



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université des Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des sciences de la technologie
Département : Génie civil

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الإخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية

N° d'ordre: 78/DS/2022

N° Série : 04/GC/2022

Thèse

Présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Doctorat en sciences

Filière : Génie civil

Option : Structure

Présenté par :

SOLTANE Mohamed Abdelali

Thème :

**Analyse de la vulnérabilité sismique du bâti existant
–cas de la ville de Skikda**

Soutenue le : 19/07/2022

Devant le Jury composé de :

	Nom et Prénom	Grade	
Président	M^F BOUMEKIK ahmed	Professeur,	Université Mentouri Constantine 1
Rapporteur	M^F MIMOUNE Mostefa	Professeur,	Université Mentouri Constantine 1
Examineur	M^F KOULOUGHLI Salim	Professeur,	Université Mentouri Constantine 1
Examineur	M^F BELACHIA mouloud	Professeur,	Université 8 Mai 1945 Guelma
Examineur	M^F MESSAST Salah	Professeur,	Université 20 août 1955 Skikda

Remerciements

Je remercie en premier Dieu qui m'a donné le courage, la volonté et la force de mener à bien ce modeste travail.

Avec autant de reconnaissance et de gratitude, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Le professeur MIMOUNE Mostefa, pour avoir bien voulu orienter et diriger les différentes phases de ce travail ainsi que sa compréhension et ses encouragements.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma grande reconnaissance à mon cher ami Monsieur GUETTICHE abdelheq, Maitre conférence classe A au centre universitaire de Abdelhafid Boussouf Mila pour ses encouragements et ses précieux conseils ainsi que les suggestions judicieuses qu'il m'a proposé ce thème de recherche et m'apporté durant les différentes phases de ce travail.

Je remercie en premier lieu les membres du jury d'avoir bien voulu y prendre part : Pr, BOUMEKIK ahmed, président et Pr, KOULOUGHLI Salim, Pr, BELACHIA mouloud et Pr, MESSAST Salah.

Un grand merci à Monsieur LAOUAR Bassem ingénieur en informatique au DUAC de Skikda, qui a bien voulu m'initier au SIG Map Info et à Monsieur BOUAFIA mohamed Ancien chef du service au DUAC de skikda, qui m'a donné un aperçu historique et urbanistique de la ville de Skikda.

Ce travail est spécialement dédié à la mémoire de mon défunt père qui n'a épargné aucun effort pour ma réussite dans les études et à ma mère qui a sacrifiée leur vie pour notre bien. Je dédie ce travail aussi à mon oncle Oussama qui m'a soutenu pour nous voir éduqués et respectés.

Je tiens à exprimer mes remerciements à ma famille dont les supports et les encouragements m'ont été d'un apport sans égal (je ne citerais pas de nom).

Un merci à tous mes amis pour leurs soutiens (je ne citerais pas de nom).

Table des matières

ملخص.....	1
Résumé	2
Abstract	3
Introduction générale.....	4
Chapitre 1 : Risque sismique et lecture urbanistique à la ville Skikda.....	9
1.1 Introduction	9
1.2 Contexte topographie et morphologie géologique de la région de Skikda	10
1.3 Contexte géotechnique	15
1.4 Contexte sismique	16
1.4.1 Sismotectonique du nord de l'Algérie.....	19
1.4.2 Evaluation de l'aléa sismique de la ville et leur adaptation	20
a. Scénario sismique déterministe	20
b. Scénario sismique probabiliste.....	22
1.4.3 Sismotectonique de la ville (les zones sources)	24
a. La première zone du nord de Constantine (la faille d'El Kantour)	24
b. La deuxième zone de Guelma (la faille de Tamlouka)	24
1.5 Présentation de la ville de Skikda	25
1.6 Aperçu historique sur la ville de Skikda	27
1.6.1 Période coloniale (1838-1962)	28
1.6.2 Période post-coloniale	30
1.7 Description des systèmes constructifs, des matériaux de construction et des tissus architecturaux	31
1.7.1 Les structures verticales et horizontales	32
1.7.2 Les fondations	34
1.7.3 Tissus architecturaux	34
1.8 Inventaires du bâtiment et enquêtes sur sites (Construction d'une base de données).....	35
1.9 Analyse statistique et repartitions des constructions	39
1.9.1 La zone touristique de Stora	42
1.9.2 Le centre historique	42

1.9.3 Les allées, la cité 20 Août 1955, cité Merdj Edib, cité CAMUS-ROSSI, cité 500 et 700 logements	45
1.9.4 Le Boulevard Houari Boumediène, cité Aissa Boukerma	46
1.9.5 Les ilots : Briqueterie, M'essouine, Zef Zaf et Bouabaz	46
1.10 Conclusion.....	49
Chapitre 2 : Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle.....	51
2.1 Introduction	51
2.2 Choix d'une méthode de vulnérabilité et les niveaux d'analyse de la vulnérabilité sismique .	51
2.3 La description de certaines des méthodes fréquemment utilisées.....	54
2.3.1 La méthodologie RADIUS (Niveau 0).....	55
2.3.2 L'échelle Macrosismique Européenne EMS-98 (Niveau 0)	61
2.3.3 La méthode FEMA 154 (Niveau 1).....	64
2.3.4 Méthode Risk-UE (Niveau 1)	67
2.3.5 La méthode Italienne GNDT (Niveau 1).....	73
2.3.6 La méthode Française VULNERALP (Niveau 1).....	76
2.3.7 La méthodologie HAZUS (Niveau 2)	79
2.4 La méthode ARL (Data-mining)	85
2.5 Conclusion.....	88
Chapitre 3 : Evaluation de la vulnérabilité sismique et les dommages sismiques des bâtiments selon la méthode Risk-UE LM1.....	89
3.1 Introduction	89
3.2 Répartition des bâtiments selon la typologie Risk-UE LM1.....	90
3.3 Evaluation la qualité sismique des constructions à l'aide de l'indice de vulnérabilité	99
3.4 Scénarios sismiques pour l'estimation des dommages	108
3.4.1 Distribution des dommages moyens	108
3.4.2 Probabilité des dommages.....	112
3.4.3 Courbes de vulnérabilité moyenne	119
3.4.4 Courbes de fragilité	126
3.5 Conclusions	129

Chapitre 4 : Evaluation de la vulnérabilité et les dommages sismiques des bâtiments selon la méthode ARL (Association Rule Learning) et les pertes économiques et sociales	131
4.1 Introduction	131
4.2 Etapes de la Méthode ARL	132
4.2.1 Collection de la base de données des attributs	133
4.2.2 Première phase de la méthode ARL : Apprentissage (Learning)	136
4.2.3 Deuxième phase de la méthode ARL : application	140
4.3 Dommages physiques selon les différents scénarios sismiques.....	143
4.4 Validation des résultats	145
4.4.1 Evaluation de la conformité de distribution de la vulnérabilité sismique entre Risk-UE LM1 et ARL.....	145
4.4.2 Evaluation de la conformité de distribution des dommages entre Risk-UE LM1 et ARL..	153
4.5 Perte socio-économique	164
4.5.1 Evaluation des pertes humaines	164
4.5.2 Evaluation des pertes économiques.....	170
a. Perte économique directe	170
a. Pertes économiques indirectes (Coût de la restauration).....	173
4.5.3 Estimation des débris générés	177
4.6 Conclusion.....	180
Conclusion générale et perspectives	182
Références bibliographiques	185
Annexe.....	197

Abréviations :

ARL : Association Rule Learning.

ATC : Applied Technology Council.

B : Bois.

B.A : Béton Armé.

CGS : Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique.

C.M : Construction Métallique.

CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique.

CTC : Contrôle Technique de la Construction.

DM : Data-mining.

DL : Direction de logement.

DEP : Direction des équipements public.

DUAC : Direction de l'urbanisme, de l'architecture et de la construction.

EMS-98 : The European Macroseismic Scale.

FEMA : Federal Emergency Management Agency.

GDP : Gross Domestic Product.

GDP_{PC} : Gross Domestic Product per capita.

HLM : Habitat à Loyer Moyen.

I : Intensité.

M : Maçonnerie.

MMI : The Modified Mercalli Intensity Scale.

MSK : The Medvedev–Sponheuer–Karnik scale.

ONS : Office Nationale des Statistiques.

OPGI : Office de Promotion et de Gestion Immobilière.

PGA: Peak Ground Acceleration.

PIB : Produit Intérieur Brut.

RADIUS: Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disaster.

RPA: Règlement Parasismique Algérien.

ZHUN: Zones d'Habitat Urbain Nouvelles.

Listes des figures

Chapitre 1

1.1 Le Modèle Numérique du Terrain (MNT) de la région de Skikda	10
1.2 Esquisse géologique de la Petite Kabylie.....	11
1.3 Alluvions au centre-ville de Skikda	12
1.4 Les dunes de sables rouges (Larbi Ben Mhidi).....	12
1.5 Des schistes et phyllades altérés.....	13
1.6 Des schistes plissés (Précambrien).....	13
1.7 Carte photogéologique du site urbain de la ville de Skikda.....	14
1.8 Extrait de la carte géologique de Philippeville N°14 -Ech 1/50000-	16
1.9 Sismicité de l'Algérie compte tenu des événements de magnitude $M_s \geq 4$: Des cercles noirs et gris désignent les événements de 1900 à 2013. Les carrés blancs désignent les événements de 1365 à 1900	17
1.10 Carte tectonique de la région méditerranéenne. La surface grise encadre la partie nord de l'Algérie. Mouvements prévus le long de la frontière entre les plaques Eurasie et Afrique... 19	
1.11 Carte sismotectonique du nord de l'Algérie montrant les principales structures actives observées dans le Tell (Meghraoui, 1988) ainsi que les grands séismes de $M_s \geq 5.5$ avec leurs mécanismes aux foyers) Havard. Les flèches rouges indiquent la direction de convergence (Nocquet et Calais, 2004). Les rectangles en pointillés délimitent les domaines caractérisés par des régimes tectoniques relativement uniformes et les diagrammes de projections horizontales de P (en rouge) et T (en bleu) des axes de déformation	20
1.12 Carte des iso-intensités historiques maximales au Skikda.....	21
1.13 Carte des courbes d'iso-accélération de la wilaya de Skikda pour des périodes de retour de 100 ans, 200 ans et 500 ans.....	23
1.14 a) Situation géologique de la chaîne tellienne algérienne, indiquant les principaux domaines tectoniques. Les lignes noires épaisses correspondent aux principaux chevauchements des Alpes. LK et GK sont respectivement la Petite et la Grande Kabylie ; F indique les unités de Flysch ; TR indique le domaine Tellien-Riff ; PN indique les dépôts de la nappe post-poussée ; SP indique la plate-forme saharienne b) Carte géologique du nord-est de l'Algérie. Les principales failles actives (lignes noires épaisses) et les unités géologiques sont tirées de Kieken (1983). Abréviations dans le tableau des	

principales failles actives : S-S = Strike-Slip, L-L = Left-Lateral, R-L = Right-Lateral, et R = Reverse.....	25
1.15 Emplacement de la ville de Skikda dans la province de Skikda	26
1.16 Carte de densités de population de la ville de Skikda	27
1.17 Les Quatre Colonies Romaines : Cirta, Rusicade, Chullu, Milev	28
1.18 Carte topographique de la ville de Skikda	29
1.19 La croissance de la ville à la période coloniale : a) une croissance linéaire (1838-1848) b) une croissance discontinu et multidirectionnel	30
1.20 Carte de l'Evolution de l'espace urbain de la ville Skikda depuis (avant 1962-2011)	31
1.21 Types de plancher : a) Plancher en bois ; b) Planchers en voule ; c) Plancher en hourdis préfabriqués.....	33
1.22 Types de typologie architecturale : a) Néo-classique (1840-1860) ; b) Éclectique (1861-1913) ; c) Art nouveau (1913-1936) ; d) Art déco (1913-1936) ; e) Néo Mauresque (1913-1936) ; f) Mouvement moderne (architecture moderne) (1936 jusqu'à ce jour)	35
1.23 Fiche technique utilisée par le CTC pour identifier l'état de conservation	38
1.24 Carte de la zone d'étude sous plateforme SIG utilisant l'image satellitaire à haute résolution Google Hybrid Maps de la ville de Skikda et avec la délimitation des sous-zones.....	41
1.25 Image sur le site touristique de Stora	42
1.26 Photographies aériennes (télé-détection) de centre historique de la ville	43
1.27 Photos sur les différentes pathologies et dégradations à Skikda : a) Fissuration verticale dans la cloison, fissurations obliques au niveau des murs porteurs et fissuration verticale au niveau du mur porteur ; b) Corrosion de solive, corrosion en voûtes et corrosion des poutrelles métalliques ; c) Effondrement partiel des planchers (en bois, en béton armé et en voûtes) ; d) dégradation des balcons	44
1.28 Photos sur les typologies constructives en panneaux préfabriqués des bâtiments collectifs de la zone 3.....	45
1.29 Photo des équipements publics (administratif, sanitaires) et des bâtiments collectifs en béton armée et en charpente métallique	46
1.30 Photos sur les deux points de glissement sur le site de Msîouene près des logements	47
1.31 Carte des risques du glissement de la ville de Skikda.....	48
1.32 Photo des façades principales des bâtiments collectifs des différents sites (Briquèterie, Zef Zaf, Msîouene et Bouabaz)	49

Chapitre 2

2.1 Schéma conceptuel du modèle RADIUS	56
2.2 Courbes de prédiction du mouvement du sol utilisées dans l'outil RADIUS	58
2.3 Courbes de vulnérabilité pour les différentes classes de bâtiments	60
2.4 Définition selon l'EMS-98 des notions de quelques, beaucoup et la plupart en pourcentage .	63
2.5 Procédure de l'identification des bâtiments dangereux par la méthode FEMA 154 par un Diagnostic Visuel Rapide (RVS).....	67
2.6 Risk-UE LM1 - Courbes de vulnérabilité - Dommage moyen (μ_D) Par typologie en fonction de l'intensité EMS-98.....	71
2.7.a Distribution binomiale discrète des probabilités de dommage pour obtenir chaque niveau de dommage EMS-98 pour une typologie et une intensité fixée.....	72
2.7.b Distribution des probabilités de dommage pour obtenir chaque niveau de dommage pour une typologie donnée en fonction de l'intensité EMS-98	72
2.8 Organigramme des étapes de calcul de l'indice de vulnérabilité et du dommage probable par la méthode GNDT II.....	75
2.9 Organigramme de la méthodologie HAZUS.....	81
2.10 Etapes de modélisation d'estimation des dommages sismiques par méthode HAZUS	84

Chapitre 3

3.1 Carte de la zone 1 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.....	90
3.2 Carte de la zone 2 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.....	91
3.3 Carte de la zone 3 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.....	92
3.4 Carte de la zone 4 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.....	93

3.5	Carte de la zone 5 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1	94
3.6	Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en maçonnerie à Skikda	97
3.7	Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en béton armé à Skikda	98
3.8	Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en acier à Skikda	98
3.9	Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en bois à Skikda.	99
3.10	Distribution des îlots selon (ONS 2020) et le nombre d'habitants par îlots sous plateforme SIG en utilisant l'Open Street Map.....	100
3.11	Distribution de l'indice de vulnérabilité par bâtiment	102
3.12	a). Distribution de l'indice de vulnérabilité par îlot ; b). Images sur le boulevard Didouche Mourad.	103
3.13	Histogrammes de la distribution de l'indice de la vulnérabilité par la méthode Risk-UE LM1 selon les matériaux de construction et l'époque de la construction	106
3.14	Distribution spatiale des dommages moyens pour différents scénarios sismiques (scénarios déterministe et probabilistes).....	111
3.15	Histogramme de la distribution de dommages moyens pour différents scénarios sismiques donné par l'étude de micro-zonage (les scénarios déterministe et probabilistes).....	112
3.16	Répartition spatiale des dommages à Skikda sur la base de l'étude de micro-zonage.....	115
3.17	Répartition des dommages par différentes zones, en fonction de scénarios sismiques	116
3.18	Distribution des dommages sévères [D4+D5] par matériaux de construction pour différentes zones, en fonction de scénarios sismiques.....	118
3.19	Résultats pour deux scénarios probabilistes de dommages sismiques [D4+D5] de la zone 2	119
3.20	Courbes de vulnérabilité pour différents types bâtiments selon l'intensité sismique	122
3.21	Photo des façades de quelques bâtiments importants : a) Siège de wilaya, b) la mairie, c) la grande poste et Algérie télécom, d) centre culturel Aisset Idir, e) la gare ferroviaire, f) théâtre, g) palais de justice, h) administration et bloc médecine légale (EPH Saad Guermech), i) établissement hospitalier Abderrezak Bouhara et j) 38 logements	123
3.22	Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en maçonnerie.....	124
3.23	Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé.....	124
3.24	Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en acier et en bois	125

3.25 Courbes de vulnérabilité pour trois types de typologies (maçonnerie, béton armé et acier)	125
3.26 Courbes de fragilité pour différents types bâtiments selon l'intensité sismique.....	128

Chapitre 4

4.1 Organigramme de la méthodologie ARL utilisé	133
4.2 Répartition des quatre attributs selon : l'époque de construction, le type de matériau, le nombre d'étages et la forme du toit dans la base de données de la zone d'étude.....	134
4.3 Précision de la classification de vulnérabilité des différentes combinaisons d'attributs, considérant 3500 générations aléatoires de 30% de la base de données des constructions à Skikda.....	138
4.4 Précision de la classification de vulnérabilité des différentes combinaisons d'attributs, considérant 3500 générations aléatoires de 30% de la base de données des constructions avec fusion des classes A et B ; tenant compte de quatre attributs : la période de construction, le nombre d'étages, la forme du toit et la nature du matériau.....	142
4.5 Répartition des classes de vulnérabilité EMS-98 obtenus avec les deux méthodes (Risk-UE LM1 et ARL) pour l'ensemble de constructions de la zone d'étude	146
4.6 Distribution des classes de vulnérabilité de l'EMS-98 des constructions dans les différentes zones d'étude obtenues par la méthode Risk-UE LM1	148
4.7 Distribution des classes de vulnérabilité de l'EMS-98 des constructions dans les différentes zones d'étude utilisée le proxy obtenu par la méthode ARL considérée quatre attribués	150
4.8 Répartition des classes de vulnérabilité EMS-98 obtenue avec les deux méthodes (Risk-UE LM1 et ARL) pour les différentes zones d'étude.....	152
4.9 Précisions du degré de dommage entre les méthodes Risk-UE LM1, ARL0 et ARL1 pour des intensités macrosismiques EMS-98 entre V à XII	154
4.10 Distribution des dommages de bâtiments en fonction de différents scénarios sismiques obtenus par ARL et Risk-UE LM1 à Skikda	155
4.11 Répartition spatiale des dommages pour les îlots conformément à la carte de la distribution de la population 2020, pour un scénario déterministe d'intensité VII, selon Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1)	158
4.12 Répartition spatiale des dommages pour les îlots conformément à la carte de la distribution de la population 2020, pour le pire scénario probabiliste d'intensité VIII-XI, selon Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1)	161

