage		Taux de dommage		Ecart moyen(%)	Moyenne(%)
RISK UE	Trouvé	RISK UE	Trouvé		
0.002	0.003	0.049	0.064	0.007	1.141
0.006	0.008	0.117	0.153	0.018	
0.014	0.018	0.279	0.363	0.042	
0.033	0.043	0.662	0.863	0.100	
0.078	0.102	1.565	2.034	0.234	
0.183	0.236	3.655	4.719	0.532	
0.415	0.528	8.301	10.568	1.134	
0.888	1.100	17.761	21.993	2.116	
1.700	2.011	34.006	40.215	3.105	
2.757	3.081	55.145	61.610	3.233	
3.729	3.965	74.575	79.292	2.358	
4.375	4.507	87.497	90.134	1.318	
4.717	4.781	94.349	95.613	0.632	

Le pourcentage de l'écart moyen entre les taux de dommage obtenus par l'approche RISK – UE et ceux pour le cas des structures en maçonnerie chaînée appliquer au contexte Algérien est de 1.14%.

Enfin pour la classe ROUGE les pourcentages de dommages sont regroupés Dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Ecart moyen des taux de dommages pour la classe ROUGE

Niveau de dommage		Taux de dommage		Ecart moyen(%)	Moyenne(%)
RISK UE	Trouvé	RISK UE	Trouvé		
0.010	0.010	0.200	0.208	0.004	0.161
0.024	0.025	0.476	0.494	0.009	
0.056	0.059	1.129	1.170	0.021	
0.133	0.137	2.651	2.748	0.048	
0.305	0.316	6.101	6.315	0.107	
0.671	0.693	13.422	13.855	0.216	
1.350	1.387	27.001	27.731	0.365	
2.344	2.390	46.879	47.795	0.458	
3.390	3.430	67.799	68.596	0.398	
4.170	4.195	83.398	83.901	0.251	
4.615	4.628	92.299	92.556	0.129	
4.831	4.837	96.621	96.739	0.059	
4.928	4.930	98.555	98.607	0.026	

Le pourcentage de l'écart moyen entre les taux de dommages obtenus par l'approche RISK – UE et ceux pour le cas des structures en maçonnerie chaînée appliquer au contexte Algérien est de 0.16%.

3.5. Conclusion

La méthode utilisée et appliquée pour le cas des constructions en maçonnerie chaînée, se base sur le calcul de l'indice de vulnérabilité, que nous avons développé dans le chapitre 2. Les courbes de vulnérabilité ont été tracées à partir des matrices de probabilité de dommages. Ces matrices permettront d'estimer la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage pour un certain nombre de constructions en maçonnerie chaînée. Les matrices de probabilité de dommage (DPM) ont été développées à l'aide de la loi de probabilité « Béta », pour les trois classes de vulnérabilité (Vert, Orange et Rouge). Les résultats des courbes trouvés pour les structures en maçonnerie chaînée ont été comparés à ceux obtenus par la méthode RISK – UE, où nous avons trouvé des écarts très faible entre les deux approches.

CHAPITRE 4

APPLICATION DE LA METHODE AUX STRUCTURES EN MAÇONNERIE CHAINEE

4.1. Introduction

La méthode développée précédemment fera l'objet d'un développement numérique. Pour ce faire un premier programme développé sous l'environnement Delphi sera utilisé pour appliquer la méthode de l'lv aux structures en maçonnerie chaînée. Le second programme développé sous Excel permet le calcul d'un niveau de dommage moyen, en utilisant les courbes de vulnérabilité développées, pour une intensité donnée. Les deux programmes peuvent être utilisés simultanément ou indépendamment, selon les besoins et les types d'analyses souhaitées.

Ces analyses ne peuvent être développées directement. A cet effet, une fiche technique relative au type de structure étudiée, devra être renseignée in-situ, pour obtenir les informations nécessaires à l'étude.

4.2. Elaboration de la fiche technique des constructions en maçonnerie chaînée

La fiche technique permet de regrouper l'ensemble des informations nécessaires pour déterminer l'indice de vulnérabilité des constructions. Cette fiche contient six parties.

PARTIE I: indentification de la structure

Cette partie contient des informations générales sur la structure.

On y trouve : adresse, âge, usage, nombre de niveaux, sous sol, autres.

PARTIE II: caractéristiques géométrique

On trouve les dimensions du bâtiment.

Longueur, largeur, hauteur, forme en plan, en élévation.

PARTIE III: système structurel

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

PARTIE IV: sol et implantation

On trouve le type de sol, la zone d'implantation.

PARTIE V: éléments non structuraux

Dans cette partie on trouve les détails.

PARTIE VI: maintenance et modifications

On trouve les informations générales sur l'état de la structure, ainsi que sur les changements apportés à la structure.

Fiche Technique d'Expertise Pour Les Constructions			
En maçonnerie chaînée			
Fiche N°: <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>			
Date : <input style="width: 20px; height: 15px;" type="text"/>			
Code de l'ingénieur :			
<u>Identification</u>			
Wilaya :			
Commune :			
Adresse :			
<u>Type de construction</u>			
Bâtiment	<input type="checkbox"/>	maison individuelle	<input type="checkbox"/>
Usine	<input type="checkbox"/>	Précaire	<input type="checkbox"/>
			Hangar <input type="checkbox"/>
			Autre (à préciser)
<u>Usage de la construction</u>			
Habitation	<input type="checkbox"/>	Scolaire	<input type="checkbox"/>
Administratif	<input type="checkbox"/>	Hospitalier	<input type="checkbox"/>
Commercial	<input type="checkbox"/>	Industriel	<input type="checkbox"/>
			Sportif <input type="checkbox"/>
			Socio culturel <input type="checkbox"/>
			Bâtiment agricole <input type="checkbox"/>
Autre (à préciser)			
<u>Description sommaire</u>			
Age approximatif (ans) : <input style="width: 60px; height: 15px;" type="text"/>			
Période coloniale <input type="checkbox"/> Après 1983 <input type="checkbox"/> Après 1988 <input type="checkbox"/> Après 1999 <input type="checkbox"/> Après 2003 <input type="checkbox"/>			
Nombres de niveau : <input style="width: 60px; height: 15px;" type="text"/>			
Longueur (m) : <input style="width: 60px; height: 15px;" type="text"/>			
Largeur (m) : <input style="width: 60px; height: 15px;" type="text"/>			

Epaisseur moyenne des murs porteurs (m) :

Sous sol : OUI NON

Vide sanitaire : OUI NON

Autres :

Régularité en plan

Régulière Faiblement irrégulière Irrégulière

Régularité en élévation

Régulière Faiblement irrégulière Irrégulière

Système structurel

Maçonnerie

Murs porteurs en pierre avec mortier de terre

Murs porteurs en pierre avec mortier de ciment

Murs porteurs en brique

Murs porteurs en parpaing

Autres (à préciser).....

Acier

Poteaux

Poutres

Autres (à préciser).....

Contreventement

Murs en maçonnerie chaînée

Murs en maçonnerie non chaînée

Portique métallique ductile

Portique métallique ordinaire

Palées triangulées

Autres (à préciser).....

Type d'assemblage

Boulonnage Rivetage Soudage

Etat général d'assemblage :

Bon Moyen Mauvais

Planchers

Bois Béton armé Voûtains Collaborant Acier

Etat général des planchers:

Bon Moyen Mauvais

Type de sol

Rocheux Ferme Meuble Très meuble

Implantation de l'ouvrage

Sur un terrain instable (tassant) Oui Non

Au bord d'une falaise Oui Non

En haut ou en bas d'une colline Oui Non

Au bord d'une rivière ou d'un oued Oui Non

Sur un terrain accidenté avec changement de pente importante Oui Non

La structure

Possède une construction mitoyenne Oui Non

Si oui, présence du joint Oui Non

Si oui, épaisseur du joint : (mm)

Toiture

Béton armé Métallique Mixte Bois

Voûtains Tarnit Tuile Autres (à préciser).....

Etat général de la toiture :

Bon Moyen Mauvais

Détail

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

Maintenance

La construction est :

Entretenu périodiquement Entretenu occasionnellement jamais Entretenu

Modification

Changement d'usage : Oui Non

Ajouts/Suppression dans le système structurel : Oui Non

Remarques générales :

La fiche technique sera introduite dans un programme numérique développé sous l'environnement Delphi.

4.3. Présentation du logiciel [80]

Delphi est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'application. Il permet de créer des interfaces graphiques tout en disposant d'un puissant langage de programmation.

Avec DELPHI on peut créer des applications performantes sous l'environnement Windows 2000, XP, 7...etc.

4.4. Organigramme de calcul

Le programme développé « Vulnerability Index Program », suit les étapes du traitement qui sont présentées sous forme d'organigramme dans la figure 4.1.

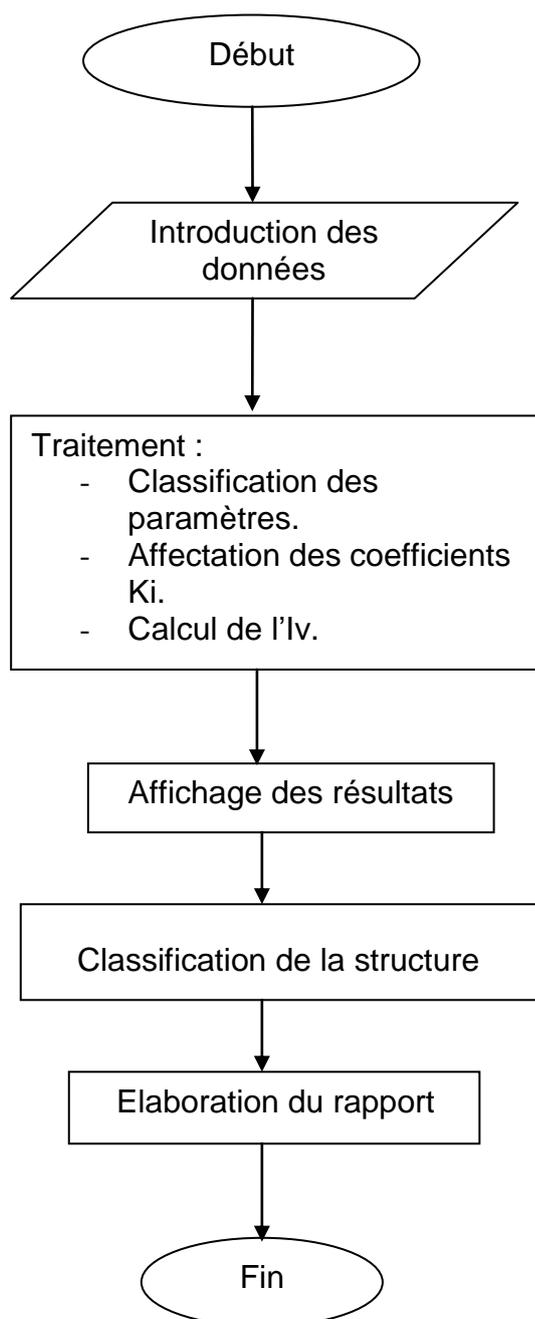


Figure 4.1 : Organigramme de calcul

4.5. Présentation du logiciel VIP

Le logiciel développé « VIP » avec le langage DELPHI [81] se compose de deux parties :

1. La partie interface utilisateurs qui sert à recueillir les données consignées dans la fiche technique.
2. La partie programme.

4.5.1. Partie interface utilisateurs

C'est la partie visuelle, elle nous permet de manipuler les applications afin de pouvoir calculer l'indice de vulnérabilité.

4.5.1.1. Page d'accueil

Cette page nous permet d'accéder aux pages d'applications, comme l'indique la figure 4.2.



Figure 4.2 : Page d'Accueil

4.5.1.2. Page d'accès aux différents programmes

Cette page nous permet de choisir le type de structure à étudier (maçonnerie, béton armé, charpente métallique ou maçonnerie chaînée), comme le montre la figure 4.3.

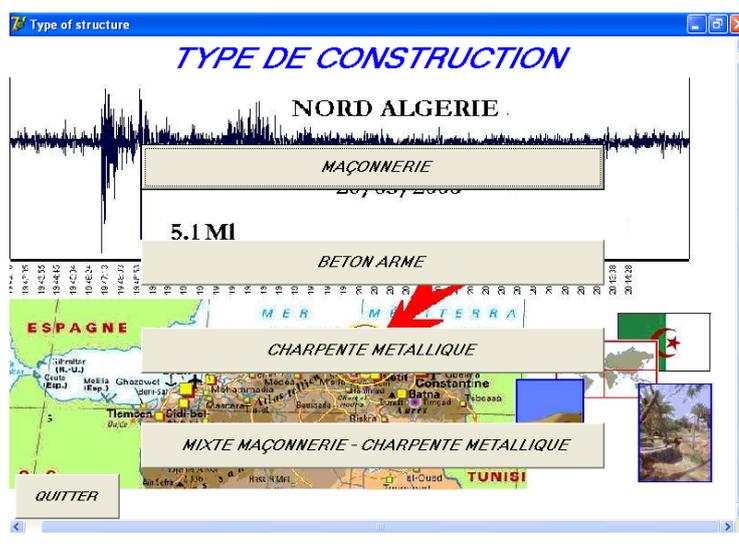


Figure 4.3: Page d'accès aux différentes applications

4.5.1.3. Page des manipulations

Chaque type de structures a sa propre fiche technique. Nous allons présenter dans ce qui suit les étapes d'étude pour les constructions en maçonnerie chaînée [80], [82], et [83].

