

N° D'ordre: 03/2012-M/GC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE****UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE****FACULTE DE GENIE CIVIL****MEMOIRE***Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER**En : Génie Civil**Spécialité : Structure**Par : Mme MERAZKA SAMIA Epouse GHRIBI***THEME**

DEVELOPPEMENT DES FONCTIONS DE VULNERABILITE SISMIQUE DES BATIMENTS EN MACONNERIE
--

Soutenu publiquement le 30 septembre 2012 devant le jury composé de :

Mr. M.CHABAAT	Prof à L'USTHB	Président
Mr DJ. BENOUAR	Prof à L'USTHB	Directeur de thèse
Mr N.LAOUAMI	Maitre de conférence A au CGS	Examineur
Mr M.TOUATI	Maitre de conférence A à L'USTHB	Examineur
Mr S.DJAKAB	Maitre de conférence B à L'USTHB	Invité

RÉSUMÉ

L'estimation des pertes encourues suite à un séisme probable est un champ d'expertise en plein développement. Elle nécessite, en autres, l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants laquelle se définit par le degré de dommages subit par une structure pour une intensité sismique donnée. Ce rapport explore l'applicabilité des méthodes d'évaluation disponibles aux bâtiments d'Algérie. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique diffèrent par leur complexité, leur précision et leur objectif. L'évaluation d'un bâtiment unique se fait par des analyses structurales détaillées alors que les différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité d'un ensemble de bâtiments reposent généralement sur l'utilisation de fonctions de vulnérabilité qui expriment le pourcentage de dommages subis par un type de structure pour différentes intensités sismiques. Ces fonctions (courbes ou matrices) sont élaborées à partir de l'observation des dommages lors de séismes passés, de l'opinion d'experts ou de modèles d'analyse. Le concept que nous avons utilisé dans cette recherche pour le développement des fonctions de vulnérabilité, est basé essentiellement sur la méthode de « l'indice de vulnérabilité ». Cette méthode, consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment appelée « Index de vulnérabilité ». Cette valeur numérique représente la somme pondérée des valeurs numériques exprimant la qualité sismique des éléments structurales du bâti. La méthode que nous avons proposée nous a permis de déterminer l'indice de vulnérabilité pour chaque bâtiment à travers les critères structuraux et non structuraux évalués à partir du diagnostic visuel des constructions endommagées par plusieurs séismes et de déterminer les fonctions de vulnérabilité. Ces fonctions représentent la corrélation entre les niveaux des dommages subis par un seul type de structure et les fonctions de vulnérabilité. L'ensemble des résultats obtenus nous permettra de prévoir les dommages dans d'autres sites de même configuration durant les futurs séismes, d'établir un outil pour préparer des scénarios dans d'autres villes ayant la même morphologie et la même typologie du cadre bâti afin de choisir les premières mesures de réhabilitation parasismique et nous permettra également d'élaborer un instrument de gestion pour les zones sismiquement actives.

Mots-clés: vulnérabilité sismique, séisme, gestion du risque, maçonnerie non armée, caractérisation structurale, dommages observés, indice de vulnérabilité, fonction de vulnérabilité

ABSTRACT

Earthquake loss estimation is a rapidly developing field. It requires the evaluation of the seismic vulnerability of existing buildings, which is defined by the evaluation of damages the buildings will suffer for different earthquake intensity. This report presents a state of the art review on the evaluation of the seismic evaluation of existing buildings and considers the applicability of the available methods for the evaluation of the existing buildings of Algeria. The methods for the assessment of the seismic vulnerability differ in expenditure and precision and on their objective. The assessment of an individual building is usually performed by a detailed structural analysis. The methods for the assessment of the seismic vulnerability of a group of buildings generally rely upon the use of damage functions or damage matrices obtained from observation of damaged buildings in earthquake-struck areas or by simulation using numerical or analytical models of the buildings. The concept which we used in this research for the development of the vulnerability functions is essentially based on the "Vulnerability Index Method". This method, consists in attributing a numerical value to each building called "vulnerability index". This numerical value represents the balanced sum of the numerical values expressing the seismic quality of the structural elements. The method which we proposed allowed us to determine the vulnerability index for each building through the structural and not structural criteria estimated from diagnostic visual of the constructions damaged by the earthquake and to determine a function of vulnerability. This function represents the correlation between the levels of the damage and the vulnerability. All the obtained results will allow us to envisage the damage in the other sites of the same configuration during the future earthquakes, to establish a tool to prepare scenarios in the other cities having the same morphology and the same typology of the buildings to choose the first measures of earthquake-resistant rehabilitation and will also allow us to elaborate an instrument of management for the active seismic zones.

Keywords: seismic vulnerability, earthquake, risk management, masonry, structural characterization, observed damages, vulnerability index, vulnerability functions

ملخص

إن احتمال حدوث خسائر تابعة لأي خطر زلزالي هو حقل تجارب قابل للتطور، من ضروري تقييم الضرر الزلزالي لهذه المباني الموجودة لذي يجب تعريف نسبة الخسائر التي تتعرض لها بنية ذو شدة معينة. المفهوم الذي استخدم في هذا البحث من أجل إعداد دوال قابلية التعرض للخطر الزلزالي تقوم أساسا على منهجية تسمى "مؤشر الهشاشة" التي أعدها بندتي. وهذه المنهجية تتمثل في إسناد قيمة عددية لكل مبنى يسمى "مؤشر الهشاشة" وهذه القيمة العددية تتمثل في المجموع المتوازن للقيم العددية التي تعبر على النوعية البنوية ضد الخطر الزلزالي للعناصر الهيكلية وغير الهيكلية للمبنى. المنهجية المقترحة تتيح لنا تحديد مؤشر الضعف(الهشاشة) لكل مبنى وذلك عبر التشخيص البصري للعناصر الهيكلية وغير الهيكلية المتضررة للمبنى من الزلزال وكذلك تحديد دالة قابلية التعرض للخطر الزلزالي (الهشاشة) هذه الدالة تمثل الارتباط بين مستويات الضرر والهشاشة.

مجمل النتائج المتحصل عليها تمكننا من توقع الأضرار في مواقع أخرى من نفس الشكل وتعد وسيلة لوضع تصورات وسيناريوهات عن بقية المدن ذات نفس التصنيف من أجل اختيار الإجراءات الأولية لتعزيز المباني بتقنيات تدعيمية ضد الخطر الزلزالي وتمكننا أيضا من إعداد أداة لإدارة المناطق الزلزالية.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	10
--------------------------	-----------

CHAPITRE I SÉISMES ET SISMOLOGIE – NOTIONS DE BASE

I.1 Notion de séisme.....	13
I.2 Mesure des séismes.....	13
I.2.1 Magnitude.....	13
I.2.2 Intensité.....	14
I.3 Aléa sismique.....	14
I.4 Risque sismique.....	15
I.5 Aperçu historique.....	16
I.5 1 Situation de l'Algérie par rapport aux mouvements des plaques.....	17
I.5 2 Conditions sismo-tectoniques régionales.....	17
I.5 3 Classification des zones sismiques en Algérie.....	17
I.6 Historique de la sismicité en Algérie.....	18
I.7. Les séismes en Algérie.....	19
I.7.1. Le séisme de Tipaza.....	20
I.7.2. Le séisme de Béni-Ouailane du 10 novembre 2000.....	20
I.7.2.1 Faille de Tachouaft (ou Béni-Ouailane).....	21
I.7.3 Le séisme de Boumerdès.....	22
I.7.3.1 Contexte géodynamique.....	22
I.8. Effets des séismes sur des bâtiments.....	24
I.8.1 Dommages provoqués par les séismes.....	24
I.8.2 Bâtiments d'habitation.....	25
I.8.2.1 Type maçonnerie très ancienne sans liant du 18 ^{ème} siècle.....	25
I.8.2.2 Type maçonnerie liée au mortier fin 19 ^{ème} et début 20 ^{ème} siècle.....	27
I.9 Synthèse de chapitre et prochaines étapes.....	29

CHAPITRE II PRINCIPES DE L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS EN MAÇONNERIE

II.1 Méthode d'évaluation basée sur l'échelle macrosismique européenne (EMS-98).....	32
II.1.1 Méthode RISK-UE.....	34
II.1.2 La méthode VULNERALP.....	36
II.1.2.1 La méthode VULNERALP : niveau 1.0.....	36
II.1.2.2 La méthode VULNERALP : niveau 1.1.....	38
II.1.2.3 La méthode VULNERALP : niveau 2.0.....	39
II.1.3 Méthode FaMIVE.....	39
II.2 Méthode d'évaluation par pointage.....	40
II.2.1 Méthode FEMA.....	40
II.2.2 La méthode de pointage du Conseil national de recherches du Canada.....	40
II.2.3 La méthode GNDDT, Italie.....	41
II.3 Synthèse de chapitre et approches étapes.....	44

CHAPITRE III INVENTAIRE TYPOLOGIQUE DES BTIMENTS

III.1 La typologie des bâtiments	46
III.2 Elaboration de la fiche technique	46
III.3 Description du bâti	47
III.4 Les critères de vulnérabilité	48
III.4.1. Caractérisation des éléments d'une structure en maçonnerie.....	48
III.4.1.1 Les types de maçonnerie et d'appareil.....	48
III.4.1.2 Les liaisons entre murs.....	49
III.4.1.3 Les planchers.....	51
III.4.1.4 Charpente et couverture.....	52
III.4.2 Données sur l'implantation du bâtiment.....	53
III.4.2.1 Implantation du bâtiment.....	53
III.4.2.2 Environnement ou localisation.....	54
III.4.3 Caractéristique géométrique du bâtiment	56
III.4.3.1 Régularité en plan.....	56
III.4.3.2 Régularité en élévation.....	57
III.4.4 Comportement sismique des structures en maçonnerie porteuse.....	59
III.5 Synthèse de chapitre	62

CHAPITRE IV VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS

IV.1 Choix et adaptation de la procédure d'analyse	65
IV.2 Définition du territoire de l'étude	66
IV.3 Critères de vulnérabilité	68
IV.4 Importance des dommages et coefficients de pondération	68
IV.5 Estimation de dommage par structure	70
IV.6 Calcul de l'indice de vulnérabilité	71
IV.7 Corrélation ou fonction de vulnérabilité	74
IV.8 Courbes de vulnérabilité	74
IV.9 Conclusion de chapitre	79

CONCLUSION	81
-------------------------	----

REFERENCES	83
-------------------------	----

ANNEXES	90
----------------------	----

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Carte de zonage sismique du territoire nationale [18]	15
Figure I.2 : Intensités maximales observées en Algérie du Nord [8]	19
Figure I.3. Carte montrant la surface de maximum intensité lors du séisme du 10 novembre 2000 de Béni-Ourtilane. [13]	21
Figure I.4. Carte isoséiste du séisme de Djemila du 14 avril 1977[13]	21
Figure I.5 : Localisation du séisme principale du 21 MAI 2003[2]	22
Figure I.6 : Contexte géodynamique de la marge Nord Africaine. Modèle Nuvel 1 [2]	23
Figure I.7 : Faille de Thénia et localisation du séisme du 21 mai 2003[2]	23
Figure II.1 : Les différentes échelles d'analyse et leur applicabilité. Tirée de Combescure, Gueguen et Lebrun (2005, p.10) [22]	31
Figure II.2: Typologie EMS-98 associées a une classe de vulnérabilité Tirée de Grunthal, Musson et Stucchi (1998) [33]	33
Figure II.3 : Evaluation des dommages moyens, calculés sur la base des informations de niveau 1.0 Méthode VULNERALP [47]	37
Figure II.4 : Evaluation des dommages moyens, calculés sur la base des informations de niveau 1.1 Méthode VULNERALP [47]	38
Figure II.5 : Evaluation des dommages, calculés sur la base des informations de niveau 2.0 Méthode VULNERALP [47]	39
Figure II.6: Evolution du dommage moyen d en fonction de l'intensité du séisme (EM98) pour plusieurs classes de vulnérabilité [29]	43
Figure III.1: Appareils utilisés pendant l'antiquité [1]	49
Figure III.2: Techniques utilisées pour la jonction de deux murs de maçonnerie de moellons [1]	50
Figure III.3: Maçonnerie appareillée formant un chaînage à l'intersection de deux murs et autour d'une ouverture [1]	50

Figure III.4: Exemples de chaînes d'angle en maçonnerie et pierres taillées [1]	50
Figure III.5: Désordres possibles aux intersections de deux murs [1]	51
Figure III.6: Exemple de plancher en bois [1]	51
Figure III.7: Implantation du bâtiment [44]	53
Figure III.8.a: Avoisinants du bâtiment [44]	54
Figure III.8.b: Avoisinants du bâtiment [44]	55
Figure III.9: les configurations de bâtiments [44]	56
Figure III.10: Torsion des constructions [44]	56
Figure III.11: Régularité en élévation [44]	57
Figure III.12: Retrait sur la façade [44]	57
Figure III.13: l'endommagement interne du bâtiment [44]	58
Figure III.14: Les 2 types de modes de rupture des bâtiments en maçonnerie porteuse [1]	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Principaux séismes d'Algérie (1365-2001) [34]	19
Tableau II.1 Indices de vulnérabilité pour la maçonnerie [28]	34
Tableau II.2 : Exemple de score pour deux critères structuraux retenus pour la méthode niveau 1.0 VULNERALP [47]	37
Tableau II.3 : Correspondance entre les classes de vulnérabilité de l'EMS98 et les scores du GNDT, d'après [29]	37
Tableau II.4: Exemple de scores retenus pour la méthode niveau 1.1 VULNERALP [47]	38
Tableau II.5: paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie d'après GNDT [30]	41
Tableau IV.1: Coefficients de pondération de chaque critère de vulnérabilité	69
Tableau IV.2: Echelle d'évaluation du degré de dommage	70

LISTE DES GRAPHES

Graphe IV.1: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Tipaza)	71
Graphe IV.2: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme d'Alger)	72
Graphe IV.3: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Béni Ourtilane)	72
Graphe IV.4: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Boumerdes)	73
Graphe IV.5: la courbe de vulnérabilité (séisme Tipaza 1989)	75
Graphe IV.6: la courbe de vulnérabilité (séisme Alger 1996)	75
Graphe IV.7: la courbe de vulnérabilité (séisme Béni Ourtilane 2000)	76
Graphe IV.8: la courbe de vulnérabilité (séisme Boumerdes 2003)	76
Graphe IV.9: la courbe d'ensemble de l'Algérie	77
Graphe IV.10: la courbe de vulnérabilité de chaque séisme	78

LISTE DES PHOTOS

Photo I.1:bâtiment effondre en mille-feuille [24]	24
Photo I.2 : effondrements des murs (empilements de pierres sans liant) [24]	25
Photo I 3:les planchers de faible intégrité (poutres en tronc d'arbre avec des branches) [24]	25
Photo I.4:la résistance des arcs de faible portée [24]	25
Photo I.5, I.6: effondrements des pièces (murs sont constitués à l'origine de moellons) [24]	26
Photo I.7 : effondrement (les angles des ouvrages en maçonnerie très vulnérables) [24]	27
Photo I.8: effondrement (murs de 40 à 60 cm d'épaisseur à l'origine moellons, charpente en bois massif et couverture lourde en tuile) [24]	27
Photo I.9: effondrement (le poids important de l'ensemble de la structure) [24]	28
Photo III.1 : Fissuration et ruine des murs de contreventement sollicités dans leur plan[1]	60
Photos III 2, III.3 : des bâtiments en maçonnerie briques rouges et de voiles en pierre (manque de chaînage) [44]	61

LISTE DES ABREVIATIONS

As	Asymétrie en plan
ATC	Conseil de Technologie Appliquée.
BSH	Basic structural hazard (Cote structurale de base)
CGS	Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique
Cm	Chaînage des murs
CNB	Code national du bâtiment du Canada
CNR	Conseil national de recherche de l'Italie
CTC	Contrôle Technique de la Construction
D	Degré de dommage
DPM	Matrice de Dommage Probable
EMS	Echelle Macrosismique Européenne
ENS	Elément Non Structural
Es	Elément secondaire
FaMIVE	Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation
FEMA	Federal Emergency Management Agency.
GNDT	Groupe national de défense contre les séisme
GPS	Global Position System
HAZUS	Hazards US
Ié	Irrégularité en élévation
INS	Indice Non Structural
IPS	priorité sismique
IS	Indice Structural
M0	Magnitude
Mb	Magnitude des ondes de volume

M_L	Magnitude local
MMI	Échelle d'intensité Mercali modifiée
MNA	maçonnerie non armé
M_s	Magnitude des ondes de surface
MSK	Échelle de magnitude sismique Mededev, Sponheuer et Karnik
M_w	la magnitude du moment sismique
NIBS	National Institute of Building Science
PGA	Peak Ground Acceleration
Q_c	Qualité du contreventement
R_f	Redondance des files
RPA	Règles Parasismique Algérienne
S_o	Condition de sol
SLR	Satellite Laser Ranging
μ_d, d	Dommage moyen
V ou (I_v)	Indice de vulnérabilité
V₀	vulnérabilité de base,
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
V_m	Vétusté des matériaux
V^{min}, V^{max}	valeurs limites de l'indice de vulnérabilité
V⁻, V⁺	valeurs probables de l'indice de vulnérabilité
ΔV_f	paramètre de l'indice de vulnérabilité qui dépend de la qualité et de la quantité
ΔV_m	paramètre de l'indice de vulnérabilité qui dépend de la région étudiée
ΔV_r	paramètre de l'indice de vulnérabilité géométrique
W_i	Poids des paramètres structuraux

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Partout dans le monde, on constate, depuis quelques décennies, une augmentation sensible de pertes matérielles, économiques et humaines à la suite de séismes. Cette situation met en évidence la vulnérabilité de nombreuses régions et est accentuée par une densité croissante de la population dans les zones urbaines exposées au danger sismique. La préoccupation des autorités pour la gestion du risque lié aux séismes est donc justifiée.

De nos jours, malgré une sismicité modérée de l'Algérie, les grandes villes comme Tipaza Alger, Beni Ourtilane et Boumerdes sont soumises à des contraintes particulières qui augmentent potentiellement ce risque. La forte concentration d'anciens bâtiments construits avant l'application de normes parasismiques et la conservation du patrimoine immobilier de ces sites passe obligatoirement par l'évaluation de la vulnérabilité sismique.

La vulnérabilité sismique exprime et mesure le niveau de dommage et de conséquences prévisibles d'un séisme sur des infrastructures et peut se définir comme la capacité d'une structure à résister à une sollicitation sismique donnée. Cette mesure dépend ainsi des caractéristiques structurales et des déficiences qui leur sont associées. Dans le cadre de l'élaboration de plans stratégiques de prévention, l'analyse de vulnérabilité a pour but de développer la connaissance du bâti existant dans une région.

La recherche sur la vulnérabilité sismique de structures traditionnelles en maçonnerie (pierre et/ou brique) est relativement importante en Algérie. On peut considérer qu'il y a deux grandes méthodes pour l'évaluer [42] :

- Les études statistiques basées sur les dommages observés lors de séismes passés et qui permettent d'obtenir des matrices de dommages probables associées à une classe de bâtiment. Ces matrices servent ensuite à développer des fonctions de vulnérabilité donnant pour un type de bâtiment la probabilité qu'un certain degré d'endommagement survienne en fonction de l'intensité d'un séisme. La valeur des résultats est essentiellement probabiliste.
- Les simulations par modèles numériques ou analytiques permettant d'obtenir la réponse d'une structure à un ou plusieurs scénarios de séismes. Les résultats sont généralement déterministes et valables pour un bâtiment en particulier.

Donc le choix de la méthode pour l'évaluation dépendra de la qualité et de la quantité de données disponibles et de l'objectif visé, soit obtenir la vulnérabilité sismique d'un bâtiment unique ou d'un ensemble de bâtiment.

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments a montré que l'analyse est possible en utilisant des méthodes simples et rapides adapte mieux a notre étude. Parmi ces structures, anciennes constructions et le patrimoine bâti sont considérées comme les plus à risque et ceci pour des évènements sismiques de faible intensité. Cette vulnérabilité est liée principalement à leur conception architecturale et à leurs éléments constitutifs tels : 1) la géométrie (volume important, plan au sol, etc.), 2) l'influence de ces édifices sur l'environnement adjacent au bâtiment, 3) l'hétérogénéité des matériaux et 4) la qualité et le type du système résistant.

En conséquence, l'étude de la vulnérabilité sismique de ces constructions s'avère nécessaire et constitue, donc, une étape primordiale pour la réduction des pertes dues aux séismes dans les différentes villes de territoire Algérien. Cette vulnérabilité peut être réduite si des mesures préventives sont prises.

Afin d'effectuer ce travail, nous avons décomposé ce mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état des connaissances sur les séismes et la sismologie. Un historique des phénomènes sismiques qui ont frappé l'Algérie est présentée, suivi d'une revue des dommages qu'ont subis les vieux bâtis.

L'information de base de cette recherche est complétée par la revue de la littérature du chapitre II qui concerne les méthodes expérimentales d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Ces méthodes proviennent principalement d'Europe, notamment de l'Italie.

Le chapitre III présente l'inventaire réalisé en Algérie et la caractérisation globale des bâtiments. Nous présentons l'information relative à l'analyse structurale des bâtiments : la géométrie, l'agencement des composantes structuraux non structuraux et les caractéristiques des matériaux.

Au chapitre IV, nous proposons une méthode rapide d'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment avec le tracé de courbes de vulnérabilité. La méthode s'inspire du mode de pointage du Groupe national de défense contre les séismes de l'Italie (GNDT).

Nous finirons par une conclusion générale qui résume l'essentiel de notre travail

CHAPITRE I

CHAPITRE I

SÉISMES ET SISMOLOGIE – NOTIONS DE BASE

Les statistiques sur les séismes qui ont secoué la planète montrent à quel point leurs effets peuvent être dévastateurs tant du point de vue humain qu'économique. Ces pertes étant principalement liées aux dommages enregistrés sur les structures, la gestion du risque passe par la compréhension du mécanisme des séismes, des phénomènes spécifiques à la région étudiée et de leurs effets sur les structures. Ce chapitre présente une revue de la littérature organisée autour des notions de base. Il s'agit de comprendre la particularité sismique à travers le territoire Algérien et d'analyser l'information disponible.

I.1 Notion de séisme

Le Larousse définit le séisme comme une « secousse brusque d'une portion de l'écorce terrestre, à partir d'un épicycle et à une certaine profondeur » [37]. Ce dernier paramètre permet de distinguer les séismes puisqu'il est reconnu que leur origine ainsi que les conditions locales ou effets de site modifieront de manière importante la propagation des ondes et les effets du séisme.

Les séismes se produisent généralement au mouvement (rupture, glissement ou frottement, collision) de plaques tectoniques façonnant et remodelant ainsi le relief de la terre. Il peut s'agir également, comme c'est le cas de l'Algérie [20], de mouvements entrent en collision. Cependant, si le mécanisme du séisme est aujourd'hui mieux connu, sa prédiction est peu fiable et les connaissances ne permettent pas non plus de les éviter.

I.2 Mesure des séismes

C'est en 1925 que le premier tremblement de terre a été mesuré à l'aide d'instruments, donnant ainsi à la science des paramètres exacts, bases d'études approfondies des séismes et de leurs effets sur les infrastructures de génie civil. Deux niveaux de mesure sont généralement utilisés : la magnitude et l'intensité.

I.2.1 Magnitude

La magnitude d'un séisme est une valeur intrinsèque du phénomène qui ne dépend pas du point d'observation. C'est en 1935, que l'Américain Charles Francis Richter introduit une méthode qui permet d'estimer l'énergie libérée au foyer d'un tremblement de terre. On parle alors, de l'échelle de Richter qui est utilisée partout dans le monde.

C'est une échelle logarithmique calculée à partir de l'amplitude des enregistrements de sismographes. Elle peut être négative ou positive et, en principe, a une limite supérieure de 10. Lorsque la magnitude d'un séisme varie d'un facteur 1, l'amplitude du mouvement varie d'un facteur 10. Par exemple, un séisme de magnitude 7 est dix fois plus fort qu'un séisme de magnitude 6 et mille fois plus fort qu'un séisme de magnitude 4.

Il existe d'autres échelles selon que l'on veuille mesurer des séismes locaux ou éloignés. Elles prennent en compte l'instrumentation utilisée et les modifications engendrées par les effets de site. Par exemple, la magnitude du moment sismique, M_w , est principalement utilisée par les sismologues pour mesurer les événements de forte magnitude puisqu'elle ne comporte pas de limite supérieure. Le moment sismique M_0 « quantifie l'énergie mécanique rayonnée par la source sismique » [39]. Selon la provenance des ondes sismiques, on utilise également les échelles mesurant la magnitude des ondes de surface M_S et des ondes de volume M_b ; ces dernières entraîneront les plus importants dommages aux structures.

I.2.2 Intensité

L'intensité sismique mesure la force d'un tremblement de terre et son effet sur une région donnée, les objets, les êtres humains et les infrastructures. Elle peut décrire la distribution probable des dommages et est dans ce cas appelée intensité macrosismique. Avec l'intensité comme paramètre d'entrée, il est possible de regrouper les structures caractérisées par un comportement sismique similaire et de définir des matrices de dommages appropriées.

Selon les spécificités des régions, plusieurs échelles de mesure de l'intensité ont été développées : l'échelle Mercalli modifiée (MMI) qui compte douze niveaux est utilisée depuis 1960 et l'échelle macrosismique européenne (EMS-98), de six classes décroissantes de vulnérabilité (A à F) est utilisée en Europe. Cette dernière se présente comme un standard pour les études d'évaluation du risque ou de la vulnérabilité sismique. On compte aussi les échelles Rossi-Forel et Mededev, Sponheuer et Karnik (MSK).

Il convient de noter qu'à partir du degré d'intensité (V), les trois échelles, MSK, MMI et EMS sont équivalentes [42]. La comparaison entre les données et éventuellement l'adaptation des modèles est alors possible.