4.13 Comparaison de la réparation des dommages (en nombre des bâtiments et en pourcentage) obtenus par Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1) pour les deux scénarios sismiques : scénario déterministe (VII) et le pire scénario probabiliste (VIII-XI).....	163
4.14 Distribution des îlots selon (ONS 2020) et le nombre d'habitants par îlots sous plateforme SIG en utilisant l'Open Street Map.....	166
4.15 Scénarios des pertes humaines (Sans-abris, Blessures et Décès) selon deux sismiques probabilistes	168
4.16 Distribution des pertes économiques directes selon deux scénarios sismiques probabilistes	171
4.17 Distribution des coûts de réhabilitation en milliards de dinars	175
4.18 Quantités de débris en tonnes générées pour différents scénarios sismiques.	179

Annexe

A.1 Classification sismique selon le plan au sol adaptée de GNDT (1994, p.31)	201
B.1 Distribution spatiale de l'indice de vulnérabilité par la méthode Risk-UE LM1 pour chaque zone	202
B.2 Histogrammes de la distribution de la vulnérabilité sismique : a) Matériaux de construction ; b) Période de construction ; c) Hauteur de la construction ; d) Niveau du code parasismique	203
C.1 Distribution spatiale de l'époque de construction pour chaque zone	204
C.2 Distribution spatiale de type de matériau de construction pour chaque zone	205
C.3 Distribution spatiale de la hauteur du bâtiment pour chaque zone.....	206
C.4 Distribution spatiale de forme du toit pour chaque zone.....	207
C.5 Histogrammes de la distribution de classe de vulnérabilité EMS-98 selon la méthode Risk-UE LM1 : a) Matériaux de construction ; b) Période de construction ; c) Hauteur de la construction ; d) Niveau du code parasismique	208
C.6 Histogrammes de la distribution de classe de vulnérabilité EMS-98 selon la méthode ARL, considérée quatre attribués : a) Matériaux de construction ; b) Période de construction ; c) Hauteur de la construction ; d) Niveau du code parasismique.....	208

Liste des tableaux

Chapitre 1

1.1 Principaux séismes survenus entre (1365–2020) d'après le catalogue des séismes en Algérie.....	18
1.2 Liste d'histoire sismique utilisée pour la réalisation de la Carte des iso-intensités maximal ..	22
1.3 Scénarios sismiques probabilistes considérés, en termes d'intensités macroséismiques, d'accélération maximale au sol (unités g) et de périodes de retour, PR (en années)	23
1.4 Occupation des bâtiments (en pourcentage par rapport au nombre total de bâtiments dans la ville de Skikda).....	39
1.5 Distribution des constructions à Skikda en fonction des matériaux de construction dans les zones considérées.....	41

Chapitre 2

2.1 Différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique et leurs échelles d'applicabilité	52
2.2 Classification des sols et leurs valeurs d'amplification	57
2.3 Equations de prédiction du mouvement du sol utilisé par RADIUS.....	58
2.4 Classes de vulnérabilité de RADIUS adaptées aux bâtiments algériens.....	59
2.5 Données des courbes de vulnérabilité pour les différentes classes de bâtiments.....	59
2.6 Matrice de probabilité de dommage.....	60
2.7 Ratio de population (jour ou nuit) pour chaque classe du bâtiment.....	61
2.8 Différenciation de typologies de structure EMS-98 et la classification en classes de vulnérabilité associées.....	62
2.9 Distribution de dommages pour différentes intensités et classes de vulnérabilité d'après EMS-98 (Qlq : quelque, Bcp : beaucoup, Plp : la plupart).....	63
2.10 Classification typologique et scores de risques structuraux de base du FEMA.....	64
2.11 Sismicité définie dans le FEMA 154.....	65
2.12 Probabilités d'effondrement calculées par rapport au score final, S	66
2.13 Scores structurels avec les degrés de dommages correspondants	66
2.14 Typologie constructive selon l'échelle macroséismique européenne EMS-98 (indices de vulnérabilité dans le Risk-UE LM1)	69
2.15 Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé.....	70

2.16	Equivalence entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS-98	71
2.17	Correspondance entre les classes de vulnérabilité de l'EMS-98 et les indices de vulnérabilité <i>IV</i> de Risk-UE.....	73
2.18	Paramètres GNDT pour les bâtiments en maçonnerie et classes de vulnérabilité associée avec la pondération w_i (d'après GNDT, 1993)	74
2.19	Equivalence des dommages entre l'échelle EMS-98 et la méthode GNDT	76
2.20	Scores extraits de la méthode GNDT pour les critères structuraux retenus dans la méthode niveau 1.0 VULNERALP	78
2.21	Classification par typologie des bâtiments selon la méthodologie HAZUS	82
2.22	Etats de dommage pour bâtiment de classe C2	85

Chapitre 3

3.1	Distribution des constructions enquêtées selon la méthode Risk-UE LM1	96
3.2	Correspondance entre l'indice de vulnérabilité <i>IV</i> de Risk-UE LM1 et le degré de vulnérabilité	101
3.3	Indices de vulnérabilité moyens pour différentes zones.	108
3.4	Récapitulatif des résultats de variation des dommages moyens selon des scénarios déterministe et probabilistes	109
3.5	Degrés de dommages moyens et états de dommages de l'EMS-98 correspondants.....	109
3.6	Distribution des classes de dommages estimées à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes.....	113
3.7	Valeurs de l'indice de vulnérabilité et type de typologie selon Risk-UE LM1 pour quelques typologies de bâtiments importants	120

Chapitre 4

4.1	Récapitulatif Attributs/ Précision	139
4.2	Probabilités conditionnelles obtenues d'après la méthode ARL à 30% de la base de données in situ pour la ville de Skikda, avec deux attributs (la période de construction et le nombre d'étages)	140
4.3	Exemple d'une matrice de confusion obtenue par la méthode ARL pour classer les constructions à Skikda selon les classes de vulnérabilité EMS-98 basé sur quatre attributs, en considérant 70% de la base de données in situ pour la ville de Skikda.....	141

4.4 Exemple de la matrice de confusion obtenue par la méthode ARL pour classer les constructions selon les classes de vulnérabilité EMS-98 avec fusion des classes A et B ; tenant compte de quatre attributs, et 70% de la base de données	142
4.5 Distribution de probabilité d'occurrence des dommages selon l'EMS-98 pour les différentes classes de vulnérabilité et différentes intensités macroséismiques européennes de V à XII.	144
4.6 Valeurs de l'indice de vulnérabilité correspondant aux classes de l'EMS-98, suivant la méthode Risk-UE LM1	145
4.7 Equations empiriques de régression pour évaluer les pertes humaines en fonction des variables [D4+D5] et la population affectée.....	165
4.8 Pertes humaines calculées pour des scénarios déterministe et probabilistes dans la zone d'étude	169
4.9 Pertes économiques en USD calculées pour les scénarios déterministe et probabilistes.....	172
4.10 Pertes économiques en dinar calculées pour les scénarios déterministe et probabilistes.....	172
4.11 Coût de réparation absolu par unité de surface pour chaque état de dommage et les pourcentages de réparation pour repositionner le coût sont également indiqués par (ATC-13 1985).....	174
4.12 Coût de restauration en USD calculé à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes	176
4.13 Coût de restauration en dinar calculé à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes	176
4.14 Poids des éléments structurels et non structurels (en tonnes par m ²) à utiliser dans le calcul des quantités de débris pour chaque classe de construction	178
4.15 Débris générés à partir de différents états de dommages structurels et non structurels (% du poids unitaire de l'élément).....	178
6.10 Débris générés calculés à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes	180

Annexe

A.1 Echelle des intensités EMS 98	197
A.2 Classification des dommages aux bâtiments en maçonnerie.....	198
A.3 Classification des dommages aux bâtiments en béton armé	199
A.4 Les paramètres de vulnérabilité du formulaire GNDT de niveau 2, adapté de GNDT (1994).....	200

ملخص :

يوفر تقييم توزيع الأضرار المحتملة للزلازل على النطاق الحضري أساساً لسياسات التخطيط للطوارئ والحد من مخاطر الزلازل. تقع مدينة سكيكدة في منطقة زلزالية معتدلة، و مع ذلك فإن مستوى الخطر مرتفع بسبب تركيز السكان و إرث المباني القديمة التي صممت بدون معايير مضاد لزلزل. يهدف هذا العمل إلى تقييم الهشاشة الزلزالية لمدينة سكيكدة، باستخدام طريقتين مختلفتين، الأولى هي طريقة أوروبية كلاسيكية لمؤشر الضعف "Risk-UE" بناءً على مسح في الموقع ، والثانية هي طريقة تعتمد على تقنية استخراج البيانات (رابطة قاعدة التعلم (ARL)) من أجل التقليل وتجنب العملية المكلفة في تحليل الضعف الزلزالي و استخدام سمات البناء الأساسية (عدد الطوابق أو فترة البناء) التي تم جمعها بسهولة من سجلات المراقبة المرئية ، من أجل إنشاء روابط بين سمات المباني و مستويات الهشاشة الزلزالية وفقاً لمقياس الزلازل الأوروبي EMS-98. يتم التحقق من صحة التعلم الخاص بسكيكدة (proxy) لطريقة ARL من خلال المقارنة مع طريقة Risk-UE. فيما يتعلق بسيناريوهات المخاطر الزلزالية، تم استخدام سيناريوهين للزلازل لأداء محاكاة الخطر الزلزالي في هذه الدراسة، وهو سيناريو حتمي (زلزال تاريخي)، والسيناريوهات الاحتمالية الأخرى (أي تتميز بفترات عودة)، وفقاً لدراسة تقسيم المناطق الزلزالية الدقيقة للمدينة. نتائج تقييم المخاطر الزلزالية في المدينة تتمثل في الأضرار التي لحقت المباني. بالإضافة، فقد تم استخدام الضرر المادي كمتغير مرتبط بالمخاطر للتنبؤ بالحسائر الاقتصادية والبشرية وكميات أخرى، مثل تكلفة الترميم وكميات الحطام. على الرغم من المخاطر الزلزالية المعتدلة في سكيكدة، إلا أن النتائج أظهرت مخاطر عالية بسبب التعرض العالي للمباني وهشاشة المباني، والتي عادة ما تكون مبنية من مبان من طوب غير مدعمة.

كلمات مفتاحية : أضرار، هشاشة، Risk-UE، ARL، سيناريو زلزالي.

Résumé :

L'évaluation de la distribution des dommages potentiels des séismes à l'échelle urbaine fournit une base pour les politiques de planification d'urgence et de réduction des risques sismiques. Skikda est située dans une région de sismicité modérée. Cependant, le niveau de risque est élevé en raison de la concentration de la population et de l'héritage des bâtiments anciens conçues sans réglementation parasismique. Ce travail a pour but d'évaluer la vulnérabilité sismique de la ville de Skikda, en utilisant deux méthodes différentes, la Première est une méthode européenne classique de l'indice de vulnérabilité Risk-UE, basée sur une enquête in situ, et la deuxième est une méthode basée sur le technique d'exploration de données (Association de règles d'apprentissage (ARL)) consiste à minimiser, à éviter le processus coûteux dans l'analyse de la vulnérabilité sismique et à utiliser les attributs de base des bâtiments (nombre d'étages ou période de construction) facilement collectés à partir d'observation visuelle, afin de créer des liens entre les attributs des bâtiments et les classes de vulnérabilité EMS-98. L'apprentissage (proxy) de vulnérabilité de Skikda de la méthode ARL est validé par la comparaison avec la méthode Risk-UE. Concernant les scénarios du risque sismique, on se base sur deux scénarios de séismes, un scénario déterministe (événement historique) et l'autre scénarios probabilistes (c'est-à-dire caractérisée par des périodes de retour), conformément à l'étude de micro zonage sismique de la ville. Les résultats de l'évaluation du risque sismique dans la ville sont représentés par les dommages aux bâtiments. Ainsi, les dommages physiques ont également été utilisés comme une variable liée au risque pour prédire les pertes économiques et humaines et d'autres quantités, telles que le coût de restauration et les quantités de débris. Malgré le risque sismique modéré à Skikda, les résultats montrent un risque élevé en raison de la forte exposition et de la vulnérabilité des bâtiments, qui sont généralement constitués de bâtiments en maçonnerie non renforcée.

Mots-clés : dommage, vulnérabilité, Risk-UE, ARL, scénario sismique.

Abstract:

The assessment of the distribution of potential earthquake damage at the urban scale provides a basis for emergency planning and seismic risk reduction policies. Skikda is located in a region of moderate seismicity. However, the level of risk is high due to the concentration of the population and the legacy of old buildings designed without a seismic code. This work is aimed at assessing the seismic vulnerability of the city of Skikda, using two different methods, the first is a classical European method of the vulnerability indice Risk-UE, based on an in situ survey, and the second is a method based on the technique of data mining (Association of Learning Rules (ARL)) is to minimize, to avoid the costly process in seismic vulnerability analysis and to use basic building attributes (number of floors or period of construction) easily collected from visual observation, in order to create links between building attributes and the EMS-98 vulnerability classes. The learning (proxy) of vulnerability of Skikda of the ARL method is validated by the comparison with the Risk-UE method. Concerning the scenarios of seismic risk, we are based on two earthquake scenarios, a deterministic scenario (historical event) and the other probabilistic scenario (i.e. characterized by return periods), in accordance with the study of seismic micro zoning of the city. The results of the seismic risk assessment in the city are represented by the damage to buildings. Thus, physical damage was also used as a risk-related variable to predict economic and human losses and other quantities, such as restoration costs and debris quantities. Despite the moderate seismic risk in Skikda, the results show a high risk due to the high exposure and vulnerability of the buildings, which generally consist of unreinforced masonry buildings.

Keywords : damage, vulnerability, Risk-UE, ARL, earthquake scenario.

Introduction générale

1. Introduction

Les catastrophes naturelles continuent de faire des milliers de victimes chaque année à travers le monde. Parmi ces catastrophes, le séisme est le plus dévastateur pour diverses raisons ; la date de leur survenance et son impact sur l'environnement urbain sont impossibles à prévoir. L'impact sur une ville littorale comme Skikda, ayant une forte densité de population et de nombreux bâtiments non parasismiques entraîne, en cas de séisme, des pertes importantes en vies humaines et en biens. La plupart des pertes humaines sont dues à l'effondrement de bâtiments, qui représente environ 90% des décès directs (Lantada et al. 2009). En ce sens, la politique de gestion des crises vise en priorité à réduire le risque sismique.

Plusieurs travaux de recherche sur l'analyse de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine ont été développés à travers le monde, telles que (Tantala et al. 2007) pour les Etats-Unis, (Tamima et Chouinard 2016) au Canada, (Zheng et al. 2019 ; Liu et al. 2020) en Chine, (Ademović et al. 2020) en Bosnie-Herzégovine, (Özkaynak et Özbay 2018) en Turquie, (Kazantzidou-Firtinidou et al. 2018) en Grèce, (Chieffo et al. 2019) en Italie, (Aguad et al. 2018 ; Blyth et al. 2020) au Portugal, (Lantada et al. 2018 ; Ródenas et al. 2018) en Espagne, (Lestuzzi et al. 2016) en Suisse, (Guéguen et al. 2007) en France. (Cherif et al. 2018) au Maroc, (Mansour et al. 2013) en Tunisie et (Guettiche, Guéguen & Mimoune 2017a ; Senouci et al. 2018 ; Athmani 2020) en Algérie. Certaines de ces méthodes sont basées sur l'analyse statistique des dommages observés lors des séismes passés (Khalfet Mansour et al. 2013), le dommage est classé sur la base des dommages structuraux observés et la typologie constructive des constructions (Guettiche, Guéguen & Mimoune 2017a).

L'Algérie compte un nombre très important de constructions en maçonnerie et en béton armé qui n'ont pas été conçues selon les normes parasismiques, ignorant totalement les risques sismiques. Après une série de séismes violents et destructeurs ayant déjà eu lieu : depuis les séismes de Constantine de 1908 à séisme de Bejaia de 2021 qui ont provoqué plus de 6,500 personnes mortes et plus de 22 milliards de dollars de pertes économiques, l'état a mis en place un certain nombre d'opérations d'expertise touchant les infrastructures stratégiques et les grandes agglomérations. Les opérations d'expertises ont été effectuées sur les bâtis

existants par les services des contrôles techniques des constructions (CTC) et le Centre de Génie Parasismique (CGS) (Alger, Oran, Constantine et Skikda), afin d'estimer leur vulnérabilité sismique. Dans ce sens, plusieurs projets de recherche sur le risque sismique et la vulnérabilité sismique des constructions ont été réalisés sur les différentes villes : Alger (Ait-Meziane 2007 ; Remki et Benouar (2014) ; Novelli et al. 2015) Blida (Tadjera et Bensaïbib (2014, 2017) ; Boukri et al. 2018) Oran (Senouci et al. 2012 ; Mammar et al. 2016 ; Senouci et al. 2018) ; Constantine (Boukri et al. 2014 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a) ; Annaba (Athmani et al.2014 ; Athmani 2020) ; Chlef (Boutaraa et al. 2018) ; Mostaganem (Chaibedra et al.2018).