La page manipulations contient cinq onglets :

1. Onglet fiche technique 1/3 ;
2. Onglet fiche technique 2/3 ;
3. Onglet fiche technique 3/3 ;
4. Onglet paramètre ;
5. Onglet rapport.

L'onglet fiche technique nous permet de remplir la fiche technique comme l'indique la figure 4.4, la figure 4.5 et la figure 4.6.

Vulnerability Index Program (mixed structure)

Fichier Rechercher Imprimer ?

WILAYA: ALGER ADRESSE: 4 rue Md tounani

COMMUNE: ALGER

ZONE SISMIQUE: 3 TYPE DE CONSTRUCTION: batiment USAGE: habitation

AGE APPROXIMATIF (ans): 70 LONGUEUR (m): 21 LARGEUR (m): 14 NOMBRE DE NIVEAUX: 3

NOMBRE DES MURS DANS LE SENS LOGITUDINAL: 4 NOMBRE DES MURS DANS LE SENS TRANSVERSAL: 5

HAUTEUR MOYENNE DES MURS (m): 3,8 EPAISSEUR MOYEN DES MURS (m): 0,60

CALCUL DE LA CAPACITE SISMIQUE

L'ETAT DU CHAINAGE DES MURS EN MACONNERIE: Murs en maçonnerie chaînée

DUCTILITE: Portique auto stable ductile TYPE DE SOL: Rocheux

TYPE D'ASSEMBLAGE: ETAT D'ASSEMBLAGE: Moyen

TYPE DES PLANCHERS: Voutains ETAT DES PLANCHERS: Bon

ETAT DES LIAISONS PLANCHERS/SYSTEME DE CONTREVENTEMENT: Bon

Figure 4.4: Remplissage de la Fiche Technique 1/3

Vulnerability Index Program (mixed structure)

Fichier Rechercher Imprimer ?

FICHE TECHNIQUE 1/3 FICHE TECHNIQUE 2/3 FICHE TECHNIQUE 3/3 PARAMETRES RAPPORT

REGULARITE EN PLAN: faiblement irrégulière REGULARITE EN ELEVATION: faiblement irrégulière

L'USAGE DE LA CONSTRUCTION EST IL CHANGE ? OUI NON

IMPLANTATION DE L'OUVRAGE: sur un terrain accidenté avec un changement de pe

LE SYSTEME STRUCTURAL EST IL MODIFIE ? OUI NON

MAINTENANCE: entretenue périodiquement

LA CONSTRUCTION POSSEDE-ELLE UNE CONSTRUCTION MITOYENNE ? OUI NON

EXISTE IL UN JOINT ? OUI NON

DONNER L'EPAISSEUR DU JOINT (mm):

COMPARER L'EPAISSEUR DU JOINT AVEC CELLE EXIGE PAR LE RPA99.V2003

Figure 4.5: Remplissage de la Fiche Technique 2/3

Figure 4.6: Remplissage de la Fiche Technique 3/3

L'onglet paramètre nous permet de voir les différents coefficients ainsi que les classes de vulnérabilités affectés aux paramètres choisis précédemment et de calculer l'indice de vulnérabilité comme l'indique la figure 4.7.

Figure 4.7: Affichage des coefficients et de l'indice de vulnérabilité

L'onglet rapport affiche une récapitulation des coordonnées de la bâtisse expertisée et le résultat de cette expertise comme le montre la figure 4.8.

The screenshot shows a software window titled "Vulnerability Index Program (mixed structure)". The main content area displays the following information:

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

WILAYA : ALGER

COMMUNE : ALGER

ADRESSE : 4 rue Md tounani

ORGANISME :

Suite à la visite sur site de la construction désignée au dessus.

- Après la constatation d'états des différents éléments structuraux et non structuraux
- Après le regroupement et l'analyse des différentes données spécifiques de la construction.

l'organisme déclare que la construction est classée: VERT

SIGNATURE DE L'INGENIEUR

Figure 4.8: Affichage du rapport

4.5.2. Partie programme

Cette partie a pour rôle de traiter et d'exécuter les différentes opérations pour chacun des paramètres choisis (chapitre 2). On peut partager en deux types de paramètres, les paramètres à quantifier, et les paramètres à observer. Pour les paramètres quantifiables, tel que la force sismique à la base, détail...etc, le programme fera des calculs avant d'affecter un coefficient donné. Pour les paramètres observables, tel que ductilité, modification...etc, le programme affectera directement un coefficient selon le choix en remplissant la fiche technique. L'affichage des coefficients affectés est visible sur l'onglet « PARAMETRE » (figure 4.7).

Après avoir affecté des coefficients à chacun de ces paramètres, le programme nous permet de calculer l'indice de vulnérabilité « Iv ». L'affichage du résultat est visible sur l'onglet « PARAMETRE » (figure 4.7).

Enfin, la dernière opération sera de classer VERT, ORANGE, ou ROUGE la construction analysée, selon son indice de vulnérabilité « Iv ». Le résultat est visible sur l'onglet « PARAMETRE » et « RAPPORT » voir figure 4.7 et 4.8.

4.6. Application de la méthode aux structures en maçonnerie chaînée

La méthode de l'indice de vulnérabilité développée à l'aide de la modélisation numérique, ne nécessite pas d'être validée du fait que les coefficients affectés à chaque paramètre sont obtenus par introduction des accélérogrammes des séismes réels. Cependant une comparaison sera opérée avec des rapports d'expertises établis par des organismes qualifiés.

4.6.1. Exemple d'application 01

Il s'agit d'une maison individuelle datant de l'époque coloniale dont la base est de forme rectangulaire comprenant un RDC et 2 autres niveaux (02 Impasse Mohamed Tounani (ex Isidore Tachet)), Alger centre (Voir figure 4.9). Cette construction est implantée sur un terrain en pente dans le sens transversal et longitudinal. Elle possède une construction mitoyenne à gauche.



Figure 4.9 : 02 Impasse Mohamed Tounani (ex Isidore Tachet)

4.6.1.1. Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité de l'exemple 1

Après avoir introduit la fiche technique précédemment remplie dans le programme « VIP », nous avons obtenus les résultats donnés dans le tableau 4.1.

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

Paramètre	Classe	Coefficients Kn
Connexions des murs	A	0.04
Capacité sismique	A	0.04
Type de sol	A	0.04
Ductilité	A	0.04
Qualité des assemblages	B	0.05
Diaphragme horizontale	A	0.04
Modification	A	0.04
Régularité en plan	B	0.05
Régularité en élévation	B	0.05
Maintenance	A	0.03
Implantation de l'ouvrage	A	0.00
Entrechoquement	A	0.00
Toiture	A	0.04
Détails	A	0.04
Indice de vulnérabilité (Iv)	-	0.50

Le calcul de l'indice de vulnérabilité pour cette construction a donné une valeur de 0.50, d'où la construction appartient la à classe VERT ([0.00 ; 0.60]).

Le rapport d'expertise effectué par un organisme qualifié, a pour conclusion : « Les observations qu'on a pu tirées est que la bâtisse est bien entretenue et présente un bon état. La bâtisse est jugée récupérable, elle est classée Vert NIV 1 ». [84]

4.6.1.2. Calcul de dommage moyen de l'exemple 1

Le calcul de dommage moyen pour les constructions en maçonnerie chaînée peut se faire à l'aide de la formule 14 (Chapitre 3), pour les différentes classes de vulnérabilité et pour les différents niveaux d'intensité sismique. Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Résultat de dommages moyens de l'exemple 1

Indice de vulnérabilité (lv)	Intensité sismique (I)	Dommage moyen (μd)
0.50	5	0.07
	6	0.17
	7	0.38
	8	0.82
	9	1.59
	10	2.64
	11	3.63
	12	4.32

Cet exemple de construction n'atteindra le niveau de dommage 1 qu'à partir de l'intensité 8, ce qui est conforme avec son indice de vulnérabilité qui la classe en Vert, et qui est conforme aussi avec la matrice de probabilité de dommage qui stipule que la plus part des constructions ayant un indice de vulnérabilité à l'intérieur de la classe Vert, auront un niveau de dommage 1 à une intensité sismique de niveau 8. La courbe de vulnérabilité pour cet exemple est illustrée sur la figure 4.10.

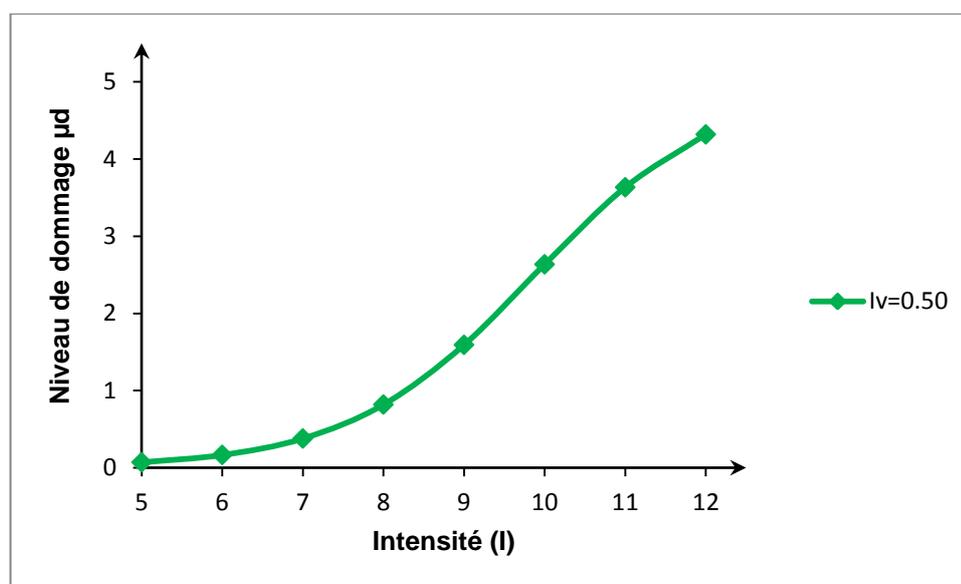


Figure 4.10 : Courbe de vulnérabilité pour un lv = 0.50

4.6.2. Exemple d'application 02

Il s'agit d'un bâtiment datant de l'époque coloniale dont la base est de forme rectangulaire comprenant un RDC et 1 autre niveau (04 Rue Abou Hamou Moussa (ex Daguerre), Alger centre (Voir figure 4.11).

Cette construction est implantée sur un terrain en pente dans le sens transversal. Elle ne possède pas de construction mitoyenne.



Figure 4.11 : 04 Rue Abou Hamou Moussa (ex Daguerre)

4.6.2.1. Résultat de calcul de l'indice de vulnérabilité de l'exemple 2

Les résultats obtenus à l'aide du programme « VIP » pour cet exemple sont donnés dans le tableau 4.3.

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

Paramètre	Classe	Coefficients Kn
Connexions des murs	B	0.05
Capacité sismique	A	0.04
Type de sol	A	0.04
Ductilité	C	0.06
Qualité des assemblages	B	0.05
Diaphragme horizontale	C	0.06
Modification	B	0.05
Régularité en plan	B	0.05
Régularité en élévation	B	0.05
Maintenance	A	0.03
Implantation de l'ouvrage	C	0.10
Entrechoquement	A	0.00
Toiture	B	0.05
Détails	C	0.06
Indice de vulnérabilité (Iv)	-	0.69

Le calcul de l'indice de vulnérabilité pour cette construction a donné une valeur de 0.69. La construction appartient alors à la classe ORANGE ([0.60 ; 0.86]).

Le rapport d'expertise effectué par un organisme qualifié, a pour conclusion : « La bâtisse est classée en Orange NIV. 4 ». [84]

Le résultat que nous avons obtenu concorde avec celui donné par le rapport d'expertise.

4.6.2.2. Calcul de dommage moyen de l'exemple 2

Le calcul de dommage moyen pour cette construction est donné dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Résultat de dommages moyens de l'exemple 2

Indice de vulnérabilité (Iv)	Intensité sismique (I)	Damage moyen (μd)
0.69	5	0.20
	6	0.45
	7	0.96
	8	1.81
	9	2.88
	10	3.82
	11	4.43
	12	4.74

Cet exemple de construction dépassera le niveau de dommage 1 qu'à partir de l'intensité 7, ce qui est conforme avec son indice de vulnérabilité qui la classe en Orange, et qui est conforme aussi avec la matrice de probabilité de dommage qui stipule que la plus part des constructions ayant un indice de vulnérabilité à l'intérieur de la classe Orange, auront un niveau de dommage 1 à une intensité sismique de niveau 7 aussi (Voir figure 4.12).