I.3 Aléa sismique

L'aléa représente, en terme de probabilité, la manifestation d'un tremblement de terre ayant une période de retour et une magnitude donnée à l'échelle régionale ou locale. En d'autres termes, l'aléa sismique représente la probabilité qu'une valeur maximale d'accélération au sol survienne sur une période de référence donné [37].

Le glossaire du NORSAR définit les termes « seismic or earthquake hazard » [42] par tout phénomène physique associé à un séisme pouvant produire des effets non désirés sur les activités humaines. Ces phénomènes incluent les failles de surface, le tremblement de terre, les glissements de terrains, la liquéfaction, la déformation tectonique, le tsunami, la seiche et leurs effets sur l'utilisation du sol, des structures et des systèmes économiques. Cette définition inclut l'aléa sismique régional, ou la macrosismicité, et les effets de site ou microsismicité.

Les cartes d'aléa sismique sont les outils de référence pour l'élaboration des cartes de macrozonage et microzonage dans le cadre d'un bon aménagement du territoire (**Figure I.1**) ainsi que pour l'élaboration des règles de construction adéquates

I.5 Aperçu historique

La première fois où l'homme a essayé de trouver une explication rationnelle au phénomène des tremblements de terre remonte à l'époque grecque où, plusieurs séismes et volcans ont eu lieu dans la région de la mer Egée et de la Méditerranée. En effet, des philosophes tels Strabo et Aristote constataient par exemple que les séismes se produisaient le plus souvent le long des côtes qu'à l'intérieur des continents. Par ailleurs, la première idée sur la dérive des continents revient au chercheur Américain F.B. Taylor qui en 1910 l'annonça en se basant sur la configuration des chaînes montagneuses de l'Eurasie [15]. Cependant c'est Alfred Wegner que l'histoire retiendra comme père de la théorie de la dérive des continents car il l'a proposée clairement avec de nombreux arguments en 1912.

En effet, pour ce géomorphologiste allemand, les continents à l'origine constituaient un seul et énorme bloc qu'il appela la PANCEE et un seul océan appelé PANTHALASSA. Cet énorme continent avait dérivé depuis l'ère Mésozoïque à nos jours, et ses fragments constitutifs seraient progressivement détachés les uns des autres. L'Amérique du Nord et l'Europe, ces deux derniers restant soudés à leur extrémité Nord jusqu'au Quaternaire.

Cette théorie a été étayée par un grand nombre d'arguments qui sont d'ordres morphologiques, structuraux, paléo climatiques, paléontologiques et paléo magnétique. Néanmoins, elle pêche par le manque d'un moteur de ce déplacement des continents.

Il faudra attendre plus de 50 ans pour que le géophysicien H. HESS de l'université de Princeton, propose en 1962 une idée nouvelle qui bouleversera les sciences de la terre; c'est l'hypothèse de l'expansion des océans. Wilson, 1965, de l'Université de Toronto, fut frappé par le fait que les mouvements de la croûte terrestre se concentraient essentiellement autour de trois types de structures caractérisées par une intense activité sismique et volcanique, il s'agit des chaînes de montagnes, des RMO et des failles transformantes qui sont caractérisées par un grand déplacement horizontal. L'hypothèse de Hess a permis enfin d'arriver à un schéma cohérent de la structure des océans, et surtout de trouver le moteur de la dérive des continents. Ainsi est née la théorie de la tectonique des plaques. En effet, en se basant sur les travaux cités précédemment, des jeunes chercheurs tels que Morgan, McKenzie et le Pichon entre autres développèrent la théorie de la tectonique des plaques lithosphériques dont l'épaisseur varie de 30 à 140km qui sont en mouvement continu.

Les plaques lithosphériques qui peuvent être composées de croûte océanique seule ou de la croûte océanique et continentale sont en mouvement les unes par rapport aux autres selon trois types de frontières.

- (I) Limites de convergences le long des chaînes de montagnes et zones de subduction ;
- (II) Limites de divergence le long des rides médioocéaniques ;
- (III) Limites de coulissage le long des failles transformantes.

Les principales plaques tectoniques sont les suivantes : Afrique, Eurasie, Pacifique, Amérique, Indes et Antarctique.

La théorie de la tectonique des plaques met en relief l'importance de la géologie dans la compréhension des tremblements. Ainsi, est née la tectonique active ou la géologie des tremblements de terre.

I.5.1 Situation de l'Algérie par rapport aux mouvements des plaques.

La chaîne tellienne (Atlas tellien) constitue le segment orogénique périméditerranéen de la ceinture active alpine et himalayenne qui s'étend du Sud-Ouest asiatique à l'Océan Atlantique. Dans la région méditerranéenne, cette ceinture est caractérisée par la convergence des plaques tectoniques africaine et eurasiennne [32].

Les travaux récents basés sur des analyses des mécanismes au foyer des séismes forts, sur les études néotectoniques. Ainsi que des méthodes très récentes basées sur des techniques spatiales telles que le GPS (Global Position System), VLBI (Very Long Baseline Interferometry) et le SLR (Satellite Laser Ranging), cette dernière montre essentiellement les déplacements globaux et non les déplacent à court terme au niveau des frontières des plaques, qui permettent des mesures de plus en plus précises sur les déplacements des plaques tectoniques, montrent que la direction du raccourcissement est NNW-SSE. Le rapprochement entre les Plaques africaine et eurasiennne est d'environ 4-6mm/an.

Ce contexte géodynamique régional a engendré dans le Nord de l'Algérie, sur environ 200 à 300 Km de large, un ensemble de structures tectoniques (plis, failles) de direction générale perpendiculaire à la direction de convergence des plaques tectoniques ainsi qu'une activité sismique relativement élevée. Cette sismicité est superficielle d'où son caractère souvent destructeur [15].

I.5.2 Conditions sismo-tectoniques régionales

La répartition des zones sismiques de l'Algérie a été préparée sur la base de l'échelle Marcalli modifiée (1931) notons que les zones d'activité sismiques sont concentrées au Nord et au Nord-Est de l'Algérie, le long de la chaîne côtière qui s'étend entre Oran et Annaba, et dans la région du Hodna et des Aurès. Une troisième zone d'activité se trouve dans l'Atlas passe par Gabes en Tunisie, Biskra et Laghouat en Algérie et Agadir en Maroc.

I.5.3 Classification des zones sismiques en Algérie

Le règlement parasismique Algérien [18], divise le territoire national en cinq (05) zones de sismicité croissante, définies comme suite :

Zone 0 : sismicité négligeable.

Zone I : sismicité faible.

Zone (II a – II b) : sismicité moyenne.

Zone III : sismicité élevée.

La carte des zones sismique de l'Algérie, et le zonage globale des différents Wilaya, représenté sur la (**Figure I.1**).

I.6 Historique de la sismicité en Algérie

L'activité sismique en Algérie est due principalement à la nature géologique de la région maghrébine et à ses caractéristiques tectoniques à la frontière des plaques africaines et eurasiennes, en mouvement compressif permanent. Les investigations de paléo sismicité effectuées ont montré l'existence de plusieurs séismes importants avec rupture en surface ($M > 6.5$) ayant affecté la région depuis au moins 600 ans environ [40].

Le dernier tremblement de terre majeur en Algérie date du 10 octobre 1980. De magnitude 7.1, celui-ci avait frappé la région d'El Asnam. La ville avait été sévèrement touchée et comptait près de 5000 morts. En 1954 la même ville avait été meurtrie par un séisme de magnitude 6.4 qui avait fait plus de 1000 morts.

D'autre part, la région Ouest d'Alger jusqu'à Cherchell a connu de nombreux séismes destructeurs par le passé : en 1365 (importants dégâts à Alger), en 1716 d'intensité épiscopale X (MMI) (destructions de la plupart des maisons traditionnelles d'Alger – 20 000 morts). Aux alentours immédiats, on peut citer les séismes de Cherchell (1735 et 1847), Hadjout (1756), Koléa (1802) et Mitidja (1867). A 80 km au Sud-Est d'Alger, le séisme de 1910, a atteint une magnitude M_s de 6.4.

Enfin, plus récemment, plusieurs séismes de magnitude comprise entre 5 et 6 se sont produits à l'Ouest d'Alger dans les régions de Cherchell, Tipaza et Medea en 1988, 1989 (70 morts-150 000 sans abris), 1990 et 1996. Tous ces séismes ont été largement ressentis à Alger [34].

A l'Est d'Alger, les cartes de sismicité historique et instrumentale montrent une zone de faible sismicité s'étendant au delà de Tizi Ouzou, à toute la Kabylie [11], [3]. C'est dans cette région qu'est localisé le séisme du 21 Mai (**Figure I.2**).

Ce séisme a été ressenti jusque dans les îles des Baléares, à 300 km de l'épicentre. Le choc principal a été suivi de plus de 200 répliques, la plus forte atteignant une magnitude de 5.2.

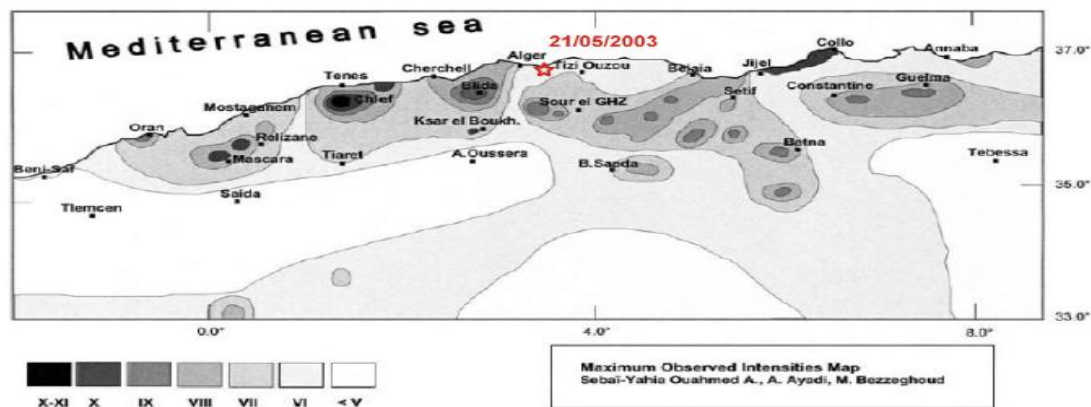


Figure I.2 : Intensités maximales observées en Algérie du Nord [8].

I.7 Les séismes en Algérie

Le plus puissant tremblement de terre de l'histoire enregistré en Algérie est celui qui se produisit à El Asnam (Chlef) le 10 octobre 1980. Sa magnitude a atteint 7.3 sur l'échelle de Richter et a fait 2600 victimes. Les tremblements de terre les plus importants en Algérie des 100 dernières années sont donnés dans le **tableau I.1**, [34].

Tableau I.1. Principaux séismes d'Algérie (1365-2001) [34]

Lieu	Date	I/ M	M	Victimes
Alger	03.01.1365	X		Plusieurs
Alger	10.03.1673			
Mitidja	03.02.1716	X		20 000
Oran	09.10.1790	X		2000
Blida	02.03.1825	X		7000
Djidjelli	22.08.1856	X		-
Aures	16.11.1869	IX		30
Gouraya	15.01.1891	X		38
Orleansville	09.09.1954	X	6.7	1243
El Asnam	10.10.1980	X	7.3	2633
Constantine	27.10.1985	VIII	5.9	10
Tipaza	29.10.1989	VIII	6.0	22
Mascara	18.08.1994	VII	5.7	175
Alger	04.09.1996	VII	5.7	
Temouchent	22.12.1999	VII	5.7	25
B.Ouartilane	10.11.2000	VII	5.4	04
Boumerdes-Alger	21.05.2003	X	6.8	2300

I.7.1 Le séisme de Tipaza

L'évaluation du risque sismique s'est faite sur la base des dommages recensés lors du séisme de Chenoua-Tipaza qui a eu lieu le 29 Octobre 1989 à 20h 9min 24s (heure locale). La magnitude de ce séisme a été de $M_s = 6.0$, l'intensité sismique maximale a été évaluée à VIII (MSK) à Nador. L'épicentre du choc principal est situé aux coordonnées géographiques suivante : latitude: $36^{\circ}.60'$ N, longitude: $02^{\circ}.50'$ E.

Le foyer se trouve à une profondeur de 10 Km et la zone épiscopentrale s'étend de Cherchell à Tipaza en passant par Nador et Hadjout [16]. La secousse a été ressentie de Tenes à l'Ouest jusqu'à Tizi-Ouzou à l'Est, Theniet El Had et Ksar El Boukhari au Sud et aux Iles Baléares en Espagne avec une intensité de III (MSK).

Le choc principal suivi 12 mn plus tard par un second choc d'environ la même intensité a causé la mort de 35 personnes, blessant 700 autres et faisant approximativement 50 000 sinistrés.

Ce séisme a également endommagé et ou détruit environ 75 000 habitations et 500 bâtiments publics [9]. les bâtiments endommagés sont répartis à travers sept (7) communes de la Wilaya de Tipaza (Cherchell, Nador-Sidi Moussa, Sidi Amar, Hadjout-Meured, Tipaza, Sidi Rached-Bourkika, दौर de Koléa, Chéraga-Zéralda).

La commune de Chenoua dans la wilaya de Tipaza est située sur le littoral Ouest à 60 km de la capitale Alger. Le Sahel ou Littoral qui s'étend d'Alger jusqu'à Cherchell sur une distance de 100 Km est une bande étroite comprise entre la mer Méditerranée et la plaine de la Mitidja. Cette région présente un aspect plus ou moins accidenté avec des altitudes ne dépassant pas 907m au mont de Chenoua, 88m dans la ville de Tipaza et 407m sur les hauteurs de Bouzaréah à Alger.

1.7.2 Le séisme de Béni-Ourtilane du 10 novembre 2000

Le vendredi 10 novembre 2000 à 19h10mn (GMT), un séisme de magnitude 5.7 sur l'échelle Richter frappa la région de Béni-Ourtilane. Il a fait 2 morts, 50 blessés et a causé des dommages importants à plus de 3000 habitations. Il a provoqué une grande frayeur chez la population locale qui a dormi dehors pendant plusieurs jours. Le choc principal a été précédée de deux séismes précurseurs et par des répliques pendant plusieurs jours, dont une réplique de magnitude 4.5 le 16 novembre. L'épicentre macrosismique est de $36.71^{\circ}N$, $4.69^{\circ}E$ (EMSC) ou $36.434^{\circ}N$, $4.903^{\circ}E$ (USGS).

L'intensité maximale I_0 est de VII (MSK) (figure 1.3). L'étude de ce séisme indique qu'il a été provoqué par la réactivation de la faille de Tachaouaft, longue de 20 km, qui est avec la faille de Kherrata, les principales sources des séismes dans le secteur des Babors [13].

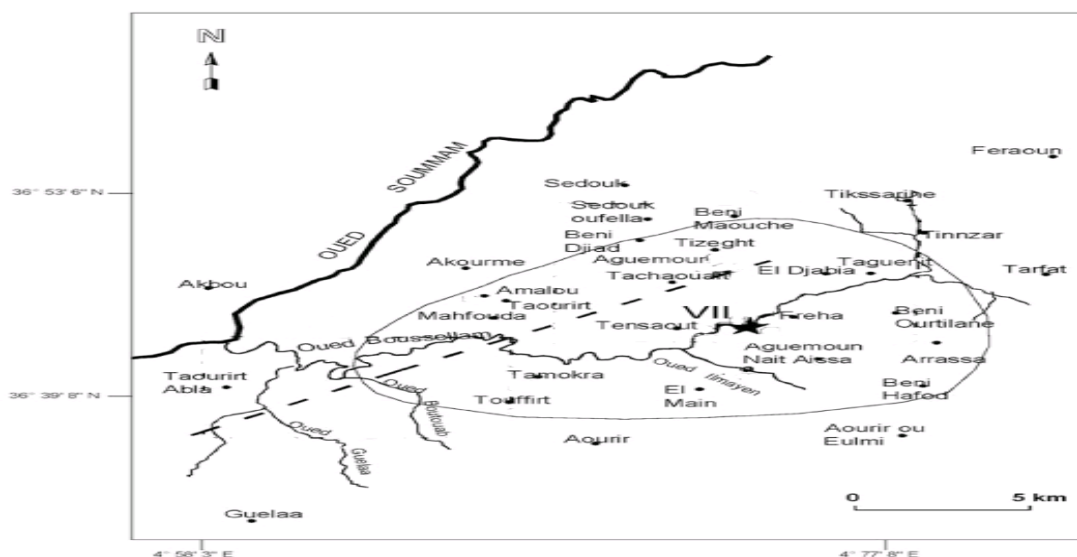


Figure I.3 Carte montrant la surface de maximum intensité lors du séisme du 10 novembre 2000 de Béni-Ourlilane. [13].

I.7.2.1 Faille de Tachouaft (ou Béni-Ourlilane)

La faille de Beni-Ourlilane ou la faille de Tachouaft est la source du séisme qui a frappé la région de Beni-Ourlilane, située au NW à 50 km de la ville de Sétif, le 10-11-2000 ($M_s=5.7$, $I_0=VII$ MSK). Cette faille était citée par Meghraoui (1988), comme une faille néotectonique et responsable de la sismicité de la région, tracée par Coutelle (1979). Le type de cette faille active est inverse d'orientation NE-SW, de pente de 400 vers le Sud-est et de longueur de 20 km (**figure I.4**). [13].

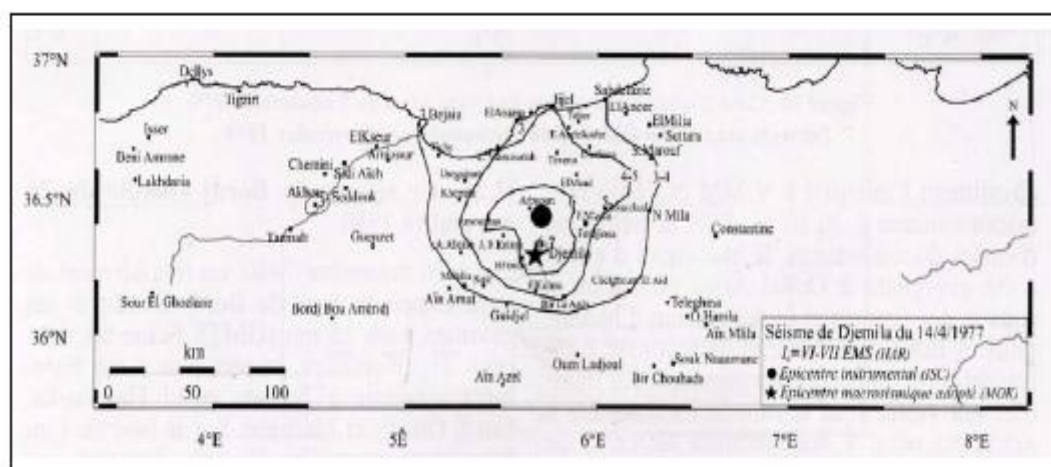


Figure I.4. Carte isoséiste du séisme de Djemila du 14 avril 1977[13]

I.7.3 Le séisme de Boumerdès

Le 21 Mai 2003 à 19h 44mn (heure locale), un fort séisme de magnitude $M_w = 6.8$ sur l'échelle de Richter a frappé les régions de Boumerdès et d'Alger, dans une zone allant principalement de Blida à Dellys, de dimension approximative de 150 km x 80 km (**Voir figure I.5**) [2]. Son épïcentre physique a été situé en mer, en face des villes de Zemmouri et Boumerdès (Coordonnées épïcentrales : 39°91 N, 3°58 E) [4]. C'est un séisme superficiel, dont le foyer se situe à environ 10 km de profondeur.

La zone touchée se caractérise par une population dense, qui a été fortement traumatisée par la secousse principale et les répliques dont la composante verticale était importante. Dans cette partie du territoire national, sont concentrées au moins 90% des installations socio-économiques et politiques du pays, cette position privilégiée fait de cette région une zone urbanisée, très peuplée et vulnérable aux catastrophes naturelles [2].



Figure I.5 : Localisation du séisme principale du 21 MAI 2003[2]

I.7.3.1 Contexte géodynamique

L'Algérie est située sur une limite majeure entre deux plaques tectoniques : la plaque Eurasienne et la plaque Africaine. Le séisme du 21 mai 2003 est lié à un contexte tectonique compressif créé par la remontée Nord-Ouest de la plaque Africaine contre la plaque Eurasienne. D'après le modèle global « Nuvel 1 » [2], la vitesse de raccourcissement entre les deux plaques est estimée entre 5 et 6 mm/an dans la région d'Alger (**Figure I.6**). L'affrontement entre les deux plaques a donné naissance notamment à la chaîne de l'Atlas Tellien. Ce massif forme une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur (**Figure I.7**).

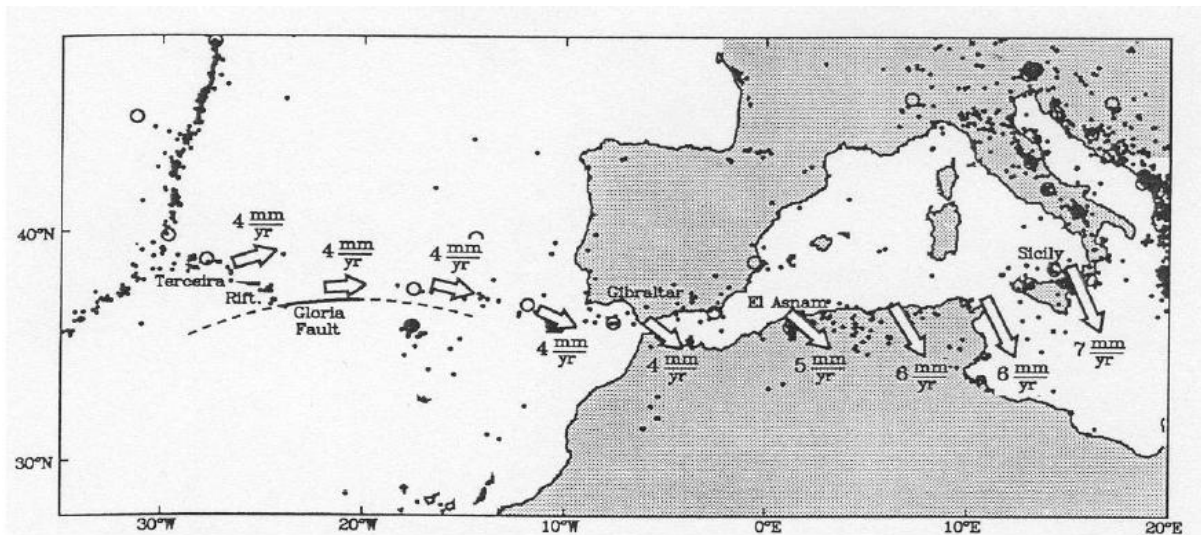


Figure I.6 : Contexte géodynamique de la marge Nord Africaine. Modèle Nuvel 1 [2]

Les cartes sismo-tectoniques disponibles pour l'Algérie du Nord font état de deux types de failles. D'une part des failles décrochantes dont la faille de Thénia (**Figure I.7**) et d'autre part des failles en compression avec des prolongements marins probables. Ainsi les failles bordant la Mitidja et le Sahel se continueraient en mer au large de la côte entre Boumerdès et Dellys [2].

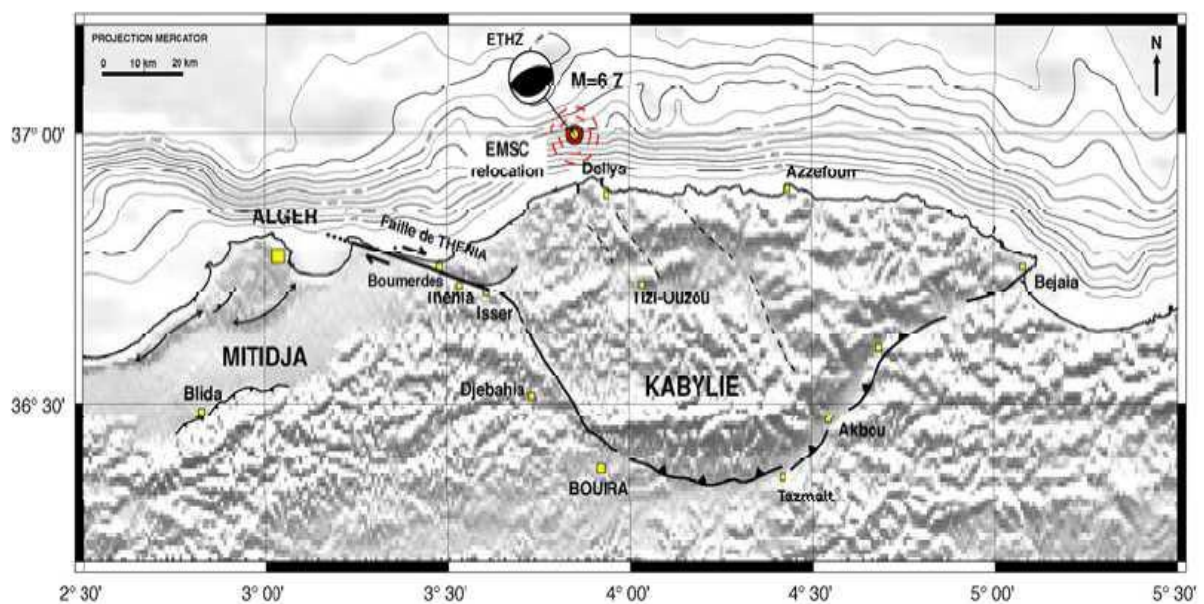


Figure I.7 : Faille de Thénia et localisation du séisme du 21 mai 2003 [2]

I.8. Effets des séismes sur des bâtiments

I.8.1 Dommages provoqués par les séismes

Avant de procéder à la définition de critères de vulnérabilité et de commencer la méthode d'évaluation, la première démarche consiste à prendre connaissance des dommages causés par la venue d'un tremblement de terre. Le retour d'expérience est toujours la première étape avant de commencer une toute étude.