Certes, Skikda est une ville côtière à sismicité modérée (zone IIa), d'après le règlement parasismique Algérien (RPA.2003), mais le nord-est du pays est actuellement sujette à des activités sismiques affectant souvent les villes limitrophes de la ville de Skikda et sa région (le séisme du 24 janvier 2020 de $M_S=4,9$ situé à 5 km nord-est d'El Aouana dans la région de Jijel, le séisme du 15 mars de $M_S=3,2$ situé à 5 km est de Zighoud Youcef dans la région de Constantine, le séisme du 07 août 2020 de $M_S=4,9$ situé à 02 km sud-est de Hammala dans la région de Mila, le séisme du 17 décembre 2020 de $M_S=3,8$ situé à 10 km ouest de Bou Hamdane dans la région de Guelma, le séisme du 05 mars 2017 de $M_S=4,6$ situé à 01 km nord-est d'Ain Bouziane dans la région de Skikda, le séisme du 22 novembre 2020 de $M_S=5,2$ et séisme du 17 mars 2021 de $M_S=4,5$ situé à 12 km sud-ouest d'El Harrouche dans la région de Skikda, le séisme du 18 mars 2021 de $M_S=6$ situé à 28 km Nord-est du Cap Carbon dans la région de Bejaia) avec plusieurs répliques, ces différents séismes ont causé un nombre non négligeable de dégâts matériels. La ville de Skikda vit une situation particulière, par sa polarité administrative et par le délabrement inquiétant de son cadre bâti, où la grande partie des anciennes constructions sont en maçonnerie non renforcée. Ce type de constructions est assujetti à des dommages importants qui peuvent entraîner des conséquences immédiates graves aux personnes et aux biens en cas de séisme même modéré (Soltane et al. 2018), car elle est caractérisée par un tissu urbain vétuste, se distinguant par une densité de population élevée. Dans l'état actuel des choses, la diminution de ce risque est primordiale afin de protéger et de conserver le caractère culturel et architectural de cette partie historique de la ville. En outre, les gestionnaires publics locaux doivent être impliqués dans la réduction des risques sismiques de cette ville, sur la base des résultats escomptés de cette étude.

2. Objectifs de la thèse

Le risque sismique rencontre des difficultés dues à sa variabilité spatiale par rapport aux risques des autres catastrophes qui sont réduites et maîtrisables. La connaissance de deux paramètres qui sont l'aléa et l'identification des éléments exposés facilite l'évaluation du risque sismique pour une région (zone, ville, quartier) et sa réduction. Donc la réduction du risque sismique passe obligatoirement par l'évaluation de sa vulnérabilité sismique.

Dans le cadre du travail que l'on se propose de faire, on s'intéresse à l'étude de la vulnérabilité du bâti existant de la ville de Skikda, afin d'ébaucher une démarche de prévention adaptée au contexte de cette ville. Skikda, située dans une région à moyenne sismicité, est classée en zone IIa d'après le dernier règlement parasismique Algérien (RPA 99 version 2003).

Pour l'agglomération de Skikda, où l'on enregistre une forte dégradation d'anciens bâtiments (construits avant l'application des normes parasismiques) et afin de sauvegarder le patrimoine immobilier de cette ville, il est impératif et urgent de réfléchir sur les moyens et les outils à mettre en place pour évaluer la vulnérabilité sismique du bâti existant.

Dans cette perspective, le choix de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique est un élément essentiel dans l'analyse de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville, et dépend de la qualité, de la quantité de données et de l'objectif visé.

Dans le cadre de cette recherche, deux méthodes seront utilisées, à savoir :

- Une méthode européenne classique « Risk-UE LM1 » basée sur des enquêtes sur sites, qui sont difficiles à réaliser et qui peuvent s'avérer coûteuses (Guéguen, 2007). Le coût de l'étude d'expertise technique du vieux bâti de la ville de Skikda en 2011 est estimé 42 millions de Dinars pour 2272 bâtis, selon les données du CTC de Skikda.
- Une méthode innovante, rapide et puissante s'appuyant sur le principe de la fouille de données (datamining en anglais) dont le but consiste à réduire les paramètres permettant d'évaluer la vulnérabilité et d'utiliser des critères de base facilement collectés à partir de recherches et d'observation visuelles, à partir d'images satellitaires à haute résolution empruntée de Google Hybrid Maps, dans le cas de cette étude.

L'objectif principal de cette recherche est d'estimer correctement et à moindre coût la vulnérabilité sismique des constructions de la ville de Skikda, et d'identifier les secteurs de la ville qui pourraient subir le plus de dommages éventuels attendus, l'étude est menée sur la base de scénarios sismiques en s'appuyant sur une étude de micro-zonage sismique.

3. Organisation et contenu de la thèse

Suivant ce qui a été présenté précédemment, cette thèse est structurée en quatre (04) chapitres décrits comme suit :

Le premier chapitre est scindé en quatre (04) : le premier axe présente le contexte des différents aspects sismique qui présente l'aléa sismique nommé micro-zonage ; géologique ; géotechnique dans le périmètre de la ville ; ce chapitre donne un aperçu historique sur les événements sismiques survenus dans le Nord Algérien, afin de situer la région de la ville de Skikda (l'objet de notre étude) et l'identification des failles actives les plus proches de cette ville, le deuxième axe présente un bref historique, géographique et l'évolution de l'urbanisation de la ville de Skikda, le troisième axe décrit le parc immobilier en matière de typologies constructives et le quatrième axe est consacré à l'inventaire de bâtiments de la zone étudiée. Ce dernier se base sur trois outils de recherches : une base de données réalisée par l'Organisme National de Contrôle Technique de la Construction de l'Est de Skikda (CTC, 2012), un diagnostic visuel sur site permettant de classer les constructions suivant les typologies constructives (méthode Risk-UE LM1) et les informations nécessaires à l'analyse structurale des bâtiments : (la géométrie, la disposition des composantes structurales et non structurale,...) et finalement un ensemble de plusieurs rapports techniques, documents, plans et lettres disponibles sur les constructions obtenues auprès des différents organismes de contrôle et les services techniques et administratifs (DUAC, OPGI, DEP et DL) de la wilaya de Skikda.

Le deuxième chapitre présente une large étude bibliographie consacrée aux méthodes d'analyse et d'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine. Le choix de la méthode d'analyse s'appuie sur le niveau, le détail d'informations disponibles et la nature de la typologie constructive existante.

Dans le troisième chapitre, on applique la méthodologie Risk-UE LM1 qui aboutit à une cartographie de la variation spatiale de la vulnérabilité exprimée en termes d'indices de vulnérabilité et de probabilité de dommages. Ceci permet de situer les zones urbaines les plus sensibles aux différents scénarios sismiques, le traçage des courbes de vulnérabilité moyennes

et les courbes de fragilités pour les bâtiments historiques en maçonnerie, stratégiques, d'importance vitale et les centres de décision. Ces résultats sont exploitables pour une bonne gestion du réseau urbain et la planification urbaine globale.

Le quatrième chapitre, est consacré à l'élaboration d'une méthode sophistiquée basée sur les techniques de fouille de données (Data-mining (DM)) appelée ARL (Association Rule Learning) pour évaluer les classes de vulnérabilité selon EMS-98, les degrés d'endommagement des bâtis et leur distribution spatiale selon les différents scénarios sismiques. A partir des résultats obtenus, une comparaison est effectuée avec la méthode macrosismique Risk-UE LM1 afin de valider la concordance entre les deux méthodes.

A la fin de ce chapitre, on présente un ensemble de résultats relatifs aux pertes socioéconomiques, coûts de restaurations et quantité des débris, correspondants aux différents scénarios sismiques. Ceci constitue, bien entendu, une base de données importante qui permettra aux autorités locales d'élaborer leur plan d'intervention d'urgence.

Enfin, ce travail est achevé par une conclusion générale qui présente une synthèse de tous les aspects de cette recherche, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus et les perspectives pour les éventuels prochains travaux.

Chapitre 1 :

Risque sismique et lecture urbanistique à la ville Skikda

1.1 Introduction

Une part importante du paysage de la ville de Skikda, qui est considéré comme l'une des régions les plus riches en Algérie en matière du patrimoine architectural, urbain et culturel hérité de la succession de plusieurs civilisations sur la ville, ayant laissé des stigmates dans la mémoire locale, où les éléments architecturaux et urbains très marquants sont représentés au centre historique de la ville (l'avenue Didouche-Mourad), témoigne de l'histoire des traditions et de la culture du pays, mais le problème est de savoir comment ce patrimoine immobilier réagit en cas d'un événement sismique et quelles zones et typologies sont sérieusement touchées par ce risque ?

Pour répondre à cette exigence imposée par le risque sismique et réduire ce risque grâce à une gestion efficace qui dépend de l'état des lieux de la zone concernée, notamment la densité de la population et l'état de conservation de ses bâtiments dans les différentes zones afin de choisir la meilleure méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique, choisir la meilleure solution pour préserver cet ancien style architectural et pour ne pas gaspiller des dépenses publiques limitées qui leur sont allouées par les autorités locales, et plus importantes encore pour sauver des vies humaines.

L'objectif de ce chapitre en premier lieu est de présenter le niveau d'aléa sismique de la ville de Skikda et la délimitation des séismes de référence avec un bref aperçu historique de son origine et de son évolution urbanistique, de manière à obtenir une perception sur le tissu urbain, à délimiter la ville aux zones répondant aux différentes époques de construction.

Concernant, le niveau de l'aléa est basé sur la sismicité historique et les accélérations prévues par la réglementation en vigueur, les études récentes de l'aléa et les effets de site possibles à partir des études géologiques et géotechniques.

En Algérie, de nombreuses études de l'aléa sismique et particulièrement micro-zonage sismique des sites urbains qui détermine l'ampleur des secousses, ce qui ont été lancés et/ou réalisés dans plusieurs villes comme Chlef (CTC, 1985) à Alger (JICA 2006), à Mascara en 1996 (CGS, 2013), à Constantine (CGS, 2004) et à Skikda (étude en cours d'élaborer) (CGS, 2014).

Deuxième lieu, une description détaillée sur les systèmes de construction, les matériaux de construction et les tissus architecturaux qui constituent le parc immobilier de la ville.

Finalement, un inventaire réalisé sur la base des informations relevées sur le terrain de différents paramètres structurels et non structurels des prélèvements et définit les bâtiments en tenant compte de leur typologie constructive selon Risk-UE et sur la base des données existant de l'organisme national de contrôle technique de la construction de l'Est de Skikda (CTC, 2012).

1.2 Contexte topographie et morphologie géologique de la région de Skikda :

La topographique de la région de Skikda est caractérisée par un relief très accidenté où 41% du territoire est des zones de montagne avec des pentes supérieures à 25%, 9 % les plaines (région de Skikda, El Hadaiek, Remdane Djamel, Collo, Azzaba et Ben Azzouz.) et pour les zones de plages la plupart de la côtière sont près de la plaine existée des dunes actuelles (Voir figure 1.1).

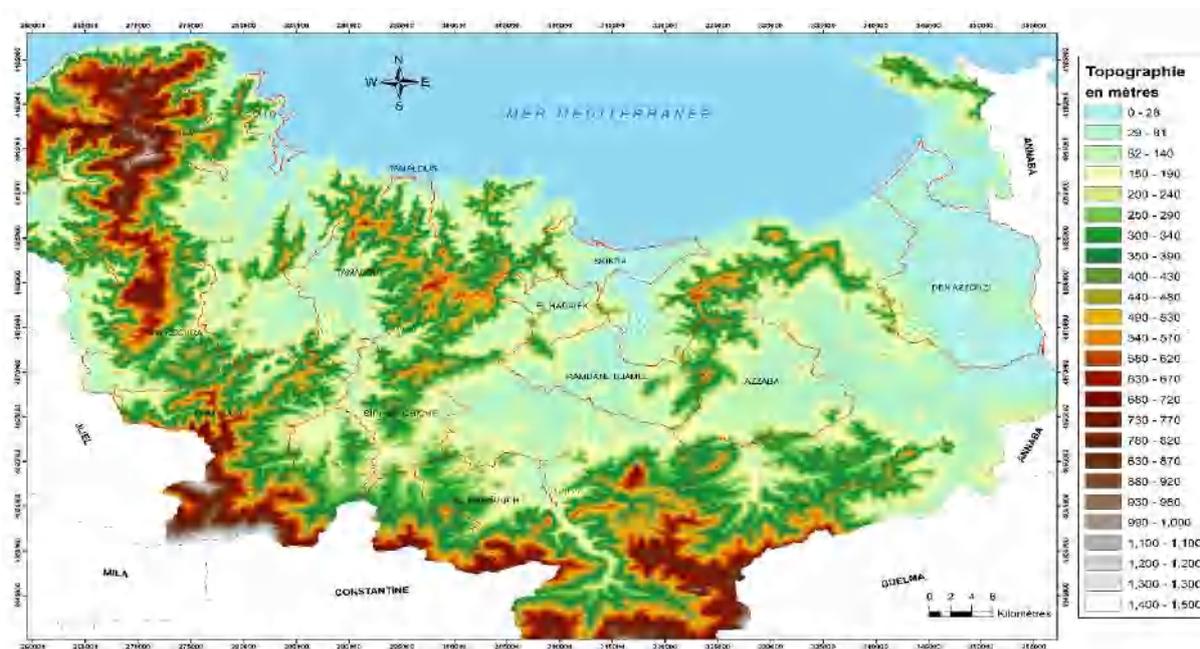


Figure 1.1 : Le Modèle Numérique du Terrain (MNT) de la région de Skikda (CGS, 2015).

La ville de Skikda se trouve dans la petite Kabylie qui fait partie de la chaîne alpine des Maghrebides. Elle s'étend entre le massif des Babors à l'Ouest et le massif de l'Edough à l'Est sur plus de 150 km le long du littoral (Voir figure 1.2).

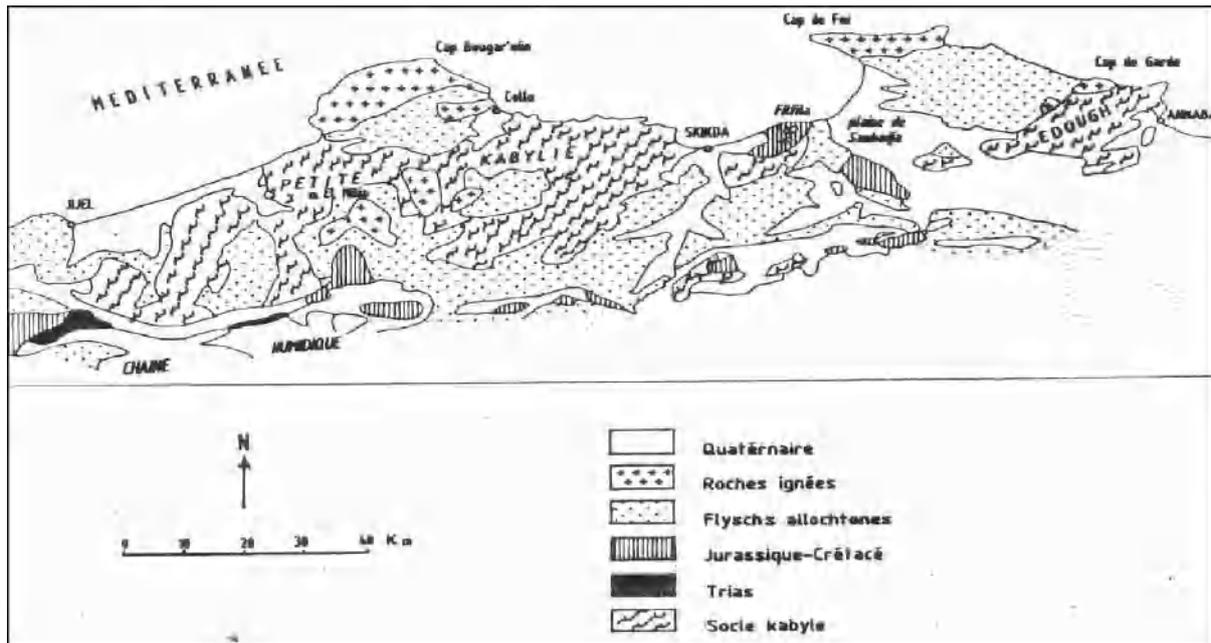


Figure 1.2 : Esquisse géologique de la Petite Kabylie (CGS, 2015).

La ville de Skikda est limitée par :

- Au Nord, par la mer Méditerranée ;
- A l'Est, par la commune de Filfila ;
- A l'Ouest, par la commune de Aïn Zouit ;
- Au Sud, par les communes d'Hamadi Krouma et El Hadaiek

Sur le plan topographique, Skikda est à cheval entre deux unités distinctes :

- **La zone de plaine** : il s'agit du prolongement de la plaine de la vallée du Saf saf. Cet ensemble se caractérise par une topographie généralement plane formant un cadre morpho-structural simple et occupe la partie Est de Skikda.
- **La zone de montagne** : occupe l'Ouest de la ville, où il s'agit d'un relief très accidenté. Nous avons les Djebels Msîouene et Rhaba ed Denia.

Sur le plan géologique, la commune de Skikda est caractérisée par :

- **Des formations récentes**

Essentiellement des dépôts actuels (alluvions actuelles et des dunes actuelles) au bord de Méditerranée et au centre de la commune, des dépôts récents (alluvions récentes, dunes récentes et le cordon littoral) au centre (Voir Figure 1.3) et des formations sédimentaires alluvionnaires du Quaternaire (Alluvions anciennes et dunes anciennes) à l'Est de la commune (Voir Figure 1.4).



Figure 1.3 : Alluvions au centre-ville de Skikda (CGS, 2015).



Figure 1.4 : Les dunes de sables rouges (Larbi Ben Mhidi) (CGS, 2015).

- Des formations anciennes

Ce sont des formations tertiaires d'âge Eocène représentées par les poudingues et grès de la base du numidien qui affleurent au Sud Est de la commune et au niveau du centre-ville (au sud du port). Quant à la partie Ouest de la ville, elle est constituée essentiellement de roches métamorphiques du socle. On retrouve des amphibolites, des calcaires cristallins, des gneiss, des gneiss schisteux, des schistes et phyllades (Voir figures 1.5 et 1.6), des micaschistes, des schistes micacés, des granulites et pegmatites).