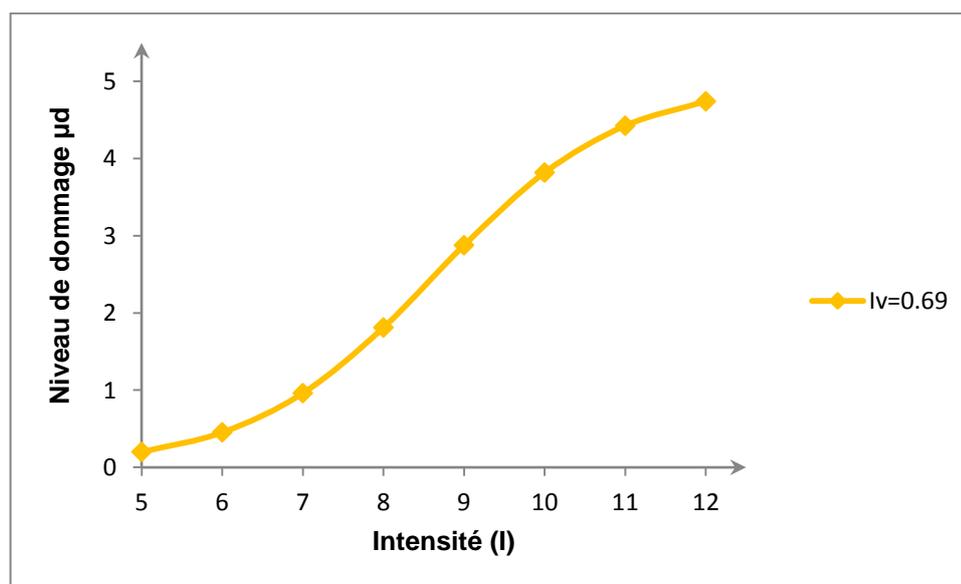


Figure 4.12 : Courbe de vulnérabilité pour un Iv = 0.69

4.6.3. Applications sur d'autres exemples

L'application de la méthode a été généralisée sur d'autres exemples, où nous avons comparés les résultats trouvés avec des rapports d'expertises élaborés par un organisme qualifié.

4.6.3.1. Résultats de calcul de l'indice de vulnérabilité

Les résultats de calcul de l'lv donnés par le VIP, pour les différents exemples (3 à 21), et ceux donnés par les rapports d'expertises effectués par le CGS sont illustrés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Résultat de l'indice de vulnérabilité des différents exemples

Adresse de la construction	Nb. de Niveaux	lv	Classe	Rapport d'expertise
2, Rue Daguerre	2	0.52	Vert	Vert niveau II
4, Rue Mohamed Tounani	3	0.68	Orange	Vert niveau II
6, bis 2 ^{ème} Imp. Rue Daguerre	2	0.56	Vert	Vert niveau II
6, Rue Daguerre	7	0.67	Orange	Vert niveau II
6, Impasse Mohamed Tounani	4	0.53	Vert	Vert niveau II
6, bis impasse Md. Tounani	2	0.69	Orange	Orange niveau IV
7, Avenue Bouhart	6	0.81	Orange	Orange niveau IV
12 Boulevard Mohamed V	5	0.82	Orange	Orange niveau III
12 Rue El Biar	5	0.81	Orange	Orange niveau IV
14 Boulevard Mohamed V	4	0.69	Orange	Vert niveau II
16 Rue El Biar	3	0.71	Orange	Vert niveau II
18 Rue El Biar	4	0.62	Orange	Orange niveau IV
20 Rue El Biar	4	0.70	Orange	Vert niveau II
26 Boulevard Mohamed V	8	0.76	Orange	Orange niveau III
26 bis Boulevard Mohamed V	7	0.74	Orange	Orange niveau III
31 Boulevard Mohamed V	7	0.61	Orange	Orange niveau III
33 Boulevard Mohamed V	7	0.75	Orange	Orange niveau III
35 Boulevard Mohamed V	7	0.62	Orange	Orange niveau III
37 Boulevard Mohamed V	7	0.61	Orange	Orange niveau III

Nous remarquons dans le tableau 4.5 ci-dessus, que les résultats trouvés pour la classification des différentes constructions sont semblables. Néanmoins un écart de 23% à été constaté, entre les rapports d'expertises et ceux trouvés par la méthode que nous avons développée.

4.6.3.2. Courbes de vulnérabilité sismique des différents exemples

Les courbes de vulnérabilité pour les différents exemples d'application sont représentées selon les indices de vulnérabilité et les niveaux de vulnérabilité. (Voir figure 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16).

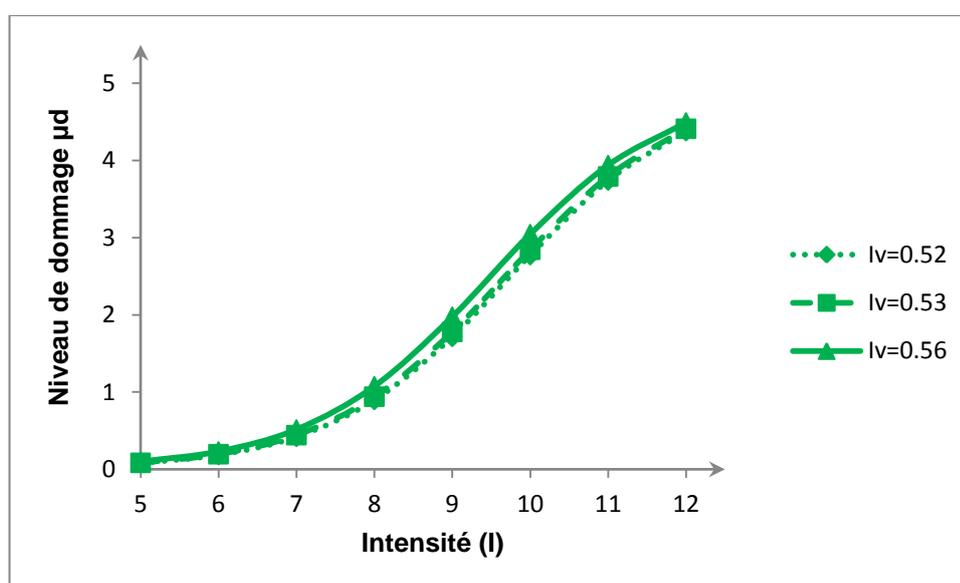


Figure 4.13 : Courbes de vulnérabilité pour les constructions classées Vert

Les constructions en maçonnerie chaînée classée en vert atteindront un niveau de dommage 1 qu'à partir de l'intensité 8. Les DPM développées pour ce type de structure stipulent que beaucoup de constructions classées en Vert auront un niveau de dommage 1 pour cette même intensité.

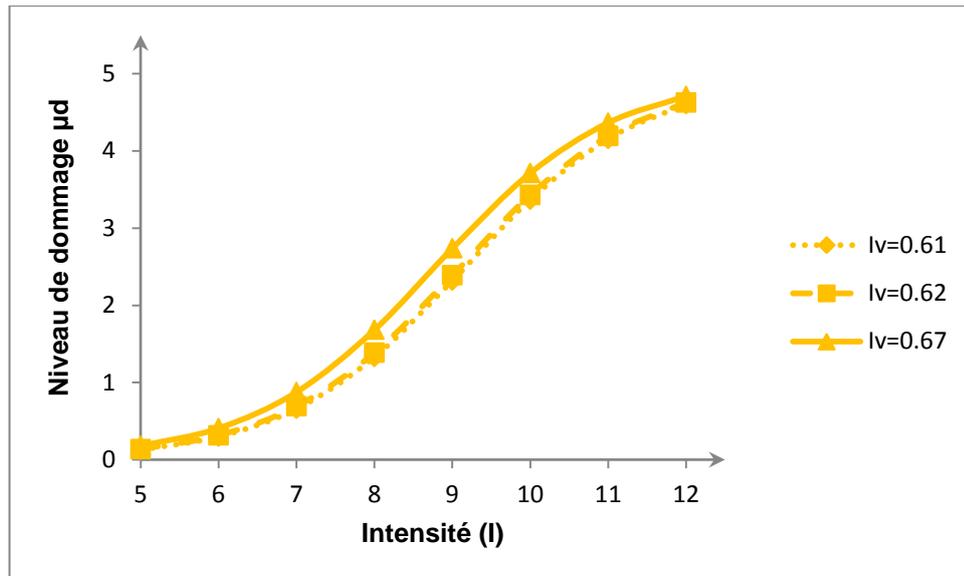


Figure 4.14 : Courbes de vulnérabilité pour un $0.61 \leq l_v \leq 0.67$

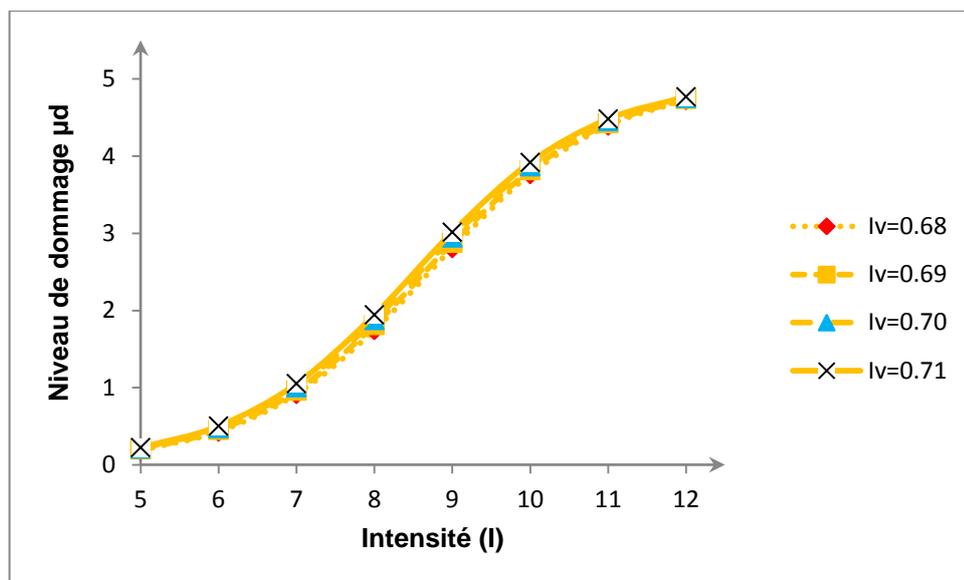


Figure 4.15 : Courbes de vulnérabilité pour un $0.68 \leq l_v \leq 0.71$

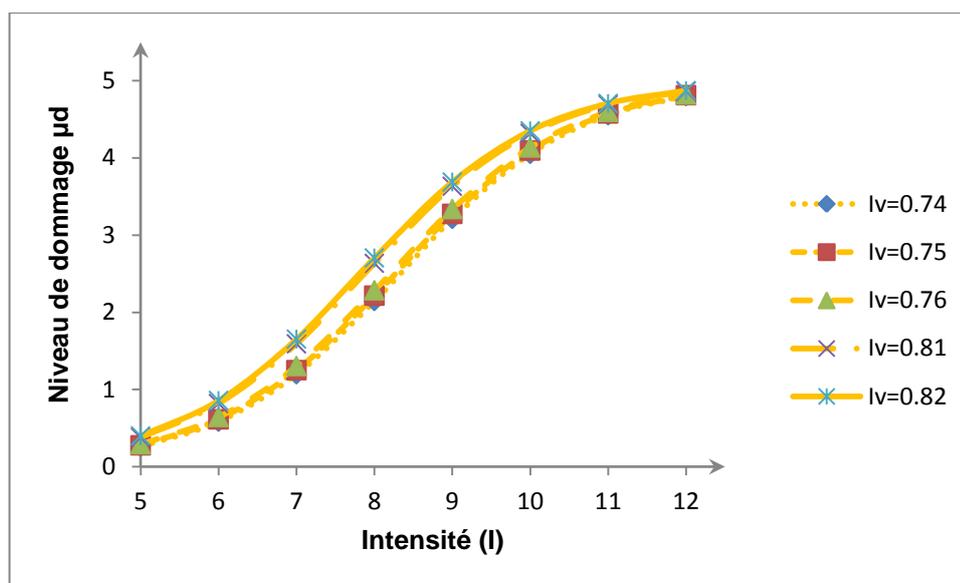


Figure 4.16 : Courbes de vulnérabilité pour un $0.74 \leq I_v \leq 0.82$

Selon les figures 4.14, 4.15 et 4.16, nous remarquons que les constructions classées en Orange atteindront un niveau de dommage 1 pour une intensité 7, et un niveau de dommage allant de 2 à 3 pour une intensité 8. Les DPM stipulent que beaucoup de structures en maçonnerie chaînée auront un niveau de dommage 1 pour une intensité 7, et beaucoup de ce type de structures auront un niveau de dommage 2 pour une intensité 8. Par ailleurs peu de constructions atteindront un niveau de dommage 3 pour cette même intensité (8).