Les photos suivantes vont nous permettre de prendre conscience des zones sensibles vis-à-vis des séismes, de savoir celles qui sont le plus vulnérable. Il faut arriver à l'interprétation de ces dommages. Ceci est le point de départ de notre démarche qui sera l'établissement de critères de vulnérabilité pour la mise en place d'une méthodologie afin de réaliser un classement du bâti existant [24].

Dans chaque ville, certains quartiers ont été fortement touchés tandis que d'autres ont été pratiquement épargnés (effet de site), et dans ces quartiers touchés, certaines constructions se sont bien comportés tandis que d'autres de même type se sont effondrés en mille-feuilles. Il est donc important d'identifier les causes multiples des dommages pour l'avenir (photo I.1)



Photo I.1: bâtiment effondre en mille-feuille [24]

La majorité des bâtiments qui ont été expertisés présentent les typologies :

- constructions anciennes en maçonnerie non armée et non chaînée (notre étude).
- voiles en béton armé.
- portiques en béton armé avec murs de remplissage en maçonnerie généralement de briques.
- Ossature métallique avec murs de remplissage en maçonnerie

I.8.2 Bâtiments d'habitation

I.8.2.1 Type maçonnerie très ancienne sans liant du 18^{ème} siècle

La casbah construite vers 1840 par les Turcs (photo I.2) [24] a énormément souffert, beaucoup de victimes sont à déplorer à cause des effondrements de murs qui ne sont que des empilements de pierres (photo I.6).



**Photo I.2 : effondrements des murs (empilements de pierres [24]
Sans liant)**

Les planchers de faible intégrité sont constitués de poutres en tronc d'arbre avec des branches par-dessus recouvertes de terre sur environ 10 cm d'épaisseur. (photo I 3). Les arcs de faible portée ont mieux résisté que les linteaux droits. (photo I.4) [24]



Photo I 3:les planchers de faible intégrité (poutres en tronc d'arbre avec des branches) [24] **Photo I.4:la résistance des arcs de faible portée[24]**

Les pièces sont généralement petites 3 m x 3m et basse sous plafond environ 2 m, les murs sont constitués à l'origine de moellons de forme arrondie qui sont empilées les unes sur les autres pour former une épaisseur pouvant atteindre quelquefois jusqu'à 60cm sur plusieurs mètres de hauteur. (photo I.5, I.6) [24].

Ce système constructif est particulièrement fragile et ne devrait pas être destiné à des logements d'habitation dans une zone de sismicité II ou III.

Bien que cette casbah représente un témoignage historique important, la vulnérabilité de ce quartier est très élevée et il devrait être évacué de tout logement d'habitation. Malgré les nombreux effondrements et les répliques fréquentes, certains propriétaires occupent encore les lieux.

Les secours ont eu beaucoup de mal à atteindre les victimes car les accès sont étroits et en cas de réplique, les risques sont très élevés. (photos I.5, I.6).



Photo I.5, I.6: effondrements des pièces (murs sont constitués à l'origine de moellons) [24].

I.8.2.2 Type maçonnerie liée au mortier fin 19 ème et début 20 ème siècle

Ces ouvrages étaient réalisés avec des moellons taillés et hourdés avec un mortier de chaux ou à la terre [24].

Les angles des ouvrages en maçonnerie sont très vulnérables et s'effondrent par accumulation de contraintes (photo I.7)



Photo I.7 : effondrement (les angles des ouvrages en maçonnerie très vulnérables) [24].

Beaucoup de constructions datant du début du siècle jusqu'en 1950 ont été détruites (**photo I.8**). Quelques bâtiments en rez -de chaussée sont très endommagés mais encore debout alors que la plupart des R+1 se sont totalement effondrés [24].

Les murs de 40 à 60 cm d'épaisseur sont en maçonnerie à base de moellons bâtis avec un mortier de chaux très friable. La charpente était généralement en bois massif avec une couverture lourde en tuile mécanique de terre cuite.



Photo I.8: effondrement (murs de 40 à 60 cm d'épaisseur à l'origine moellons, charpente en bois massif et couverture lourde en tuile) [24].

Beaucoup de constructions en maçonnerie se sont aussi effondrées, les charpentes en bois en mauvais état n'ont pas résistées aux secousses, ce mauvais état était principalement du à des dégradations d'insectes xylophages

Quelques constructions datant des années 1950 sont complètement détruites [24]. Elles étaient réalisées à partir de poteau en béton avec un remplissage à base de blocs pleins en béton très résistant mais très lourd peu solidarisé par le mortier de pose.

Le poids important de l'ensemble de la structure a joué un rôle destructeur dans leur comportement.



Photo I.9: effondrement (le poids important de l'ensemble de la structure) [24].

I.9 Synthèse de chapitre et prochaines étapes

L'information recueillie à cette première étape d'analyse succincte, nous permet de conclure ce qui suit pour les différentes villes de l'Algérie :

- les régions épacentrales sont caractérisées par des secousses de haute fréquence, et les bâtiments de faible période peuvent y subir des dommages importants;

Les constructions en maçonnerie ne conviennent pas en zone sismique, elles ont engendré beaucoup de victimes notamment dans les vieux bâtis.

- Les ouvrages en maçonnerie sont à proscrire notamment ceux ultra-vulnérables de type "casbah", quant aux autres ils pourraient être renforcés mais le cout des travaux pourrait être dissuasif.

- Il faudrait éviter de créer des entailles dans les bâtiments qui conduisent à une vulnérabilité accrue.

Afin d'évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments, il faudra :

- analyser les méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité sismique, au chapitre II, le but étant de les comparer et de retenir celles qui permettent d'évaluer de manière sécuritaire et rapide la performance des structures et des éléments de structures;

- définir une typologie propre en Algérie, caractériser les structures et identifier les paramètres géométriques et qualitatifs qui influencent le comportement des structures et ce, en accord avec les méthodes d'évaluation qui seront choisies, l'étape préliminaire étant la réalisation d'un inventaire des bâtiments.

CHAPITRE II

CHAPITRE II

PRINCIPES DE L'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS EN MAÇONNERIE

La vulnérabilité sismique, comme définie à l'introduction, traduit la performance probable d'un bâtiment ou d'une famille de structures lorsque soumis à des secousses. Différentes méthodes ont été développées pour mesurer cette vulnérabilité. Elles sont issues pour la plupart de l'observation des dommages résultant des séismes sur les structures et permettent des analyses à des échelles distinctes comme illustré à **la Figure II.1**. Selon l'applicabilité de la méthode et le nombre des bâtiments à analyser, la précision de l'analyse augmentera avec les moyens mis en œuvre.

augmentation des moyens mis en oeuvre →					
Echelle d'analyse	Plusieurs centaines de bâtiments		Quelques bâtiments		Bâtiments individuels
Méthodes	Vulnérabilité EMS98	Indice de Vulnérabilité	Avis d'experts	Calculs analytiques simples	Analyse numérique – modélisation –
Applicabilité	Ville – Commune – Quartier – Parcs immobiliers – Bâtiments Stratégiques				
Moyens humains	Sans formations - Etudiants - Techniciens - Ingénieurs - Ingénieurs confirmés				

Figure II.1 : Les différentes échelles d'analyse et leur applicabilité.
Tirée de Combescure, Gueguen et Lebrun (2005, p.10) [22]

Une revue de ces méthodes appliquées aux édifices en maçonnerie est l'objet de ce chapitre; les méthodes sont abordées de manière générale. L'accent sera mis sur :

- des analyses globales issues directement des données statistiques (nombre élevé de bâtiments). L'intérêt de ces modèles dans le contexte d'étude, est lié au fait que la vulnérabilité sismique est considérée d'une manière globale et reflète celle d'une famille de bâtiments de régions différentes;

Cette revue bibliographique est menée afin de faire ressortir les points communs entre les méthodes, ceci en prévision d'une adaptation cohérente à notre étude. L'information provient en grande partie de la documentation européenne, canadiennes et américaines, de nombreuses références, et des cites d'internes

Il est important de souligner qu'à l'application des méthodes se révèlent hybrides, c'est-à-dire issues de la combinaison des analyses pures décrites à **la Figure II.1**.

II.1 Méthode d'évaluation basée sur l'échelle macrosismique européenne (EMS- 98)

Initialement développée pour qualifier l'intensité d'un séisme, l'échelle macrosismique européenne (EMS) sert aussi à l'évaluation et à la prédiction des dommages en cas de séisme éventuel. L'échelle EMS-98 associe 15 types de structures, dont sept en maçonnerie, aux classes de vulnérabilité A à E, A étant la plus vulnérable. Le type de structure est défini par la qualité du matériau et du système de contreventement qui ont un effet sur la réponse du bâtiment (**Voir Figure II.2**).

Les statistiques autour des dommages enregistrés sur les structures montrent, en effet, que le niveau de dommage est contrôlé par les caractéristiques du système résistant (type d'éléments verticaux et horizontaux). Par ailleurs, l'introduction de cinq niveaux de dommage (**Voir annexe A**) facilite la définition de l'intensité sismique et de la probabilité qu'a une structure de subir ce niveau de dommage [22]. Les résultats sont présentés sous forme de matrice de dommages probables (DPM) ou de courbes de vulnérabilité où le dommage est associé à la probabilité de dépassement.

L'utilisation de l'échelle EMS-98 permet donc, de répartir un ensemble de structures selon des classes de vulnérabilité établies et d'estimer les dommages anticipés par typologie de structures et ceci, pour une intensité donnée. De cette analyse, découlent des modèles de vulnérabilité macrosismique dans lesquels la variable d'entrée est l'intensité liée à d'autres paramètres typologiques du bâti (**Voir annexe B**). Bien qu'établie pour les structures européennes, on peut dire que cette méthode d'analyse s'adapte bien aux notre structures anciennes en leur attribuant des cotes (indices) structurales propres aux typologies.

On constate que cette méthode est certes très sommaire mais, dans le cas où une typologie détaillée de la zone d'étude est disponible avec sa répartition spatiale, 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'EMS 98 acceptée comme un standard en Europe met aussi à disposition une typologie générique pour la plupart des constructions que l'on trouve en Europe et en particulier en Algérie.

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

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

Figure II.2: Typologie EMS-98 associées à une classe de vulnérabilité
 Tirée de Grunthal, Musson et Stucchi (1998) [33]

II.1.1 Méthode RISK-UE

La méthode utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments courants a donc été développée par l'équipe de l'université de Gènes, partenaire du projet. Elle 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.

Dans RISK-UE [1], la méthode de niveau 2 a également été développée basée sur l'analyse de la capacité d'une structure à dissiper de l'énergie. Elle ne sera pas traitée dans ce document, cette méthode nécessitant des moyens et des compétences plus larges pour une analyse à grande échelle.

En se basant sur l'échelle EMS-98, la méthodologie RISK-UE de niveau 1 très proche de la méthode du GNDT (à laquelle participa activement l'équipe de Gènes). Cette théorie [28] [33] est généralement utilisée pour modéliser l'incertitude et la quantifier de manière cognitive. Dans ce cas, une fonction de vulnérabilité, dont les valeurs appartiennent à l'ensemble $\{0, 1\}$, est définie pour chacune des typologies de l'EMS-98. Un indice de vulnérabilité de base, V_0 , est établi avec une fourchette de valeurs probables, des bornes V^- , V^+ et les valeurs limites V^{\min} , V^{\max} tel que montré au **Tableau II.1** donnant les valeurs trouvées pour les structures en maçonnerie.

Tableau II.1 Indices de vulnérabilité pour la maçonnerie [28]

Typologies (tirée de la méthode EMS-98)		Indices de vulnérabilité				
		V^{\min}	V^-	V_0	V^+	V^{\max}
M1	Moellon brut, pierre tout venant	0,62	0,81	0,87	0,98	1,02
M2	Brique crue (adobe)	0,62	0,69	0,84	0,98	1,02
M3	Pierre brute	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M4	Pierre massive	0,30	0,49	0,62	0,79	0,86
M5	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M6	Non renforcée, avec des planchers en béton armé	0,30	0,49	0,62	0,79	0,86
M7	Renforcée ou chaînée	0,14	0,33	0,45	0,63	0,70

Les indices V^- , V^+ sont fonction de la disponibilité d'une base de données sur les dommages probables spécifiques à la région étudiée ou sur sa vulnérabilité selon les équations suivantes où ΔV_f est un paramètre qui dépend de la qualité et de la quantité de données disponibles :

$$V^- = V_0 - \frac{3}{2} \Delta V_f \quad (2.1)$$

$$V^+ = V_0 + \frac{3}{2} \Delta V_f \quad (2.2)$$

ΔV_f est pris égal à **0,08** lorsque les données ne sont pas disponibles et à **0,04** dans le cas contraire. Le fuseau des valeurs possibles de ces indices se rapprochera des valeurs limites et permet de prendre en considération l'incertitude liée au manque de données.

L'indice final V sera affiné à l'aide de facteurs reliés au comportement sismique : les paramètres géométriques, par exemple ΔV_r et à la région étudiée ΔV_m , selon l'équation 2.3.

$$V = V_0 + \Delta V_r + \Delta V_m \quad (2.3)$$

A partir de cet indice, des courbes de vulnérabilité ont été proposées par l'université de Gènes, issues comme pour les méthodes précédentes d'analyses statistiques des dommages constatés lors de séismes italiens. Le taux de dommage moyen μ_D s'exprime donc par la relation (2.4) suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \frac{I + 6.25IV - 13.1}{2.3} \right] \quad (2.4)$$

II.1.2 La méthode VULNERALP

Le concept de la méthode VUNERALP est le même que celui du GNDT. Elle propose plusieurs niveaux d'analyse, depuis un niveau très basic 1.0 permettant de définir pour un grand nombre de construction celles qui présentent la plus forte vulnérabilité, jusqu'à un niveau élaboré 2.0 proche du niveau 2 du GNDT. Dans tous les cas, la recherche d'indicateurs structuraux est la base de l'analyse.

Le travail de synthèse réalisé par le groupe de travail AFPS [22] révèle que quelque soit la méthode employée (RiskUE, ATC, GNDT, Canadienne etc...), certains critères comme le matériau de construction, l'irrégularité en plan ou en élévation de la structure sont récurrents. D'autres nécessitent des observations fines de la structure, une connaissance parfaite des modes de construction, voir même d'essais. On peut rappeler que pour l'élaboration de la méthode GNDT, les italiens ont bénéficié d'endommagements sévères pour accéder à des informations spécifiques ainsi révélées, inaccessibles sinon.

L'idée de la méthode VULNERALP est de réduire les erreurs d'évaluation et d'ignorer les paramètres difficilement accessibles. Cependant, l'évaluation sera d'autant plus précise que le niveau de l'analyse sera élaboré. Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité sera d'autant plus fiable que les paramètres structuraux seront mieux définis.

Ces méthodes étant basées sur des distributions statistiques corrélant le niveau de dommages aux dispositions constructives des structures endommagées, il convient de donner l'intervalle de confiance pour chaque niveau.

II.1.2.1 La méthode VULNERALP : niveau 1.0

Le niveau 1.0 est établi sur la base de 7 critères structuraux que sont le matériau de construction, l'irrégularité en élévation et en plan, la forme du toit, la position de la structure, son époque de construction et la nature de la fondation. Le champ des réponses possibles pour chaque critère est limité par des choix binaires : par exemple, la structure est régulière ou irrégulière en élévation et la toiture est en terrasse ou en pente. On s'aperçoit ainsi que ces indicateurs, essentiels dans l'évaluation de la vulnérabilité, peuvent être facilement renseignés. Les scores IV_i sont extraits des valeurs données par le GNDT.

La précision des descriptions des paramètres étant plus grossière, il convient de donner le champ du probable sur la base des scores du GNDT.

L'indice de vulnérabilité fonction du matériau de construction est calé sur les travaux présentés par Giovinazzi et Lagomarsino [29] qui ont traduit les classes de vulnérabilité de l'Echelle européenne EMS98 en indice (**Tableau II.3**).

Tableau II.2 : Exemple de score pour deux critères structuraux retenus pour la méthode niveau 1.0 VULNERALP [47]

Niveau1.0	Avant 1945			Entre 1945 et 1970			Entre 1970 et 2000			Après 2000		
	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min
Maçonnerie	45	25	15	45	25	15	25	15	5	25	15	5
Béton armé	25	25	25	25	15	5	15	5	0	5	2.5	0

Niveau 1.0	Régulier en élévation			Irrégulier en élévation		
	Max	Med	Min	Max	Med	Min
Maçonnerie	25	15	0	45	25	5
Béton armé	10	5	0	15	10	5

Dans le cadre de VULNERALP, cet IV_i est modulé en fonction de l'époque de construction, qui traduit sur une ville en général l'évolution des codes de dimensionnement et de l'emploi des matériaux de constructions. Cette stratégie permet alors de relier la vulnérabilité à un niveau de dommage compatible avec celui de l'EMS98. Des matrices de vulnérabilité sont alors proposées, extraites des domaines possibles des critères du GNDT.

Tableau II.3 : Correspondance entre les classes de vulnérabilité de l'EMS98 et les scores du GNDT, d'après [29]

Méthode	Equivalence				
EMS98	A	B	C	D	E
Score	45	25	15	5	0

Les valeurs moyennes et l'intervalle des valeurs les plus probables de l' IV et donc du dommage moyen sont ainsi calculés pour chaque bâtiment. On obtient une première évaluation de la vulnérabilité ainsi que les zones du possible. On s'aperçoit ainsi que même si le champ du possible est large, on obtient néanmoins une première vision de la vulnérabilité des bâtiments testés.

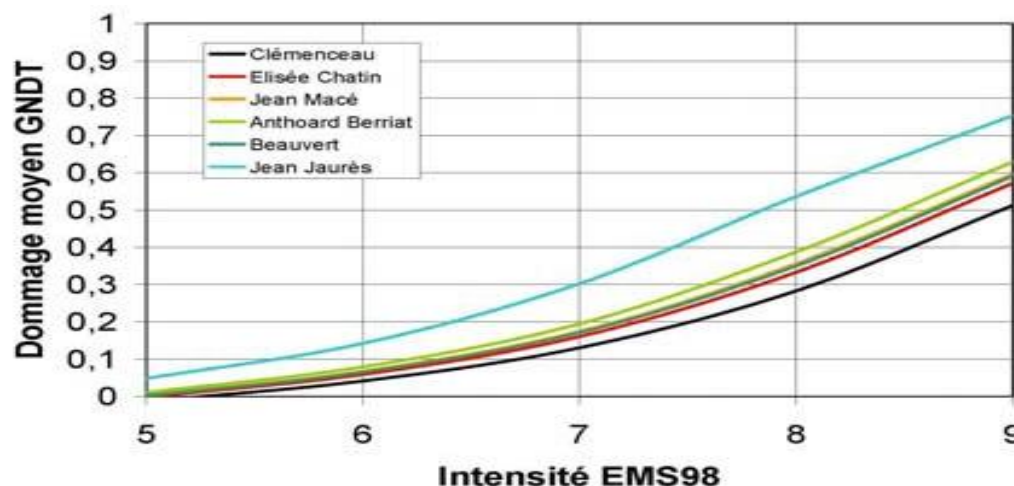


Figure II.3 : Evaluation des dommages moyens, calculés sur la base des informations de niveau 1.0 Méthode VULNERALP [47]

II.1.2.2 La méthode VULNERALP : niveau 1.1

Le niveau 1.1 est établi sur la base des 7 critères structuraux du niveau 1.0, mais dont le degré de précision a évolué, réduisant ainsi le champ possible des indices. Ce niveau requiert des informations plus précises et par conséquent des personnes plus compétentes ou mieux formées (**Tableau II.4**). Par exemple, pour les matériaux de construction, on distinguera d'une part les murs voiles ou le système poteaux-poutres pour les constructions en béton armé, et d'autre part les maçonneries en pierres brutes des maçonneries en éléments préfabriqués, et donc agencés, ainsi que celles en pierres maçonnées. De même, la forme de la toiture s'affine, entre une toiture terrasse sur des murs en béton ou en maçonnerie d'une toiture à une ou plusieurs pentes. Contrairement au niveau 1.0, il est souvent nécessaire de pénétrer dans la structure pour une identification complète.

Tableau II.4: Exemple de scores retenus pour la méthode niveau 1.1 VULNERALP [47]

Niveau1.1	Maçonnerie			Béton		
	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min
RePl1.1	0	0	0	0		0
RePl1.2	5	5	5	5		5
RePl2.1	25	25	25	10		10
RePl2.2	45	45	45	15		15

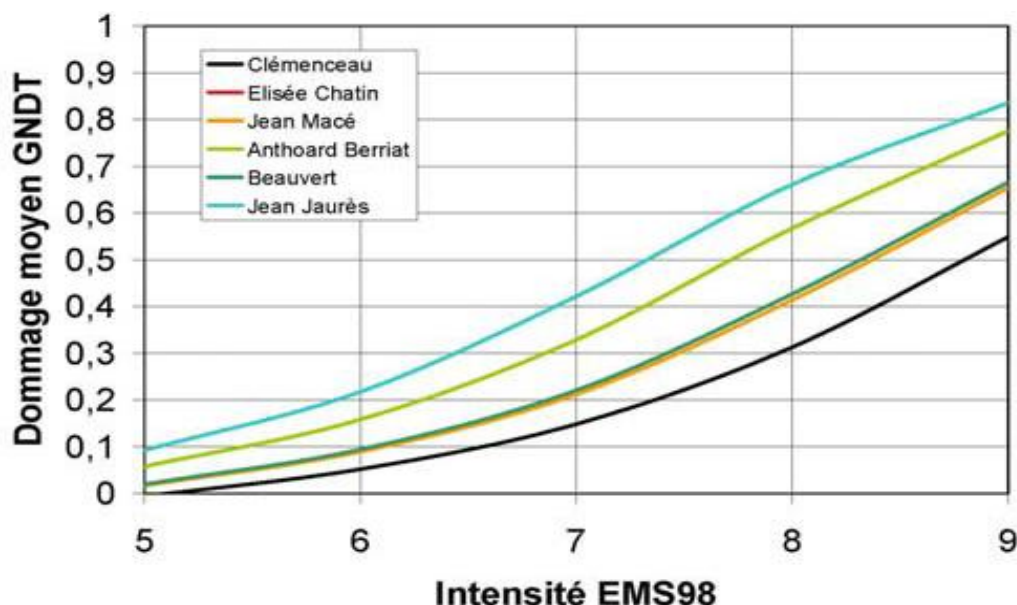


Figure II.4 : Evaluation des dommages moyens, calculés sur la base des informations de niveau 1.1 Méthode VULNERALP [47]

II.1.2.3 La méthode VULNERALP : niveau 2.0

Le niveau 2.0 est identique à celui du GNDT. Toutes les rubriques doivent être renseignées, certaines nécessitant non seulement des connaissances sur les dispositions constructives et par conséquent des connaissances sur les spécificités structurales de la région

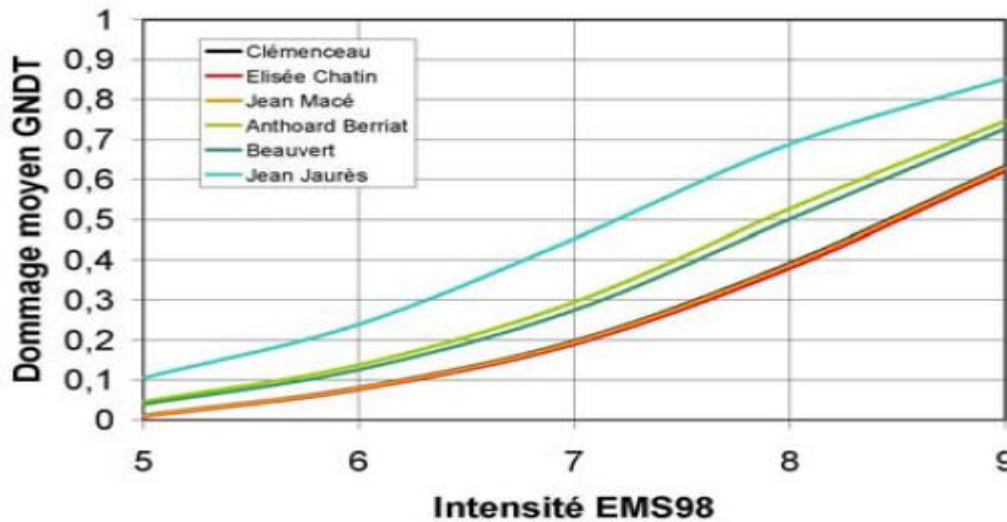


Figure II.5 : Evaluation des dommages, calculés sur la base des informations de niveau 2.0 Méthode VULNERALP [47]

D'autre part, pour les matériaux de construction, on distingue chaque classe de la typologie EMS98, tandis que la nature des liaisons, le type des toitures et l'irrégularité en élévation s'affinent. Le temps passé pour chaque structure augmente et il est nécessaire d'avoir accès aux différentes parties de la structure.

II.1.3 Méthode FaMIVE

Dans la méthode FaMIVE (D'Ayala et Speranza, 2002), les bâtiments sont d'abord évalués selon la méthodologie EMS-98 puis les mécanismes d'effondrement sont identifiés par le logiciel FaMIVE (Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation). Ce logiciel est basé sur l'analyse statique équivalente (aux états limites) des murs extérieurs d'une structure en maçonnerie; le but étant de prédire la charge maximale de rupture, le mode de rupture ou la variation de la vulnérabilité obtenue en introduisant des renforts prédéfinis. Des bases de données sont intégrées à ce logiciel. Elles regroupent, entre autres, les mécanismes de rupture probable et les modes de connexion entre les murs établis selon l'approche par macroéléments [25].

II.2 Méthode d'évaluation par pointage

Les méthodes d'évaluation par pointage ont pour objectif principal une évaluation rapide et aisée des structures aux fins de classement ou d'évaluation de leur vulnérabilité. L'attribution de pointage est faite sur la base de paramètres typologiques représentatifs de la région étudiée. Un indice de vulnérabilité est établi à partir d'une fiche de critères structuraux et non structuraux relevés à l'inspection de la structure. L'établissement des critères et des cotes structurales est fait à partir de l'opinion d'experts, donc est grandement lié aux particularités locales.