Figure 1.5 : Des schistes et phyllades altérés (CGS, 2015).



Figure 1.6 : Des schistes plissés (Précambrien) (CGS, 2015).

La figure 1.7 représente la carte photo-géologique du site urbain de la ville de Skikda qui contient à toutes les formations géologiques déjà citées ci-dessus.

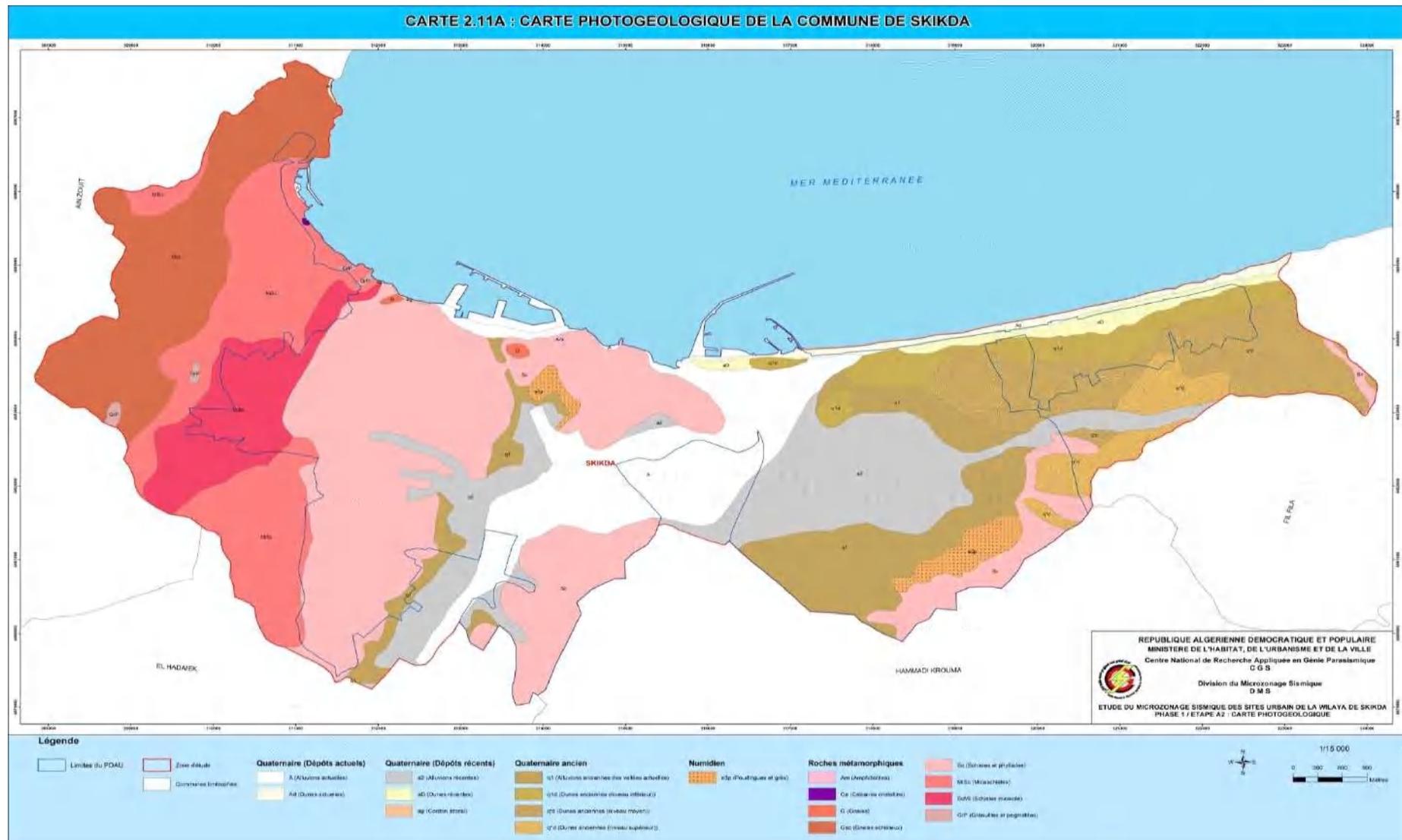


Figure 1.7 : Carte photogéologique du site urbain de la ville de Skikda (CGS, 2015).

1.3 Contexte géotechnique

Les grandes compositions géotechniques présentes dans la zone concernée, par la compilation des investigations géotechnique effectuées sur la ville par laboratoire de l'habitat et de la construction de l'Est (LNHC-EST) et la carte géologique de la figure 1.8, réalisé par Villa (1980), sont les suivantes :

1. Les zones Nord (l'intérieur du port Skikda) et Sud (Briquèterie, Msîouene, Zef Zaf et Boulevard Houari Boumedienne) de la ville de Skikda sont caractérisées par des schistes et phyllades, constitué essentiellement des schistes et des schistes argileux talqueux, sériciteux ou satinés de couleur gris-bleuâtre.
2. La zone est de la ville (la zone industrielle) est caractérisée par des formations sédimentaires constituées par des argiles et des sables.
3. La zone ouest de la ville (Boulekroud) est caractérisée par des schistes micacés, des schistes et phyllades, constituées essentiellement des schistes et des schistes argileux talqueux, sériciteux ou satinés de couleur gris-bleuâtre.
4. Au milieu de la ville (les allées, la cité 20 Août 1955, cité Merdj Eddib) est caractérisée par des alluvions récentes constituées de limons fins, avec quelques nappes de galets, de sable et disposées en lentilles ; le long du boulevard Didouche-Mourad (les arcades) est caractérisé par schiste granulitisés (gneiss) qui est en alternance parfois avec des micaschistes et formant le terme de passage des vrais gneiss aux micaschistes ou aux schistes micacés.
5. Les remblais (récents) se retrouvent dans toutes les couches superficielles, avec une épaisseur variable selon les différentes zones.

Le classement des sols a été basé sur la classification du RPA 99 version 2003, et les valeurs des essais pressiométriques et statiques, leur classement varie de **S3** (site meuble) (les valeurs du nombre coups N qui varie entre 10 et 50) caractérisée par un dépôt épais de sables et graviers moyennement dense ou d'argile moyennement raide (au milieu de la ville (les allées, la cité 20 août 1955, cité Merdj Eddib et boulevard Didouche-Mourad (les arcades) et l'ouest de la ville (la zone industrielle)) à **S2** (site ferme) (les valeurs du nombre de coups N qui est supérieur à 50) caractérisée par un dépôt de sable et graviers très denses (les zones Nord (l'intérieur du port Skikda) et Sud (Briquèterie, Msîouene, Zef Zaf et Boulevard Houari Boumedienne) de la ville).



Légende :

	Argiles et grès (Numidien inférieur)		Schistes micacés
	Schistes et phyllades		Alluvions récentes

Figure 1.8 : Extrait de la carte géologique de Philippeville N°14 -Ech 1/50000- d'après (Villa, 1980).

1.4 Contexte sismique

Les séismes destructeurs étant rares dans la ville de Skikda, mais historiquement, l'activité sismique est concentrée dans la partie nord du pays sur le long de l'Atlas Tell ($32^{\circ} \text{N} - 38^{\circ} \text{N}$, $2^{\circ} \text{W} - 9,5^{\circ} \text{E}$), (Voir figure 1.9) où on trouve les plus grandes villes et les zones urbaines à haute densité de population (où se concentre 89% de la population Algérienne) (GRRAG, 2001), une survenance éventuelle d'un séisme majeur dans les périmètres de la ville et/ou dans les régions limitrophes peut entraîner des conséquences immédiates graves aux personnes et aux biens. En effet, plusieurs séismes violents et destructeurs se sont produits dans le passé, causant plusieurs centaines de morts et d'énormes pertes économiques (CRAAG, 1994), comme celui qui ont frappé la région de d'El Chlef par deux fois, Orléanville en 1954 et El Asnam en 1980 ($M_s=7,2$), Mascara en 1994 ($M_s=5,7$), Aïn-Temouchent 1999, et récemment Boumerdes 2003 ($M_s=6,7$).

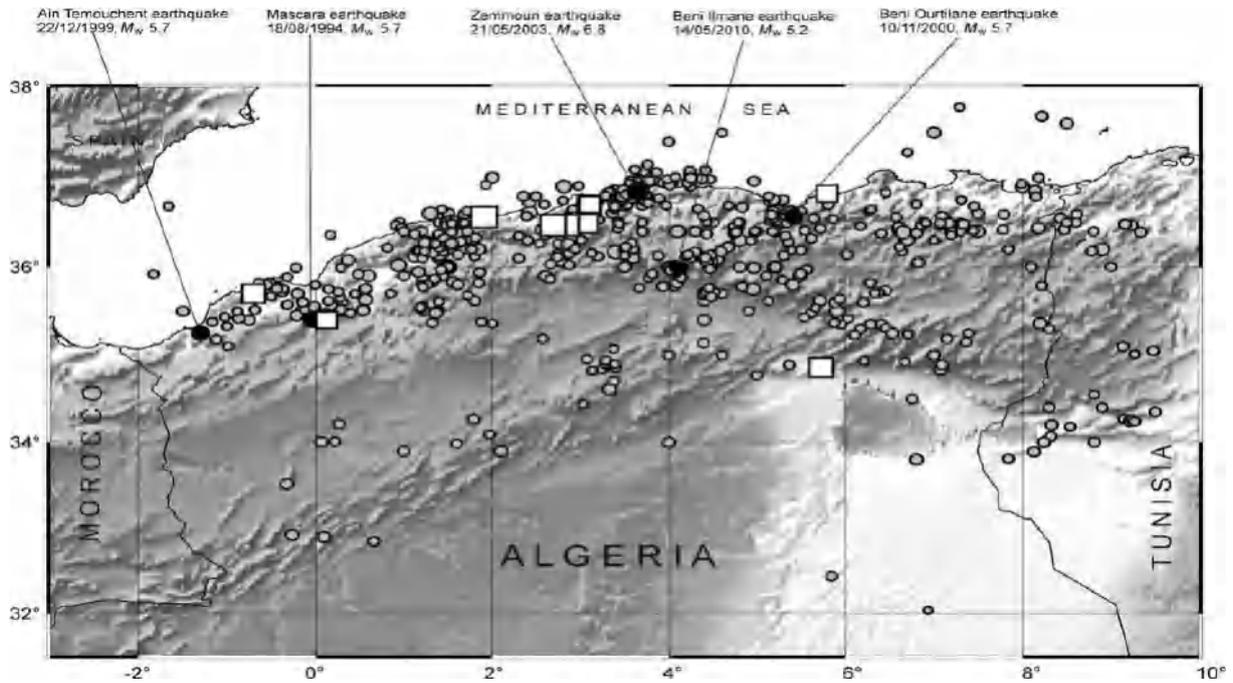


Figure 1.9 : Sismicité de l'Algérie compte tenu des événements de magnitude $M_s \geq 4$: Des cercles noirs et gris désignent les événements de 1900 à 2013. Les carrés blancs désignent les événements de 1365 à 1900 (Ayadi et Bezzeghoud, 2015).

En Algérie, nombreux chercheurs ont publié et élaboré des catalogues sur l'histoire sismique du Nord Algérien qui ont constitué un élément de base pour l'évaluation des risques sismiques et les études de micro-zonation, ces catalogues ont été réalisés par : Benhallou et Roussel (1971), Roussel (1973), Benhallou (1985), Benouar (1994, 1996), Mokrane et al. (1994), Harbi (2001), Yelles-Chaouche et al. (2002), Harbi et al. (2004, 2006, 2010), Yelles-Chaouche et al. (2006), Hamdache et al. (2010), Ayadi et Bezzeghoud (2015) et le site web de CRRAG pour couvrir différentes régions et périodes. Une liste des événements historiques et documentés est compilée dans le tableau 1.1, édité à partir des différentes sources de données citées ci-dessus pour inclure uniquement les événements ayant des conséquences destructrices en Algérie.

Tableau 1.1 : Principaux séismes survenus entre (1365–2021) d'après le catalogue des séismes en Algérie.

Localité	Date	I ou M_s	Morts	Blessés	Sans-abris	Domage des bâtis
Alger	03/01/1365	X	Plusieurs	/	/	
Alger	10/03/1673	/	/	/	/	/
Mitidja	03/02/1716	IX	20 000	/	/	/
Oran	09/10/1790	IX-X	2000	/	/	/
Blida	02/03/1825	X-XI	7000	/	/	/
Djидjelli	22/08/1856	X	/	/	/	/
Mouzaïa	02/01/1867	X–XI	100	160	/	/
Biskra	16/11/1869	IX	30	/	/	/
Mascara	29/11/1887	IX–X	20	/	/	80
Gouraya	15/01/1891	X	38	/	/	53
Constantine	04/08/1908	VIII/5,25	12	/	/	/
Aumale (Sour elGhozlane)	24/06/1910	VIII/6,6	81	/	/	/
Bordj Abou hassan	25/08/1922	VIII/5,4	4	/	/	50
Mac-Mahon	16/03/1924	VIII/5,3	4	/	/	/
Inkerman chlef	24/08/1928	VIII/5,4	4	/	/	100
Carnot	07/09/1934	VII/5,1	0	11	/	100
Guelma	10/02/1937	VIII/5,2	2	16	28	/
Mansoura	16/04/1943	VIII/5,3	9	11	900	250
Béjaïa	12/02/1946	IX/5,5	264	112	7500	1000
Constantine	06/08/1947	VIII/5	3	8	/	50
Kheratta	17/02/1949	VII/4,75	2	16	350	50
Orléansville	09/09/1954	X/6,7	1243	5000	60000	20000
Bou Medfaa	07/11/1959	VIII/5,3	0	2	500	100
M'sila Melouza	21/02/1960	VIII/5	47	129	4900	600
M'sila	01/01/1965	VIII/5,45	5	25	25000	3145
Bordj Bou Areridj	24/11/1973	VII/5,1	4	43	14922	2000
El Asnam	10/10/1980	X/7,3	2633	8369	400000	60000
Constantine	27/10/1985	VIII/5,9	10	3000	/	/
Tipasa-Chenoua	29/10/1989	VIII/5,9	35	700	50000	8000
Mascara	18/08/1994	VII/5,7	172	295	10000	2806
Ain Temouchent	22/12/1999	VII/5,7	26	174	25000	2708
Beni Ourtilane	10/11/2000	VII/5,7	2	50	/	3000
Boumerdes–Alger	21/05/2003	X/6,8	2278	11450	18200	44000
Laalam	20/03/2006	VII/5,2	4	68	dizaines de personnes	40
Oran	07/06/2008	5,5	1	11	/	/
Beni Ilmane	14/05/2010	VII/5,2	4	170	/	/
Alger	01/08/2014	5,6	6	420		
Mihoub	28/05/2016	5,3	/	29	500	62
Hammala	07/08/2020	4,9	/	/	1000	6000
El Harrouche	22/11/2020	5,2	/	/	/	/
Bejaia	18 /03 :2021	6	/	/	/	dizaines de bâtis

I : intensité, M_s : Magnitude

1.4.1 Sismotectonique du nord de l'Algérie

L'activité sismique du nord de l'Algérie, est l'une des régions les plus sismiquement actives de la Méditerranée, est liée à de gigantesques fracturations sous forme de failles géologiques illustrant les mouvements de confrontation entre la plaque eurasiennne et la plaque africaine avec un raccourcissement entre ces plaques de ~ 4 mm/an (Baddari et Djeddi, 2002 ; Ayadi et Bezzeghoud, 2015, Boulahia et al. 2021) (Voir figure 1.10). Du nord au sud, le nord de l'Algérie est divisé en quatre principaux domaines structuraux. Ces domaines ont acquis leur configuration géologique actuelle au cours des événements tectoniques d'extension et de compression du Mésozoïque et du Cénozoïque qui étaient liés aux ouvertures et fermetures de la mer Méditerranéenne. Ces caractéristiques géologiques, liées aux processus inter-plaques, sont : le système Tell Atlas ou Tell-Rift, les hauts plateaux, le système Atlas Saharien ou des montagnes de l'Atlas, et la plate-forme Sahara (Peláez José et al. 2005) (Voir figure 1.11). D'autre part, les séismes algériens sont superficiels ne dépassant pas en profondeur les 15 km, ce qui les rend plus perceptibles par la population et donc plus dangereux.

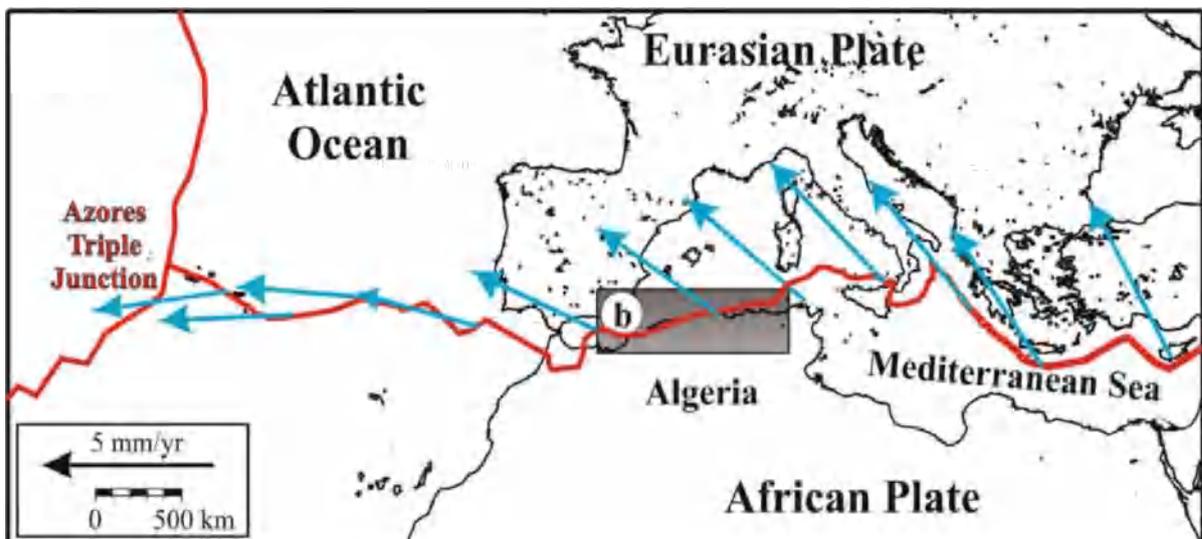


Figure 1.10 : Carte tectonique de la région méditerranéenne. La surface grise encadre la partie nord de l'Algérie. Mouvements prévus le long de la frontière entre les plaques Eurasie et Afrique (Boulahia et al. 2021).