4.7. Conclusion

Dans ce dernier chapitre deux programmes développés pour le contexte Algérien ont été appliqués, afin d'estimer la vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie chaînée. Le premier programme qui permet le calcul de l'indice de vulnérabilité, a été appliqué à ce type de structures en utilisant le langage de programmation Delphi.

Le second programme développé sous Excel, permet d'estimer un niveau de dommage moyen pour ce type de construction, en fonction de l'indice de vulnérabilité et de l'intensité sismique. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes. Ces courbes de vulnérabilité sismique peuvent aussi contribuer à créer une base de données, pour un parc immobilier donné, à l'échelle d'une commune, ville ou une région, afin d'établir des scénarios sismiques.

Les programmes développés ont été appliqués sur un certain nombre d'exemples de structures en maçonnerie chaînée. Les résultats trouvés concordent avec ceux obtenus par un organisme qualifié.

CONCLUSION

En Algérie, les structures existantes en maçonnerie chaînée ne répondent pas aux exigences des règlements parasismiques actualisés. Aussi ce type de structure est particulièrement vulnérable au séisme.

Afin de réduire la vulnérabilité sismique de ce type de structure, il est primordial de disposer d'un outil de diagnostic fiable. Le présent travail entre dans ce cadre et a conduit au développement de deux programmes. Le premier programme appelé VIP (Vulnerability Index Program) développé sous Delphi, calcule l'indice de vulnérabilité de structures en maçonnerie chaînée et les classe en trois classes. Le second programme développé sous Excel, détermine le taux de dommage que pourrait subir une structure pour une intensité donnée.

Le VIP est le résultat de la mise en œuvre de la méthode de l'indice de vulnérabilité. Cette méthode est basée sur le choix des paramètres pouvant avoir une influence sur la vulnérabilité sismique de ces structures. Par la suite des coefficients de pondération pour chaque paramètre ont été affectés. Le calcul des coefficients de pondération a été fait selon une analyse dynamique non linéaire en introduisant des accélérogrammes des séismes réels. Les coefficients obtenus sont issus des déplacements maximums engendrés par ces accélérogrammes, pour trois types de bâtiment (Faible hauteur, moyenne hauteur et hauteur élevée).

Une comparaison des coefficients de pondération entre cette méthode et la méthode de l'lv empirique a été effectuée.

Une fiche technique permettant de recueillir l'ensemble de l'information nécessaire pour établir la classification des structures en maçonnerie chaînée a été élaborée. Nous avons appliqué le VIP sur plusieurs exemples de constructions expertisées auparavant par un organisme qualifié. Les résultats trouvés concordent avec les rapports d'expertises.

Le second programme quant à lui, est le résultat de développement des matrices de probabilité de dommage (DPM). Les matrices ont été développées à

l'aide de la loi « Béta », pour chaque classe de vulnérabilité (Vert, Orange et Rouge). Le second programme permet de calculer le taux de dommage de ce type de structure, en fonction de l'indice de vulnérabilité donné par le VIP et l'intensité sismique. Ces taux de dommages sont donnés sous formes de courbes de vulnérabilité. Une comparaison de l'approche, que nous avons développé a été effectuée avec la méthode RISK – UE.

Les résultats trouvés dans la présente thèse, peuvent être utilisés pour simuler des scénarios sismique des constructions, afin d'identifier les zone les plus vulnérable aux effets des séismes. Ces scénarios peuvent être utiles pour la gestion des catastrophes par les autorités concernées (APC, Wilayates, Directions d'urbanisme, Protection civile...etc.), afin d'élaborer un plan d'action pour réaménager et restructurer les anciennes villes, dans le but de réduire le risque sismique en Algérie.

REFERENCES

- [1] : Revet, S., « Vivre dans un monde plus sûr Catastrophes naturelles et sécurité globale », Cultures et Conflits, V.75, (Janvier 2011), 34 – 51.
- [2] : Colin, A., « La résilience : un concept pour la gestion des risques », Annales de Géographie, V. 2, n° 654, (2007), 115-125.
- [3] : Burdet, O., « notes de cours, maçonnerie », www.lmc.epfl.ch, Lausanne, Suisse, 28 Février 2008.
- [4] : Groupe AFPS, « Définition et étude des typologies maçonnerie: Notions sur le comportement et la modélisation des bâtiments en maçonnerie soumis à un chargement sismique », France, 2005.
- [5] : Wheeler, P., « L'architecture gréco-romaine de l'époque classique à l'empire », université de Savoie, France, 19 juillet 1999.
- [6] : Foura, M., « Histoire critique de l'architecture », Offices des publications universitaires, Algérie, 2005.
- [7]: Nollet, M.J., « Evolution bâtiment », Université Du Québec, 2007.
- [8]: Hirt, M.A., Crisinel, M., « Conception des charpentes métalliques », Lausanne, Janvier 2002.
- [9]: Sayin, E., Yon, B., Calayir, Y., Karaton, M., « Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazig) earthquake in Turkey », Engineering Failure Analysis, in press (2012).
- [10]: Churilov, S., Dumova-Jovanoska, E., « In-plane shear behavior of unreinforced and jacketed brick masonry walls », Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V. 50, (Avril 2013), 85 –105.
- [11]: Groupe AFPS, « Vulnérabilité Sismique du Bâtis Existant : approche d'ensemble », Document de travail version 2.2, France, Mai, 2005.
- [12] : Bensaïbi., M., « Notes de cours, vulnérabilité des structures », Université de Blida, Algérie, 2007.

- [13]: Boukri, M., « Détermination de l'indice de vulnérabilité des constructions en maçonnerie », Thèse de magister, Université de Blida, Algérie, 2003.
- [14] : Belmouden, Y., Lestuzzi, P., « Évaluation de La vulnérabilité sismique des bâtiments existants en suisse », Rapport de recherche, Lausanne, 2006.
- [15] : Mehenni Belarbi, H., Bensaïbi, M., « Vulnérabilité sismique et renforcement du futur pavillon des urgences du CHU Mustapha », Conférence Internationale de Géoengineering IGC/USTHB, Alger, Algérie, 11-13 Juin 2000.
- [16]: GNDT, « The Catania Project: Earthquake Damage Scenarios for a High Risk Area in the Mediterranean », CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, Italy, 2000.
- [17]: Lang, K., « Seismic vulnerability of existing building », Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss, 2002.
- [18]: Giovinazzi, S., « The vulnerability assessment and the Damage Scenario in seismic risk analysis », Thèse de Doctorat, Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig et University of Florence, 2005.
- [19]: Benedetti, D. et al, « Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban Nuclei », Department of structural Engineering Polytechnic, Milan, Italy, 1988.
- [20]: Benedetti, D., Petrini, V., « On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure », The Industry of Constructions, V. 18, (1984), 66 – 78.
- [21]: Betti, M., Vignoli, A., « Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance », Engineering Structures, V. 30, (Mai 2008), 352 – 367.
- [22]: Lignola, G.P., Nigro, E., Cosenza, E., « Seismic vulnerability of natural stone pinnacles on the Amalfi Coast in Italy ». Journal of Cultural Heritage, V. 11, (2010), 68 – 80.
- [23]: Calì, I., Marletta, M., Pantò, B., « A new discrete element model for the evaluation of the seismic behavior of unreinforced masonry buildings », Engineering Structures, V. 40, (Mars 2012), 327 – 338.
- [24]: Mallardo, V., Malvezzi, R., Milanib, E., Milani, G., «Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study in Ferrara ». Engineering Structures, V. 30, (Décembre 2008), 2223-2241.
- [25] : Formisano, A., Florio, G., Landolfo, R., Mazzolani, F.M., « Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of

masonry building aggregates », *Advances in engineering software*, V. 80, (2015), 116-138.

[26]: Betti, M., Vignoli, A., « Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'Impruneta (Italy) », *Construction and Building Materials*, V. 25, (2011), 4308-4324.

[27]: Park, J., Towashiraporn, P., Craig, J.I., Goodno, B.J., « Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures », *Engineering Structures*, V. 31, (Septembre 2009), 125 – 137.

[28]: Aref, A.J., Dolatshahi, K.M., « Three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures », *Computer and Structures*, V. 120, (Juin 2013), 9 – 23.

[29]: Pelà, L., Cervera, M., Roca, P., « An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures ». *Construction and Building Materials*, V. 41, (Aout 2013), 957 – 967.

[30]: Almeida, C., Guedes, J.P., Arêde, A., Costa, A., « Geometric indices to quantify textures irregularity of stone masonry walls », *Construction and building materials*, V. 111, (2016), 199-208.

[31]: Truong-Hong, L., Laefer, D.F., « Impact of modeling architectural detailing for predicting unreinforced masonry response to subsidence », *Automation in Construction*, V. 30, (Décembre 2013), 191 – 204.

[32]: Petrovcic, S., Kilar, V., « Seismic failure mode interaction for the equivalent frame modeling of unreinforced masonry structures », *Engineering Structures*, (Mai 2013), V. 54, 9 – 22.

[33]: Zimmermann, T., Strauss, A., Bergmeister, K., « Numerical, investigation of historic masonry walls under normal and shear load », *Construction and Building Materials*, (Février 2010), V. 24, 1385 – 1391.

[34]: Ruiz-garcia, J., Negrete, M., « Simplified drift based assessment procedure for regular confined masonry building in seismic regions », *Journal of Earthquake Engineering*, V. 31, (Septembre 2009), 520 – 539.

[35]: Ghalehnovi, M., Rahdar, H.A., « Seismic vulnerability and performance level of confined brick walls », *Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 messina and Reggio Calabria Earthquake*, USA, 2008.

- [36]: Dhanasekar, M., « Shear in Reinforced and Unreinforced Masonry: Response, Design and Construction », *Procedia Engineering*, V. 14, (2011), 2069 – 2076.
- [37]: Bensaibi, M., Djaalali, F., Belheouane, F. I., Amellal, O., Yousfi. N., « Seismic vulnerability index method: Algerian case studies », 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japon, Mars 7-8, 2011.
- [38] Djaalali, F., Bensaibi, M., « Détermination des courbes de vulnérabilité pour le bâti en maçonnerie de la capitale Alger (Algérie) », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure de travaux public, Algérie, 2013.
- [39]: Djaalali, F, Bensaibi, M., Bourahla, N., Davenne, L., « Vulnerability curves of masonry constructions Algiers case study », *Structural Engineering and Mechanics*, V. 42, n° 5, (2012), 609 – 630.
- [40] : Belhouane, F.I., Bensaibi, M., « Détermination de l'indice de vulnérabilité des constructions en béton armé », Thèse de magister, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2006.
- [41]: Belheouane, F. I., Bensaibi, M., « Détermination des courbes de vulnérabilité pour les structures en béton armé en Algérie », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure de travaux public, Algérie, 2013.
- [42]: Belheouane, F.I., Bensaibi, M., « Assessment of vulnerability curves using vulnerability index method for reinforced concrete structures », *World Academy of Science Engineering and Technology, International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering*, n° 6, (2013), 153 – 156.
- [43]: Belheouane, F.I., Bensaibi, M., « Vulnerability curves of reinforced concrete buildings », International Conference on Engineering and built Environment, Bangi, Malaysia, Novembre 19-20, 2013.
- [44]: Amellal, O., Bensaibi, M., Grine, K., « Seismic vulnerability index method for steel structures », The 15th world conference on earthquake engineering (WCEE), Lisboa, Portugal, 24-28 Septembre, 2012.
- [45] : Amellal, O., Bensaibi, M., « Détermination de l'indice de vulnérabilité des constructions en charpente métallique », Thèse de magister, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2008.
- [46] : Yousfi, N., Bensaibi, M., « Détermination de l'indice de vulnérabilité des structures », Thèse de magister, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2010.