Les méthodes utilisées par un pays ou un autre se différencient généralement par le type de structures considérées, les éléments modifiant la performance, l'inclusion ou non des éléments non-structuraux et de la valeur économique des bâtiments. Parmi les pays possédant une méthodologie établie on retrouve entre autres les États-Unis, le Canada, la Suisse et l'Italie. L'Italie possède également une méthodologie établie par le GNDT particulièrement adaptée à l'évaluation des structures en maçonnerie de pierre.

II.2.1 Méthode FEMA

Cette méthode rapide d'évaluation sismique visuelle FEMA 154-États-Unis, Les cotes structurales utilisées dans la procédure du Federal Emergency Management Agency (FEMA) sont issues de courbes de fragilité caractéristiques définies par le logiciel HAZUS (HAZard US) qui est un outil de gestion et de planification du risque. Les cotes sont définies pour 15 types de bâtiments [26]. Un indice structural, le Basic Structural Hazard (BSH), est attribué en fonction du système de résistance aux forces latérales et du niveau de sismicité de la région, c'est-à-dire calculé en termes de probabilité d'effondrement ajusté à différents critères de performance. Le BSH varie de 1,8 à 4,6 pour un bâtiment en maçonnerie non armée lorsque celui-ci est situé dans une zone de sismicité respectivement élevée et faible; une valeur élevée du BSH correspondant à une meilleure performance sismique. À noter que la définition des bâtiments en MNA utilisée pour cette méthode s'applique aux bâtiments, les courbes de fragilité n'incluant pas le type de structures sous étude.

II.2.2 La méthode de pointage du Conseil national de recherches du Canada

Cette méthode vise les constructions existantes exception faite des petits bâtiments résidentiels. Trois indices, structural (IS), non structural (INS) et de priorité sismique (IPS) sont calculés en fonction de six variables identifiées de A à F représentant : la sismicité (A), l'état du sol (B), la cote structurale de base selon l'année de construction avec comme référence l'année 1990 (C), les irrégularités du bâtiment (D), l'importance de l'édifice (E) et les dangers liés aux éléments non structuraux (F). Bien qu'aucune probabilité ne soit rattachée aux indices, l'indice structural IS (équivalent au produit $A*B*C*D*E$) donne une évaluation relative du risque sismique avec la prise en compte de l'aléa sismique ($A*B$), de la vulnérabilité sismique du bâtiment ($C*D$) et de la valeur rattachée au bien (E).

L'évaluation peut se faire rapidement à partir d'un formulaire quantitatif et un pointage global est calculé. Comme pour la méthode du FEMA, cette méthode appliquée aux bâtiments, les caractéristiques principales considérées pour le pointage étant les mêmes quelque soit la structure considérée [25].

II.2.3 La méthode GNDT, Italie

La méthode GNDT a été développée par le Groupe de défense contre les tremblements de terre du Conseil national de recherche de l'Italie (CNR). Elle propose une évaluation à deux niveaux [31] auxquels correspondent deux formulaires : le niveau I d'analyse globale des bâtiments permettant la collecte de l'information de base et l'élaboration d'un inventaire et le niveau II menant au calcul d'un indice pondéré de vulnérabilité. Ce deuxième niveau d'analyse permet également de tracer des courbes de vulnérabilité en fonction de modes de rupture probables.

Cette méthode prend sa source dans l'importante base de données découlant des inventaires post-sismiques réalisés en Italie, en 1994. Le nombre de structures endommagées en maçonnerie non armée et en béton est suffisamment élevé pour pouvoir établir des relations entre le taux d'endommagement et les caractéristiques structurales du système résistant. La méthode est maintenant largement utilisée partout en Europe notamment pour l'inventaire des bâtiments historiques permettant ainsi la création d'une importante base de données sur les bâtiments en maçonnerie et en béton armé.

Le formulaire II concernant les bâtiments en maçonnerie présente les onze critères (**Voir tableau II.5**) contrôlant la réponse sismique des bâtiments et les quatre classes de vulnérabilité croissantes de A à D.

Tableau II.5: paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie d'après GNDT [30]

1	Type et organisation du système résistant
2	Qualité du système résistant
3	Résistance conventionnelle sous chargement horizontal
4	Localisation de la structure et fondations
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

Un indice de vulnérabilité I_v est calculé à partir des éléments du système structural principal et des déficiences qui y sont reliées puis pondéré selon un poids relatif aux paramètres structuraux. La valeur de l'indice varie de 0 à 100, selon l'équation :

$$IV = \sum_{i=1}^{11} IV_i w_i \quad (2.5)$$

Le mode opératoire utilisé pour la définition de cette méthode est le suivant.

- Définition de l'indice de vulnérabilité I_v à partir de 11 paramètres structuraux identifiés a priori comme participant à la vulnérabilité globale de la structure.
- Calcul de l'indice de vulnérabilité de base I_v comme la somme pondérée des indices I_v et comparaison avec l'endommagement observé.
- Pondération et ajustement des valeurs des indices I_v en fonction de l'endommagement observé.

L' I_v est normalisé par sa valeur maximale possible (cas le plus défavorable) pour exprimer l'indice de vulnérabilité sur une échelle comprise entre 0 et 100%.

Dans des travaux plus récents [29] proposent une formule permettant d'estimer le dommage moyen en fonction de l'intensité du séisme I et de l'indice de vulnérabilité I_v calculé à l'aide de la méthode GNDT par la relation suivante

$$d = 0.5 + 0.45 \arctan(0.55 \cdot (I - 10.2 + 0.05 I_v)) ; 0 < d < 1 \quad (2.6)$$

Comme pour le développement des méthodes d'analyse de vulnérabilité, cette relation a été estimée à partir des retours d'enquêtes post-sismiques.

Des valeurs moyennes d'indice de vulnérabilité sont données pour les différentes typologies du GNDT. Il faut noter que Giovinazzi et Lagomarsino utilisent les niveaux de dommage de l'échelle EMS 98. (**Figure II.6**)

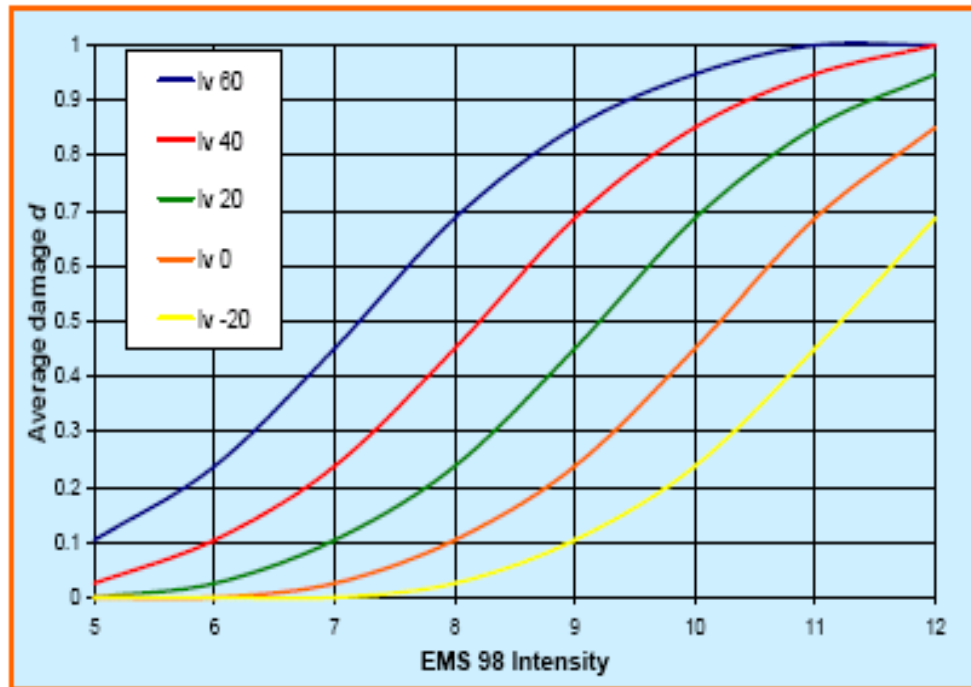


Figure II.6: Evolution du dommage moyen d en fonction de l'intensité du séisme (EM98) pour plusieurs classes de vulnérabilité [29]

II.3 Synthèse de chapitre et approches étapes

Dans cette revue de littérature, de nombreux points communs apparaissent entre les méthodes, il ressort que

- l'analyse est menée sur la base d'une échelle de dommage connue et une typologie prédéfinie : GNDT, EMS-98, pour la plupart;
- les indices de vulnérabilité obtenus pour les édifices ou les formules de base développées dans des contextes spécifiques peuvent être modulés par des indicateurs qualitatifs propres au bâti analysé;
- la vérification de la performance d'une structure par les méthodes de pointage permet de donner une estimation fiable de leur vulnérabilité;
- en ce qui concerne les évaluations de famille de structures, l'importance est mise davantage sur les aspects qualitatifs que quantitatifs.

Sur la base de cette revue de littérature et dans le contexte de recherche, l'approche à considérer pour l'analyse de la vulnérabilité se ferait selon deux étapes :

a) La réalisation d'un inventaire

Le maximum d'information sur les caractéristiques structurales des bâtiments de l'inventaire sera recherché puisque les méthodologies traitent les informations par bâtiment, rendant l'élaboration d'un formulaire d'évaluation rapide incontournable. Celui-ci pourra être complété de manière optimale par les gestionnaires des bâtiments.

b) L'analyse de la vulnérabilité sismique de l'ensemble du bâtiment

Cette analyse, basée en partie sur une typologie permettant d'établir la vulnérabilité sismique de l'ensemble des bâtiments, est possible selon la typologie caractérisée par un indice de vulnérabilité de base pour les bâtiments. Pour les fins d'adaptation au contexte de l'Algérie, l'indice sera ajusté en fonction de critères spécifiques (structuraux et non structuraux) afin de garder la cohérence dans l'interprétation des résultats.

CHAPITRE III

CHAPITRE III

INVENTAIRE TYPOLOGIQUE DES BATIMENTS

Le projet consiste à l'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti de l'Algérie. Cette étude s'est faite en deux parties, premièrement un inventaire typologique et deuxièmement une évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments traditionnelle, basée principalement sur l'observation visuelle.

Dans l'étude de la vulnérabilité sismique d'une grande population de bâtiments, chaque bâtiment ne peut être analysé séparément. C'est pour cela qu'il est nécessaire de faire un inventaire, c'est-à-dire de considérer une approche globale, simple et statistique du comportement des bâtiments.

III.1 La typologie des bâtiments

Cette étude a pour objectif de définir la typologie des bâtiments existants. Cette définition permettra l'établissement des courbes de vulnérabilité sismiques réalistes de ces bâtiments prenant en compte les caractéristiques structurales spécifiques des bâtiments en maçonnerie des différentes régions de l'Algérie pour une estimation fiable du risque sismique.

L'établissement d'une classification des constructions en Algérie doit être basé sur un inventaire sismique. La connaissance des caractéristiques structurelles des bâtiments permet de quantifier la vulnérabilité sismique du bâti existant. Dans le présent travail, une étude bibliographique a été menée afin d'essayer de définir une classification du bâti Algérien par exemple:

- Les bâtiments en maçonneries porteuses (murs porteurs);
- Les bâtiments en béton armé;
- Les bâtiments en construction métallique.

Cette classification a été réalisée sur la base d'observations visuelles de l'extérieur des bâtiments, complétées des fiches renseignées par les équipes du CTC et du CGS. Pour cette étape, aucune démarche probabiliste n'a été utilisé, chaque bâtiment a été visualisé et analysé séparément.

III.2 Elaboration de la fiche technique

L'élaboration de la fiche technique permettant l'estimation de l'indice de vulnérabilité après enquêtes sur site, nécessite la connaissance des paramètres de nature structurale ou non structurale, ayant une influence sur le comportement de la structure et donc sur la réponse sismique.

La fiche d'enquête regroupe l'ensemble des paramètres comprend les éléments principaux suivants :

a) Données générales (adresse, âge, etc...), b) Caractéristiques géométriques, c) Système structural, d) Conditions du sol, e) Etat des éléments non structuraux, f) Etat des réseaux divers, g) Maintenance.

Ces informations permettent d'évaluer qualitativement et quantitativement la qualité sismique des constructions (**voir annexe C**). Donc un effort considérable a été consacré à la collection d'une banque de données d'observation de dommages aussi complète et homogène que possible à travers les fiches d'enquêtes renseignées après les séismes de Chenoua (1989), Alger (1996), Béni Ourtilane (2000) et Boumerdes (2003). Dans ces fiches, les données en termes sont présentées par des niveaux (cinq) de dommages par rapport à plusieurs (huit) facteurs de vulnérabilité de la structure.

III.3 Description du bâti

Dans les zones les plus affectées par ces évènements, le patrimoine bâti se caractérise par les types de constructions suivants [4]:

Les constructions individuelles, généralement (un niveau ou deux niveaux) en maçonnerie ancienne de blocs de terre ou de pierres liées à la chaux ou en briques de terre cuites chaînée ou non chaînée par exemple les villes de Béni Ourtilane.

Anciennes constructions coloniales réalisées avant 1930, pouvant atteindre jusqu'à six niveaux. Elles sont constituées en maçonneries porteuses (murs porteurs) massives de pierre, généralement non chaînées, avec des planchers en voûtains de briques et poutrelles métalliques. Leurs toitures est en terrasse accessibles ou en charpentes en bois, avec des tuiles plates ou creuses. Ces constructions sont rencontrées principalement au centre des agglomérations et constituent en général les vieux tissus urbains comme les villes de Tipaza et d'Alger.

Le patrimoine bâti construit entre les années 1930 et 1960, relativement modernes avec l'introduction du béton armé dans les ossatures en poteau -poutres et planchers en dalle de béton ou préfabriqués (hourdis – poutrelles). Ces constructions modernes récentes (Boumerdes), réalisées à partir de 1960 jusqu'à aujourd'hui avec l'utilisation de techniques nouvelles notamment les coffrages outils (tables et banches ou tunnels), les différentes préfabrifications (lourdes ou légères, totales ou partielles, intégrées ou ouvertes). Le développement des connaissances dans le domaine de la construction a permis également la diversification des matériaux (béton armé, béton précontraint, charpente métallique, etc.) et des structures porteuses (portiques, voiles porteurs, systèmes mixtes). Une grande partie de ces constructions récentes a été conçue, réalisée et suivie par des professionnels par les services de contrôle du CTC

III.4 Les critères de vulnérabilité

En tout premier lieu, pour commencer le diagnostic d'un bâtiment, il faut caractériser la structure et identifier les paramètres géométriques et qualitatifs qui influencent le comportement du bâti.

La vulnérabilité est liée principalement à leur conception architecturale et à leurs éléments constitutifs tels : 1) la géométrie, 2) l'influence de ces édifices sur l'environnement adjacent au bâtiment, 3) l'hétérogénéité des matériaux et 4) la qualité et le type du système résistant.

Effectivement, il faut différencier les bâtiments construits en béton armé des bâtiments construits en charpente métallique ou bien de ceux construits en maçonnerie dite traditionnelle. Ces différents matériaux ne réagissent pas de façon identique face au séisme, en effet ils confèrent aux bâtiments une souplesse plus ou moins importante, une rigidité différente, une masse par plancher différente ce qui fait réagir les bâtiments de façon très distincte suivant les matériaux utilisés [24].

III.4.1. Caractérisation des éléments d'une structure en maçonnerie

Ce chapitre décrit succinctement les principales caractéristiques des structures de bâtiments en maçonnerie. Les éléments formant la structure des bâtiments (murs porteurs, planchers, charpente...) sont tout d'abord décrits en essayant de mettre en évidence les caractéristiques influençant le comportement sismique des bâtiments.

Cette présentation reprend les différents éléments des structures des bâtiments en maçonnerie:

- les murs porteurs en maçonnerie ainsi que les connexions entre murs
- les planchers et leur liaison avec les murs porteurs
- la charpente et la couverture

III.4.1.1 Les types de maçonnerie et d'appareil

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 des dispositions possibles dans le plan des murs (appareils) ou dans l'épaisseur (voir annexe D).

Maçonnerie ancienne

Quelques appareils utilisés dans les structures antiques sont rappelés sur la figure III.1

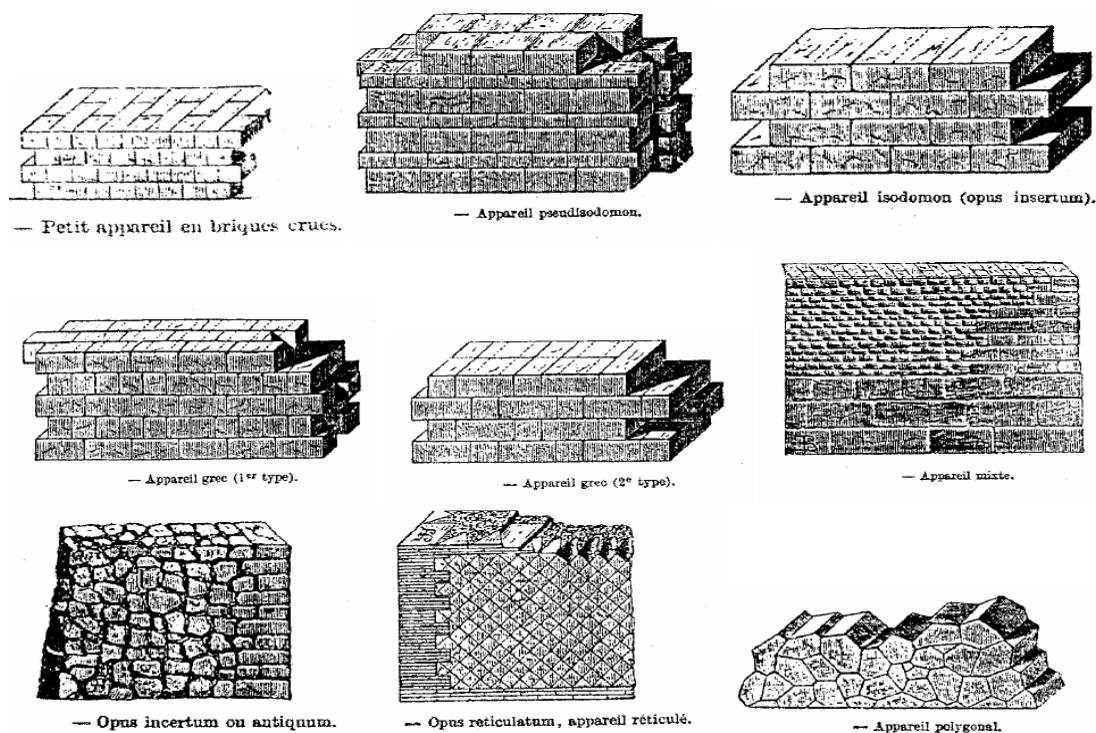


Figure III.1: Appareils utilisés pendant l'antiquité [1]

III 4.1.2 Les liaisons entre murs

Deux murs perpendiculaires peuvent être liaisonnés:

- par harpement ou déharpement en laissant des assises en attentes (Figure III.2),
- en pratiquant des arrachements, c'est-à-dire en laissant des vides dans lesquels viendront se raccorder des moellons du mur perpendiculaire (Figure III.2).

L'intersection de deux murs est souvent – mais pas toujours – mieux appareillée qu'en partie courante (présence de maçonnerie de pierres taillées pour les murs en maçonnerie, par exemple). La maçonnerie présente alors des chaînages aux angles (chaîne d'angle) ou à l'intersection de deux murs comme la façade et un mur de refend (jambe) (Figures III.3 et III.4). Les désordres généraux qui affectent les murs se traduisent généralement par des fissures au niveau des intersections. En l'absence de harpage, des fissures verticales peuvent se former directement à la jonction des deux murs. Les fissures verticales peuvent aussi se former dans un des deux murs à la limite du harpage (Figure III.5).

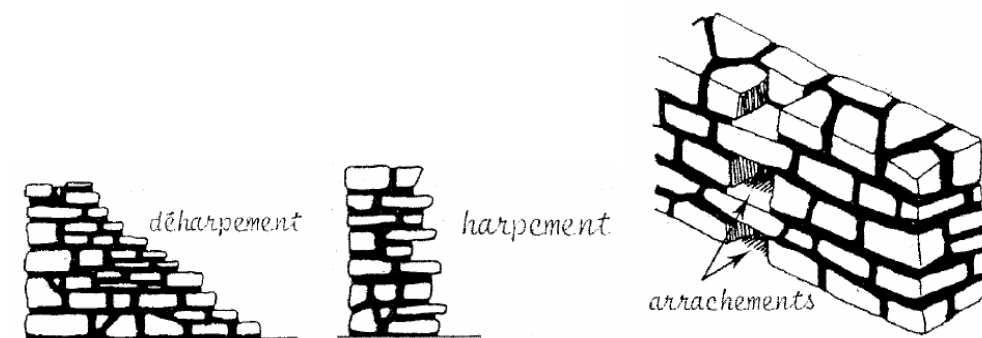


Figure III.2: Techniques utilisées pour la jonction de deux murs de maçonnerie de moellons [1]

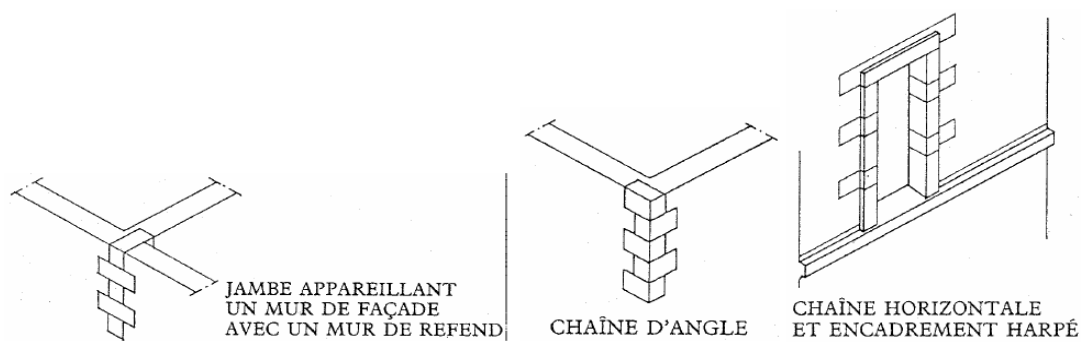


Figure III.3: Maçonnerie appareillée formant un chaînage à l'intersection de deux murs et autour d'une ouverture [1]

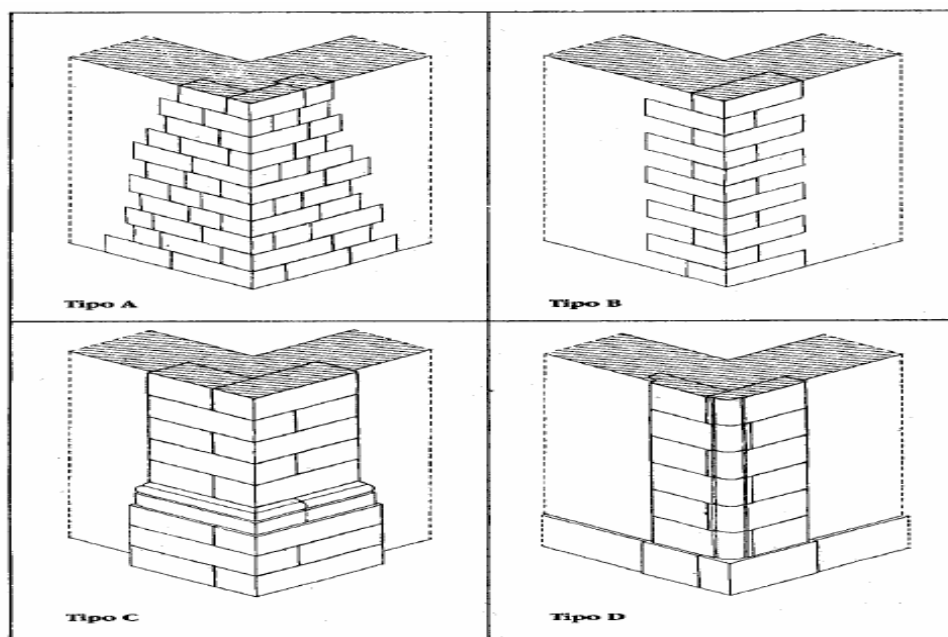


Figure III.4: Exemples de chaînes d'angle en maçonnerie et pierres taillées [1]

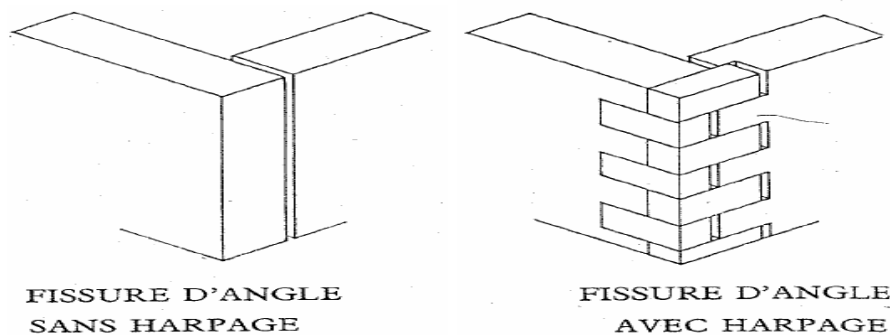


Figure III.5: Désordres possibles aux intersections de deux murs [1]

III 4.1.3 Les planchers

Les planchers jouent un rôle important sous chargement sismique en ayant un rôle de diaphragme permettant le transfert des efforts vers les éléments de contreventement verticaux. La distance entre 2 murs est généralement déterminée par la portée des planchers et poutres utilisés qui sont de l'ordre de 4 à 5m pour les planchers les plus courants. Il faut noter que généralement les murs pignons reprennent la charge verticale des planchers et que la façade n'est pas porteuse (Figure III.6).