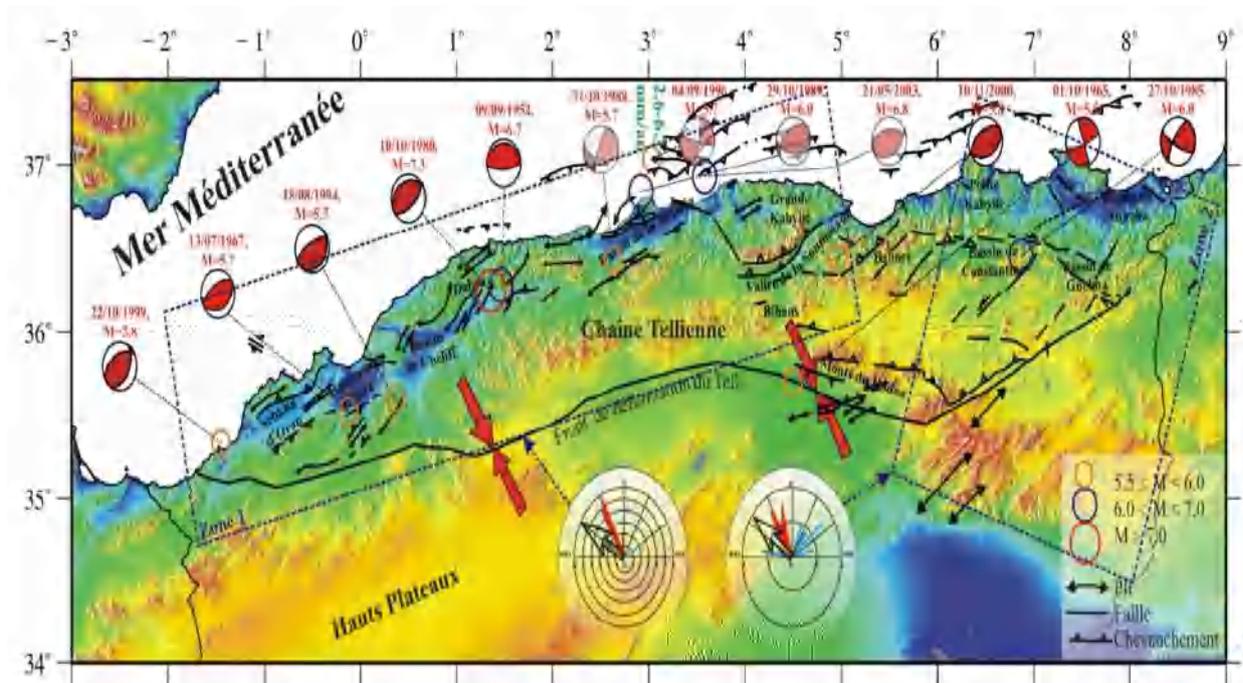


Figure 1.11 : Carte sismotectonique du nord de l'Algérie montrant les principales structures actives observées dans le Tell (Meghraoui, 1988) ainsi que les grands séismes de $M_s \geq 5.5$ avec leurs mécanismes aux foyers) Havard. Les flèches rouges indiquent la direction de convergence (Nocquet et Calais, 2004). Les rectangles en pointillés délimitent les domaines caractérisés par des régimes tectoniques relativement uniformes et les diagrammes de projections horizontales de P (en rouge) et T (en bleu) des axes de déformation (Serpelloni et al. 2007).

1.4.2 Evaluation de l'aléa sismique de la ville et leur adaptation

La ville est classée en zone IIa (sismicité modérée) selon le dernier règlement parasismique Algérien (RPA99/2003).

Deux types de scénarios sismiques ont été développés et utilisés dans cette étude pour réaliser des simulations de scénarios de risques sismiques, l'un déterministe, l'autre probabiliste.

a. Scénario sismique déterministe

Ce scénario utilise de séisme historique ayant l'intensité épicertrale la plus haute observée à l'échelle d'intensité macrosismique et le plus proche du site pour générer de l'aléa, mais d'autres séismes peuvent également être sélectionnés. D'après l'étude de micro-zonage sismique de la ville de Skikda réalisée par le centre national de recherche appliquée en génie parasismique (CGS, 2014) montrant que cette ville n'a pas connu des séismes historiques

dévastateurs et les activités tectoniques étant faibles par rapport à d'autres régions algériennes. Toutefois, des séismes ont été localisés dans les régions limitrophes accusant des intensités plus ou moins élevées affecte la ville de Skikda, résultant de l'activité sismique de trois régions Jijel, Constantine et Guelma. Notre choix du séisme de référence correspond au séisme de Constantine du 27 octobre 1985 avec intensité épiscopentrale est estimée à ($I=VIII$) (EMS-98) de magnitude ($M_s=5,9$) pour cette étude. La carte des iso-intensités historiques maximales au Skikda (Voir figure 1.12), qui est basée sur la compilation de dix-huit séismes (Voir tableau 1.2) ressentis dans les régions limitrophes a permis l'élaboration de la carte (Voir figure 1.12). Donc la ville de Skikda a été affectée par l'intensité égale à ($I_0=VII$) (MSK) basant sur quatre événements sismiques historiques les plus significatifs : séisme de Djidjelli du 22 août 1956 ($I=VIII$ (MSK)), séisme de Guelma du 10 février 1937 ($I=VIII$ (MSK)) et séisme de Constantine 6 août 1947 ($I=VIII$ (MSK)) et séisme de Constantine 27 octobre 1985 ($I=VIII$ (EMS-98)) (CGS, 2014).



Figure 1.12 : Carte des iso-intensités historiques maximales au Skikda (CGS, 2014).

Tableau 1.2 : Liste d'histoire sismique utilisée pour la réalisation de la Carte des iso-intensités maximal (CGS, 2014).

Date	Site	Intensité et/ou Magnitude	Domages
22-08-1856	Djidjelli	VIII et 5,7	- 05 morts et beaucoup de blessés - Endommagement d'un nombre important de structure
16-09-1907	Constantine	VIII	/
04-08-1908	Constantine	VIII et 5,2	- Destructions des vieilles bâtisses - 05 morts et 12 personnes blessées
10-02-1937	Guelma	VIII	- Des maisons traditionnelles, coloniales et bâtiments publics sont détruit - 02 morts et 16 personnes blessées
06-08-1947	Constantine	VIII-IX et 5,3	- 03 morts et plusieurs blessés - Endommagement d'un nombre important de structure
23-11-1950	Kasr Sbahi	V	/
01-04-1952	Ain Tessar	VI	/
23-05-1956	Hammam Meskhouti	VII	/
26-06-1956	Ouenza	VII	/
19-09-1959	Meskiana	VI	/
01-12-1960	N, Fedj Zemala	VII	/
18-02-1962	W, Ghardimaou	VIII	/
20-03-1962	Est Annaba	VII	/
14-03-1963	Château du Rhum	VI	/
19-01-1977	Ain Soltane, TU	VII	/
23-06-1979	Kasr Sbahi	V	/
05-10-1984	Ain Fekroun	VII	/
27-10-1985	Constantine	VIII-IX et 5,9	- Perte dizaine de vies humaines (05 morts et plus 300 blessés). - Plusieurs vieilles constructions endommagées

b. Scénario sismique probabiliste

Les scénarios probabilistes correspondent à des séismes dont les probabilités des occurrences sont prédéfinies en considérant toutes les sources sismiques qui existent dans la région. Les résultats sont présentés sous forme de relations entre les valeurs d'accélération maximales au sol et les fréquences annuelles de dépassement d'une part et les valeurs d'accélération maximales et les périodes de retour d'autre part et sous forme de cartes des courbes d'iso-accélération en cartographiant les valeurs moyennes pour des périodes de retour de 100, 200 et 500 ans (CGS, 2014).

L'étude de micro-zonage sismique de la ville de Skikda a permis d'estimer les événements sismiques probabilistes, réalisée en 2014 (CGS, 2014), montre que les accélérations maximales aux roches (PGA) varient de 0,135 g pour 100 ans (avec une probabilité d'occurrence de 10% par 10 ans), de 0,185 g pour 200 ans et de 0,28 g (avec une probabilité d'occurrence de 10% par 20 ans) pour une période de retour de 500 ans (avec une probabilité d'occurrence de 10% par 50 ans, soit un dimensionnement de la structure pour qu'elle soit capable de résister à une accélération qui a 10% de probabilité d'être dépassée au cours des 50 prochaines années (ou 90% de chance de ne pas être dépassée)) (Voir figure 1.13).

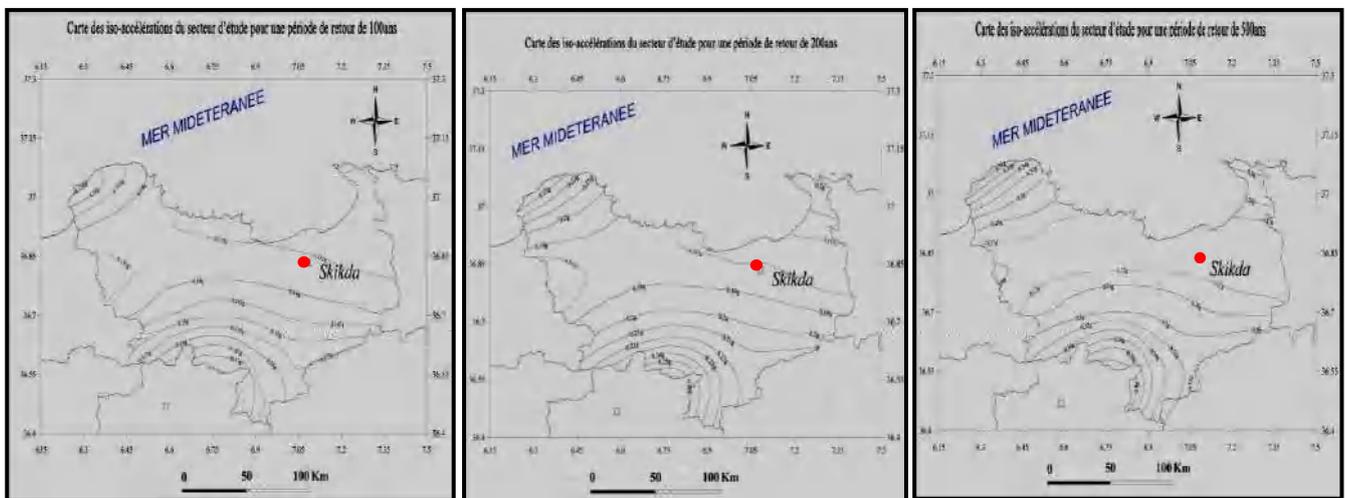


Figure 1.13 : Carte des courbes d'iso-accélération de la wilaya de Skikda pour des périodes de retour de 100 ans, 200 ans et 500 ans (CGS, 2014).

Dans cette thèse, on utilise l'équation 1.1 (Catulo et al. 2018), qui permet de convertir la valeur de l'accélération maximale du sol (PGA) en intensité selon l'échelle de (EMS-98) :

$$I_{EMS-98} = 5 + \frac{\ln(PGA) - \ln(0,03)}{\ln(1,8)} \quad (1.1)$$

Tableau 1.3 indique les intensités macroséismiques considérées des scénarios probabilistes, ainsi que les accélérations de base et les périodes de retour correspondantes.

Tableau 1.3 : Scénarios sismiques probabilistes considérés, en termes d'intensités macroséismiques, d'accélérations maximales au sol (unités g) et de périodes de retour, PR (en année).

PGA (g)	PR (en années)	EMS-98 Intensité
0,135	100	VII-VIII
0,185	200	VIII
0,27	500	VIII-IX

D'après le tableau 1.3, les intensités macrosismiques des scénarios obtenus varient de VII-VIII pour une période de retour 100 ans à VIII-IX pour 500 ans. Tel qu'indiqué dans la section.1.3 (contexte géotechnique), la majorité du terrain de la ville de Skikda est classée dans la catégorie 3 (site meuble), selon Secanell et al. (2004), en raison des effets d'amplification des sols meubles, il est concevable d'augmenter l'intensité de demi-unité (0,5) pour notre zone étude.

1.4.3 Sismotectonique de la ville (les zones sources)

D'après les travaux de recherche de Hamidatou et Sbartai (2017) qui ont identifié cinq zones de sources dans la région de Constantine associant des failles actives, la sismicité, la géologie et la tectonique dont deux zones de failles sont près à la ville de Skikda (Voir figure 1.14), dans le but de trouver des liens entre la sismicité et les structures actives.

- a. **La première zone du nord de Constantine (la faille d'El Kantour) :** Cette zone correspond au champ géologique situé au nord de Constantine et à l'entrée de Skikda, qui se caractérise par une faille active segmentée et s'étend sur 2080 km². L'activité sismique dans cette zone a été associée à des événements sismiques relativement petits, mais récemment, cette faille est potentiellement active qu'elle a provoqué des séismes du 05 mars 2017 et du 22 novembre 2020, avec des magnitudes de 4,6 et de 5,2 respectivement.
- b. **La deuxième zone de Guelma (la faille de Temlouka) :** La zone de Guelma comprend un système de failles avec un mécanisme focal étendu. Meghraoui (1988) a décrit une transtension de bassin (dépression tectonique formée par extension et subsidence), qui s'est formée entre deux chevauchements dextres dans une direction est-ouest. Le séisme de référence dans cette zone s'est produit le 10 février 1937, avec une magnitude de 5,2 (Benouar, 1993). Deux autres tremblements de terre $I_0 = VIII$ (MSK) se sont produits dans la région le 17 juin 1908 et le 3 décembre 1928.

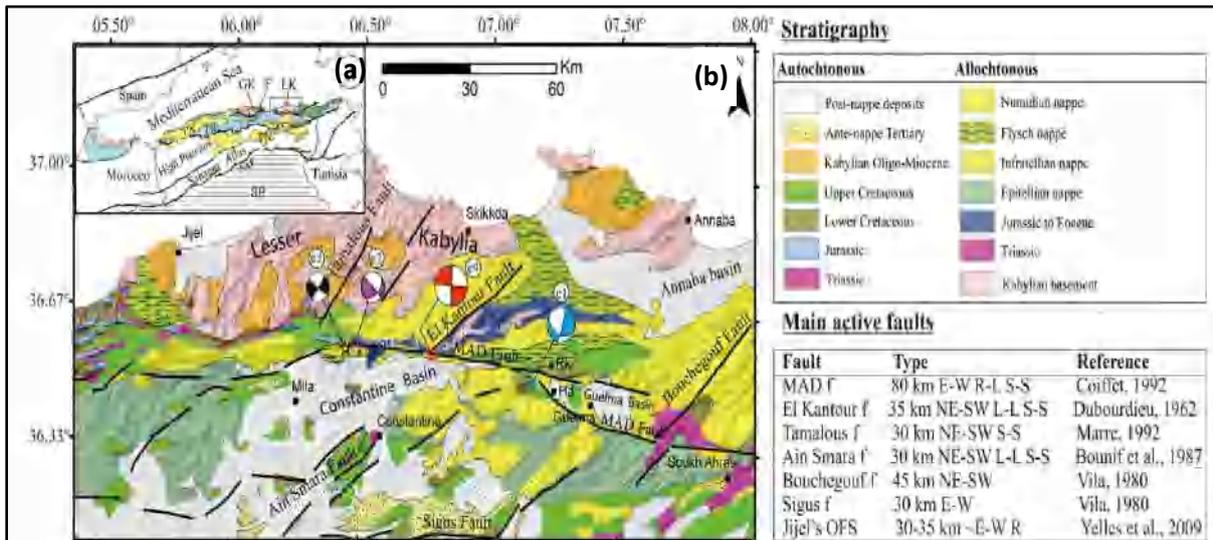


Figure 1.14 : a) Situation géologique de la chaîne tellienne algérienne, indiquant les principaux domaines tectoniques. Les lignes noires épaisses correspondent aux principaux chevauchements des Alpes. LK et GK sont respectivement la Petite et la Grande Kabylie ; F indique les unités de Flysch ; TR indique le domaine Tellien-Riff ; PN indique les dépôts de la nappe post-poussée ; SP indique la plate-forme saharienne b) Carte géologique du nord-est de l'Algérie. Les principales failles actives (lignes noires épaisses) et les unités géologiques sont tirées de Kieken (1983). Abréviations dans le tableau des principales failles actives : S-S = Strike-Slip, L-L = Left-Lateral, R-L = Right-Lateral, et R = Reverse (Bendjama et al. 2021).

1.5 Présentation de la ville de Skikda

Skikda est un pôle économique et industriel d'importance nationale et internationale, situé entre deux métropoles régionales Constantine et Annaba. La ville est située à l'Est – Algérien, à 510 km d'Alger et à 89 km de Constantine et à 104 km de la ville de Annaba (Voir figure 1.15).

Administrativement, la commune de Skikda est limitée par :

- La commune d'Ain Zouit à l'Ouest ;
- La commune de Flifla à l'Est ;
- La commune de H. Krouma au Sud ;
- La commune d'EL.Hadaïk au Sud-Ouest.



Figure 1.17 : Les Quatre Colonies Romaines : Cirta, Rusicade, Chullu, Milev
(http://skikda.boussaboua.free.fr/skikda_histoire_02_antiquite.htm).

Les ruines de la ville antique, furent détruites par les Vandales du roi Genséric au Ve siècle. La région de Skikda s'est arabisée aux premières heures de la conquête islamique, l'entrée de l'islam dans la région se fit par l'intermédiaire de « Oheid Allah El Fatimi » qui réussit à convertir les tribus de la confédération des « Katana ». La ville fut occupée par les troupes françaises en 1838, elle porta d'abord le nom de port de France puis celui de « Philippeville » en hommage au roi français Louis Philippe (Chaguetmi, 2011).