- [47]: Yousfi, N., Bensaïbi, M., « Estimation de l'indice de vulnérabilité de structures mixte maçonnerie/charpente métallique », 8^{ème} colloque national AFPS, Paris, 6 – 8 Septembre 2011.
- [48]: Yousfi, N., Bensaïbi, M., « Evaluation de la vulnérabilité sismique des constructions en maçonnerie et charpente métallique », Colloque international réduction du risque sismique, Chlef, 10 – 11 Octobre 2012.
- [49]: Yousfi, N., Bensaïbi, M., « Analyse de la vulnérabilité sismique des constructions mixte en maçonnerie et charpente métallique », Séminaire international euro-méditerranéen aménagement du territoire, gestion des risques et sécurité civile Batna, Algérie, 25-27 septembre 2012.
- [50]: Yousfi, N., Bensaïbi, M., « Réduction de la vulnérabilité sismique des constructions : cas d'étude des structures mixte maçonnerie – charpente métallique », CMSS 2013 International Congress on Materials & Structural Stability, Rabat, Morocco, 27 – 30 novembre 2013.
- [51]: FEMA, HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology - Technical and User Manuals, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C, USA, 1999.
- [52]: FEMA, HAZUS-MH Technical Manual, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC, USA, 2003.
- [53]: OYO Corporation, RADIUS methodology, IDNDR, 1999.
- [54]: Bensaïbi, M. et al., « Seismic risk assessment of current buildings of Algiers city », 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- [55]: OYO-CGS, « Etude de vulnérabilité sismique de la ville d'Alger », Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA) - Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 2006.
- [56]: Bensaïbi, M., Tadjer, K., et Mezazigh, B., « Scénario catastrophe de la ville de Blida », Actes du VII^{ème} Colloque National AFPS, Paris, France, 04-06 Juillet, 2007.
- [57]: Bensaïbi, M., et Tadjer, K., « A simplified approach to earthquake risk scenarios with application to Blida », International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, Shanghai, China, 23-26 Septembre 2010.

- [58]: Tadjer, K., Bensaïbi, M, Chaid, A., « Vulnerability assessment of Blida city », 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 24 – 28 Septembre 2012.
- [59]: Boukri, M., Farsi, M.N., Mebarki, A., « Vulnérabilité sismique du bâti algérien : développement d'un outil d'aide à la décision », Thèse de doctorat, Université de Blida, Algérie, 2014.
- [60]: Milutinovic, Z.V., Trendafiloski, G.S., « An advanced approach to earthquake risks scenarios with applications to different european towns, WP4: Vulnerability of current buildings », RISK – UE, Europe, Septembre 2003.
- [61]: ATC13, « Earthquake Damage Evaluation Data for California », Report ATC-13, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, 1985.
- [62]: Ruiz-García, J., Negrete, M., « Drift-based fragility assessment of confined masonry walls in seismic zones », Engineering Structures, V. 31, (Septembre 2009), 170 – 181.
- [63]: Grünthal, G., « Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie », European Macroseismic Scale 1998, European Center for Geodynamics and Seismology, V.15, Luxembourg, 1998.
- [64]: Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H., « Development Of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over The Past 30 Years », ISET Journal of Earthquake Technology, V.43, n°3, (2006), 75 – 104.
- [65]: Andreas, J.K., Panagopoulos, G., Penelis, G.G., « Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece », Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.28, (2007), 836 – 850.
- [66]: Plumier, A., « Cours sur les réponses élastiques des structures aux séismes », Belgique, 2007.
- [67]: Plumier, A., « Cours sur les réponses inélastique des structures aux séismes », Belgique, 2007.
- [68]: Plumier, A., Camelbeeck,T., Barszez, A.M., « Le risque sismique et sa prévention en région wallonne », Belgique, 2008.
- [69]: Plumier, A., « Cours sur la conception parasismique des bâtiments », Belgique, 2007.

- [70]: SAP 2000, Advanced 14.0.0, « Structural analysis program », computers and structures, Inc. Berkeley California, 2009.
- [71] : PY, B., « Statistique descriptive », 4e Edition, Economica, France, 1996.
- [72] : Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, « Règles parasismique algériennes RPA 99 / version 2003 », DTR-B.C.2.48, Alger, 2004.
- [73]: NEHRP Consultants Joint Venture, « Soil-Structure Interaction for Building Structures », National institute of standards technology, USA, 2012.
- [74] : Association française de normalisation (AFNOR). Eurocode 3 «Calcul des structures en acier», Document d'Application, AFNOR, Paris, 1999.
- [75] : Saint Marin, J.M., Calgaro, J.A., « Les eurocodes conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil », Groupe moniteur (éditions du moniteur), Paris, 2005.
- [76] : Comité Européen de Normalisation, « Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes », Bruxelles, 2003.
- [77]: Building and civil engineering sector policy and strategy committee, « Eurcode 6: Design of masonry structures », BSI group, United Kingdom, 2001.
- [78]: Karantoni, F., Lyrantzaki, F., Tsionis, G., Fardis, M.N., « Seismic Fragility Functions of Stone Masonry Buildings ». The 15th world conference on earthquake engineering (WCEE), Lisboa, Portugal, 24-28 Septembre 2012.
- [79]: Cázares, U., Niño, M., Reinoso, E., « Vulnerability functions for buildings due to liquefaction», The 15th world conference on earthquake engineering (WCEE), Lisboa, Portugal, 24-28 Septembre 2012.
- [80] : Graine, S., « Delphi 7 ». Concepts De Base, Bases De Données, Ed l'Abeille, 2006.
- [81]: Bardon, M., Belaid, M.C., « DEPLHI 5, cours, exercices corrigés et études de cas », Ed Berti, 2001.
- [82] : Belaid, M.C., « DELPHI, programmer les bases de données », Ed Pages bleus, mars 2005.
- [83]: Dick, L., « DELPHI 3 », Ed Borland, 2000.
- [84]: Centre national de recherche appliqué en génie parasismique (CGS), Rapports d'Expertises de la Ville d'Alger, Alger, 2005.
- [85] : Bolhassani, M., Hamid, A.A., Moon, F.L., « Enhancement of lateral in-plane capacity of partially grouted concrete masonry shear walls », Engineering structures, V. 108, (2016), 59-76.

- [86] : Minaie, E., Moon, F.L., Hamid, A.A., « Nonlinear finite element modeling of reinforced masonry shear walls for bidirectional loading response », *Finite elements in analysis and design*, V. 84, (2014), 44-53.
- [87] : Kumar, N., Rajagopal, A., Pandey, M., « Plasticity based approach for failure modeling of unreinforced masonry », *Engineering structures*, V. 80, (2014), 40-52.
- [88] : Kenneth, A., Franch, G., Gian, M., Morbelli, G., Maximiliano, A., Inostroza, A., Gori, R.E., « A seismic vulnerability index for confined masonry shear wall buildings and a relationship with the damage », *Engineering structures*, V. 30, (2008), 2605-2612.
- [89] : Lourenco, P.B., Roque, J.A., « Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings », *Constructions and building materials*, V. 20, (2006), 200-208.
- [90] : Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., Leite, J.C., Ingham, J.M., Modena, C., Da Porto, F., « Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: International database and validation », *Engineering failure analysis*, V. 34, (2013), 585-605.

ANNEXE 1

Méthode utilisée pour calculer la force sismique à la base [13]

La capacité sismique de la structure, R, peut être exprimée par la relation :

$$R = C \cdot W$$

Où **C** est le facteur de résistance et W le poids de la construction.

Le facteur C est donné par la relation suivante :

$$C = \frac{a_0 t_k}{q \cdot N} \left[1 + \frac{q \cdot N}{1.5 a_0 t_k (1 + \gamma)} \right]$$

Où

t_k est la résistance au cisaillement,

N est le nombre de niveau de la structure

q est la masse par unité de surface $q = \frac{W}{At}$

At est la section transversale totale à la base du bâtiment.

A = Min (Ax, Ay), B = Max (Ax, Ay)

$$a_0 = \frac{A}{A_t} \qquad \gamma = \frac{B}{A}$$

Ax et Ay représente respectivement la section transversale dans le sens transversal et dans le sens longitudinal.

A est la section minimale entre Ax et Ay, B représente la section maximale entre Ax et Ay.

On définit Alpha : $\frac{C}{C^-}$ avec $C^- = \frac{ADQ}{R}$

Les paramètres A, D, Q et R donnés par le règlement parasismique Algérien (RPA 99 version 2003)

A : Coefficient d'accélération de zone.

D : Facteur d'amplification dynamique.

Q : Facteur de qualité.

R : Coefficient de comportement global de la structure.

Ainsi, la construction est classée en A, B ou C selon le paramètre Alpha.

La construction appartient à la:

- Classe A si $\alpha > 1$
- Classe B si $0.4 < \alpha \leq 1$
- Classe D si $\alpha \leq 0.4$

ANNEXE 2

Les critères de régularité imposée par le règlement algérien

1 Régularité en plan [72]

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.

2 Régularité en élévation [72]

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

ANNEXE 3

Séisme de Boumerdes : 2003

Tableau 1 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.43	2.81	2.83
2	Capacité sismique	0.43	3.63	3.65
3	Type de sol	0.19	0.19	0.19
4	Ductilité	0.43	2.79	2.80
5	Qualité des assemblages	0.43	2.83	2.84
6	Diaphragme horizontale	0.43	2.87	3.00
7	Modification	0.43	2.77	2.94
8	Régularité en plan	0.43	2.79	2.80
9	Régularité en élévation	0.43	2.81	2.82
10	Maintenance	0.43	7.64	18.74
11	Implantation de l'ouvrage	0.43	31.46	116.70
13	Toiture	0.43	2.98	3.00
14	Détails	2.80	2.81	2.82

Tableau 2 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de moyenne hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	19.35	19.46	19.77
2	Capacité sismique	19.35	41.59	42.00
3	Type de sol	1.00	1.34	1.34
4	Ductilité	19.35	19.50	19.70
5	Qualité des assemblages	19.35	19.46	19.51
6	Diaphragme horizontale	19.35	20.33	23.21
7	Modification	19.35	20.10	20.62
8	Régularité en plan	19.35	19.60	20.20
9	Régularité en élévation	19.35	19.54	19.80
10	Maintenance	19.35	48.35	146.33
11	Implantation de l'ouvrage	19.35	63.06	816.58
13	Toiture	19.35	20.01	20.02
14	Détails	21.04	21.06	21.08

Tableau 3 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction d'une hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	120.62	125.00	127.12
2	Capacité sismique	120.62	136.00	138.06
3	Type de sol	34.00	36.35	36.35
4	Ductilité	120.62	122.00	124.03
5	Qualité des assemblages	120.62	148.10	149.01
6	Diaphragme horizontale	120.62	121.00	123.00
7	Modification	120.62	121.01	205.53
8	Régularité en plan	120.62	120.70	121.03
9	Régularité en élévation	120.62	120.70	121.01
10	Maintenance	120.62	163.35	232.25
11	Implantation de l'ouvrage	120.62	322.55	814.87
13	Toiture	120.62	120.95	121.04
14	Détails	120.70	120.85	120.99

Séisme de Beniourthilène : 2000

Tableau 4 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	1.36	1.37	1.38
2	Capacité sismique	1.36	2.62	2.63
3	Type de sol	1.36	1.36	1.36
4	Ductilité	1.36	1.37	1.38
5	Qualité des assemblages	1.36	1.37	1.38
6	Diaphragme horizontal	1.36	1.39	1.46
7	Modification	1.36	1.37	1.38
8	Régularité en plan	1.36	1.37	1.38
9	Régularité en élévation	1.36	1.37	1.38
10	Maintenance	1.36	2.78	6.15
11	Implantation de l'ouvrage	1.36	9.53	19.96
13	Toiture	1.36	1.44	1.45
14	Détails	1.36	1.37	1.38

Tableau 5 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	16.80	17.00	17.50
2	Capacité sismique	16.80	27.04	27.06
3	Type de sol	0.04	0.04	0.04
4	Ductilité	16.80	17.01	17.29
5	Qualité des assemblages	16.80	17.00	17.05
6	Diaphragme horizontal	16.80	17.89	21.60
7	Modification	16.80	18.00	18.02
8	Régularité en plan	16.80	17.27	17.95
9	Régularité en élévation	16.80	17.04	17.40
10	Maintenance	16.80	41.17	42.00
11	Implantation de l'ouvrage	16.80	18.06	38.24
13	Toiture	16.80	17.40	17.42
14	Détails	19.60	19.62	19.64

Tableau 6 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	16.60	17.01	17.50
2	Capacité sismique	16.60	17.22	18.23
3	Type de sol	0.19	0.24	0.32
4	Ductilité	16.60	16.62	16.70
5	Qualité des assemblages	16.60	24.39	24.61
6	Diaphragme horizontal	16.60	16.63	16.81
7	Modification	16.60	16.65	37.15
8	Régularité en plan	16.60	16.61	16.62
9	Régularité en élévation	16.60	16.63	16.70
10	Maintenance	16.60	41.71	41.71
11	Implantation de l'ouvrage	16.60	32.52	46.31
13	Toiture	16.60	16.77	17.02
14	Détails	27.47	27.50	27.52

Séisme de CHENOUA : 1989

Tableau 7 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.42	0.43	0.44
2	Capacité sismique	0.42	0.51	0.52
3	Type de sol	0.01	0.02	0.03
4	Ductilité	0.42	0.43	0.44
5	Qualité des assemblages	0.42	0.43	0.44
6	Diaphragme horizontal	0.42	0.45	0.53
7	Modification	0.42	0.44	0.46
8	Régularité en plan	0.42	0.43	0.47
9	Régularité en élévation	0.42	0.43	0.44
10	Maintenance	0.42	0.95	0.98
11	Implantation de l'ouvrage	0.42	1.57	6.63
13	Toiture	0.42	0.45	0.93
14	Détails	0.87	0.88	0.89