Les appuis des planchers sur les murs et le niveau de connexion avec les murs ont une influence majeure sur le comportement sismique. Les appuis des planchers en bois sont caractérisés par la longueur de pénétration de la poutre et par la nature du coussinet de pose de l'about de poutre.

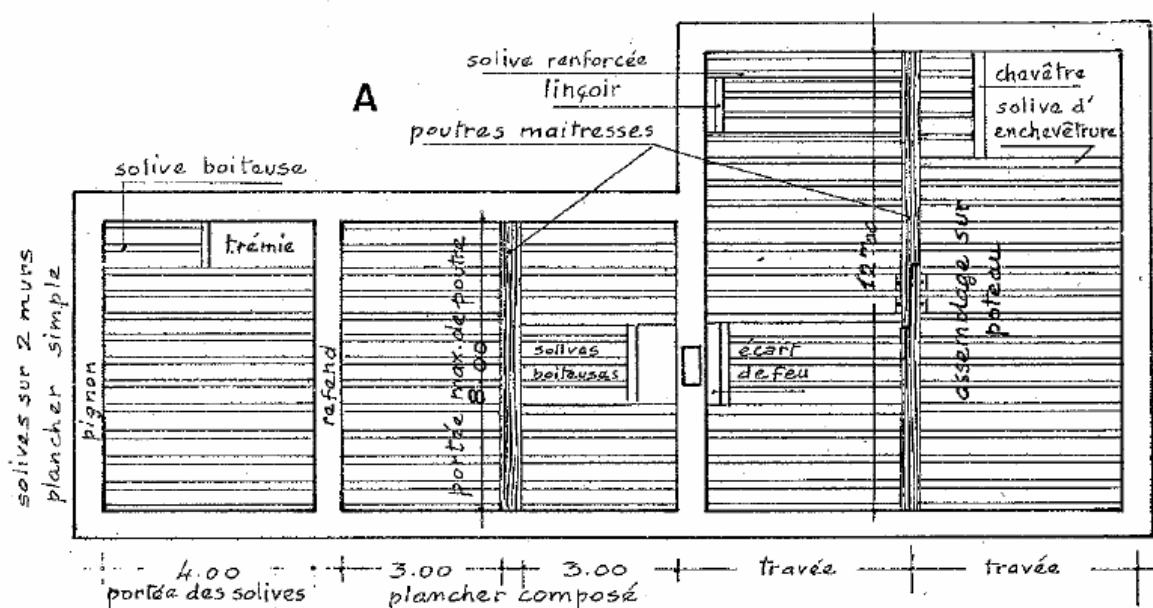


Figure III.6: Exemple de plancher en bois [1]

III 4.1.4 Charpente et couverture

Les toitures des maisons modestes des villes et villages dont la largeur entre murs pignons ou murs de refend ne dépasse pas 4 à 5 mètres sont généralement formées de pannes en simple appui sur les murs et portant les chevrons. Ces toitures sont similaires à des planchers inclinés.

Les couvertures à deux pentes peuvent aussi être supportées par des fermes formées par empilage et portées par l'entrait. L'entrait est une poutre de forte dimension qui porte de mur à mur et sur laquelle repose, en son milieu, le poinçon portant la panne faîtière.

Les fermes triangulées sont une évolution des fermes traditionnelles par empilage et se sont développées au XIX^{ème} siècle. Les éléments de ces charpentes ne travaillent qu'en traction compression (aucune flexion, en particulier dans l'entrait).

Le fait que la toiture exerce ou non une poussée horizontale sur les éléments porteurs verticaux influence le comportement sismique du bâtiment. Une telle poussée existe lorsque la charpente est sous-dimensionnée et s'accompagne généralement d'une flèche verticale de la couverture. La masse est la seconde caractéristique influençant le comportement sismique du bâtiment.

III 4.2 Données sur l'implantation du bâtiment

III 4.2.1 Implantation du bâtiment

Concernant la localisation et l'implantation du bâtiment à diagnostiquer, les facteurs essentiels à prendre en compte sont la pente générale du terrain et les changements brusques de pente du terrain (Figure III.7).

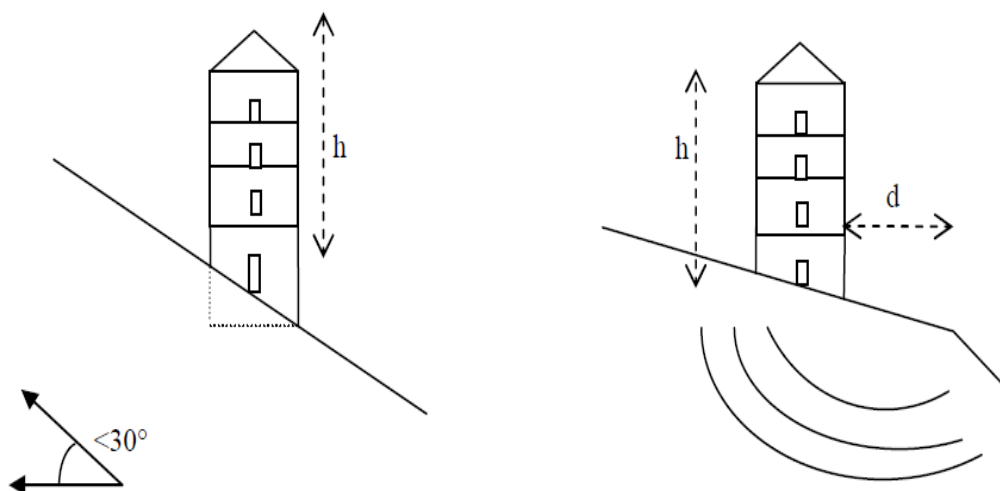


Figure III.7: Implantation du bâtiment [44].

Ces considérations sont à prendre en compte car des risques d'éboulement en falaise peuvent avoir lieu au cours d'un tremblement de terre. Des chutes de pierres, de rochers sont à prévoir d'où un important risque vis-à-vis de la sécurité des habitants. Concernant la pente générale du terrain nous entrerons dans la sécurité et nous affecterons une pénalité à un bâtiment construit sur un terrain ayant une pente supérieure à 30%.

Concernant le deuxième critère, il s'agit de mettre l'accent sur les bâtiments construits à flanc de colline. Plus le bâtiment est proche de la « falaise » ou du changement de pente, plus le bâtiment risque de glisser, la distance fixée est une distance inférieure à deux fois la hauteur du bâtiment

De même, il faudra prendre en compte l'hypothétique proximité d'un mur de soutènement ou bien d'un talus proche d'un bâtiment. Nous pénaliserons dans ce cas les édifices ne respectant pas la distance de deux fois la hauteur h de celui-ci. Le coefficient de pénalité sera légèrement inférieur à celui d'un changement de pente mais bien supérieur à celui d'une pente générale, puisque l'écroulement du mur provoquerait un sinistre plus important.

III 4.2.2 Environnement ou localisation

Cette partie concerne les bâtiments avoisinants le bâtiment qui devra être diagnostiqué. Il s'agit d'indiquer la présence ou non d'un joint de dilatation, la qualité de ce joint, ou bien la présence d'un bâtiment à proximité ne respectant pas une certaine distance.

La rigidité latérale des bâtiments étant plus faible que la rigidité verticale, les oscillations horizontales des bâtiments sont en générale les plus dangereuses. Ils subissent des translations, des balancements et des déformations d'ensemble qui se répercutent sur les divers éléments constructifs. Les déplacements relatifs des étages, peuvent être importants dans le cas de bâtiments élancés et flexibles, et être à l'origine de la destruction d'éléments non structuraux

Les bâtiments doivent être protégés contre l'entrechoquement avec les structures adjacentes (Figure III.8.a). Pour cela il faut :

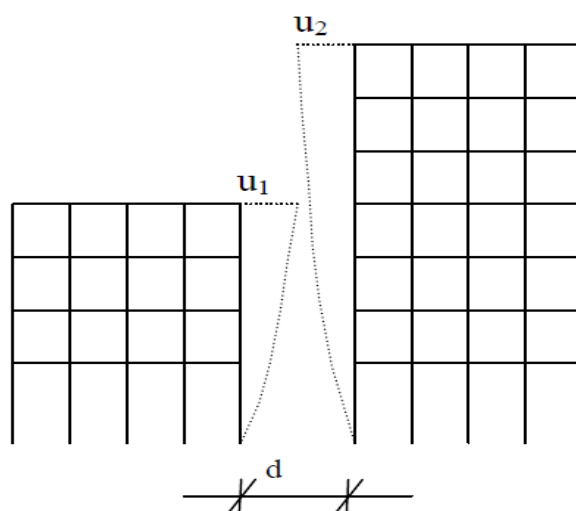


Figure III.8.a: Avoisinants du bâtiment [44].

- Que la distance entre la ligne de séparation et les points d'impacts potentiels ne soit pas inférieure au déplacement horizontal maximal du bâtiment.
- Que la distance entre les bâtiments ne soit pas inférieure à la somme des déplacements horizontaux maximaux des deux bâtiments. La distance $d \geq u_1 + u_2$ sera donc à respecter.

Nous pénaliserons les bâtiments dont le joint de dilatation est inférieur à 4cm (le joint est soit insuffisant soit obstrué), nous affecterons aussi une pénalisation lors qu'il y a présence d'un bâtiment sur une distance inférieure à la hauteur du bâtiment à diagnostiquer ($d < h$).

A noter que la distance à respecter croit avec la hauteur des bâtiments, il faut dans certains cas de bâtiments de plusieurs étages plusieurs centimètres d'espacement. Notre étude se limiterait à des bâtiments inférieurs à des R+4 voire R+5, nous limiterons cet espacement à 4cm.

Si les niveaux des planchers d'un bâtiment sont les mêmes que ceux du bâtiment adjacent, la distance minimale citée ci-dessus peut être réduite par un coefficient de 0,7.

Par contre il faudra éviter la configuration suivante, nous pénaliserons également les bâtiments, bien que l'espacement du joint de dilatation soit respecté, présentant des planchers à des niveaux différents que le bâtiment qui lui est accolé.

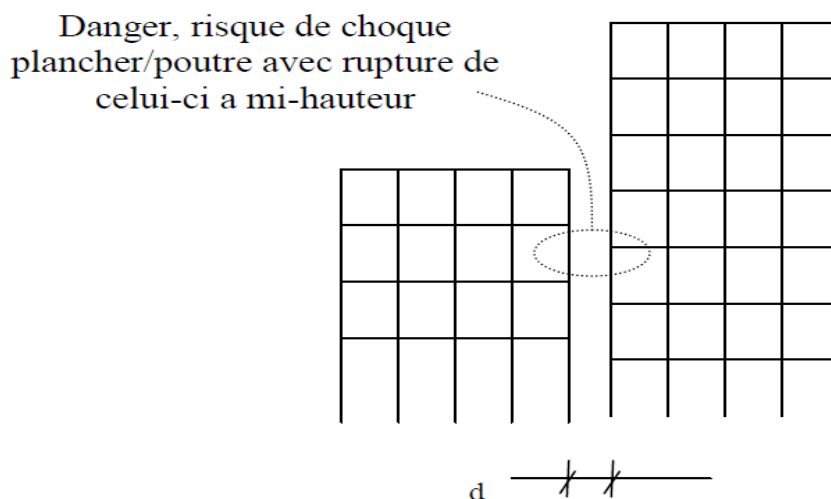


Figure III.8.b: Avoisinants du bâtiment [44].

Cette configuration peut s'avérer très dangereuse, en cas de déplacement horizontal important du bâtiment, il a risque de choc entre le plancher du bâtiment de droite et les poteaux ou voiles du bâtiment de gauche (Figure III.8.b).

Il y a un risque accru de rupture à mi-hauteur de ces éléments structuraux. Certes, il n'est pas toujours évident de vérifier les niveaux des étages avec les bâtiments qui sont accolés, par manque d'autorisation (espace privé) mais il est viable de pénaliser le bâtiment dans ces cas.

III 4.3 Caractéristiques géométrique du bâtiment

III 4.3 1 Régularité en plan

Le mouvement sismique est un phénomène bidirectionnel, la structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant les deux directions et les éléments structuraux doivent 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 se rapproche d'une forme symétrique suivant les deux axes, des dégâts importants ont souvent été observés à la jonction des pans dans des structures composées de plusieurs pans perpendiculaires.

Les raideurs flexionnelles suivant les directions principales sont très différentes sont très différents dans un bâtiment rectangulaire. Il en résulte des périodes propres différentes de 2 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. Voici les configurations de bâtiments favorables, certaines sont moins fréquentes que d'autres (Figure III.9).

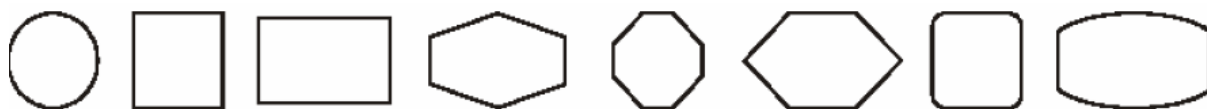


Figure III.9: les configurations de bâtiments [44].

Les formes rectangulaires apparaissent comme étant des formes intéressantes par contre il faut éviter que ceux-ci soient trop élancés. En effet, on considère que la longueur de notre structure ne doit pas dépasser environ quatre fois la largeur de celui-ci, cela engendrerait des moments de torsion trop importants sur le bâtiment.

De même, les parties en décrochage sont des facteurs favorisant les torsions en plan, ce qui provoque une concentration de contraintes au niveau de l'angle droit de décrochage

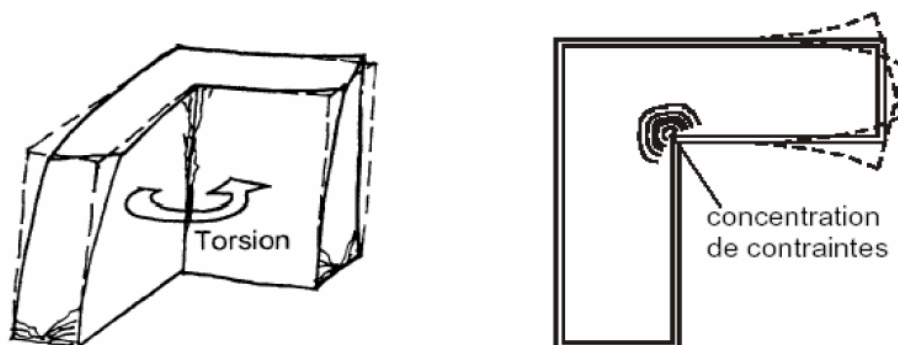


Figure III.10: torsion des constructions [44].

Les déplacements horizontaux du sol produisent des oscillations de torsion des constructions, couplées avec leurs oscillations latérales. Les effets des oscillations de torsion sont importants dans le cas des bâtiments de forme irrégulière ou possédant un contreventement excentré (Figure III.10).

III 4.3.2 Régularité en élévation

En élévation, les principes de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure sans variation brutale de configuration ou bien de décrochage. De telles variations entraînent des sollicitations locales très élevées au niveau des arêtes de jonctions.

Les constructions ayant des décrochements extérieurs en élévation doivent soit être scindées par des joints de fractionnement en blocs élémentaires sans décrochements soit dans le cas de la maçonnerie recevoir des chaînages verticaux de renforcement (Figure III.11).

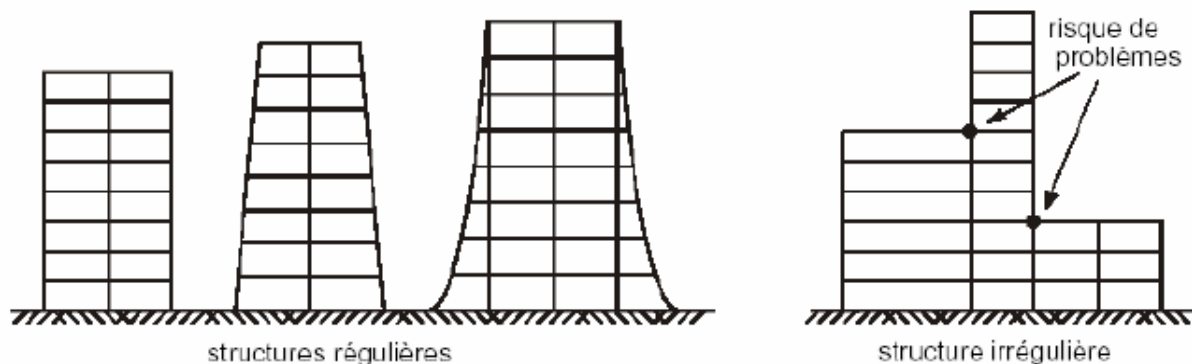


Figure III.11: Régularité en élévation [44].

Cette structure irrégulière présente le défaut de joints de fractionnement, ces joints doivent assurer l'indépendance complète entre chaque bloc permettant ainsi d'éviter les interactions de comportement en cas de séisme. Nous pourrions considérer cette configuration comme des parties avec retraits en façades entraînant la formation d'un bloc supérieur qui interférera avec le bâtiment en cas de séisme (Figure III.12).

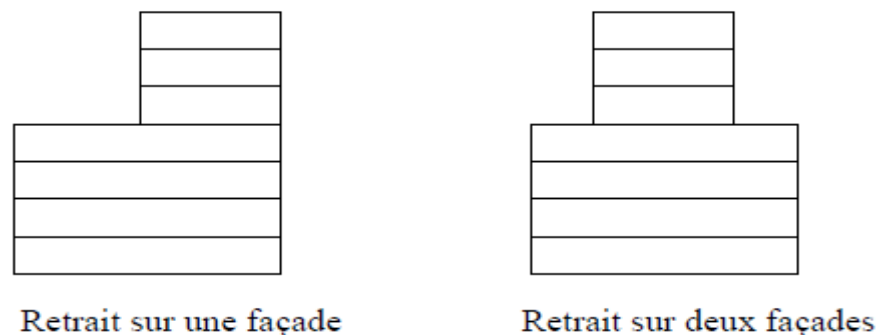


Figure III.12: Retrait sur la façade [44].

La variation de raideur ne se fait pas de manière continue, lorsque des parties sont en retrait comme sur les structures, ci-dessus, la réponse en « coup de fouet » est à craindre, ce cas présente une certaine vulnérabilité. Cette réponse agit de la façon suivante, la partie en retrait aura un déplacement inverse à la partie de raideur plus importante. Un effondrement ou un endommagement de la partie supérieure sera à craindre ou à prévoir.

A cela, concernant la régularité en élévation, nous pouvons pénaliser aussi les bâtiments présentant des hauteurs de niveaux différentes sur toute la hauteur du bâtiment (Figure III.13).

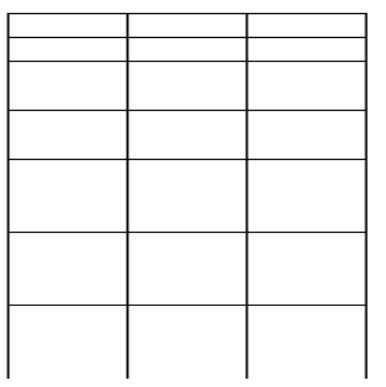


Figure III.13: l'endommagement interne du bâtiment [44].

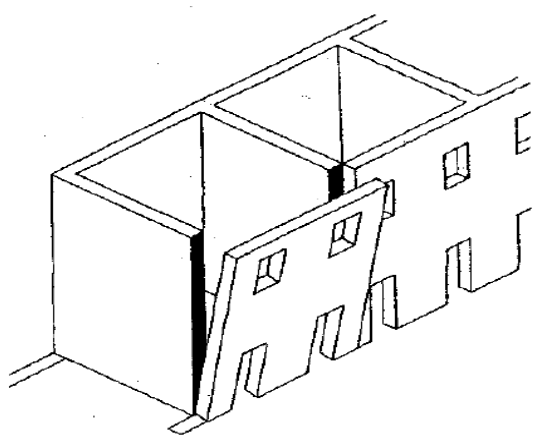
III 4 4 Comportement sismique des structures en maçonnerie porteuse

L'effet d'un séisme sur une maison ou un immeuble en maçonnerie peut être bien appréhendé en analysant les mécanismes de résistance de la structure soumise à des forces horizontales proportionnelles à la masse des différents éléments (murs, toitures et planchers). 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.

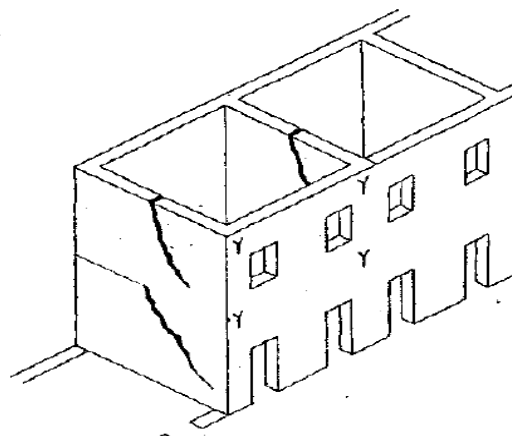
Une tenue correcte aux chargements sismiques exige donc que :

- 1.** les éléments verticaux (contreventements) et horizontaux (planchers et toiture) soient solidaires entre eux. De bonnes connections 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 2 directions. La qualité du contreventement dépend de la section des murs participant au contreventement dans chaque direction ainsi que de la qualité de la maçonnerie.

Les différents exemples de dommages sont présentés aux figures III.14 suivantes.



a/ Renversement des murs dans leur plan



b/ Rupture des murs de contreventement

Figure III.14: Les 2 types de modes de rupture des bâtiments en maçonnerie porteuse [1]



Photo III.1 : Fissuration et ruine des murs de contreventement sollicités dans leur plan[1]

Effectivement, la maçonnerie concerne les techniques de maçonnerie dite lourde ou en blocs, ces méthodes présentent le défaut d'une faible quantité d'armatures (manque de chaînages verticaux et/ou horizontaux). Le contreventement dans les deux directions de ces bâtiments est assuré par des murs porteurs en maçonnerie lourde.

L'insuffisance ou l'absence de contreventement entraîne des effondrements ou des basculements irréparables. Ceci est inadmissible pour les constructions récentes.

Une structure réalisée en maçonnerie mais en absence de chaînages horizontaux ou verticaux sera considéré comme étant un paramètre entraînant une forte vulnérabilité [44].



Photos III 2, III.3 : des bâtiments en maçonnerie briques rouges et de voiles en pierre (manque de chaînage) [44].

Ces deux photos confirment le comportement critique des bâtiments manquant de chaînage. Dans ce cas (Photos III 2, III.3), il s'agit de la maçonnerie en briques rouges et de voiles en pierre.

III.5 Synthèse de chapitre

Le projet consiste à l'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti de l'Algérie. Cette étude basée sur un inventaire typologique.

L'inventaire sismique réalisé sur la base d'observations visuelles de l'extérieur des bâtiments, complétées par des fiches d'enquêtes renseignées après les séismes de Chenoua (1989), Alger (1996), Béni Ourtilane (2000) et Boumerdes (2003). Dans ces fiches, les données en termes sont présentées par des niveaux de dommages par rapport à plusieurs facteurs de vulnérabilité de la structure.

Effectivement, pour commencer le diagnostic d'un bâtiment, Il faut caractériser la structure et identifier les paramètres géométriques et qualitatifs qui influencent le comportement du bâti.

La vulnérabilité est liée principalement à leur conception architecturale et à leurs éléments constitutifs tels : 1) la géométrie, 2) l'influence de ces édifices sur l'environnement adjacent au bâtiment, 3) l'hétérogénéité des matériaux et 4) la qualité et le type du système résistant.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS

L'évaluation de la vulnérabilité sismique de l'ensemble des bâtiments constitue l'objet central de ce chapitre. Comme la majorité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité retrouvées dans la littérature, l'attention a été mise sur l'identification des paramètres de vulnérabilité sismique.

Ce sont ces paramètres qui serviront à moduler l'indice de vulnérabilité des différents bâtiments et à tracer des courbes de vulnérabilité. Cette étude nécessite la connaissance de ces paramètres de nature structurale ou non structurale, ayant une influence sur le comportement de la structure et donc sur la réponse sismique.

IV.1 Choix et adaptation de la procédure d'analyse

La procédure proposée combine le calcul du dommage [28] [35] et les facteurs de vulnérabilité apprêtés aux chapitres précédents. L'intérêt principal de la méthode proposée est applicable tant aux structures.

Parmi les méthodes décrites au chapitre précédent certaines présentent un intérêt particulier pour l'étude de la vulnérabilité en Algérie. Ces dernières sont particulièrement adaptées à des ensembles de bâtiments situés dans des régions de séismicité faible à moyenne et pour lesquelles on ne possède pas beaucoup de données sur la performance des structures aux séismes passés. C'est le cas de systèmes de pondération (indice de vulnérabilité).

Toutes les méthodes de pondération pointage sont basées sur le même principe d'attribution d'une cote à un bâtiment afin de refléter sa vulnérabilité par rapport à d'autres bâtiments. Les étapes d'évaluation sont présentées ici en mettant en évidence les similarités et les différences, et en distinguant les cotes référant la vulnérabilité du bâti Algérien.

Donc la méthode de que nous avons proposée nous a permis de déterminer l'indice de vulnérabilité pour chaque bâtiment à travers les critères structuraux et non structuraux évalués à partir du diagnostic visuel des constructions endommagées par les quatre séismes et de déterminer les fonctions de vulnérabilité.

IV.2 Définition du territoire de l'étude

Dans ce travail de recherche nous avons étudié la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie, en utilisant des échantillons de plusieurs villes à travers le territoire Algérien endommagés lors des différents séismes (**Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000 et Boumerdes 2003**). Cette étude nous a permis de développer les courbes de vulnérabilité pour ces bâtiments en se basant sur la méthode de l'indice de vulnérabilité.