1.6.1 Période coloniale (1838-1962)

Les colons français ont été installés sur le site de l'ancienne ville romaine (centre historique de la ville de Skikda –Rue Didouche Mourd) profitant ainsi d'une trame déjà existante (ANAT, 1998), fut d'abord une ville de garnison.

La croissance démographique, les demandes accentuées en matière de logement et de manque de l'espace disponible pour construire de ces logements, les Français étaient obligés d'occuper les sites topographiquement difficiles (les terrains accidentés), elle est construite entre deux collines dont l'altitude est d'environ 160 mètres : le Béni-melek à l'Ouest et Bou-Abbâz à l'Est, séparés par un ravin qu'occupait une rivière (Voir figure 1.18) (Boulkaibet, 2011).

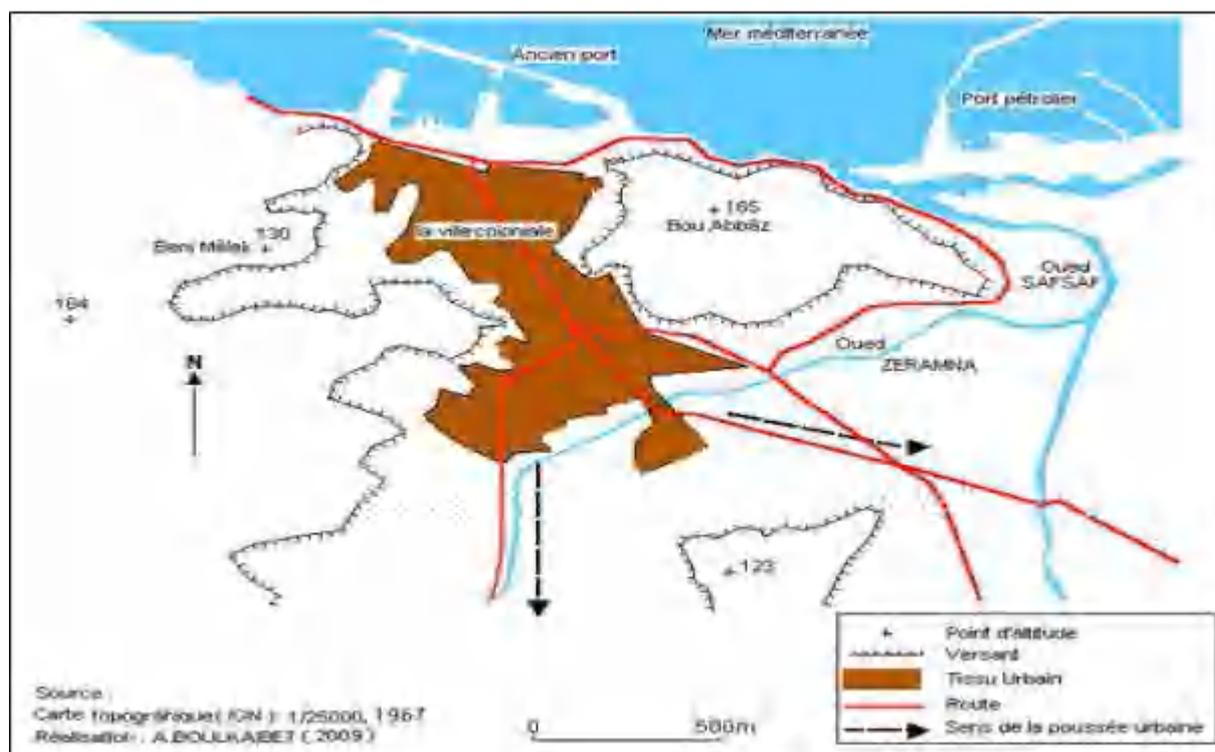


Figure 1.18 : Carte topographique de la ville de Skikda (Boulkaïbet, 2011).

Après la guerre mondiale, la ville continue son expansion vers le Sud sur les terrains agricoles, et comme dans toutes les grandes villes algériennes à cette époque-là le fameux « plan de Constantine (1958) » a été appliqué, donnant naissance aux grandes ensemble de bâtis de type habitation à loyer modéré (cité Camus, CIA et Ballot) (Djema, 2013).

Durant de la période coloniale (1838-1962) : la croissance de la ville a pris un aspect linéaire selon l'axe Nord –Sud de la porte de Stora jusqu'à la porte de Constantine entre (1838 et 1848), entre 1848 et 1910 la croissance de la ville s'est traduit par un aspect discontinu et multidirectionnel, car la topographie du site constituait l'une des contraintes de l'urbanisation de la ville (Voir figure 1.19).

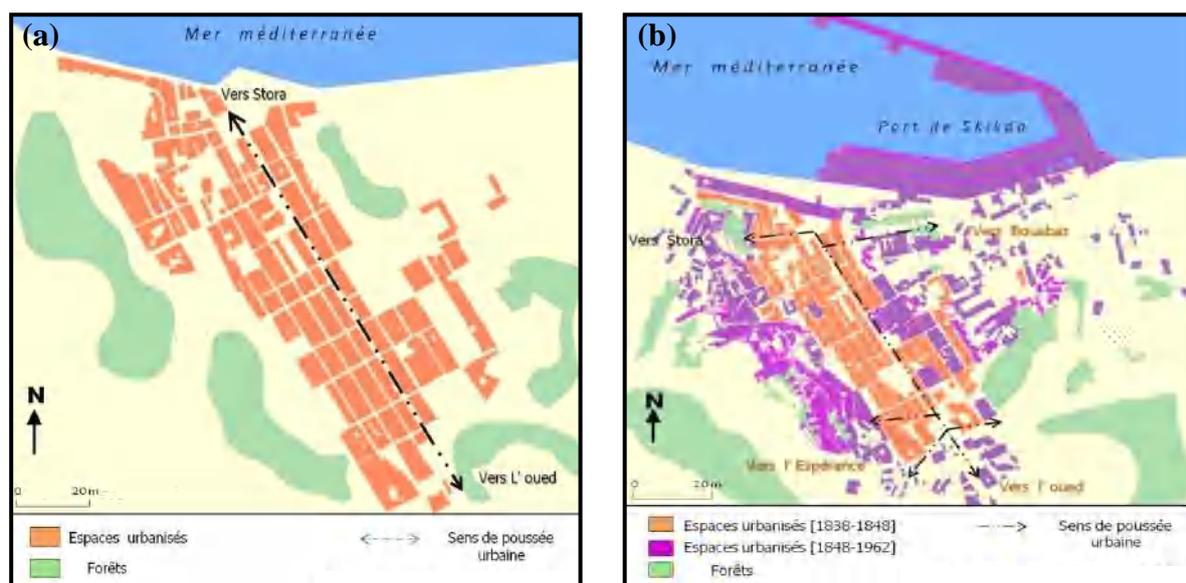


Figure 1.19 : La croissance de la ville à la période coloniale : a) une croissance linéaire (1838-1848) b) une croissance discontinu et multidirectionnel (1848-1910) (Chaguetmi, 2011).

En cette période, de nombreux monuments historiques classés ont été inaugurés comme : Mosquée Sidi Ali Dib en 1846, le palais Dar Mériem en 1913, l'artisanat ou fonctionnait une école de tapis (aujourd'hui centre culturel communal Aissat Idir) en 1932, un nouvel hôtel de police 1933, la gare ferroviaire en 1937, la mairie (l'hôtel de ville) en 1931, la grande poste en 1938, la Banque d'Algérie en 1934, le théâtre municipal en 1932, l'église Sainte-Thérèse (actuellement la Crèche du Serdouk) en 1945. La plupart de ces patrimoines bâtis ont été conçus par l'architecte français Charles Montaland sous l'administration de Paul Cuttoli.

1.6.2 Période post-coloniale

Dès l'indépendance, au cours des années 1962 jusqu'à 1970, l'intérêt quasi-exclusif pour les activités productives, l'application du plan de Constantine et l'adoption des industries industrialisantes qui l'inspire ont eu des retombées directes et radicales sur l'aménagement de l'espace national ; l'implantation des pôles industriels dans les villes sans qu'elles soient préparées a aggravé le phénomène de l'exode rural (une moyenne de 170000 personnes par an pendant la période 1966-1977 (Le taux d'urbanisation s'est élevé à près de 32% en 1966)) (Chaguetmi, 2011), ce qui a conduit à une extension urbaine galopante et très défavorable à l'agriculture (intégration de plusieurs hectares de terre à haute valeur agricole dans les périmètres à urbaniser) et à l'environnement par la prolifération de l'habitat illicite, devant l'absence d'une politique urbaine stricte et rigoureuse. Y ont été appliquées certaines

décisions politiques prises à l'échelle nationale pour lancer des programmes de logements en zones d'habitat urbain nouvelles ZHUN, on peut citer : l'Espérance, la cité des 700 logements, etc. Le résultat a été un grand changement fonctionnel de l'espace communal de la ville : les espaces à vocation agricole deviennent urbano-industriels (Nemouchi, 2005). En outre, il y a eu la création de lotissements publics et privés et l'encouragement du secteur privé dans le domaine de la construction.

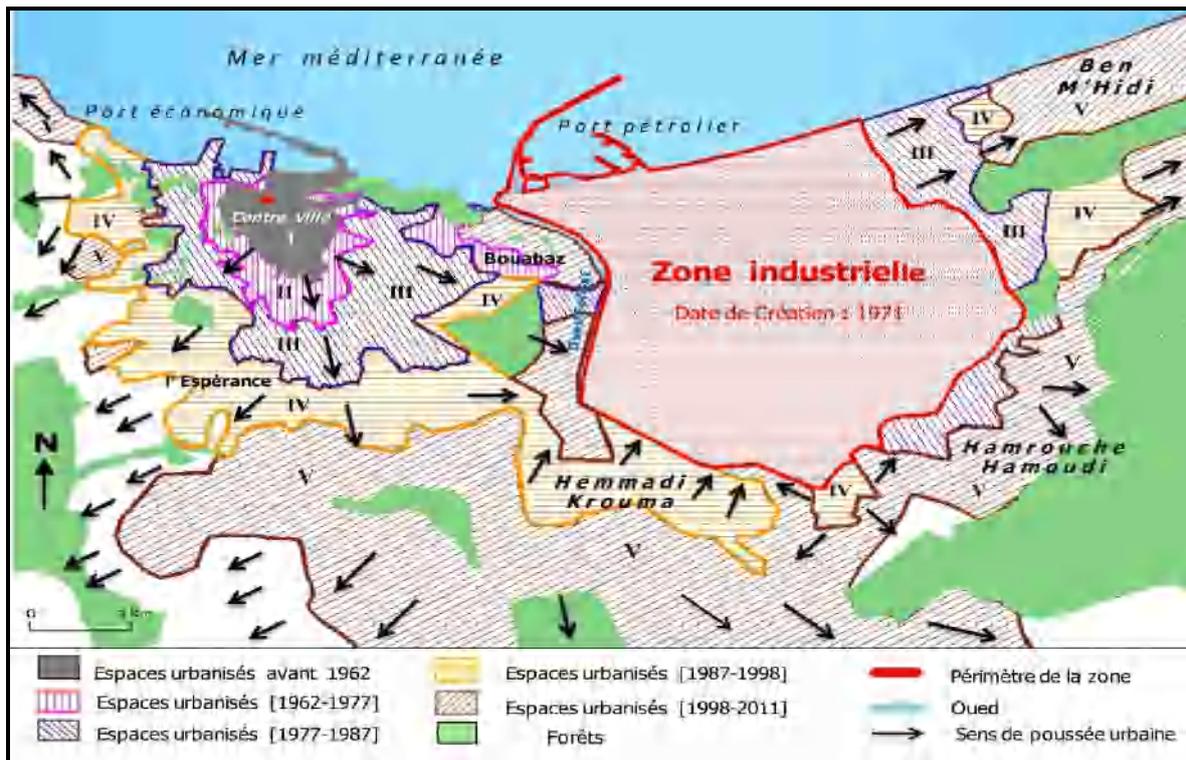


Figure 1.20 : Carte de l'évolution de l'espace urbain de la ville Skikda depuis (avant 1962-2011) (Chaguetmi, 2011).

1.7 Description des systèmes constructifs, des matériaux de construction et des tissus architecturaux

Dans la ville de Skikda, les constructions ont été classées généralement selon le type de matériau de construction, le type de système de structure verticale et horizontale et l'époque de construction. Dans ce travail, une étude bibliographique a été menée afin de décrire brièvement les principaux éléments constructifs existants influençant le comportement sismique des constructions :

1.7.1 Les structures verticales et horizontales

Les constructions d'architecture coloniale sont caractérisées par des façades comportant de grandes ouvertures orientées directement sur la route, à savoir de grandes portes, de grandes fenêtres, des balcons, etc. (PPSMVSS, 2011). Les constructions en maçonnerie ont été caractérisées par :

- Des structures verticales sont réalisées de la façon suivante : au niveau de soubassement, de certaines constructions, les murs en pierre de taille pour protéger contre l'humidité, au rez-de-chaussée et les étages pour les murs porteurs composés de murs en briques creuses, briques céramiques de brique plein d'épaisseur de 15 cm à côté et d'autres de 25, 30 ou encore de 45 cm, et/ou en pierre non chaînée avec une épaisseur qui varie entre 50 et 80 cm, pour les cloisons sont souvent en briques céramiques d'épaisseur 7 cm et revêtues d'une couche de plâtre peint et parfois en briques creuses d'épaisseur 12cm (Groupement CTC et AQUIDOS, 2016).
- Des structures horizontales sont faites en plancher en bois massif reposant sur des poutres en bois, comme indiqué à la figure (1.21.a), en plancher en hourdis céramiques voûtés ou non et poutres métalliques (IPN) pouvant supporter de plus grandes charges et de plus grandes portées et sont relativement indéformables avec le temps, comme indiqué à la figure (1.21.b), en planches de profilés métalliques et de hourdis préfabriqués en béton léger et en dalle en béton armé, comme indiqué à la figure (1.21.c). Leurs toitures sont en terrasse accessibles ou en charpentes en bois, avec des tuiles plates ou creuses. Ces constructions sont concentrées dans la ville historique (Boulevard Didouche Mourad) (Groupement CTC et AQUIDOS, 2016). Il existe aussi des bâtiments récents (modernes), construits à la fin de la période coloniale jusqu'à aujourd'hui, qui sont réalisés en béton armé.

Les styles architecturaux coloniaux ont été modifiés radicalement après l'indépendance où les constructions en béton armé sont prédominantes avec des fenêtres carrées voire allongées dans le sens horizontal, des balcons sont trouvés dans tous les étages, des hauteurs plus importantes, atteignant généralement 5 étages, certains bâtiments dépassés 10 étages. Ces constructions ont été caractérisées par :

- Des structures verticales du système poteau et poutre, soit des murs porteurs en béton armé et soit des systèmes mixtes des remplissages en maçonnerie de briques.
- Des structures horizontales : des planchers en béton armé, des planchers en corps creux.

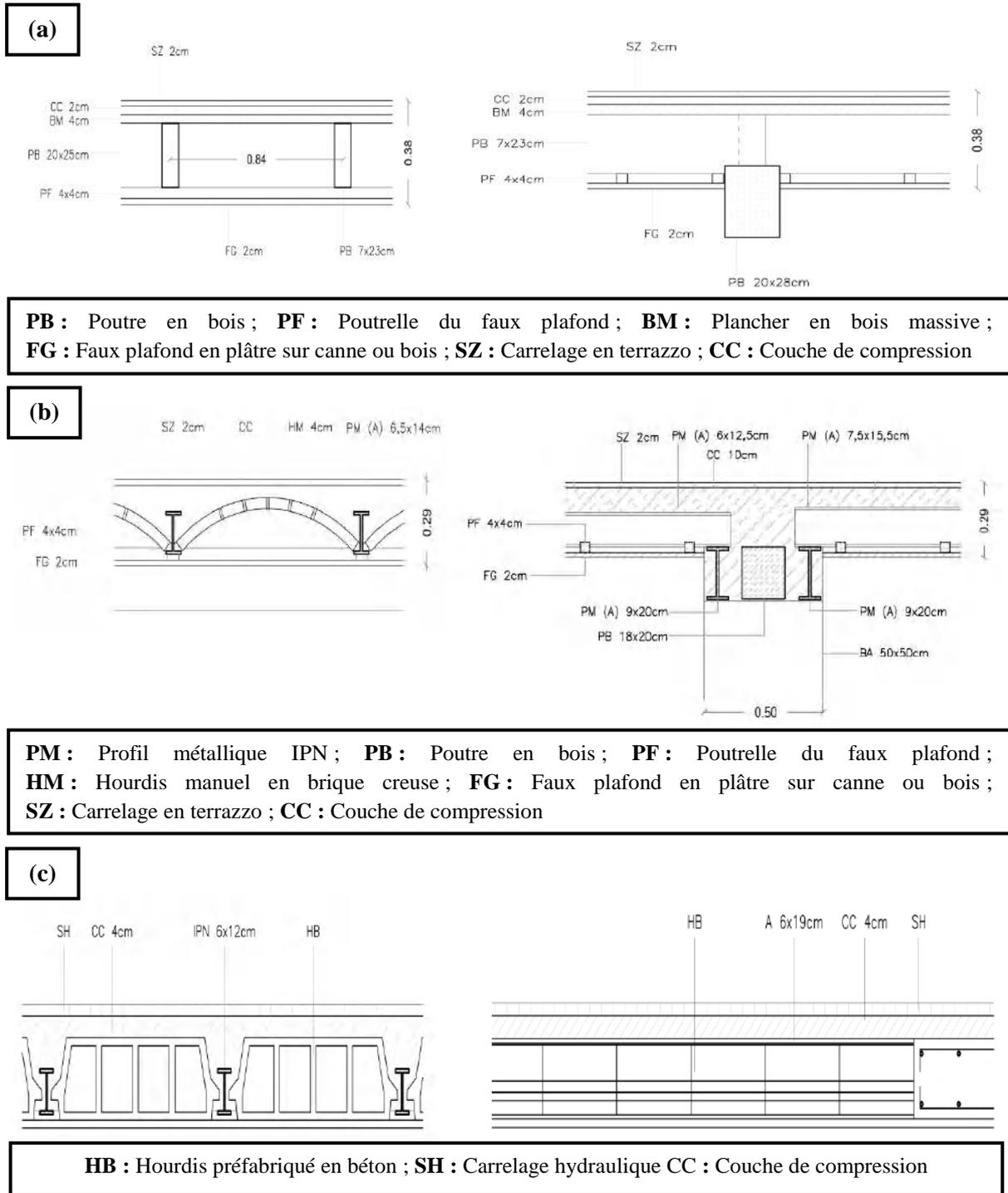


Figure 1.21 : Types de plancher : a) Plancher en bois ; b) Planchers en voute ; c) Plancher en hourdis préfabriqués (Groupement CTC et AQUIDOS, 2016).