Tableau 8 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.90	0.92	0.94
2	Capacité sismique	0.90	1.50	1.52
3	Type de sol	0.30	0.31	0.39
4	Ductilité	0.90	0.92	0.94
5	Qualité des assemblages	0.90	0.92	0.94
6	Diaphragme horizontal	0.90	0.94	1.05
7	Modification	0.90	0.92	1.00
8	Régularité en plan	0.90	0.92	0.94
9	Régularité en élévation	0.90	0.92	0.94
10	Maintenance	0.90	1.53	1.60
11	Implantation de l'ouvrage	0.90	2.06	65.75
13	Toiture	0.90	0.95	0.97
14	Détails	0.90	0.92	0.94

Tableau 9 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	1.43	1.45	1.47
2	Capacité sismique	1.43	1.56	1.60
3	Type de sol	0.02	0.07	0.27
4	Ductilité	1.43	1.44	1.45
5	Qualité des assemblages	1.43	1.44	1.45
6	Diaphragme horizontal	1.43	1.44	1.45
7	Modification	1.43	1.44	3.36
8	Régularité en plan	1.43	1.44	1.45
9	Régularité en élévation	1.43	1.44	1.45
10	Maintenance	1.43	1.64	3.45
11	Implantation de l'ouvrage	1.43	3.36	136.77
13	Toiture	1.43	1.45	1.46
14	Détails	1.43	1.44	1.45

Séisme d'Ain Temouchent : 1999

Tableau 10 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	3.95	3.96	3.97
2	Capacité sismique	3.95	4.50	4.52
3	Type de sol	3.95	3.95	3.95
4	Ductilité	3.95	3.96	3.97
5	Qualité des assemblages	3.95	3.96	3.97
6	Diaphragme horizontal	3.95	4.12	4.50
7	Modification	3.95	4.00	4.02
8	Régularité en plan	3.95	4.00	4.10
9	Régularité en élévation	3.95	3.97	3.99
10	Maintenance	3.95	5.68	6.01
11	Implantation de l'ouvrage	3.95	6.04	6.06
13	Toiture	3.95	4.30	4.32
14	Détails	3.99	4.00	4.02

Tableau 11 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	8.23	8.24	8.27
2	Capacité sismique	8.23	8.25	8.27
3	Type de sol	8.23	8.23	8.23
4	Ductilité	8.23	8.25	8.26
5	Qualité des assemblages	8.23	8.25	8.27
6	Diaphragme horizontal	8.23	8.70	9.30
7	Modification	8.23	8.27	9.35
8	Régularité en plan	8.23	8.28	8.33
9	Régularité en élévation	8.23	8.28	8.34
10	Maintenance	8.23	8.25	8.30
11	Implantation de l'ouvrage	8.23	8.25	8.27
13	Toiture	8.23	8.70	8.72
14	Détails	8.23	8.25	8.27

Tableau 12 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	6.45	6.75	6.92
2	Capacité sismique	6.45	7.74	7.80
3	Type de sol	0.02	0.03	0.12
4	Ductilité	6.45	6.62	6.83
5	Qualité des assemblages	6.45	6.48	6.50
6	Diaphragme horizontal	6.45	6.83	7.60
7	Modification	6.45	6.63	6.95
8	Régularité en plan	6.45	6.53	6.61
9	Régularité en élévation	6.45	6.50	6.53
10	Maintenance	6.45	8.23	8.40
11	Implantation de l'ouvrage	6.45	6.96	7.05
13	Toiture	6.45	6.57	6.60
14	Détails	6.45	6.47	6.49

Séisme d'OKKAIDO : 1994

Tableau 13 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.31	0.32	0.33
2	Capacité sismique	0.31	0.32	0.33
3	Type de sol	0.31	0.32	0.33
4	Ductilité	0.31	0.32	0.33
5	Qualité des assemblages	0.31	0.32	0.33
6	Diaphragme horizontal	0.31	0.39	0.40
7	Modification	0.31	0.32	0.33
8	Régularité en plan	0.31	0.32	0.33
9	Régularité en élévation	0.31	0.32	0.33
10	Maintenance	0.31	0.41	0.56
11	Implantation de l'ouvrage	0.31	0.50	0.85
13	Toiture	0.31	0.34	0.35
14	Détails	0.31	0.32	0.33

Tableau 14 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.36	0.37	0.38
2	Capacité sismique	0.36	0.49	0.51
3	Type de sol	0.36	0.36	0.36
4	Ductilité	0.36	0.37	0.38
5	Qualité des assemblages	0.36	0.37	0.38
6	Diaphragme horizontal	0.36	0.39	0.40
7	Modification	0.36	0.37	0.40
8	Régularité en plan	0.36	0.37	0.38
9	Régularité en élévation	0.36	0.37	0.38
10	Maintenance	0.36	0.46	0.46
11	Implantation de l'ouvrage	0.36	0.38	3.29
13	Toiture	0.36	0.39	0.40
14	Détails	0.36	0.37	0.38

Tableau 15 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.36	0.39	0.41
2	Capacité sismique	0.36	0.39	0.41
3	Type de sol	0.36	0.36	0.36
4	Ductilité	0.36	0.37	0.38
5	Qualité des assemblages	0.36	0.37	0.38
6	Diaphragme horizontal	0.36	0.37	0.40
7	Modification	0.36	0.37	0.49
8	Régularité en plan	0.36	0.37	0.38
9	Régularité en élévation	0.36	0.37	0.38
10	Maintenance	0.36	0.39	0.54
11	Implantation de l'ouvrage	0.36	0.42	4.46
13	Toiture	0.36	0.37	0.38
14	Détails	0.36	0.37	0.38

Séisme de KURIL : 2007

Tableau 16 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	4.80	4.81	4.85
2	Capacité sismique	4.80	4.81	4.90
3	Type de sol	4.80	4.80	4.80
4	Ductilité	4.80	4.82	4.84
5	Qualité des assemblages	4.80	4.86	4.87
6	Diaphragme horizontal	4.80	5.13	5.46
7	Modification	4.80	4.90	4.91
8	Régularité en plan	4.80	4.88	5.03
9	Régularité en élévation	4.80	4.84	4.87
10	Maintenance	4.80	5.68	13.82
11	Implantation de l'ouvrage	4.80	13.96	24.50
13	Toiture	4.80	5.16	5.17
14	Détails	4.88	4.89	4.90

Tableau 17 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	23.77	24.00	25.00
2	Capacité sismique	23.77	25.75	26.10
3	Type de sol	1.50	1.50	1.50
4	Ductilité	23.77	24.00	25.00
5	Qualité des assemblages	23.77	24.00	25.00
6	Diaphragme horizontal	23.77	25.00	27.00
7	Modification	23.77	23.90	30.53
8	Régularité en plan	23.77	24.00	24.90
9	Régularité en élévation	23.77	23.85	24.00
10	Maintenance	23.77	42.37	47.73
11	Implantation de l'ouvrage	23.77	31.50	80.91
13	Toiture	23.77	24.41	25.00
14	Détails	24.24	24.28	25.00

Tableau 18 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	76.23	76.92	77.04
2	Capacité sismique	76.23	76.90	77.25
3	Type de sol	5.30	5.89	7.24
4	Ductilité	76.23	76.67	77.00
5	Qualité des assemblages	76.23	76.46	76.88
6	Diaphragme horizontal	76.23	77.17	78.78
7	Modification	76.23	76.65	76.77
8	Régularité en plan	76.23	76.48	76.78
9	Régularité en élévation	76.23	76.33	76.45
10	Maintenance	76.23	76.23	76.23
11	Implantation de l'ouvrage	76.23	77.00	79.12
13	Toiture	76.23	76.65	76.90
14	Détails	76.23	76.34	76.46

Séisme de FUKUSHIMA : 2011

Tableau 19 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	5.47	5.48	5.51
2	Capacité sismique	5.47	7.89	7.90
3	Type de sol	0.01	0.02	0.03
4	Ductilité	5.47	5.49	5.51
5	Qualité des assemblages	5.47	5.52	5.60
6	Diaphragme horizontal	5.47	5.70	6.54
7	Modification	5.47	5.68	5.70
8	Régularité en plan	5.47	5.53	6.08
9	Régularité en élévation	5.47	5.51	5.55
10	Maintenance	5.47	12.34	38.58
11	Implantation de l'ouvrage	5.47	45.15	115.96
13	Toiture	5.47	5.95	6.00
14	Détails	5.55	5.55	5.55

Tableau 20 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	56.75	57.05	57.90
2	Capacité sismique	56.75	57.00	67.98
3	Type de sol	0.00	0.00	0.04
4	Ductilité	56.75	57.13	57.58
5	Qualité des assemblages	56.75	57.98	58.20
6	Diaphragme horizontal	56.75	59.41	71.55
7	Modification	56.75	59.74	59.90
8	Régularité en plan	56.75	57.71	59.91
9	Régularité en élévation	56.75	57.22	57.84
10	Maintenance	56.75	68.51	246.33
11	Implantation de l'ouvrage	56.75	85.74	126.82
13	Toiture	56.75	58.41	58.60
14	Détails	64.50	64.70	64.90

Tableau 21 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	225.84	227.00	230.01
2	Capacité sismique	225.84	229.48	230.08
3	Type de sol	0.00	0.03	0.11
4	Ductilité	225.84	226.15	228.46
5	Qualité des assemblages	225.84	239.00	240.03
6	Diaphragme horizontal	225.84	226.63	229.16
7	Modification	225.84	227.13	229.39
8	Régularité en plan	225.84	226.02	227.15
9	Régularité en élévation	225.84	226.39	227.46
10	Maintenance	225.84	246.34	246.34
11	Implantation de l'ouvrage	225.84	258.5	675.66
13	Toiture	225.84	226.90	227.13
14	Détails	225.84	225.96	226.05

Séisme de TORISHIMA : 2012

Tableau 22 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.25	0.26	0.27
2	Capacité sismique	0.25	0.42	0.43
3	Type de sol	0.25	0.25	0.25
4	Ductilité	0.25	0.26	0.27
5	Qualité des assemblages	0.25	0.26	0.27
6	Diaphragme horizontal	0.25	0.26	0.28
7	Modification	0.25	0.26	0.27
8	Régularité en plan	0.25	0.26	0.27
9	Régularité en élévation	0.25	0.26	0.27
10	Maintenance	0.25	0.68	1.67
11	Implantation de l'ouvrage	0.25	5.37	6.13
13	Toiture	0.25	0.26	0.27
14	Détails	0.25	0.26	0.27

Tableau 23 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	2.53	2.56	2.64
2	Capacité sismique	2.53	6.70	6.75
3	Type de sol	0.01	0.02	0.03
4	Ductilité	2.53	2.57	2.63
5	Qualité des assemblages	2.53	2.58	2.60
6	Diaphragme horizontal	2.53	2.71	3.30
7	Modification	2.53	2.74	2.76
8	Régularité en plan	2.53	2.61	2.72
9	Régularité en élévation	2.53	2.57	2.63
10	Maintenance	2.53	4.53	7.92
11	Implantation de l'ouvrage	2.53	6.41	9.30
13	Toiture	2.53	2.60	2.62
14	Détails	3.07	3.09	3.11

Tableau 24 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	8.43	8.47	8.88
2	Capacité sismique	8.43	8.50	8.90
3	Type de sol	0.01	0.02	0.03
4	Ductilité	8.43	8.76	8.82
5	Qualité des assemblages	8.43	8.65	8.73
6	Diaphragme horizontal	8.43	8.45	8.50
7	Modification	8.43	8.47	21.14
8	Régularité en plan	8.43	8.50	8.61
9	Régularité en élévation	8.43	8.45	8.49
10	Maintenance	8.43	11.00	17.03
11	Implantation de l'ouvrage	8.43	10.78	12.18
13	Toiture	8.43	8.49	8.56
14	Détails	9.25	9.28	9.34

Séisme d'ALASKA : 1972

Tableau 25 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.03	0.04	0.05
2	Capacité sismique	0.03	0.04	0.05
3	Type de sol	0.01	0.02	0.03
4	Ductilité	0.03	0.04	0.05
5	Qualité des assemblages	0.03	0.04	0.05
6	Diaphragme horizontal	0.03	0.04	0.05
7	Modification	0.03	0.04	0.05
8	Régularité en plan	0.03	0.04	0.05
9	Régularité en élévation	0.03	0.04	0.05
10	Maintenance	0.03	0.04	0.07
11	Implantation de l'ouvrage	0.03	0.05	0.12
13	Toiture	0.03	0.04	0.05
14	Détails	0.03	0.04	0.05