L'inventaire typologique est l'étape fondamentale dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un ensemble bâti. Dans le cadre de cette étude, l'inventaire est établi selon une approche globale afin de capter les caractéristiques principales et similaires des bâtiments qui influencent leur performance sismique, une proposition de classement typologique illustré.

- ❖ Selon l'inventaire nous avons pris en considération des échantillons des quatre séismes comme suit:
 - 2030 bâtiments des différentes communes de la wilaya de Tipaza.
 - 410 bâtiments des différentes communes de la wilaya d'Alger.
 - 1129 bâtiments des différentes villes de la commune de Béni ourtilane.
 - 9999 bâtiments des différentes communes de la wilaya de Boumerdes.
- ❖ Selon le type de structure nous avons effectué une classification du bâti existant pour chaque séisme:

Séisme de Tipaza

- 1766 bâtiments contreventés par murs porteurs en maçonnerie;
- 228 bâtiments en béton armé;
- 30 d'autres bâtiments.

Séisme d'Alger

- 314 bâtiments contreventés par murs porteurs en maçonnerie;
- 77 bâtiments en béton armé;
- 23 d'autres bâtiments.

Séisme de Béni ourtilane

- 1007 bâtiments contreventés par murs porteurs en maçonnerie;
- 98 bâtiments en béton armé;
- 24 d'autres bâtiments.

Séisme de Boumerdes

- 5071 bâtiments contreventés par murs porteurs en maçonnerie;
- 4290 bâtiments en béton armé;
- 638 d'autres bâtiments.

❖ Selon le degré de dommage nous avons quantifié les bâtiments pour chaque séisme:

Séisme de Tipaza

- 460 bâtiments sont classés sans dommage ou très faiblement endommagés, ils pourront assurer la continuité de leurs fonctions après de simple réparation, ils sont représentés par la couleur vertes;
- 1165 bâtiments ont subi des dommages plus ou moins importants et qui nécessitent une expertise plus approfondie ils sont représentés par la couleur orange;
- 141 bâtiments ont subi des dommages considérables et sont classés à démolir ils sont représentés par la couleur rouge.

Séisme d'Alger

- 92 bâtiments sont classés sans dommage ou très faiblement endommagés, ils pourront assurer la continuité de leurs fonctions après de simple réparation, ils sont représentés par la couleur vertes;
- 170 bâtiments ont subi des dommages plus ou moins importants et qui nécessitent une expertise plus approfondie ils sont représentés par la couleur orange;
- 152 bâtiments ont subi des dommages considérables et sont classés à démolir ils sont représentés par la couleur rouge.

Séisme de Bénie ourtilane

- 341 bâtiments sont classés sans dommage ou très faiblement endommagés, ils pourront assurer la continuité de leurs fonctions après de simple réparation, ils sont représentés par la couleur vertes;
- 496 bâtiments ont subi des dommages plus ou moins importants et qui nécessitent une expertise plus approfondie ils sont représentés par la couleur orange;
- 170 bâtiments ont subi des dommages considérables et sont classés à démolir ils sont représentés par la couleur rouge.

Séisme de Boumerdes

- 2355 bâtiments sont classés sans dommage ou très faiblement endommagés, ils pourront assurer la continuité de leurs fonctions après de simple réparation, ils sont représentés par la couleur vertes;
- 2170 bâtiments ont subi des dommages plus ou moins importants et qui nécessitent une expertise plus approfondie ils sont représentés par la couleur orange;
- 546 bâtiments ont subi des dommages considérables et sont classés à démolir ils sont représentés par la couleur rouge.

IV.3 Critères de vulnérabilité

La méthode de l'indice de vulnérabilité consiste à identifier des paramètres structuraux ou non structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure. Une fois ces paramètres identifiés, on leur affecte un coefficient pour tenir compte de leur prépondérance les uns par rapport aux autres. Cette prépondérance est affectée aussi par le respect ou non des règlements parasismique lorsqu'ils existent.

En nous basant sur les développements effectués par (Benedetti et al [88], GNDT [94]). Les bâtiments ont été numérisés dans une base de données qui comporte leurs fiches d'enquêtes techniques. Donc on a sélectionné huit critères de vulnérabilité, les plus défavorables observés d'après les différents séismes. Il s'agit de :

- 1 Vétusté des matériaux (Vm)
- 2 Qualité du contreventement (Qc)
- 3 Eléments secondaires (Es).
4. Chaînage des murs (Cm)
5. Irrégularité en élévation (Ié)
- 6 Asymétrie en plan (As)
- 7 Redondance des files (Rf).
- 8 Condition de sol (So).

IV.4 Importance des dommages et coefficients de pondération

Nous proposons un tableau combine les paramètres des quatre séismes (Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000 et Boumerdes 2003) que nous estimons prépondérant dans l'estimation de la qualité sismique des constructions.

Les résultats du tableau 4.1 représentent le pourcentage des bâtiments endommagés par rapport aux critères de vulnérabilité, les coefficients de pondération représentant l'importance de chacun (les critères de vulnérabilité) dans le comportement global et le coefficient de pondération normalisé obtenu en divisant la valeur du coefficient de pondération obtenue par la valeur maximale.

Tableau IV.1: Coefficients de pondération de chaque critère de vulnérabilité

paramètres	Tipaza 1989		Alger 1996		Béni Ourtilane 2000		Boumerdes 2003	
	Facteur de pondération	Facteur de pondération normalise	Facteur de pondération	Facteur de pondération normalise	Facteur de pondération	Facteur de pondération normalise	Facteur de pondération	Facteur de pondération normalise
Vétusté des matériaux (Vm)	0.83	1	0.76	0.80	0.26	0.47	0.13	0.24
Qualité du contreventement (Qc)	0.70	0.84	0.58	0.61	0.53	0.95	0.54	1
Eléments secondaires (Es)	0.55	0.66	0.44	0.46	0.36	0.64	0.33	0.61
Chaînage des murs (Cm)	0.46	0.55	0.96	1	0.55	1	0.20	0.37
Irrégularité en élévation (Ié)	0.11	0.13	0.28	0.29	0.16	0.30	0.28	0.52
Asymétrie en plan (As)	0.11	0.13	0.32	0.33	0.16	0.29	0.32	0.59
Redondance des files (Rf)	0.09	0.11	0.26	0.27	0.25	0.46	0.29	0.53
Condition de sol (So)	0.002	0.002	0.14	0.14	0.11	0.20	0.07	0.13

Ce tableau est mené afin de faire ressortir les points communs entre les différents séismes, c'est-à-dire nous a permis de déterminer les critères pathologiques les plus défavorables (vétusté des matériaux, qualité du contreventement et chaînage des murs) de chaque séisme (voir les graphes IV.1, IV.2, IV.3, IV.4), donc l'étude a permis de mieux connaître le bâti existant et sa vulnérabilité sismique.

IV.5 Estimation de dommage par structure

La vulnérabilité sismique est exprimée par une fonction de dommages attendus aux constructions (légers, modérés, graves, effondrement) selon l'intensité de l'événement. Evaluer la vulnérabilité sismique d'une structure signifie donc exprimer de telles fonctions de dommages, c'est à dire en d'autres mots prévoir le comportement d'une structure donnée lors d'un séisme donné.

Des études antérieures ont montré que des événements de même intensité (I) ont causé des dommages considérablement différents sur les constructions. Malgré le développement des connaissances des mouvements forts du sol, l'intensité reste un paramètre important dans l'observation des dommages enregistrés lors des derniers séismes, à compter de celui d'El Asnam du 10 Octobre 1980. La quantité de dommages enregistrée dans chaque structure expertisée est obtenue en attribuant à chaque élément une valeur dans une échelle graduelle représentée par des niveaux et des couleurs, cette classification a été établie par l'organisme de contrôle technique des constructions Algérien (C.T.C.) (voir le tableau IV.2).

Le dommage total de la structure est égal à la somme des dommages enregistrés de toutes les composantes structurelles et non structurelles du bâtiment. L'importance des dommages est exprimée en pourcentage.

Tableau IV.2: Echelle d'évaluation du degré de dommage.

Dommages	Aucun	Léger	Modéré	Important	Destruction totale
Valeurs	1	2	3	4	5
Couleurs	Vert	Vert	Orange	Orange	Rouge
Pourcentage	0%	25%	50%	75%	100%

D'après le tableau IV.2, le taux d'endommagement pour chaque structure est compris entre 0% et 100%. Le degré de dommage maximal sera égal à 40. Il est obtenu lorsque tous les critères de vulnérabilité atteignent la valeur maximale de 5. Le degré de dommage est normalisé en divisant la valeur obtenue par la valeur maximale de $D=40$, donc le dommage sera compris entre 0 et 1.

$$0 < D < 1$$

IV.6 Calcul de l'indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité sera calculé à partir des huit critères de vulnérabilité (Voir tableau 4.1). Ces critères sont obtenus à partir du diagnostic visuel des éléments structuraux et non structuraux composant le bâtiment.

L'indice de vulnérabilité V pour chaque bâtiment est égal à la somme des produits de tous les degrés d'appréciation des critères de vulnérabilité [6]. par leur coefficient de pondération. Les résultats obtenus peuvent s'écrire comme suit :

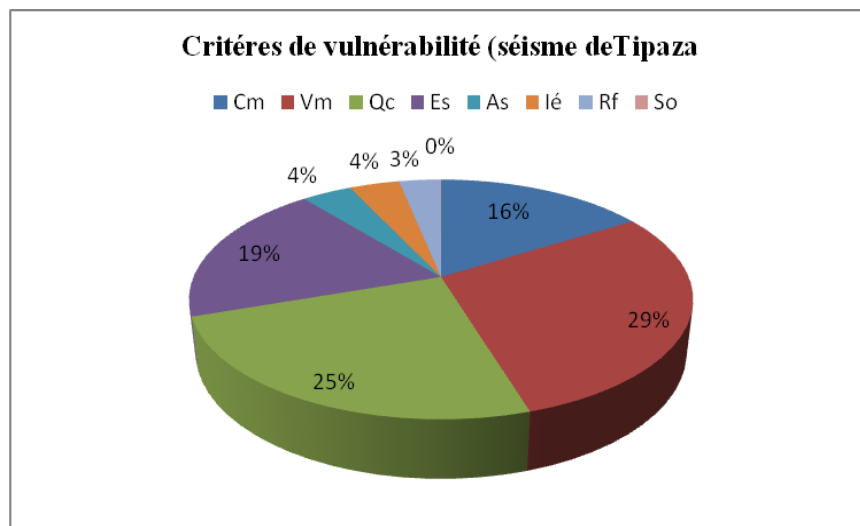
$$V = \text{Somme Pondérée des facteurs de vulnérabilité}$$

L'expression de l'indice de vulnérabilité de chaque bâtiment (V) pour les quatre séismes s'écrit donc comme suit :

D'après le tableau (IV.4) on a trace les graphes (IV.1, IV.2, IV.3, IV.4) qui montrent la répartition des critères de vulnérabilité de chaque séisme

❖ L'équation (IV.1) du séisme de Tipaza 1989

$$V = V_m + 0.84Q_c + 0.66E_s + 0.55C_m + 0.13I_e + 0.13A_s + 0.11R_f + 0.002S_o \quad (IV.1)$$

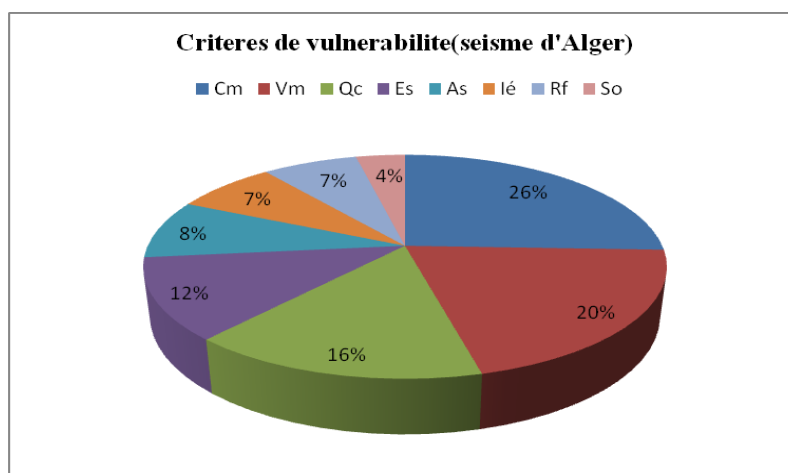


Graphique IV.1: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Tipaza)

Graphique IV.1: La majorité des constructions de la période coloniale sont en maçonnerie, donc les dommages essentiels sont dus à la mauvaise qualité des matériaux de construction, les fissures des murs de contreventement et à l'inexistence de chaînage

❖ L'équation (IV.2) du séisme d'Alger 1996

$$V=Cm+0.8Vm+0.61Qc+0.46Es+0.33As+0.29Ié+0.27Rf+0.14So \quad (IV.2)$$

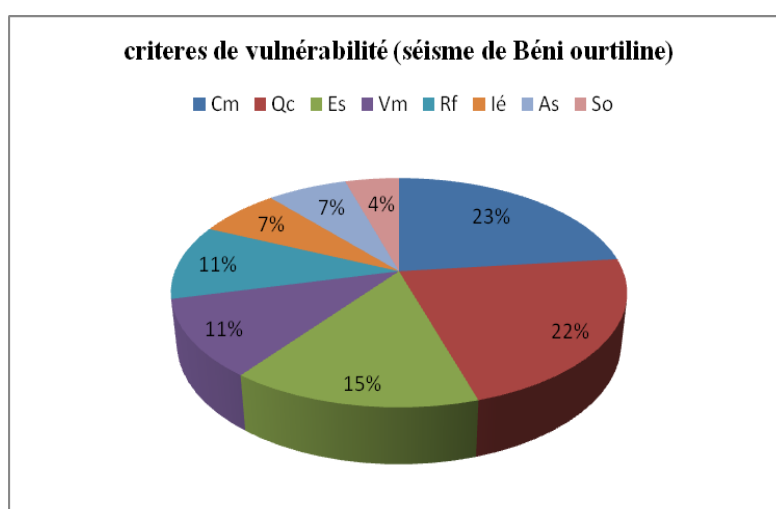


Graphé IV.2: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme d'Alger)

Graphé IV.2: Ces constructions traditionnelles se rencontre principalement au centre des agglomérations et constituent les vieux tissus urbains, donc les dommages sont principalement dus au type de la maçonnerie porteuses massives de pierres, en général non chaînées.

❖ L'équation (IV.3) Le séisme de Béni Ourtilane 2000

$$V=Cm+0.95Qc+0.64Es+0.85Ié+0.47Vm+0.46Rf+0.30Ié+0.29A+0.20So \quad (IV.3)$$

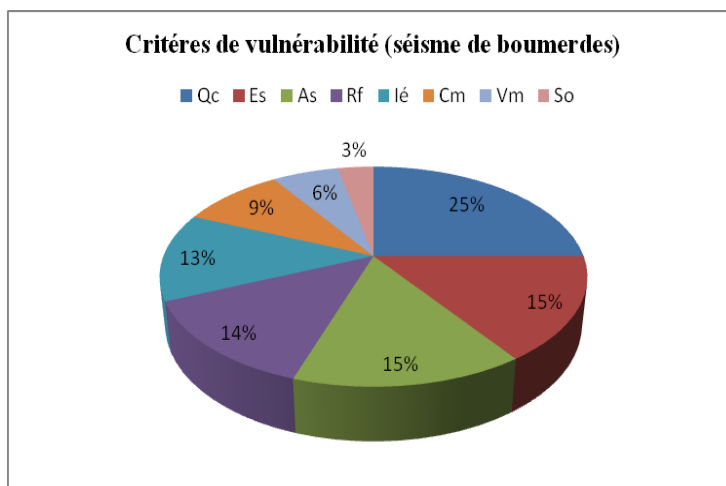


Graphé IV.3: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Béni Ourtilane)

Graphe IV.3: Ces constructions individuelles, généralement en maçonnerie ancienne de blocs de terre ou de pierres liées à la chaux ou en briques de terre cuites chaînée ou non chaînée.

❖ **L'équation (IV.4) Le séisme de Boumerdes 2003**

$$V=QC+0.61Es+0.59As+0.53Rf+0.52Ié+0.37Cm+0.24Vm+0.13So \quad (IV.4)$$



Graphe IV.4: la répartition des critères de vulnérabilité (séisme de Boumerdes)

Graphe IV.4: Les constructions réalisées avec l'utilisation de nouvelles techniques (chainage des murs), donc les dommages sont lie principalement aux non structuraux (éléments secondaires).

On peut conclure que le développement des connaissances dans le domaine de la construction en maçonnerie a permis également de déterminer le pourcentage des bâtiments endommagés par rapport aux critères les plus vulnérable pour différentes séismes (Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000 et Boumerdes 2003).

Donc les dommages que nous avons recensés sont dus à la vétusté des matériaux, d'où fissurations importantes sur les murs porteurs et les murs contreventement, à l'inexistence des chainages des murs, d'où fissurations verticales importantes aux jonctions des murs ainsi qu'à la mauvaise qualité des éléments secondaires. Ceux sont les critères pathologiques les plus importants observés d'après les fiches d'évaluation de dommage.

IV.7 Corrélation ou fonction de vulnérabilité

La corrélation entre les dommages enregistrés (**D**) et les indices de vulnérabilité déterminés (**V**) peut être développée sous la forme quadratique pour les (04) séismes:

L'analyse des paires (D, V) a permis de déterminer les coefficients de régression par la méthode des moindres carrés pour chaque type de fonction.

Nous avons retenu dans cette étude les fonctions de vulnérabilité de type quadratique sont présente par la suite:

En effet le travail basé sur les dommages observés lors de séismes passés et qui permettent d'obtenir des fonctions de dommages probables associées à une classe de bâtiment. Ces fonctions servent ensuite à développer des courbes de vulnérabilité donnant pour un type de bâtiment la probabilité qu'un certain degré d'endommagement survienne en fonction de l'indice de vulnérabilité d'un séisme.

IV.8 Courbes de vulnérabilité

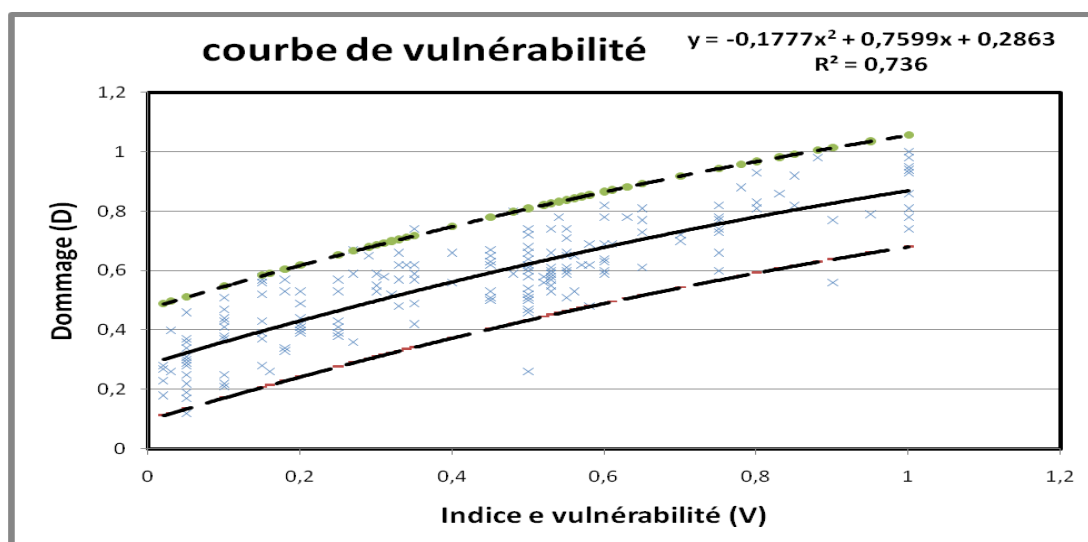
Les fonctions de vulnérabilité nous permettons de tracée des courbes quadratiques évidemment croissantes, et montrent l'évolution du degré d'endommagement en fonction de l'indice de vulnérabilité, comme il a été défini précédemment, résulte de plusieurs indicateurs structuraux et non structuraux considérés comme contrôlant le comportement du bâtiment vis-à-vis du séisme.

Les graphes **IV.5, IV.6, IV.7 IV.8** montrent les courbes des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité pour les séismes (**Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000, Boumerdes 2003**)

Les résultats numériques des indices de vulnérabilité V et les degrés de dommage D avec l'intervalle des valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ calculés pour chaque bâtiment d'après l'analyse des fiches d'évaluation concernant les bâtiments endommagés lors de différentes séismes sont reportés dans les tableaux de (Annexe E)

Effectivement, Le fuseau des valeurs possibles de ces dommages $[D+\sigma ; D-\sigma]$ se rapprochera des valeurs limites et permet de prendre en considération l'incertitude liée au manque de données. Donc ce fuseau est généralement utilisé pour limiter l'incertitude et le quantifier correctement.

Courbe de vulnérabilité du séisme Tipaza 1989

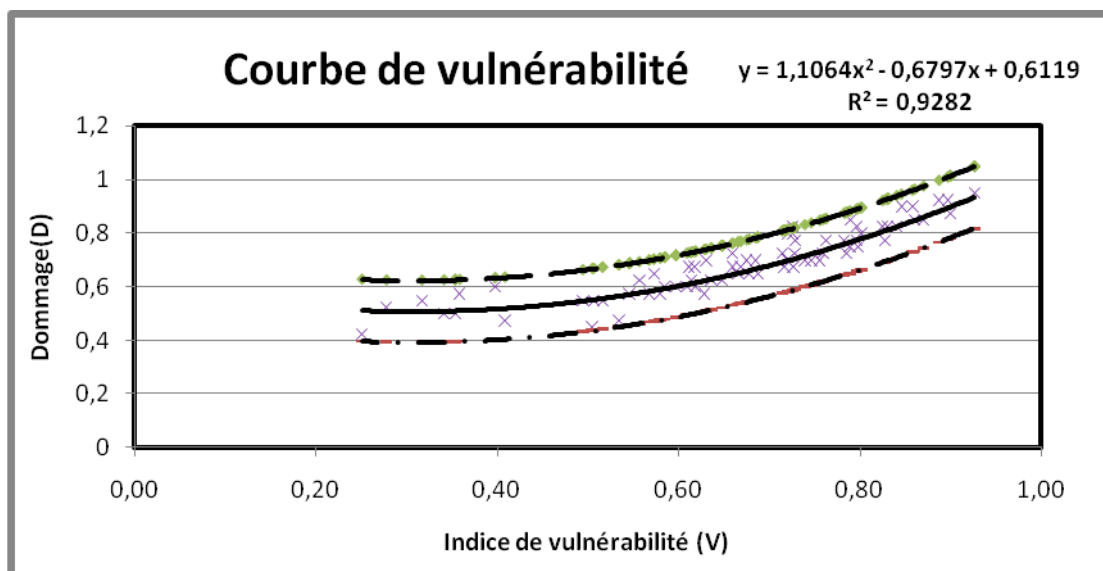


Graphe IV.5:la courbe de vulnérabilité (séisme Tipaza1989)

Le graphe IV.5 montre l'appréciation des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité avec l'intervalle de valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ pour la fonction quadratique

$$D = -1.177V^2 - 0.759V + 0.286 \quad (\text{IV.5})$$

Courbe de vulnérabilité du séisme Alger 1996

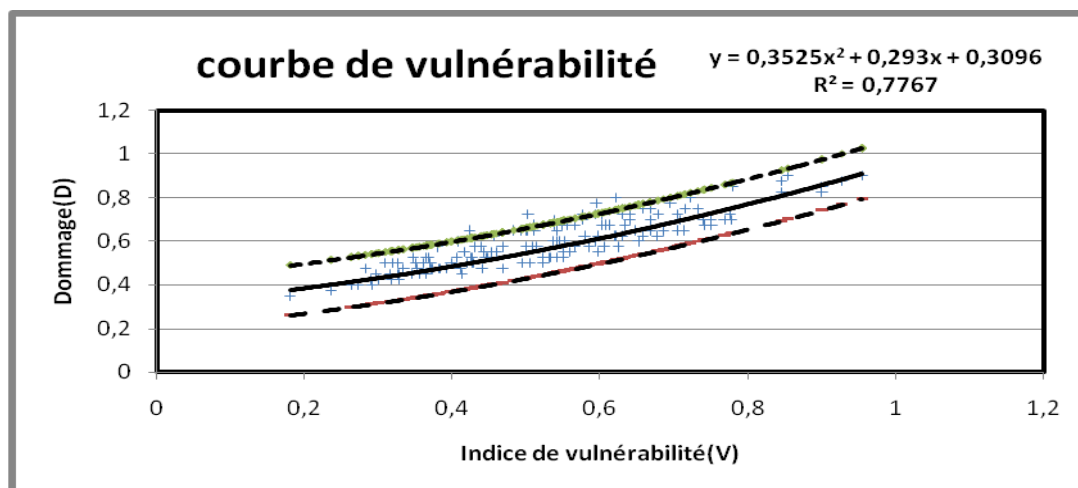


Graphe IV.6:la courbe de vulnérabilité (séisme Alger1996)

Le graphe IV.6 montre l'appréciation des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité avec l'intervalle de valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ pour la fonction quadratique.