1.7.2 Les fondations

Il existe plusieurs types des fondations, qui dépendent du type de construction, que nous citerons :

Pour les constructions en maçonnerie sur un système de fondation : en semelles filantes en béton de ciment cyclopéen et en semelles filantes en maçonnerie de moellons. Ces fondations ont une profondeur variante de 0,60 m à 2,00 m selon le niveau de bon sol. (Dekoumi, 2007 ; Guettiche, 2017).

Pour les constructions en béton armé, généralement des semelles isolées, filantes ou surfaciques (radier général) sont utilisées, sauf dans certaines constructions avec des hauteurs élevées où les fondations sont réalisées avec des semelles sur pieux (Guettiche, 2017).

1.7.3 Tissus architecturaux

On peut recenser typologiquement six (06) types de bâtiments en fonction du tissu architectural, à partir de la lecture des façades, à savoir : Néo-classique (1840-1860), Éclectique (1861-1913), Art nouveau (1913-1936), Art déco (1913-1936), Néo-Mauresque ((appelé aussi arabisance) un mélange de « pastiche » de l'architecture arabo-musulmane) (1913-1936) et mouvement moderne (architecture moderne) (1936 jusqu'à ce jour).

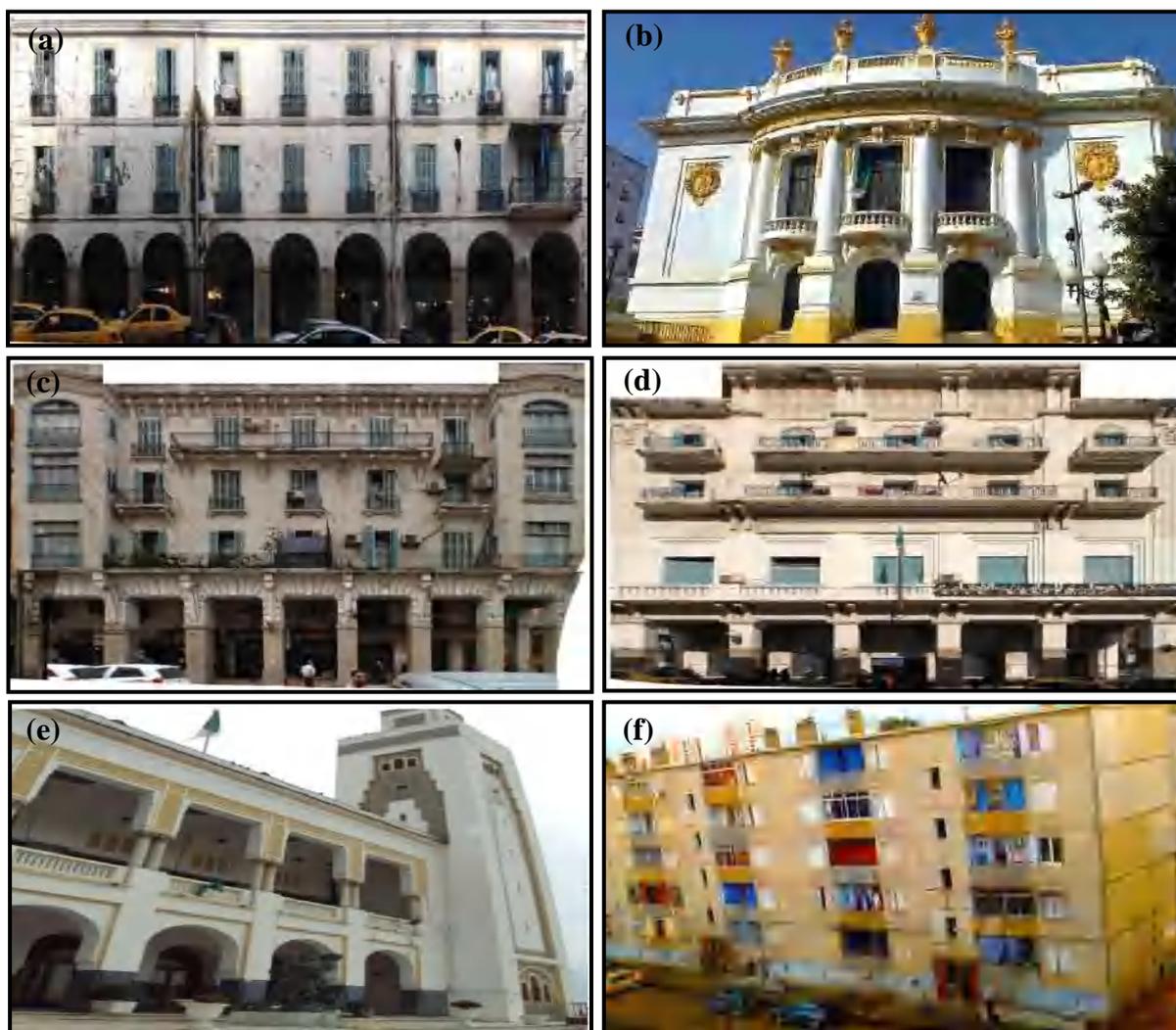


Figure 1.22 : Types de typologie architecturale : a) Néo-classique (1840-1860) ;
 b) Éclectique (1861-1913) ; c) Art nouveau (1913-1936) ; d) Art déco (1913-1936) ;
 e) Néo Mauresque (1913-1936) ; f) Mouvement moderne (architecture moderne) (1936
 jusqu'à ce jour).

1.8 Inventaires du bâtiment et enquêtes sur sites (construction d'une base de données)

Dans le traitement d'un grand nombre de bâtiments dans une zone urbaine, l'inventaire par échantillons représentatifs d'une famille de bâtiments est souvent employé (Brennet et Badoux, 2002). Pour évaluer correctement la vulnérabilité sismique à grande échelle, nous allons d'abord procéder à un inventaire détaillé sur les typologies architecturales et les techniques de construction utilisées afin d'identifier la méthode d'évaluation la plus adéquate.

Premièrement, En se basant, sur les données de l'étude d'expertise technique du vieux bâti de la ville de Skikda réalisé par l'organisme national de contrôle technique de la

construction de l'Est de Skikda (CTC, 2012) qui est représentée par une fiche technique d'identification d'une construction de CTC, comme présenté à la figure 1.23, avec des petits changements des informations dans l'année de construction pour permettre d'évaluer qualitativement et quantitativement la qualité sismique de ces constructions, qui décrit le type d'informations collectées lors de l'enquête sur le terrain, subdivisée en trois parties: 1. Description ; 2. Diagnostic et 3. Conclusion et recommandations. Cette expertise, basée sur un diagnostic visuel des différents éléments de la construction, qui a été utilisée pour classer les constructions existant dans l'une des quatre classes de l'état de conservation (bon état, légèrement dégradé, moyennement dégradé et fortement dégradé) afin d'établir et de fournir des orientations sur le type d'intervention sur les constructions concernées (réparer, réhabiliter, renforcer ou reconstruire). Chaque classe d'état de conservation des bâtiments est donnée sous forme de couleur : vert, jaune, orange et rouge. Le premier groupe, en vert, est constitué de bâtiments ne nécessitant aucune intervention structurelle (sauf quelques réparations superficielles éventuelles) pour assurer la sécurité de leurs habitants. Le deuxième groupe, en jaune, se compose de bâtiments qui nécessitent des interventions de réparation et/ou de renforcement léger. Le troisième groupe, en orange, se compose de bâtiments qui nécessitent des interventions de réparations et/ou de réhabilitation sérieuse (modérée à lourde). Le dernier groupe, en rouge, est constitué de bâtiments qui ont besoin d'une intervention urgente du renforcement ou qui devraient être démolis et reconstruits.

Deuxièmement, on se base sur notre propre enquête qui s'appuie sur le diagnostic visuel avec de nombreuses visites sur le site pour classer les constructions par la méthode Risk-UE selon la typologie (EMS-98) (Grünthal, 2001), qui est basée essentiellement sur le type de système porteur et le type de matériaux de construction et regrouper d'autre ensemble des paramètres de nature structurale ou non structurale (année de construction, état de conservation, Interventions de confortement, etc.), ce qui peut influencer sur les performances sismiques du bâtiment. Les difficultés liées au diagnostic visuel sont l'impossibilité d'accéder à l'intérieur du bâtiment pour réaliser un inventaire systématique et exhaustif de l'ensemble de celui-ci. Ainsi, on se repose sur l'observation visuelle extérieure des immeubles, sur les photographies satellites, et il est également impossible de préciser le "type des fondations".

Finalement, à l'aide de plusieurs rapports techniques, documents, plans et lettres disponibles sur les constructions délivrées par les organismes de contrôle et les services techniques et administratifs (DUAC, DEP, DL et OPGI) de la wilaya de Skikda. Concernant les données sur l'année de construction et le système porteur et l'état de conservation.

Dans ce cadre, on utilise le même modèle de fiche technique déjà réalisé par l'organisme national de contrôle technique de la construction de l'Est de Skikda (CTC, 2012) pour le relevé des caractéristiques structurales et non structurales de différentes constructions.

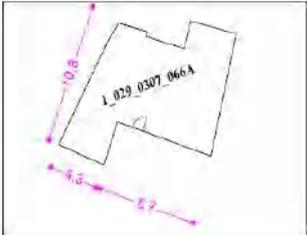
PARTIE I: DESCRIPTION			
<p>Occupation : <input type="checkbox"/> Logement <input type="checkbox"/> Individuelle <input type="checkbox"/> Collective <input type="checkbox"/> Nombre de logements <input type="checkbox"/> Administratif <input type="checkbox"/> Commerciale <input type="checkbox"/> Scolaire <input type="checkbox"/> Installations sportives <input type="checkbox"/> Autre (à préciser)</p> <p>Année de la construction : <input type="checkbox"/> Avant 1838 <input type="checkbox"/> 1838-1920 <input type="checkbox"/> 1920-1950 <input type="checkbox"/> 1950-1962 <input type="checkbox"/> 1962-1980 <input type="checkbox"/> 1980-2003 <input type="checkbox"/> Après 2003</p> <p>Niveau code parasismique : <input type="checkbox"/> <1981 Faible <input type="checkbox"/> 1981-2003 Moyen <input type="checkbox"/> >2003 Elevé</p> <p>Interventions sur la construction : <input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Agrandissement <input type="checkbox"/> Elévation <input type="checkbox"/> Réparation <input type="checkbox"/> Réhabilitation <input type="checkbox"/> Renforcement <input type="checkbox"/> Année d'intervention :</p> <p>Etat de la construction : <input type="checkbox"/> Achevée <input type="checkbox"/> Partiellement achevée <input type="checkbox"/> En cour de construction</p> <p>Occupation : <input type="checkbox"/> Totalement occupée <input type="checkbox"/> Partiellement occupée <input type="checkbox"/> Inoccupée <input type="checkbox"/> Abandonnée</p> <p>Données de l'implantation : Nature du sol en surface :</p> <p>Pente générale : <input type="checkbox"/> Nulle <input type="checkbox"/> Modérée < 10% <input type="checkbox"/> Forte > 10%</p> <p>Environnement de la construction : Construction isolée : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Position du bâtiment : <input type="checkbox"/> Milieu <input type="checkbox"/> Coin <input type="checkbox"/> En-tête Joint : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> Non Dimension :</p> <p>Réseaux divers:.....</p>	<p>Caractéristiques géométriques : Forme en plan Rectangulaire <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Forme irrégulière <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Forme en élévation Nombre de niveaux, Hauteur de Niveau, Hauteur S/So Croquis</p> 		
Structure porteuse:			
Structure verticale		Structure horizontale	
<p>Béton Armé Système poteaux – Poutres Système de portique Système murs porteurs Système mixte portiques/murs porteurs Système à noyau Autres: ...</p>	<p>Charpente Métallique Portiques Auto stable ductiles Portiques Auto stable Ordinaires Palées Triangulées en X, V Cadres et palées en X, V Assemblages Autres: ...</p>	<p>Maçonnerie Murs en parpaings Murs en pierre de taille Murs en moellons Murs en adobe (briques de terre cuite) Murs en blocs de tuff Structure mixte Autres: ...</p>	<p>Plancher à Hourdis ou en Béton Armé. Planchers avec structure et éléments secondaires en bois Planchers Bois connecté aux murs porteurs avec tirants métallique Planchers mixtes poutrelles métalliques/maçonnerie voûté ou non Voûtes avec tirants métalliques Présence de balcons et loggias Autres: ...</p>
<p>Autres, à préciser: Cloisonnement et remplissages, Escaliers, Type et structure des escaliers, Garde-Corps, Matériaux de revêtement, Parements extérieurs, Couvertures/Bardages/Etanchéité, Installation divers.</p>			
PARTIE II: DIAGNOSTIC			
Structure porteuse:			
<p>Pour l'ensemble de la construction: Ouvrages intacts, Tassement, Basculement, Rotation, Soulèvement et Autres: ...</p>			
Structure verticale		Structure horizontale	
<p>Béton Armé Eléments porteurs intacts Disparition ou enrobage insuffisant Corrosion d'armatures et perte de section Carbonatations (Apparition de traces blanches, efflorescences) Faiçonnage (Alcali réaction) Flèche excessive Epaufrure Cassure/Ecrasement Déformation/Flambement Apparition de fissures Autres: ...</p>	<p>Maçonnerie Eléments porteurs intacts Ecaillage Eclatement Effritement Epaufrure Défaut de verticalité Descellement Fissuration Effondrement localisé Dislocation Altération du matériau constitue du joint Autres: ...</p>	<p>Charpente Métallique Aucune dégradation Fléchissement Flambement Déversement Torsion Corrosion Rupture/Cassure Autres: ...</p>	<p>Aucune dégradation Ondulation Affaissement Gondolement Fléchissement Bombement Corrosion Rupture Pourrissement Autres: ...</p>
<p>État de dégradation et de conservation de: Cloisonnement et remplissage, Escaliers, Couvertures/ Bardages/Etanchéité.</p>			
<p>Environnement immédiat de la construction</p>			
<p>Apparition de traces d'humidité</p>			
<p>Analyse:</p>			
PARTIE III: CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS			
<p>Niveau de dégradation des constructions : Légèrement dégradé Moyennement dégradé Fortement dégradé Bon teat</p>	<p>Classement de l'intervention : Légère Moyenne Lourde</p>	<p>Type d'intervention : Bâtiment à conforter Bâtiment à réhabiliter</p>	<p>Construction menaçant ruine (IMR)</p>
PARTIE IV: CAMPAGNE PHOTOS			
			

Figure 1.23 : Fiche technique utilisée par le CTC pour identifier l'état de conservation (CTC, 2012).

Cette étude a touché 4507 constructions où de 53 constructions abandonnées qui représentent 1,19 % du nombre total des constructions enquêtées ne prennent donc pas en considération dans l'analyse de la vulnérabilité sismique, alors l'étude a porté sur 4454 constructions dont 3696 bâtiments résidentiels soit 82,98 % 758 soit 17,02 % des équipements administratifs, d'éducation, de santé, musées et patrimoine culturel, etc. Le tableau 1.4 donne la répartition des différentes typologies constructives selon le type d'occupation.

Tableau 1.4 : Occupation des bâtiments (en pourcentage par rapport au nombre total de bâtiments dans la ville de Skikda).

Occupation	Nombre de bâtiments	
Bâtiments résidentiels	3696	82,98%
Bureaux administratifs	144	3,23%
Éducation (crèches, écoles, collège et centre de formation professionnelle)	210	4,71%
Musées et patrimoines culturels	3	0,07%
Religion (mosquées, marabout, école coranique et église)	23	0,52%
Hôpitaux, hospices et cliniques	49	1,10%
Services d'équipement: parking, marchés publics, bureaux de poste, banque, agences, hôtels et motels	158	3,55%
Sport	11	0,25%
sièges de l'armée et de la police	24	0,54%
Station de transport	26	0,58%
Équipement commercial, usine et entreprise	110	2,47%

1.9 Analyse statistique et repartitions des constructions

L'analyse de la vulnérabilité sismique d'un environnement urbain est caractérisée par l'aptitude des bâtiments et des structures à supporter les secousses sismiques (vulnérabilité physique) et par la capacité des populations à se comporter de façon cohérente et raisonnée face à un événement majeur (vulnérabilité sociale). Pour identifier correctement les typologies constructives de la zone d'étude selon Risk-UE, il suffit de connaître l'année de construction pour localiser les constructions de même époque qui sont construites des mêmes matériaux de construction, des mêmes techniques de réalisation et des mêmes niveaux de code parasismique. Pour cela, on prend en considération l'évolution urbanistique et historique de la ville correspondant aux grandes périodes de réalisation pour faire un découpage en sous-zones par une relative homogénéité architecturale et constructive afin de mieux présenter notre travail.

D'après (Petroccioli, 1993 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a) qui ont été identifiés à l'échelle de la région méditerranéenne trois (03) grandes familles de constructions correspondant à trois périodes coloniales de construction qui sont :

- Période entre 1838-1920 : Dominance de constructions traditionnelles réalisées avec l'adobe, la maçonnerie de pierre et de briques avec des planchers en bois et/ou en voûtains.

- Période entre 1920-1950 : constructions en maçonnerie de pierres et/ou de briques avec des planchers de dalle en béton armée.