Tableau 26 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.07	0.09	0.11
2	Capacité sismique	0.07	0.10	0.12
3	Type de sol	0.20	0.20	0.20
4	Ductilité	0.07	0.09	0.11
5	Qualité des assemblages	0.07	0.08	0.09
6	Diaphragme horizontal	0.07	0.09	0.11
7	Modification	0.07	0.09	0.11
8	Régularité en plan	0.07	0.08	0.09
9	Régularité en élévation	0.07	0.08	0.09
10	Maintenance	0.07	0.10	0.46
11	Implantation de l'ouvrage	0.07	0.13	0.40
13	Toiture	0.07	0.09	0.11
14	Détails	0.08	0.09	0.10

Tableau 27 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.27	0.30	0.34
2	Capacité sismique	0.27	0.45	0.58
3	Type de sol	0.04	0.10	0.20
4	Ductilité	0.27	0.30	0.33
5	Qualité des assemblages	0.27	0.45	0.48
6	Diaphragme horizontal	0.27	0.28	0.29
7	Modification	0.27	0.30	0.56
8	Régularité en plan	0.27	0.28	0.29
9	Régularité en élévation	0.27	0.28	0.29
10	Maintenance	0.27	0.52	0.60
11	Implantation de l'ouvrage	0.27	0.51	0.56
13	Toiture	0.27	0.28	0.29
14	Détails	0.27	0.28	0.29

Séisme d'IMPERIAL VALLEY : 1979

Tableau 28 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de faible hauteur

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.02	0.03	0.04
2	Capacité sismique	0.02	0.03	0.04
3	Type de sol	0.02	0.02	0.02
4	Ductilité	0.02	0.03	0.04
5	Qualité des assemblages	0.02	0.03	0.04
6	Diaphragme horizontal	0.02	0.03	0.04
7	Modification	0.02	0.03	0.04
8	Régularité en plan	0.02	0.03	0.04
9	Régularité en élévation	0.02	0.03	0.04
10	Maintenance	0.02	0.05	0.09
11	Implantation de l'ouvrage	0.02	0.48	0.53
13	Toiture	0.02	0.03	0.04
14	Détails	0.02	0.03	0.04

Tableau 29 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur moyenne

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.10	0.12	0.14
2	Capacité sismique	0.10	0.21	0.25
3	Type de sol	0.10	0.10	0.10
4	Ductilité	0.10	0.12	0.14
5	Qualité des assemblages	0.10	0.12	0.14
6	Diaphragme horizontal	0.10	0.12	0.14
7	Modification	0.10	0.11	0.12
8	Régularité en plan	0.10	0.11	0.12
9	Régularité en élévation	0.10	0.11	0.12
10	Maintenance	0.10	0.28	0.92
11	Implantation de l'ouvrage	0.10	0.46	0.86
13	Toiture	0.10	0.12	0.14
14	Détails	0.10	0.11	0.12

Tableau 30 : Valeurs de déplacements maximum pour une construction de hauteur élevée

N°	Paramètres	Déplacements maximum (mm)		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Connexions des murs	0.50	0.82	0.84
2	Capacité sismique	0.50	0.93	1.00
3	Type de sol	0.50	0.50	0.50
4	Ductilité	0.50	0.80	0.83
5	Qualité des assemblages	0.50	0.91	0.93
6	Diaphragme horizontal	0.50	0.82	0.85
7	Modification	0.50	0.81	1.13
8	Régularité en plan	0.50	0.81	0.82
9	Régularité en élévation	0.50	0.80	0.82
10	Maintenance	0.50	1.00	1.07
11	Implantation de l'ouvrage	0.50	1.05	1.10
13	Toiture	0.50	0.80	0.81
14	Détails	0.92	0.94	0.96

ANNEXE 4

1. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme d'Ain temouchent

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.53	1.53	3.00
Type de sol	9.43	9.43	8.33	-	-	-	1.69	1.61	1.47	3.00
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.26	1.26	3.00
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02	3.00
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Maintenance	9.1	6.66	5.26	-	-	-	1.69	1.23	0.97	3.00
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	1.69	0.72	0.10	3.00
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.00
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23	3.00

2. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de Tipaza

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Capacité sismique	-	-	-	4.34	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53	8.16
Type de sol	-	-	-	4.34	4.34	3.84	1.69	1.61	1.47	8.16
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.26	1.26	8.16
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02	8.16
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	1.69	1.23	0.97	8.16
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.27	4.34	2.27	0.10	1.69	0.72	0.10	8.16
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	8.16
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23	8.16

3. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de Beniourthilene

Paramètres	Fréquences (Hz)									F ₀ (Hz)
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	-	-	-	1.624
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	-	-	-	1.624
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	-	-	-	1.624
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	-	-	-	1.624
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.624

4. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de Boumerdes

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	-	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53	4.15
Type de sol	9.43	9.43	8.33	-	-	3.84	1.69	1.61	1.47	4.15
Ductilité	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Assemblage	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.26	1.26	4.15
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Modifications	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.02	4.15
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Maintenance	9.1	6.66	5.26	-	3.03	1.25	1.69	1.23	0.97	4.15
Implantation de l'ouvrage	-	-	-	-	2.27	0.10	-	-	-	4.15
Toiture	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.69	1.69	1.69	4.15
Détails	9.1	9.1	9.1	-	-	-	1.23	1.23	1.23	4.15

5. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme d'Alaska

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53	7.111
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	1.69	1.61	1.47	7.111
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.26	1.26	7.111
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02	7.111
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	1.69	1.23	0.97	7.111
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	1.69	0.72	0.10	7.111
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	7.111
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23	7.111

6. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme d'Imperial Valley

Paramètres	Fréquences (Hz)									F ₀ (Hz)
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	-	-	-	1.202
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	-	-	-	1.202
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Maintenance	9.1	6.66	5.26	-	-	-	-	-	-	1.202
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	-	-	-	1.202
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.202

7. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme d'Okkaido

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53	3.345
Type de sol	9.43	9.43	8.33	-	-	-	1.69	1.61	1.47	3.345
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.26	1.26	3.345
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02	3.345
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Maintenance	9.1	6.66	5.26	-	-	-	1.69	1.23	0.97	3.345
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	1.69	0.72	0.10	3.345
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	3.345
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23	3.345

8. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de fukushima

Paramètres	Fréquences (Hz)									F ₀ (Hz)
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	-	-	-	1.965
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	-	-	-	1.965
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Maintenance	9.1	6.66	5.26	-	-	-	-	-	-	1.965
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	-	-	-	1.965
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.965

9. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de Kuril

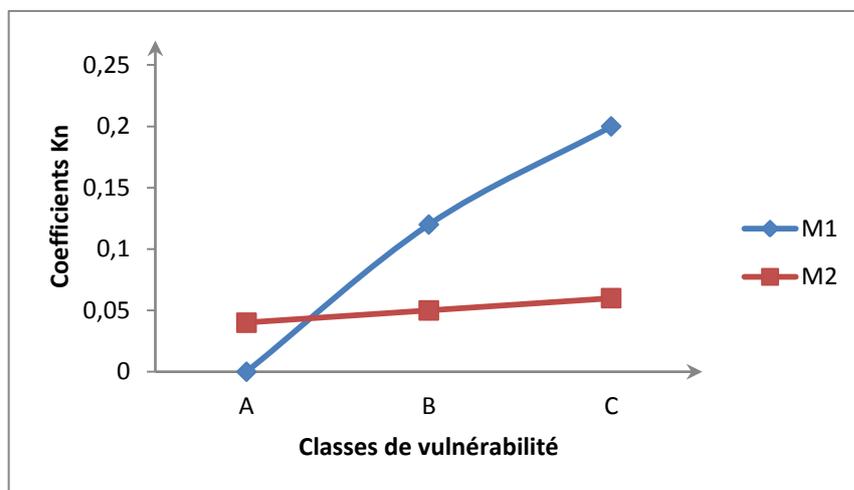
Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	-	-	-	1.611
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	-	-	-	1.611
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	-	-	-	1.611
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	-	-	-	1.611
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	-	-	-	1.611

10. valeurs des fréquences considérées dans le calcul des coefficients : séisme de Torishima

Paramètres	Fréquences (Hz)									
	Faible hauteur			Moyenne hauteur			Hauteur élevée			F ₀ (Hz)
	Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			Classes de vulnérabilité			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Connexion des murs	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Capacité sismique	9.1	9.1	9.1	4.34	3.57	3.57	1.69	1.53	1.53	0.885
Type de sol	9.43	9.43	8.33	4.34	4.34	3.84	1.69	1.61	1.47	0.885
Ductilité	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Assemblage	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.26	1.26	0.885
Diaphragme horizontal	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Modifications	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.02	0.885
Régularité en plan	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Régularité en élévation	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Maintenance	9.1	6.66	5.26	4.34	3.03	1.25	1.69	1.23	0.97	0.885
Implantation de l'ouvrage	9.1	2.13	0.32	4.34	2.27	0.10	-	-	-	0.885
Toiture	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.69	1.69	1.69	0.885
Détails	9.1	9.1	9.1	4.34	4.34	4.34	1.23	1.23	1.23	0.885

ANNEXE 5

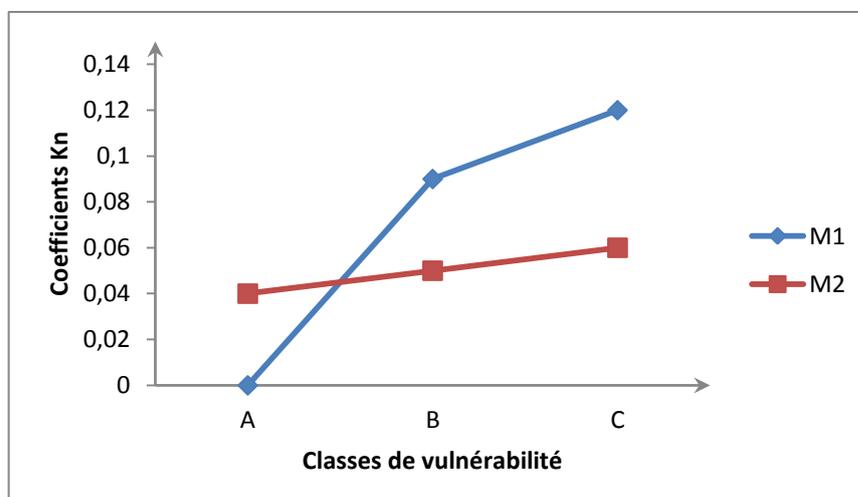
1. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre connexions des murs



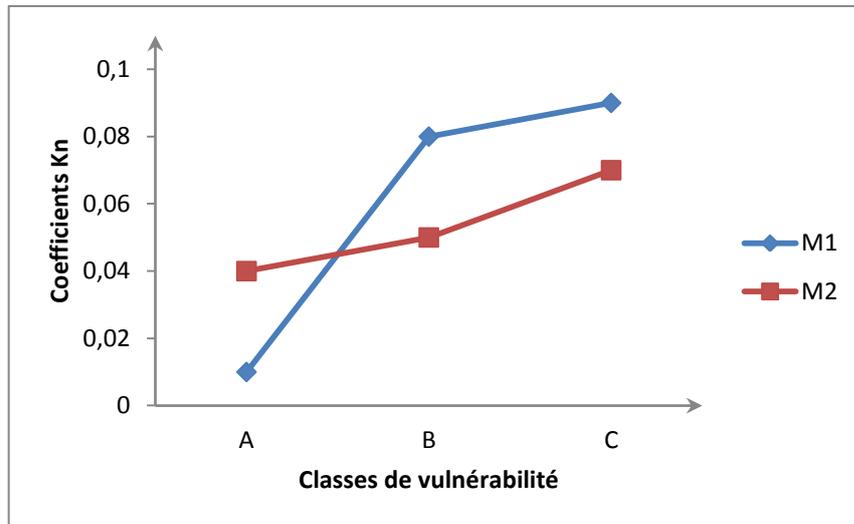
M1 : méthode statistique.

M2 : méthode par modélisation numérique.