$$D=1.106V^2-0.679V+0.611 \quad (\text{IV.6})$$

Courbe de vulnérabilité du séisme Béni Ortilane 2000

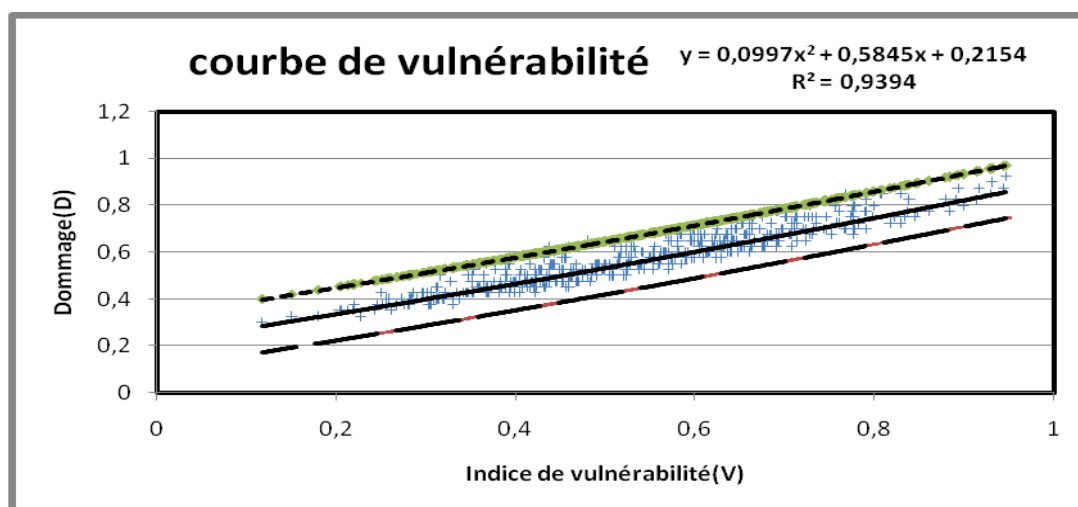


Graphe IV.7:la courbe de vulnérabilité (séisme Béni Ourtilane2000)

Le graphe IV.7 montre l'appréciation des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité avec l'intervalle de valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ pour la fonction quadratique.

$$D=0.352 V^2+0.293V+0.309 \quad (\text{IV.7})$$

Courbe de vulnérabilité du séisme Boumerdes 2003



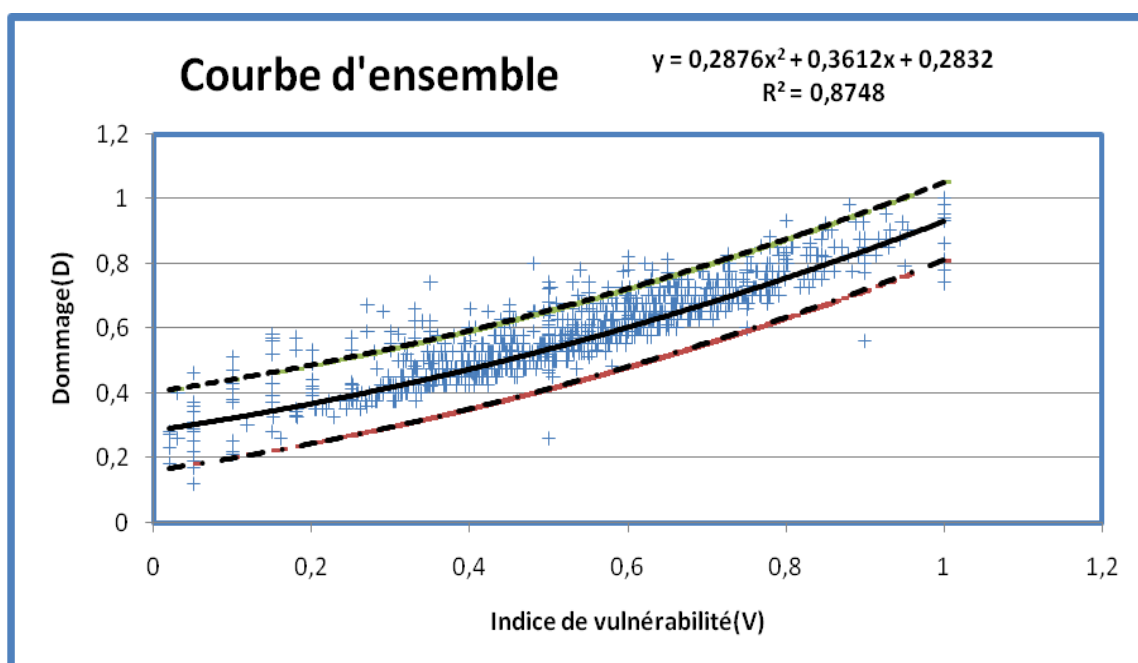
Graphe IV.8:la courbe de vulnérabilité (séisme Boumesdes2003)

Le graphe IV.8 montre l'appréciation des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité avec l'intervalle de valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ pour la fonction quadratique.

$$D=0.099 V^2+0.584V+0.215 \quad (\text{IV.8})$$

Donc on peut conclure que la courbe de vulnérabilité nous permettra, en fonction de l'indice de vulnérabilité du bâtiment, de prévoir un degré de dommage attendu avec un certain degré de fiabilité. Cette méthode basée sur les facteurs de pathologie nous permettra de dimensionner les mesures préventives à appliquer pour les bâtiments existants dans les zones sismiquement actives dans le cadre de la politique de la réduction du risque sismique.

Courbe d'ensemble de séismes (Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000, Boumerdes 2003)



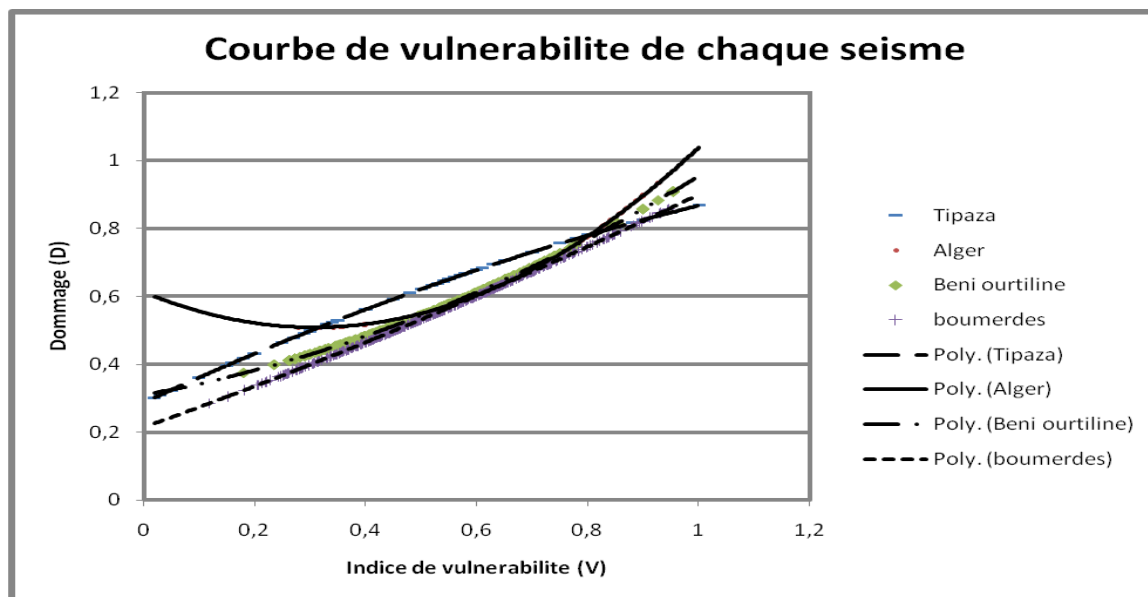
Graphe IV.9:la courbe d'ensemble de l'Algérie

Le graphe IV.9 montre l'appréciation des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité avec l'intervalle de valeurs probables $[D+\sigma ; D-\sigma]$ pour la fonction d'ensemble de l'Algérie

$$D=0.287 V^2+0.361V+0.283 \quad (\text{IV.9})$$

Cette courbe d'ensemble des 04 séismes permet pour chaque indice de vulnérabilité de déterminer le taux de bâtiments subissant un certain niveau de dégâts. En d'autres mots, cette courbe permet de réaliser des scénarios pour les différentes villes à travers le territoire Algérien.

Courbe de vulnérabilité de chaque séisme



Grphe IV.10:la courbe de vulnérabilité de chaque séisme

Les courbes de vulnérabilité de chaque séisme relient l'endommagement probable des structures à la violence des secousses sismiques par rapport à l'indice de vulnérabilité dans la considération des critères de vulnérabilité et la typologie de la structure

D'après le graphe on remarque que l'allure des courbes de vulnérabilité sont différentes donc on peut dire que chaque courbe de vulnérabilité dépend des caractéristiques structurales propres aux bâtiments. Malgré le développement des connaissances des mouvements forts du sol, l'intensité reste un paramètre important dans l'observation des dommages enregistrés lors des derniers séismes

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie, en utilisant plusieurs échantillons des bâtiments endommagés lors des différents séismes

Cette étude nous a permis de développer les courbes de vulnérabilité pour ces bâtiments en se basant sur la méthode de l'indice de vulnérabilité.

Cette étude a permis donc de mieux connaître la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie pour les différentes régions des villes de l'Algérie, elle nous a permis de déterminer les critères pathologiques les plus défavorable (vétusté des matériaux, qualité du contreventement et chaînage des murs) de ce type de bâti, des courbes des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité pour les séismes (Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000, Boumerdes 2003) et une courbe d'ensemble de l'Algérie

Nous suggérons l'utilisation de cette méthodologie pour d'autres typologies de bâtiments (Bâtiments en béton armé ou mixte) et dans d'autres zones urbaines sujettes aux séismes afin d'obtenir une première sélection et de connaître les zones les plus sensibles et de définir ainsi les priorités à prendre en compte pour la protection de ceux-ci ainsi que de la population lors de futures séismes.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'analyse de la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie existants signifie l'estimation de leur consistance en termes quantitatifs et qualitatifs, en particulier l'estimation de leur degré d'endommagement vis-à-vis des événements sismiques. L'évaluation de cette vulnérabilité sismique est menée dans ce travail par une méthode de classification des bâtiments en maçonnerie appelée « Méthode de l'indice de vulnérabilité ». Celle-ci consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment, cette valeur est dite *Indice de vulnérabilité*, I_v , représente la somme pondérée des valeurs numériques exprimant la qualité sismique des éléments structuraux ou non structuraux qui joue un rôle significatif dans la réponse sismique de la structure.

Dans ce travail de recherche nous avons étudié la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie, en utilisant des échantillons de plusieurs villes travers le territoire Algérien endommagés lors des séismes différentes (**Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000, Boumerdes 2003**) Cette étude nous a permis de développer les courbes de vulnérabilité pour ces bâtiments en se basant sur la méthode de l'indice de vulnérabilité.

Cette étude a permis donc de mieux connaître la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie pour les différentes régions des villes de l'Algérie, elle nous a permis de déterminer les critères pathologiques les plus défavorable (vétusté des matériaux, qualité du contreventement et chaînage des murs) de ce type de bâti, des courbes des dommages par rapport à l'indice de vulnérabilité pour les séismes (Tipaza 1989, Alger 1996, Béni Ourtilane 2000, Boumerdes 2003) et une courbe d'ensemble de l'Algérie

L'ensemble des résultats obtenus nous permettra de prévoir les dommages dans d'autres sites de même configuration durant les futurs séismes, d'établir un outil pour préparer des scénarios dans d'autres villes ayant la même morphologie et la même typologie du cadre bâti afin de choisir les premières mesures de réhabilitation parasismique et nous permettra également d'élaborer un instrument de gestion pour les zones sismiquement actives.

Nous suggérons l'utilisation de cette méthode pour d'autres typologie de bâtiments (bâtiments en béton armé, en charpente métallique) et dans d'autres zones urbaines sujettes aux séismes afin d'obtenir une première sélection et de connaître les zones les plus sensibles et de définir ainsi les priorités à prendre en compte pour la protection de ceux-ci ainsi que de la population lors de futures séismes.

En conséquence, l'étude de la vulnérabilité sismique de ces constructions en maçonnerie s'avère nécessaire et constitue, donc, une étape primordiale pour la réduction des pertes dues aux séismes dans une ville. La vulnérabilité peut être réduite si des mesures préventives sont prises.

REFERENCES

REFERENCES

- [1] AFPS. Cahier technique N°24, Première recommandations en vue l'évaluation de la présomption de vulnérabilité au séisme du bâti existant. Mars 2002.
- [2] AFPS. Le séisme du 21 mai 2003 en Algérie .Rapport préliminaire de la mission AFPS Organisée avec le concours du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ; version du 08.07.2003. Sur le site de l'AFPS (<http://www.afps-seisme.org>).
- [3] Ayadi.A, Benhallou.H et Bourouis.S, Seismotectonics and seismic quietness of the Oranie region (Western Algeria): The Mascara earthquake of August 18th 1994. J. Seismology, 6-13-23-2002.
- [4] Azzouz.H, Adib.A et Rebzani.B. Boumerdes 2003, Leçon d'un seisme.CTC Chlef / Société de Gestion des Participations Etudes et Engineering. Alger Septembre 2005.
- [5] Benedetti.D, Petrini.V. «Sulla vulnerabilita sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione l'industria delle costruzioni » P 66-74. Volume 18, (1984).
- [6] Benedetti.D, Benzoni.G. « Seismic vulnerability index versus damage for unreinforced masonry buildings », Proceeding of international conference on reconstruction, restauration and urban planning of towns and regions in seismic prone areas. Skopje, Yougoslavie. Novembre1985.
- [7] Benedetti.D, Benzoni.G and Parisi.M.A. Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, Earthquake Engineering and structural dynamics. P16, (1988)
- [8] Benhallou.H, Bezzeghoud.M, Messaoud.A, Mokrane.A, Sebaï.A. Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI), Avances en Geofisica y Geodesia, I (1), Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente, Instituto Geografico National Espagna. PP 107-114, (1996).
- [9] Benouar.DJ, Foufa.A. Méthodologie de la fonction de la vulnérabilité et du risque sismique dans les centres urbains coloniaux. Cas de Tipaza Actes du 1^{er} colloque national de CGS.P289a 298.Volume1 AGS, Alger, Juin1996.

- [10] Belhaid.H, Bohadad.Y. La Technique Active: Exemple de l'Algérie du Nord in (Risque, Vulnérabilité et fiabilité dans la construction, vers une réduction des désastres). Algérie, 11et12octobre2003
- [11] Boudiaf.A, Philip.H. Tectonique active et risque sismique dans le bassin de la Soummam, Kabylie, Algérie. 1er colloque National de Génie Parasismique, Alger, 4-6 Juin 1996
- [12] Boudiaf.A, Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie. Thèse de Doctorat de l'université de Montpellier II, France, P273 Mai 1996.
- [13] Bouhadad.Y, Laouami.N et Nour.A. The Beni-Ourtilane-Tachaouaft fault and Seismotectonic aspects of the Babors region (NE of Algeria). Journal of Seismology, P 79-88. Volume 1, (2003).
- [14] Bouguerba.A, Le Séisme d'Alger du 21 Mai 2003, Revue Marocaine de Génie Civil, N°104/ P09-29, (2003).
- [15] Bousaffa.A, Ben Slimane.R. Contribution Hydrologique de la Région de Batna (Tazolta Ain Touta), Mémoire d'ingénieur Université de Constantine (1997).
- [16] C.G.S. Actes des Journées d'Etudes.in (Prévention et Action Post Sismique) Tipaza. Algérie, 5-6 Février 1990.
- [17] C.G.S. Actes séminaire:« Construction Parasismique, Architecture Et Aménagement En Zone Sismique », 21 et 22 juin 1999.
- [18] C.G.S. Règles parasismique Algériennes (RPA version 2003). ISBN: 9961-923-13-8. (2004).
- [19] C.G.S. Actes séminaire Règle de conception et de calcul parasismique des structures : présentation de MR Ameer Boualem, « Enseignement du 21mai 2003 » ; les 14, 15,16 mars 2004.

- [20] CGS. Alea Sismique en Algérie et Microzonage, Cas de L'Algérie, Volume1 (2004).
- [21] Chehzed.B. Dynamique D'espace et les formes Urbains de la ville de Batna, Mémoire d'ingénieur, Université de Constantine (2001).
- [22] Combescure.D, Gueguen.P et Lebrun.B. Vulnérabilité sismique du bâti existant Approche d'ensemble. Document de travail. Grenoble: Groupe AFPS. P10, (2005).
- [23] Davidovici.Victor, La construction en zone sismique. Le moniteur, (1999).
- [24] Davidovici.V, « Séisme de Boumerdes-21 mai 2003 », Rapport définitif Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 23 juillet 2003.
- [25] D'Ayala.D, et Speranza.E. « An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings ». In 12th European conference on earthquake engineering (Londres, 9-13 septembre 2002). P 3-3, Vol. 3. Elsevier Science Ltd(2002).
- [26] FEMA. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook. Rapport FEMA-154. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency (1988).
- [27] Filiatrault.A. Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Montréal: Éditions de l'École polytechnique de Montréal. P478, (1996).
- [28] Giovinazzi.S. « The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis ». These de doctorat en génie en ligne, Braunschweig (Germany) and Florence (Italy), Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig and University of Florence. P200, In Braunschweig university library (2005).
- [29] Giovinazzi.S and Lagomarsino.S. Seismic risk analysis: a method for the vulnerability analysis of built-up areas, European Safety and Reliability Conf. ESREL, June, Maastricht, The Netherlands (2003).
- [30] GNDT. Rischio Sismico di Edifici Pubblici - Parte I: aspetti metodologici. Cento Servizi Quasco, Bologna (1993).

[31] GNDT. Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici - Istruzioni per la compilazione della scheda di 2° livello: Muratura. Roma: Groupe national de défense contre les tremblements de terre (1994).

[32] Groupe de Recherche Néotectonique de L'arc de Gibraltar. « L'histoire tectonique récente de l'arc de Gibraltar et des bordures de la mer d'Alboran » le bulletin de la société géologique de France (1977).

[33] Grünthal.G, Musson.M.W et Stucchi.M, L'échelle macrosismique européenne (EMS-98). Coll. « Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie ». Luxembourg: Conseil de l'Europe (1998).

[34] Harbi.A, Maouche.S, Les principaux séismes du Nord-Est de l'Algérie. Mémoires du Service Géologique National, Alger. P 81, (2009).

[35] Lagomarsino.S, Giovinazzi.S, Podestà.S et Resemini.S, WP5: Vulnerability assessment of historical and monumental buildings - Handbook. Coll. « An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns », Contract: EVK4-CT-2000-00014. Genes: University of Genoa. P90, (2000).

[36] Lang.K, « Seismic vulnerability of existing buildings ». Thèse Dr.sc.techn. en ligne, Switzerland, Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich (Switzerland). P189, In Proquest (2002).

[37] Larousse, Le petit Larousse illustré en couleur. Paris: Larousse. P1812, (2008).

[38] Lefebvre.K, « Caractérisation structurale et évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments historiques en maçonnerie du Vieux-Montréal ». Mémoire de maîtrise, Canada, École de technologie supérieure (Canada). P208, In Proquest (2004).

[39] Lestuzzi.P et Badoux.M, Conception et dimensionnement des bâtiments. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires. P346, (2008).

[40] Meghraoui.M, Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie: paleosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique, Thèse de doctorat es-sciences, Université de Paris 11, France. P356, (1988).

[41] Milan. Zacek, « Construction parasismique», Editions (1996).

[42] Nollet,M-J. Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants : état des connaissances. En ligne. Coll. « Rapport technique ». Montréal: École de technologie supérieure, 81 f. p. <<http://www.etsmtl.ca/biblio/ets-rt/2004/ets-rt-2004-001.pdf>>. Consulté le 12 oct 2008.

[43] Revue française de Génie Civil. P 471 à 498, Volume 7- N°45 (2003).

[44] Rapport final de PFE de Jean-François.G, (Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments) INSA Strasbourg, Spécialité Génie Civil, Option Construction, Mars-Juillet 2007.

[45] RISK-UE, An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns, Projet Européen, EVK4-CT-2000-00014 28 (2003).






[46] Seismocare Computed Aided Reduction of Seismic Risk with application to existing cities, town planning and construction - Directions to fill in the vulnerability form GNDT levels 1 and 2, Projet Européen Environment and Climate (1994-1998).

[47] VULNERALP. Projet d'évaluation de la vulnérabilité sismique à Grenoble. [http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/~pgueg/VULNERALP](http://www-<u>lgit.obs.ujf-grenoble.fr/~pgueg/VULNERALP) (2006).

ANNEXES

ANNEXES A

Classification et description des dommages pour les bâtiments en maçonnerie EMS98

Classification des dégâts aux bâtiments en MAÇONNERIE	
	<p>Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux) 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>Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés) Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grand morceau de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p>Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants) Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles se détachent du toit. Fracture des cheminées à la jonction avec le toit. Défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons).</p>
	<p>Degré 4 : Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants) Défaillance sérieuse des murs, défaillance structurale partielle des toits et planchers.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (Dégâts structuraux importants) Effondrement total ou presque total.</p>

ANNEXES B

Définition de la caractérisation des dommages en fonction des intensités EM98

Degrés d'intensité	Descriptions
Intensité V: Fort	Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B
Intensité VI: Dégâts légers	Dégâts de degré 1 de nombreux bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 2 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité C
Intensité VII: Dégâts	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1
Intensité VIII: Dégâts importants	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2
Intensité IX: Destructions	De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2
Intensité X: Destructions importantes	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subit des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3 Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2
Intensité XI: Catastrophe	La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A et B subit des dégâts de degré 5 La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subit des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4 De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3

ANNEXES C

Fiche d'évaluation des dommages

FICHE D'EVALUATION DES DOMMAGES			
SEISME DE : **/**/****			
Code inspecteur :			
Date :			
IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION :			
Secteur :	Zone :		
Adresse ou éléments d'identification :			
Construction calculer au séisme :	Oui-Non		
Construction contrôlée :	Oui-Non		
USAGE DE LA CONSTRUCTION (*)			
Logement	Scolaire	Commercial	
Administratif	Hospitalier	Industriel	
Socioculturel	Sportif	Réservoir d'eau	
DESCRIPTION SOMMAIRE			
Age approximatif :			
Nombre de niveau :	Sous-sol ; Oui-Non	Vide sanitaire : Oui-Non	
Nombre de joints de dilatation :	-En élévation :	-Infrastructure :	
Eléments extérieurs indépendants : (escaliers, auvent, passage couverts.)			
PROBLEME DE SOL AUTOUR DE LA CONSTRUCTION (*)			
Faïlle : Oui-Non	Affaissement -Soulèvement :	Oui-Non	
Liquéfaction ; Oui-Non	Glissement :	Oui-Non	
FONDACTIONS-INFRASTRUCTURE			
Fondation :	Infrastructure (dans le cas VS ou S/SOL) :		
-Type de fondation	-voile béton continu: 1-2-3-4-5		
-Type de dommages	-poteaux béton avec remplissage : 1-2-3-4-5		
-Tassement uniforme :	Oui-Non		
-Glissement :	Oui-Non		
-Basculement	Oui-Non		
STRUCTURE RESISTANTE (*)			
Eléments porteurs (charges verticales)		Eléments de contreventement	
-Murs en maçonnerie	1-2-3-4-5	-Murs en maçonnerie	1-2-3-4-5
-Voiles en béton	1-2-3-4-5	-Voiles béton armé	1-2-3-4-5
-Poteau en béton	1-2-3-4-5	-Portiques béton armé	1-2-3-4-5
-Poteau métallique	1-2-3-4-5	-Portiques métalliques	1-2-3-4-5
-Poteau en bois	1-2-3-4-5	- Palées triangulées	1-2-3-4-5
-Autre	1-2-3-4-5	- Autres	1-2-3-4-5
Planchers-toiture terrasse		Toiture inclinée	
-Béton armé	1-2-3-4-5	-Charpente métallique	
-Solives métalliques	1-2-3-4-5	-Charpente en bois	
-Solives bois	1-2-3-4-5	-Couverture tuile	
		-Couverture amiante ciment	
		-Couverture métallique	

ELEMENTS SECONDAIRES :			
Escalier		Remplissages extérieurs	
-Béton	1-2-3-4-5	-Maçonnerie	1-2-3-4-5
-Métal	1-2-3-4-5	-Béton préfabriqué	1-2-3-4-5
-Bois	1-2-3-4-5	- Bardages	1-2-3-4-5
		-autres	1-2-3-4-5
Autres éléments intérieurs		Elément extérieur	
-Plafond	1-2-3-4-5	-Balcons	1-2-3-4-5
-Cloisons	1-2-3-4-5	-Garde-corps	1-2-3-4-5
-Éléments vitrés	1-2-3-4-5	-Au vert	1-2-3-4-5
		-Acrotères – corniches	1-2-3-4-5
		-Cheminées	1-2-3-4-5
		- Autres	1-2-3-4-5
INFLUENCE DES CONSTRUCTIONS ADJACENTES : (*)			
La construction menace une autre construction		Oui-Non	
La construction est menacée une autre construction		Oui-Non	
La construction peut-être un soutien pour une autre construction		Oui-Non	
La construction peut-être soutenue par une autre Construction		Oui-Non	
VICTIMES :(*)			
Oui-Non -peut-être	si Oui, combien ?		
COMMENTAIRES SUR LA NATURE ET LA CAUSE PROBABLE DES DOMMAGES			
	Sens transversal (*)	Sens longitudinal (*)	
- Symétrie en plan	bon -moyen-mauvais	bon -moyen-mauvais	
- Régularité en élévation	bon -moyen-mauvais	bon -moyen-mauvais	
- Redondances des fils	bon -moyen-mauvais	bon -moyen-mauvais	

AUTRE COMMENTAIRE :	
EVALUATION FINALE (*)	
Niveau général des dommages : 1-2-3-4-5	Couleur : vert- orange-rouge
MESURES IMMEDIATES A PRENDRE	
(*) Entourer la mention utile. Dans le cas de numéros, un ou plusieurs numéros peuvent être entourés.	

ANNEXES D

Les différents types de la maçonnerie

Maçonnerie ancienne

Quelques appareils utilisés dans les structures antiques sont rappelés sur la figure 1

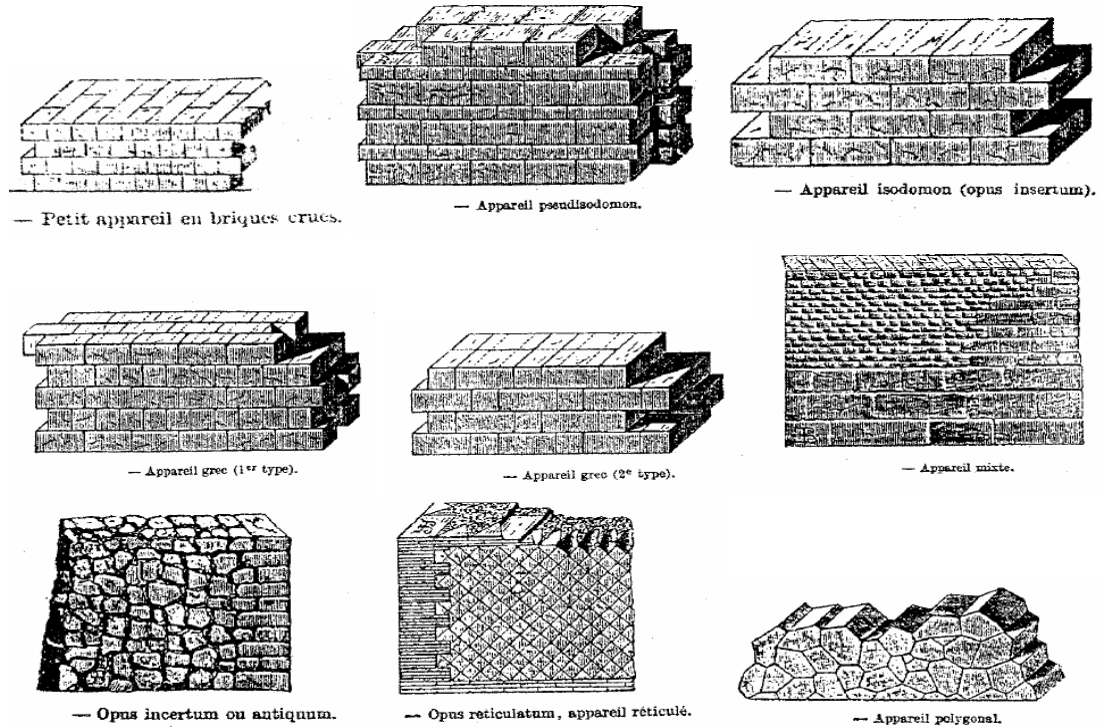


Figure 1: Appareils utilisés pendant l'antiquité [2]

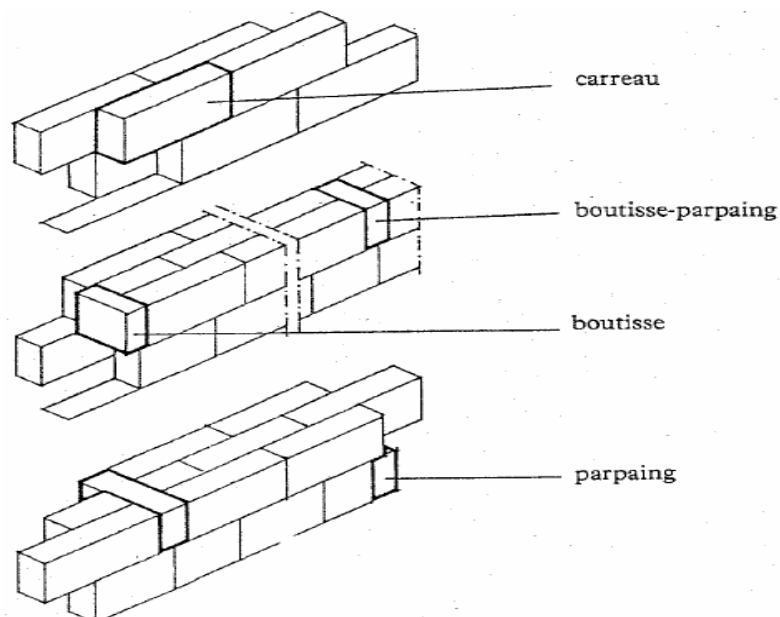


Figure 2 : Dispositions des blocs dans l'épaisseur des murs [2]

❖ Maçonnerie de pierre de taille

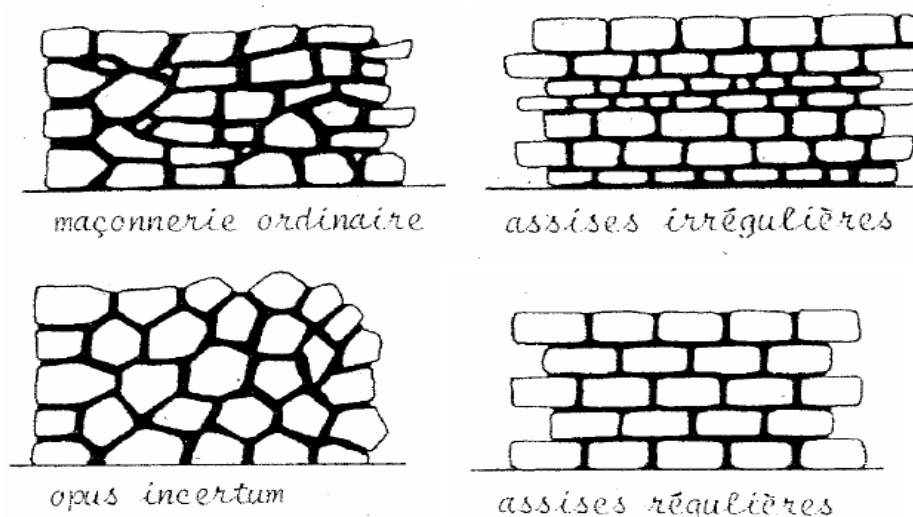
Les appareils de la maçonnerie de pierre de taille sont généralement réguliers (genre appareils “isodom” des grecs), l’esthétique résidant essentiellement dans la taille et la finition des parements.

❖ Maçonnerie de moellons

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 (Figure 3).

Les maçonneries de moellons bruts peuvent comporter deux parements (Figure 4) 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 1 ou 1.5 cm à 2 ou 3 cm 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 3). Généralement, pour des raisons d’isolation, les murs extérieurs sont formés de deux parements et leur épaisseur varie de 45 à 60cm. 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.



Moellons bruts

Moellons assisés

Figure 3: Maçonnerie de moellons [2]

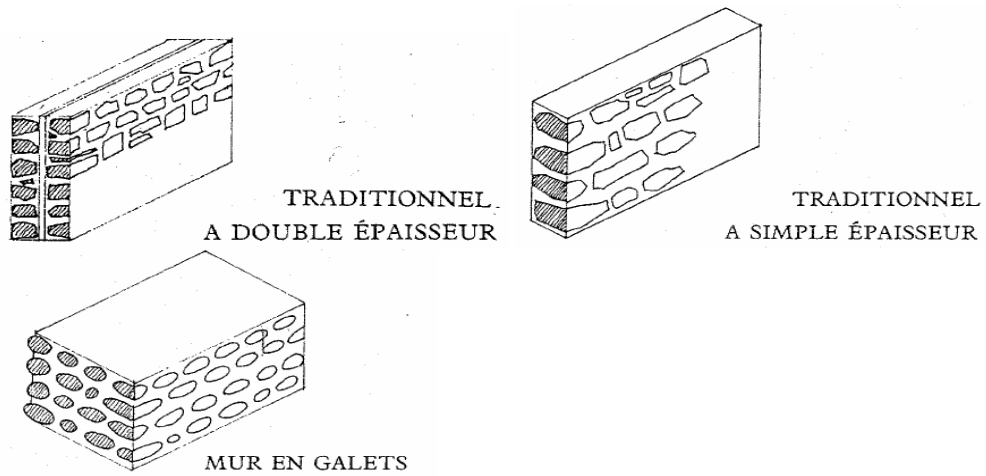


Figure 4: Différents types de murs en moellons [2]

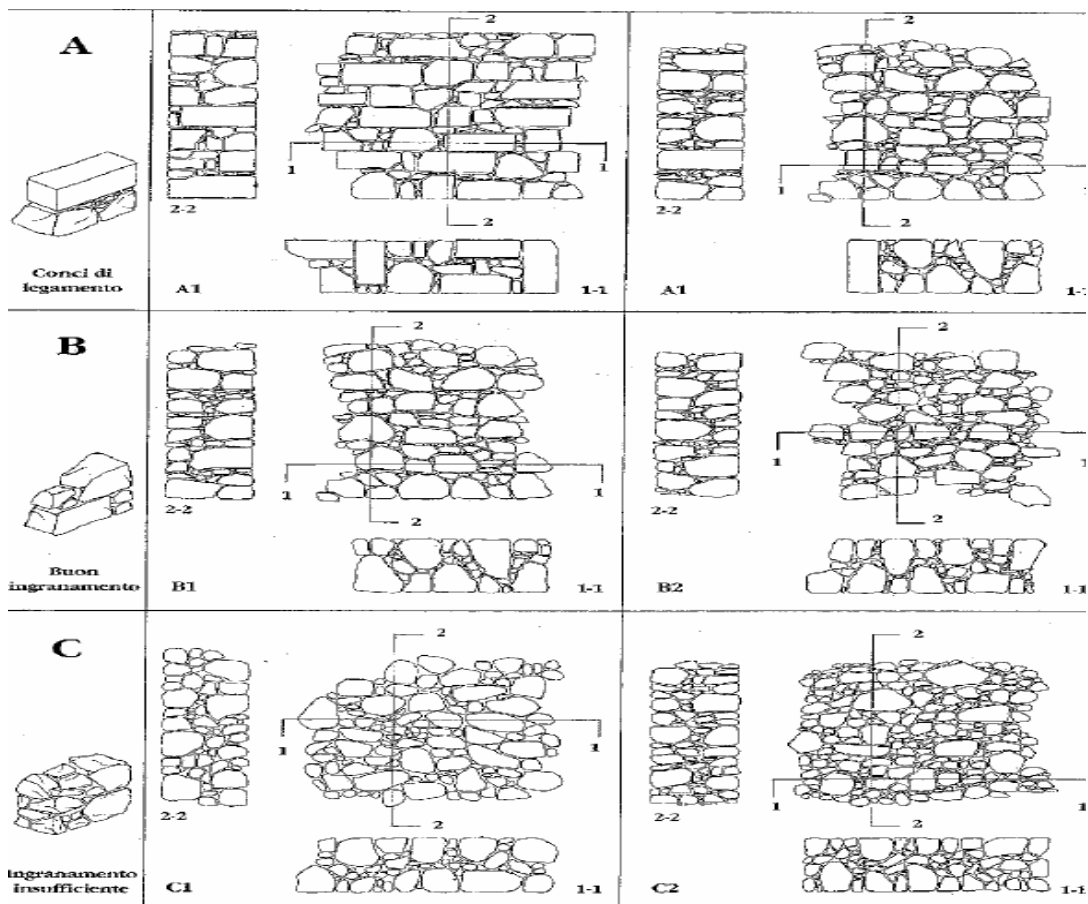


Figure 5: Exemples de classification de la maçonnerie de moellons suivant la régularité des blocs et du degré de connexion des 2 parements [2]

❖ Maçonnerie de briques

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

❖ Maçonnerie de blocs béton

Des blocs béton (parpaings ou agglomérés) sont employés dans des murs simples de maisons individuelles ou immeubles contemporains de faibles hauteurs (Figure 7). L'isolation thermique est souvent assurée par un autre matériau n'ayant aucun rôle structurel.

❖ Maçonneries composites

Ce sont des maçonneries de plusieurs sortes de matériaux dont la disposition relative peut avoir un but purement esthétique ou, plus généralement, être étudiée avec un souci de résistance de l'ensemble (Figure 8).

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 présente des redans dans lesquels s'engage la maçonnerie de remplissage.

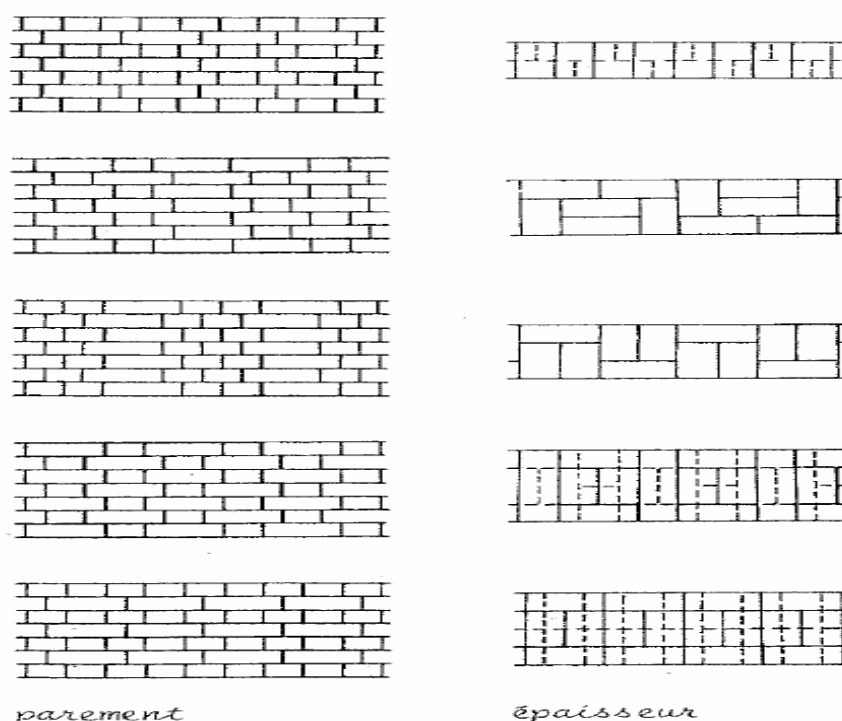


Figure 6: Maçonnerie de briques [2]

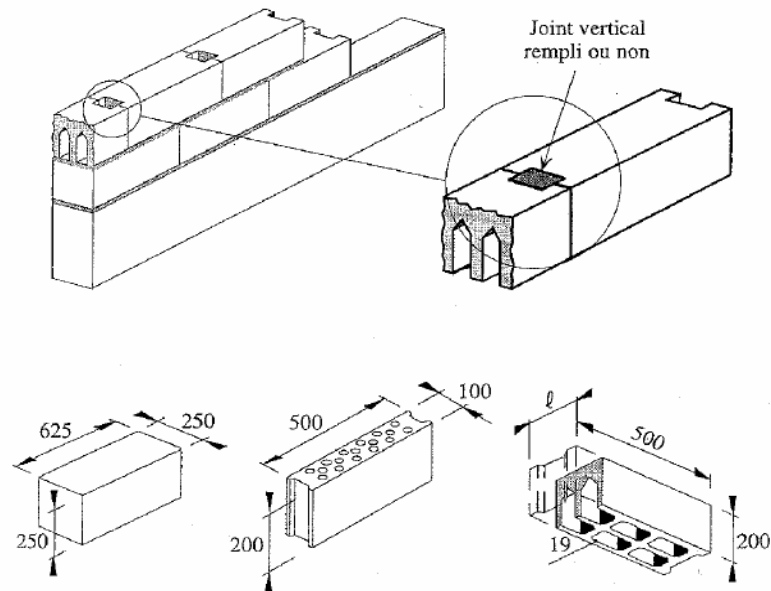


Figure 7: Maçonnerie de blocs en béton (agglomérés) [2]

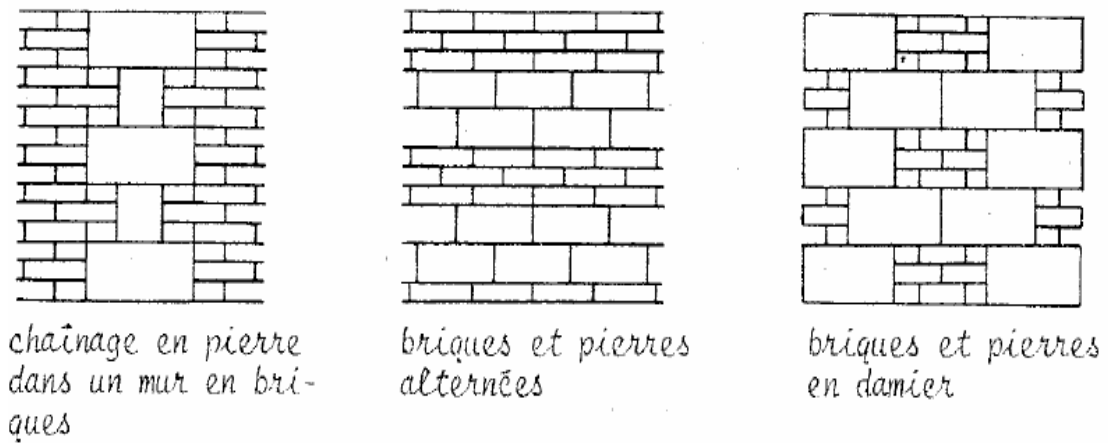


Figure 8: Exemples de maçonnerie composite [2]

ANNEXE E

Tableau : Résultats numériques des indices de vulnérabilité et degrés de dommage d'après l'analyse des fiches d'évaluation des bâtiments endommagés par les quatre séismes (Tipaza- Alger-Béni Ourtilane-Boumerdes)

Tipaza 1989

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D- σ	D+ σ
0,02	0,18	0,1134092	0,4888092
0,02	0,23	0,1134092	0,4888092
0,02	0,27	0,1134092	0,4888092
0,02	0,28	0,1134092	0,4888092
0,03	0,26	0,1209107	0,4963107
0,03	0,4	0,1209107	0,4963107
0,05	0,12	0,1358075	0,5112075
0,05	0,17	0,1358075	0,5112075
0,05	0,19	0,1358075	0,5112075
0,05	0,22	0,1358075	0,5112075
0,05	0,25	0,1358075	0,5112075
0,05	0,28	0,1358075	0,5112075
0,05	0,29	0,1358075	0,5112075
0,05	0,3	0,1358075	0,5112075
0,05	0,31	0,1358075	0,5112075
0,05	0,34	0,1358075	0,5112075
0,05	0,36	0,1358075	0,5112075
0,05	0,37	0,1358075	0,5112075
0,05	0,46	0,1358075	0,5112075
0,1	0,21	0,17243	0,54783
0,1	0,22	0,17243	0,54783
0,1	0,25	0,17243	0,54783
0,1	0,37	0,17243	0,54783
0,1	0,38	0,17243	0,54783
0,1	0,41	0,17243	0,54783
0,1	0,43	0,17243	0,54783
0,1	0,44	0,17243	0,54783
0,1	0,47	0,17243	0,54783
0,1	0,51	0,17243	0,54783
0,15	0,28	0,2081675	0,5835675
0,15	0,37	0,2081675	0,5835675
0,15	0,39	0,2081675	0,5835675
0,15	0,43	0,2081675	0,5835675
0,15	0,52	0,2081675	0,5835675

Tipaza 1989

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D- σ	D+ σ
0,15	0,57	0,2081675	0,5835675
0,15	0,58	0,2081675	0,5835675
0,16	0,26	0,2152088	0,5906088
0,18	0,33	0,2291852	0,6045852
0,18	0,34	0,2291852	0,6045852
0,18	0,53	0,2291852	0,6045852
0,18	0,57	0,2291852	0,6045852
0,2	0,39	0,24302	0,61842
0,2	0,4	0,24302	0,61842
0,2	0,41	0,24302	0,61842
0,2	0,42	0,24302	0,61842
0,2	0,44	0,24302	0,61842
0,2	0,49	0,24302	0,61842
0,2	0,53	0,24302	0,61842
0,25	0,38	0,2769875	0,6523875
0,25	0,39	0,2769875	0,6523875
0,25	0,41	0,2769875	0,6523875
0,25	0,43	0,2769875	0,6523875
0,25	0,53	0,2769875	0,6523875
0,25	0,57	0,2769875	0,6523875
0,27	0,36	0,2903267	0,6657267
0,27	0,59	0,2903267	0,6657267
0,27	0,67	0,2903267	0,6657267
0,29	0,65	0,3035243	0,6789243
0,3	0,53	0,31007	0,68547
0,3	0,55	0,31007	0,68547
0,3	0,59	0,31007	0,68547
0,31	0,58	0,3165803	0,6919803
0,32	0,52	0,3230552	0,6984552
0,33	0,48	0,3294947	0,7048947
0,33	0,57	0,3294947	0,7048947
0,33	0,62	0,3294947	0,7048947
0,33	0,66	0,3294947	0,7048947
0,34	0,62	0,3358988	0,7112988

Alger 1996

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D- σ	D+ σ
0,63	0,575	0,506100167	0,737892567
0,56	0,625	0,460698747	0,692491147
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,69	0,7	0,549774289	0,781566689
0,74	0,7	0,59864493	0,83043733
0,52	0,55	0,4401728	0,6719652
0,67	0,65	0,534094319	0,765886719
0,62	0,6	0,499358125	0,731150525
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,60	0,6	0,484833587	0,716625987
0,79	0,725	0,645180433	0,876972833
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,57	0,65	0,469844161	0,701636561
0,59	0,6	0,477174751	0,708967151
0,79	0,75	0,6485871	0,8803795
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,35	0,5	0,394023705	0,625816105
0,60	0,6	0,484833587	0,716625987
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,52	0,55	0,4401728	0,6719652
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,35	0,5	0,394023705	0,625816105
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,60	0,6	0,484833587	0,716625987
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,40	0,6	0,400756853	0,632549253
0,36	0,575	0,394582498	0,626374898
0,57	0,575	0,466855798	0,698648198
0,57	0,65	0,469844161	0,701636561
0,66	0,675	0,529049516	0,760841916
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,80	0,775	0,656855845	0,888648245
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182

Alger 1996

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,67	0,65	0,534094319	0,765886719
0,25	0,425	0,395068439	0,626860839
0,76	0,725	0,618103208	0,849895608
0,67	0,675	0,536650818	0,768443218
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182
0,32	0,55	0,391726729	0,623519129
0,76	0,775	0,621323475	0,853115875
0,76	0,775	0,621323475	0,853115875
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,72	0,675	0,577726114	0,809518514
0,61	0,625	0,496281853	0,728074253
0,83	0,825	0,69568552	0,92747792
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,61	0,625	0,496281853	0,728074253
0,69	0,65	0,551926782	0,783719182
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,66	0,725	0,529549905	0,761342305
0,76	0,775	0,621323475	0,853115875
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,83	0,825	0,69568552	0,92747792
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,59	0,6	0,477174751	0,708967151
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,51	0,55	0,435817593	0,667609993
0,65	0,625	0,520682029	0,752474429
0,55	0,575	0,454804475	0,686596875
0,61	0,625	0,496281853	0,728074253

Boumerdes 2003

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,306390977	0,4	0,29122278	0,51646703
0,384085213	0,45	0,34198357	0,56722782
0,40726817	0,45	0,3573631	0,58260735
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,508145363	0,5	0,42553255	0,6507768
0,508145363	0,5	0,42553255	0,6507768
0,484962406	0,5	0,4096867	0,63493095
0,460526316	0,5	0,39310033	0,61834458
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,359649123	0,45	0,32588873	0,55113298
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,408521303	0,45	0,35819748	0,58344172
0,369047619	0,425	0,33206497	0,55730921
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,28320802	0,4	0,27630958	0,50155383
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,423558897	0,475	0,36823444	0,59347869
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,25877193	0,4	0,26070627	0,48595052
0,384085213	0,45	0,34198357	0,56722782
0,408521303	0,45	0,35819748	0,58344172
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,220551378	0,375	0,23653985	0,4617841
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249

Boumerdes 2003

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,40726817	0,45	0,3573631	0,58260735
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,359649123	0,45	0,32588873	0,55113298
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,452380952	0,525	0,387598	0,61284225
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,508145363	0,5	0,42553255	0,6507768
0,28320802	0,4	0,27630958	0,50155383
0,508145363	0,5	0,42553255	0,6507768
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,40726817	0,45	0,3573631	0,58260735
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,220551378	0,375	0,23653985	0,4617841
0,484962406	0,5	0,4096867	0,63493095
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056

Boumerdes 2003

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,220551378	0,375	0,23653985	0,4617841
0,484962406	0,5	0,4096867	0,63493095
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,456140351	0,45	0,39013589	0,61538014
0,437343358	0,5	0,37747461	0,60271886
0,384085213	0,45	0,34198357	0,56722782
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,28320802	0,4	0,27630958	0,50155383
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,384085213	0,45	0,34198357	0,56722782
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,488721805	0,55	0,41224902	0,63749326
0,439849624	0,55	0,37915871	0,60440296
0,28320802	0,4	0,27630958	0,50155383
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,384085213	0,45	0,34198357	0,56722782
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,220551378	0,375	0,23653985	0,4617841
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,306390977	0,4	0,29122278	0,51646703

Boumerdes 2003

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,460526316	0,5	0,39310033	0,61834458
0,446741855	0,475	0,38379645	0,60904069
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,321428571	0,425	0,30095351	0,52619776
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,397869674	0,475	0,35111524	0,57635949
0,553258145	0,575	0,45667489	0,68191914
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,408521303	0,45	0,35819748	0,58344172
0,408521303	0,45	0,35819748	0,58344172
0,484962406	0,5	0,4096867	0,63493095
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,62406015	0,575	0,50636931	0,73161355
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,62406015	0,575	0,50636931	0,73161355

Boumerdes 2003

Indice de vulnérabilité (V%)	Degré de dommage (D%)	D-σ	D+σ
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,62406015	0,575	0,50636931	0,73161355
0,460526316	0,5	0,39310033	0,61834458
0,484962406	0,5	0,4096867	0,63493095
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,561403509	0,55	0,46234106	0,68758531
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249
0,452380952	0,525	0,387598	0,61284225
0,460526316	0,5	0,39310033	0,61834458
0,345864662	0,425	0,31686212	0,54210637
0,25877193	0,4	0,26070627	0,48595052
0,422305764	0,475	0,36739631	0,59264056
0,523182957	0,525	0,43586824	0,66111249