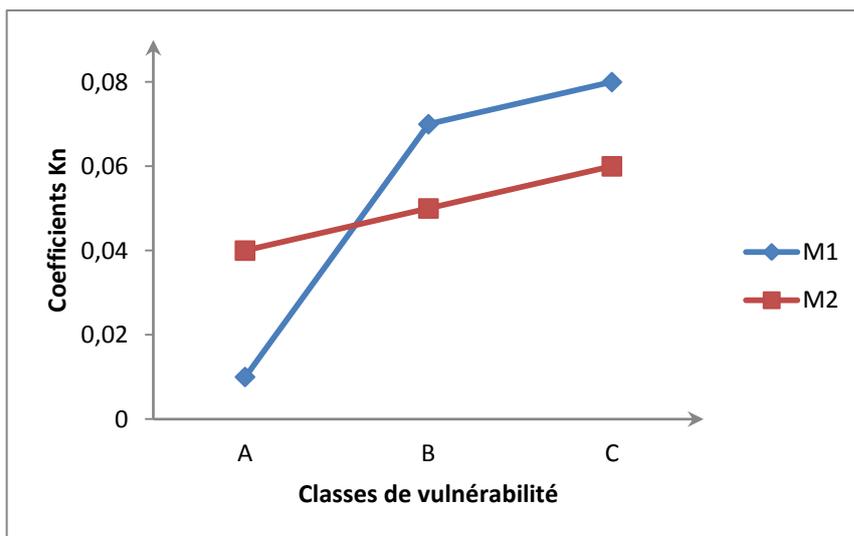
2. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre capacité sismique



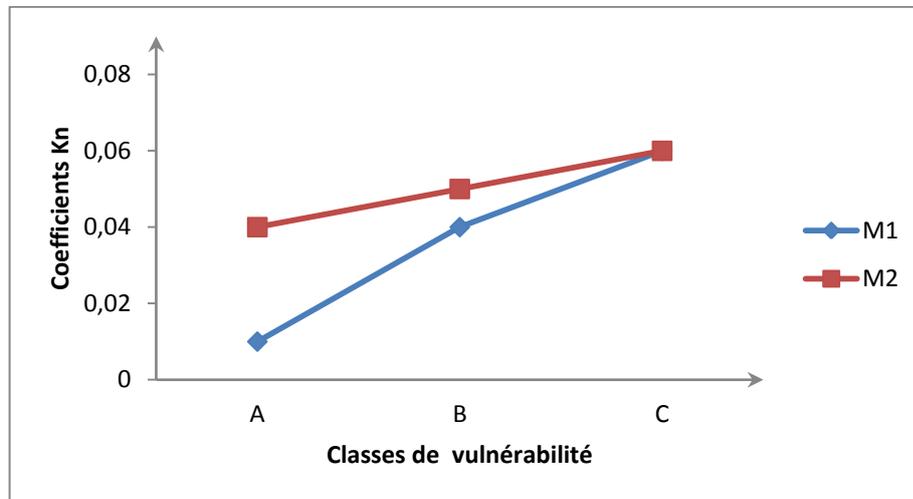
3. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre type de sol



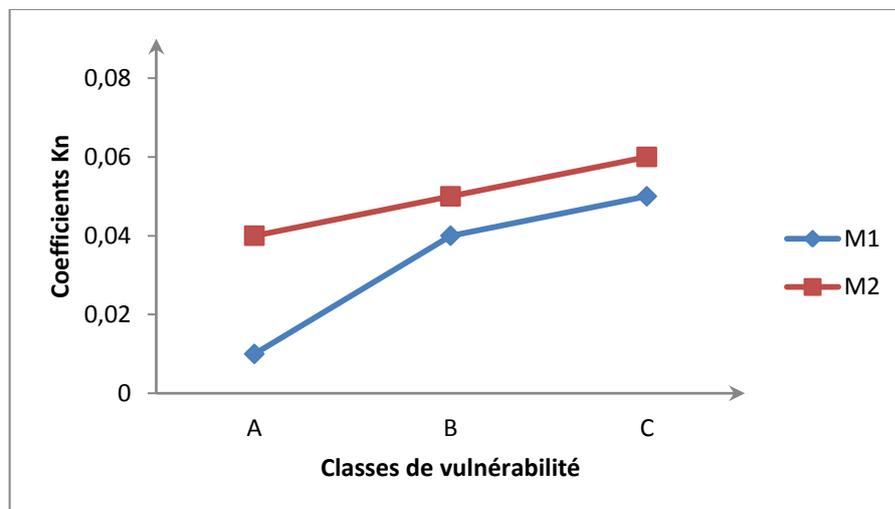
4. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre ductilité



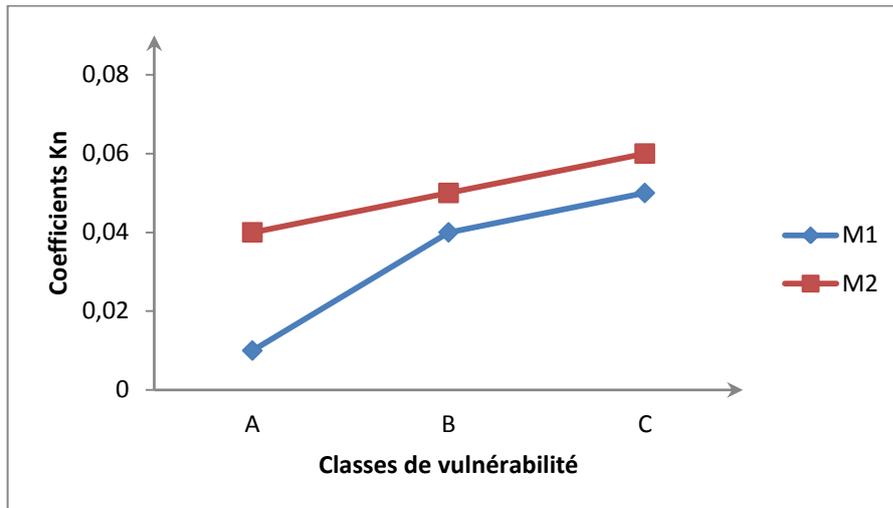
5. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre qualité des assemblages



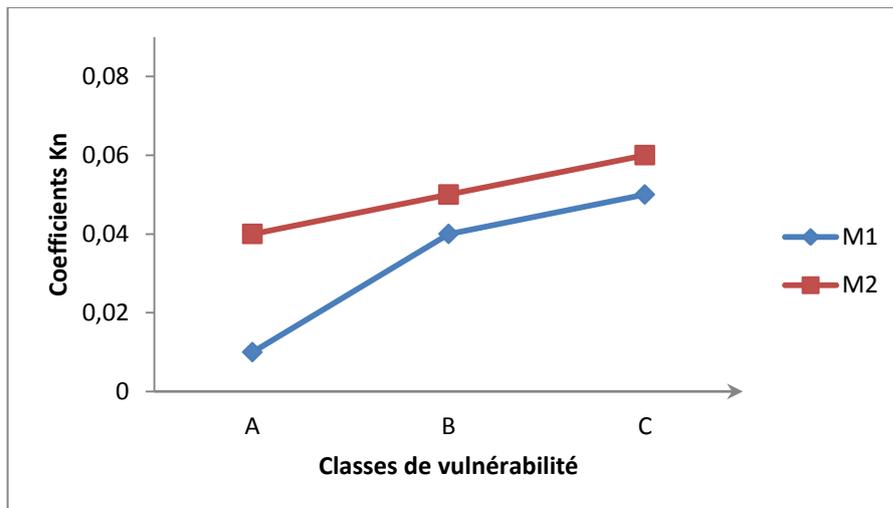
6. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre diaphragme horizontal



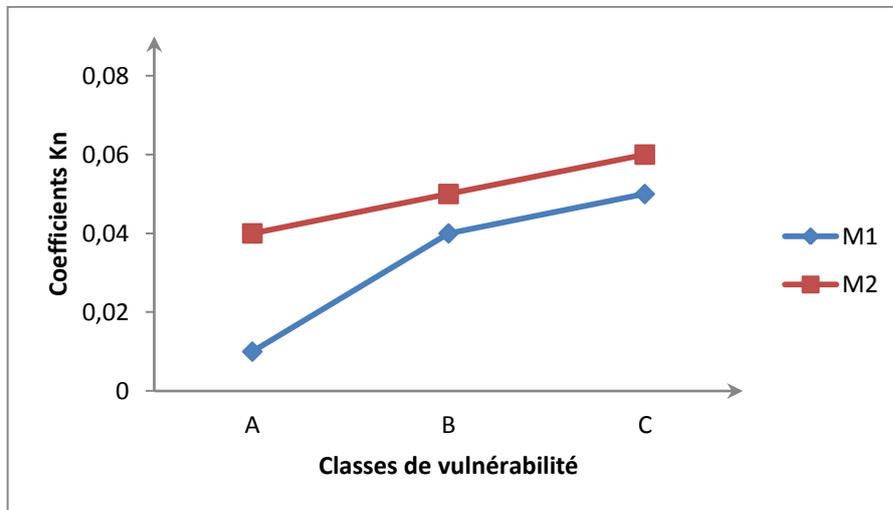
7. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre modification



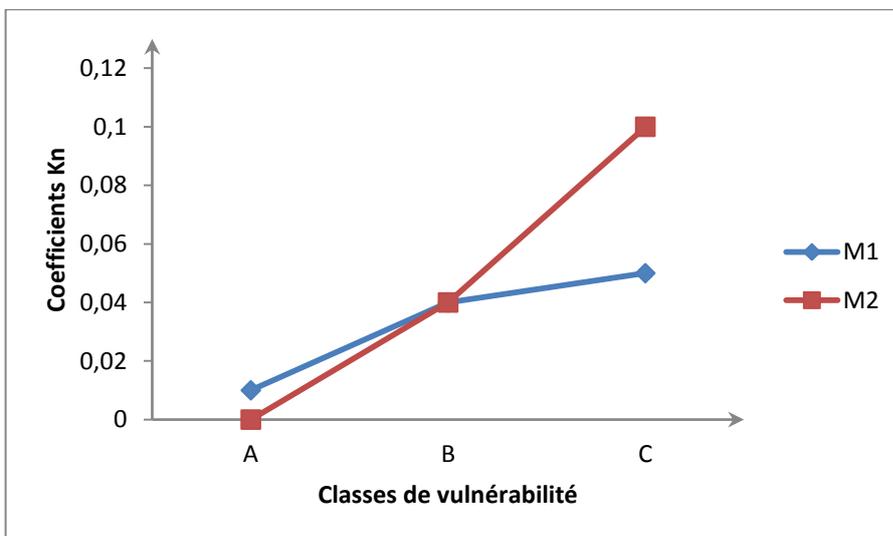
8. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre régularité en plan



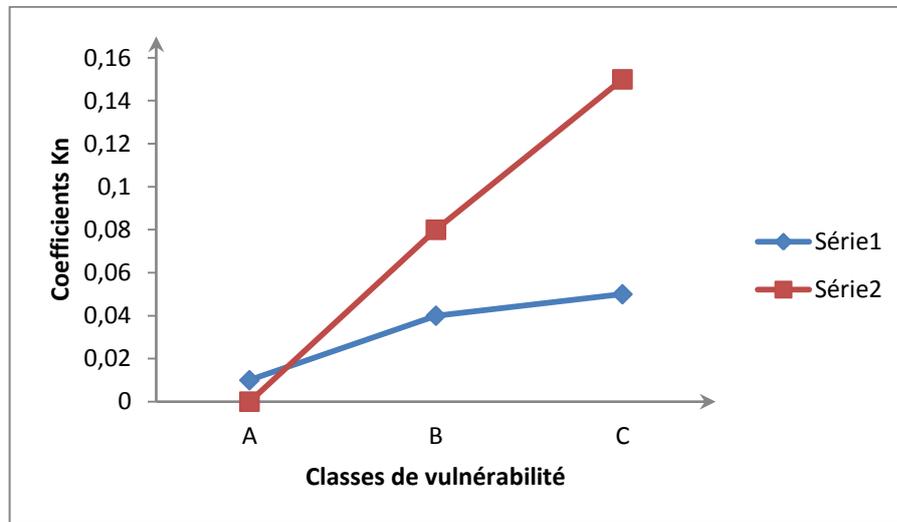
9. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre régularité en élévation



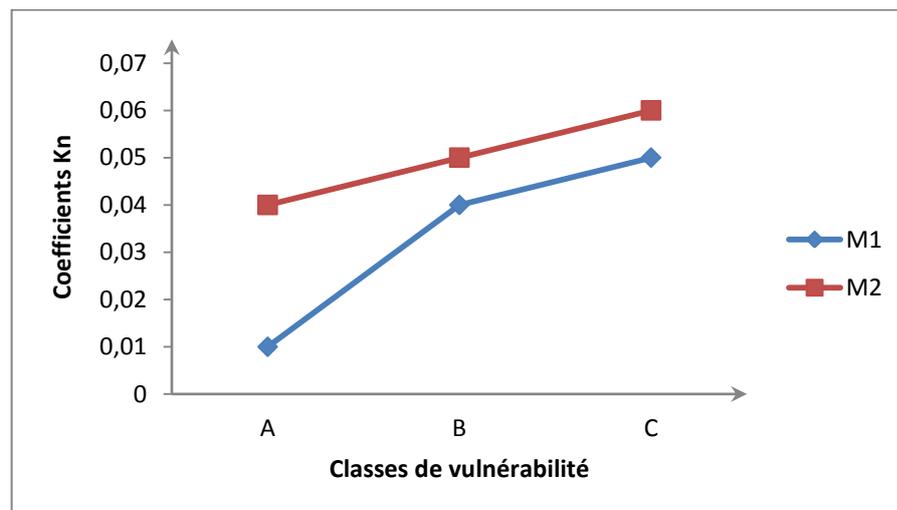
10. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre implantation de l'ouvrage



11. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre entrechoquement



12. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre toiture



13. Comparaison entre l'évolution des coefficients pour le paramètre détail