- Après 1950-1962 : Généralisation des constructions modernes en poteaux poutres (portique) en béton armé ou mur porteur en béton armé.

Dans la période après l'indépendance 1962 (post-coloniale) peut être divisé en trois (03) périodes de construction, il est directement lié au niveau du code parasismique (l'établissement règlement parasismique) :

- Période entre 1962 -1981 : Une nouvelle technique de construction a été utilisée dans cette époque en général des panneaux préfabriqués en béton armé ou/et poteaux poutres (portique) en béton armé ou/et mur porteur en béton armé, construits avant l'établissement de premier règlement parasismique algérien de 1981 (RPA 81, 1981), considère comme des constructions ont un niveau parasismique bas.

- Période entre 1981-2003 : Des constructions ont été construites entre 1981 et la date de publication de la dernière version de règlement parasismique algérien de 2003 (RPA03, 2003), considérés comme des bâtiments ont un niveau de conception parasismique moyen.

- Période >2003 : Après 2003, considère comme des constructions de haute conception parasismique.

Selon la lecture urbanistique, historique de la ville et les périodes de construction précédentes, on va diviser la ville de Skikda en cinq zones de nombre total d'échantillons est de 4454 bâtis enquêtés sur un parc immobilier évalué à 6482 constructions dans la zone d'étude :

Zone 01 : la zone touristique de Stora.

Zone 02 : la vieille ville (le centre historique de la ville).

Zone 03 : regroupant les cités : les allées, cité 20 Août 1955, Merdj Eddib, Frères Saker, cité 500 et 700 logements.

Zone 04 : regroupant : le boulevard Houari Boumédiène et cité Aïssa Boukerma.

Zone 05 : regroupant l'ensemble des îlots : Briqueterie, Msîouene, Zef Zaf et Bouabaz.

Le tableau ci-après donne le nombre des constructions enquêtés et la distribution de nombre des bâtis en fonction des matériaux de construction par zone d'études :

Tableau 1.5 : Distribution des constructions à Skikda en fonction des matériaux de construction dans les zones considérées.

Zone	Total des constructions	constructions enquêtés	% Bâti enquêté	Bâti maçonnerie	Bâti B.A	Bâti C.M	Bâti Bois
Zone 01	314	101	32,17%	53	48	0	0
Zone 02	2397	2176	90,78%	1494	669	11	2
Zone 03	20 72	1038	50,14%	51	978	8	1
Zone 04	637	379	59,50%	5	275	99	0
Zone 05	1062	760	71,47%	0	760	0	0

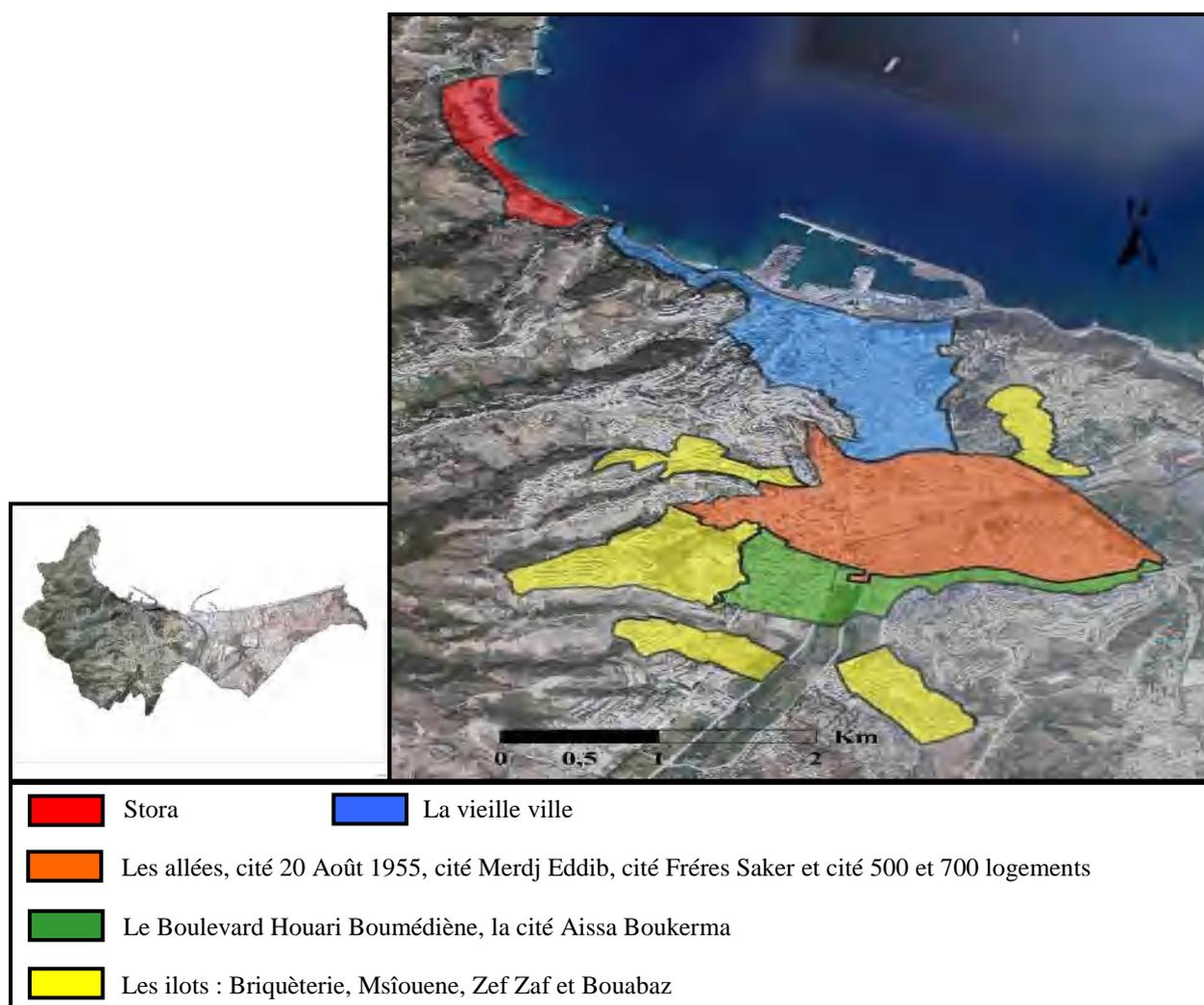


Figure 1.24 : Carte de la zone d'étude sous plateforme SIG utilisant l'image satellitaire à haute résolution Google Hybrid Maps de la ville de Skikda et avec la délimitation des sous-zones.

1.9.1 La zone touristique de Stora

Grâce à sa proximité avec la ville de Skikda et à la richesse du site, cette zone se présente comme l'un des plus grands pôles du tourisme, le site de Stora se caractérise par des maisons individuelles et collectives (villas anciennes à un, deux, trois ou quatre niveaux construits en maçonnerie) du temps colonial, et bâtiments collectifs et des équipements construits en béton armé (poteau –poutre) construits après l'indépendance (à partir de 1962), ainsi que des bâtiments d'habitation qui ont souffert de graves endommagements par des formations de fissures et de vieillissement des matériaux de construction. En général, la majorité des bâtis sont en maçonnerie et soit en béton armé qui n'ont pas été conçues selon les normes parasismiques (construites avant l'application du premier règlement parasismique Algérien de 1981 (RPA 81, 1981)). La topographie et la morphologie du site (pente, glissement de terrain) influent négativement sur la qualité et la stabilité des constructions.

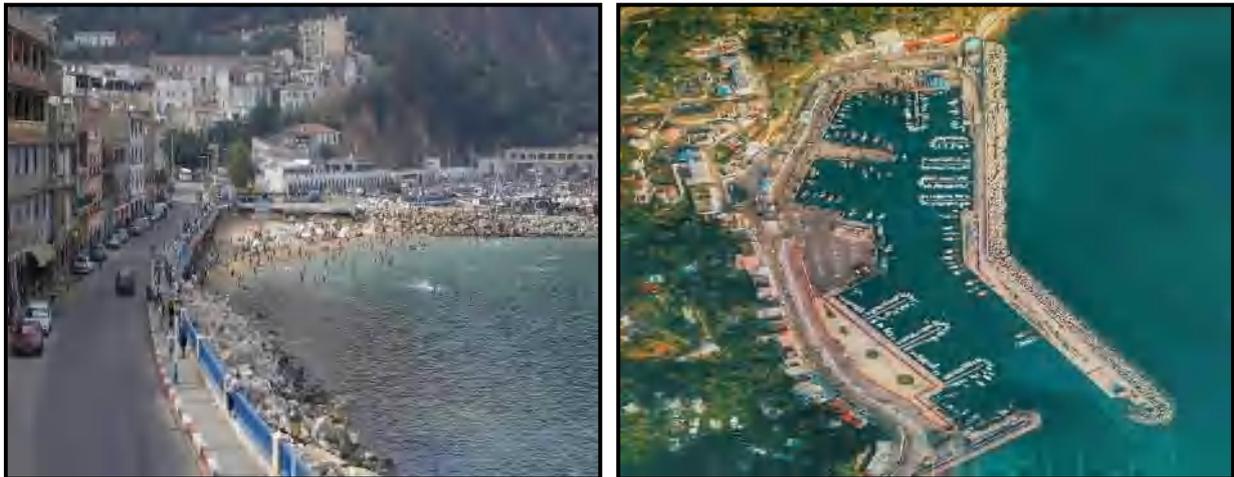


Figure 1.25 : Image sur le site touristique de Stora.

1.9.2 Le centre historique

Le centre historique de la ville de Skikda constituait le noyau de la ville et la première agglomération urbaine de Skikda avant toute extension, couvre une superficie de 190 hectares, a été construite à l'époque coloniale, profitant de l'ancienne ville et de la trame romaine déjà existante. Presque la majorité des constructions de la vieille ville ont été construites entre 1840 et 1962 avec des modifications durant les années 1860, 1870 et 1936 (Groupement CTC et AQUIDOS, 2016) et la majorité de son cadre bâti ancien ont été construits en maçonnerie non renforcée dont le nombre d'étages variés entre (R+0) à (R+6).

Le site du centre est accidenté, avec des pentes qui dépassent les 10%. Les données géotechniques révèlent qu'une lithologie de 4 à 5 mètres d'épaisseur pratiquement sur le long du boulevard de Didouche Mourad surplombe un sol constitué essentiellement de schiste gris

bleu à noirâtre altéré dans les premiers mètres avec la présence de millonite à certains niveaux. C'est un site peu stable, le sol étant composé d'une couche importante de remblai, supportée par une couche de schiste très altère (Hadeff, 2011).

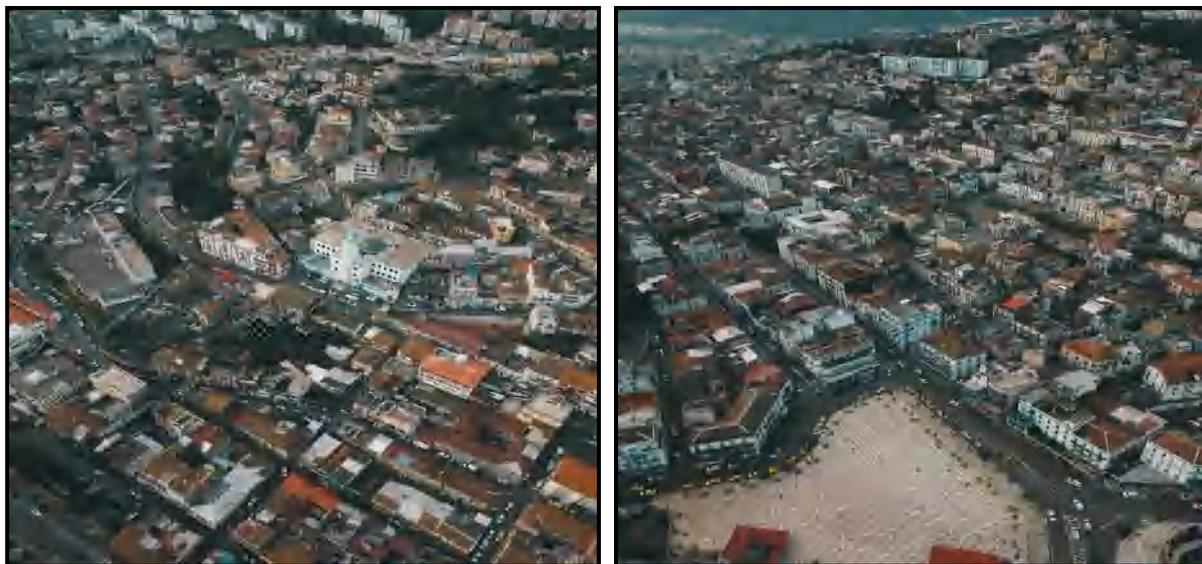


Figure 1.26 : Photographies aériennes (télé-détection) de centre historique de la ville.

D'après les deux études réalisées en 2012 CTC (2012) et en 2016 Groupement CTC et AQUIDOS (2016): premièrement une étude d'expertise du vieux bâti de la ville par l'Organisme National de Contrôle Technique de la Construction de l'Est de Skikda, deuxièmement une étude intégrée de réhabilitation du vieux bâti de la ville sur 127 immeubles de la Rue Didouche Mourad, révèle les diverses pathologies et dégradations existant sur les bâtis, il se résume comme suit : la présence des fissurations horizontales, verticales et obliques au niveau des murs porteurs et non porteurs comme les cloisons, dégradation des balcons, effondrement partiel des planchers, corrosion très avancée des poutrelles métalliques du plancher en voûtes, corrosion des poutres (solives) comme indiquée dans la figure 1.27 :



Figure 1.27 : Photos sur les différentes pathologies et dégradations à Skikda : a) Fissuration verticale dans la cloison, fissurations obliques au niveau des murs porteurs et fissuration verticale au niveau du mur porteur ; b) Corrosion de solive, corrosion en voûtes et corrosion des poutrelles métalliques ; c) Effondrement partiel des planchers (en bois, en béton armé et en voûtes) ; d) dégradation des balcons (CTC, 2012, Groupement CTC et AQUIDOS, 2016).

Ces dégradations sont dues aux vétustés des constructions et l'absence de l'entretien périodique. Selon ces rapports et sur la base de notre propre inspection pour évaluer l'état de conservation des bâtis, on compte 2229 constructions, ils indiquent que : 45% de l'ensemble de constructions sont en bon état (soit 998 constructions), 27% en moyen état (609), 26% en mauvais état (569) et 35% et 2% des constructions abandonnées (53) qui ne prennent donc pas en considération dans l'analyse de la vulnérabilité sismique. Au vu de la dégradation de la partie historique de la ville, elle a bénéficié des nombreuses études et opérations de réhabilitation pour sauvegarder le patrimoine architectural.

1.9.3 Les allées, la cité 20 Août 1955, cité Merdj Eddib, cité Frères Saker, cité 500 et 700 logements

La zone est située au sud du vieux centre-ville. Il s'agit d'une première extension de la ville après l'indépendance, avec un changement radical du tissu urbain hérité de l'époque coloniale. La plupart des constructions ont été construites entre les années 1962 et 1981, avant l'établissement du premier règlement parasismique algérien de 1981 (RPA 81, 1981) sauf la cité Frères Saker qui a été construite avant 1962 correspondant aux premiers grands ensembles d'habitat à loyer moyen (HLM). Ces cités se caractérisent par des bâtiments d'habitats collectifs construits en panneaux préfabriqués en béton armé qui ont été réalisées par les sociétés algériennes « SONATIBA » entre les années 1970 et 1980 et la majorité des bâtiments est de quatre étages (R+4), composés de dix logements dont neuf logements sont identiques constitués de 3 pièces (F3) et un seul au rez-de-chaussée de 2 pièces (F2), et quelques bâtiments atteignent le plus souvent 8 étages (R+8) et des tours.



Figure 1.28 : Photos sur les typologies constructives en panneaux préfabriqués des bâtiments collectifs de la zone 3.

1.9.4 Le Boulevard Houari Boumédiène, cité Aissa Boukerma

Les bâtis du « Boulevard Houari Boumédiène » constitués des bâtis à destination mixte (habitats collectives, commerce et administration) de hauteur variante de 8 à 25 mètres, construits entre 1981 et 2003 et on trouve dans la même zone un pôle administratif, construit après 2003 et des établissements scolaires, hospitaliers et quelques maisons individuelles. En général, ces constructions se caractérisent par du système portique (poteau-poutre) en béton armé. Dans la cité Aissa Boukerma, on trouve des bâtiments d'habitats collectifs construits dans les années 1980 en charpente métallique de hauteur (R+4).



Figure 1.29 : Photo des équipements publics (administratif, sanitaires) et des bâtiments collectifs en béton armée et en charpente métallique.

1.9.5 Les îlots : Briquèterie, Msîouene, Zef Zaf et Bouabaz

Les bâtis de ces îlots ont été construits obligatoirement dans les sites accidentés avec des pentes relativement élevées (10% à $\geq 30\%$), en raison du manque de l'espace disponible pour construire dans les sites plats, ce qui a conduit à des glissements de terrain dangereux menaçant un risque sur les bâtis (Voir figure 1.30).



Figure 1.30 : Photos sur les deux points de glissement sur le site de Msîouene près des logements.

La carte des risques du glissement de la ville de Skikda, a été réalisée par le bureau d'étude française TERRASOL (2007) qui classe les risques en 4 niveaux :

- Risque 0 : pas de risques liés aux instabilités gravitaires, il n'y a pas de contrainte liée à cet aléa sauf si l'objet des travaux est la création d'un relief.

- Risque I : zone de risques potentiels, montrant localement un facteur défavorable : les contraintes d'aménagement sont limitées et font appel à des mesures de précautions systématiques.
- Risque II : zone de risques significatifs, comportant plusieurs facteurs défavorables : le risque doit être pris en compte dès son apparition pour obtenir des adaptations spécifiques aux sites pour l'aménagement de la zone.
- Risque III : zone de risques forts, avec cumul de facteurs défavorables ou un facteur défavorable particulièrement fort : les contraintes d'aménagement sont fortes, le traitement des sites fera appel à des études et travaux spécifiques préalables aux aménagements.

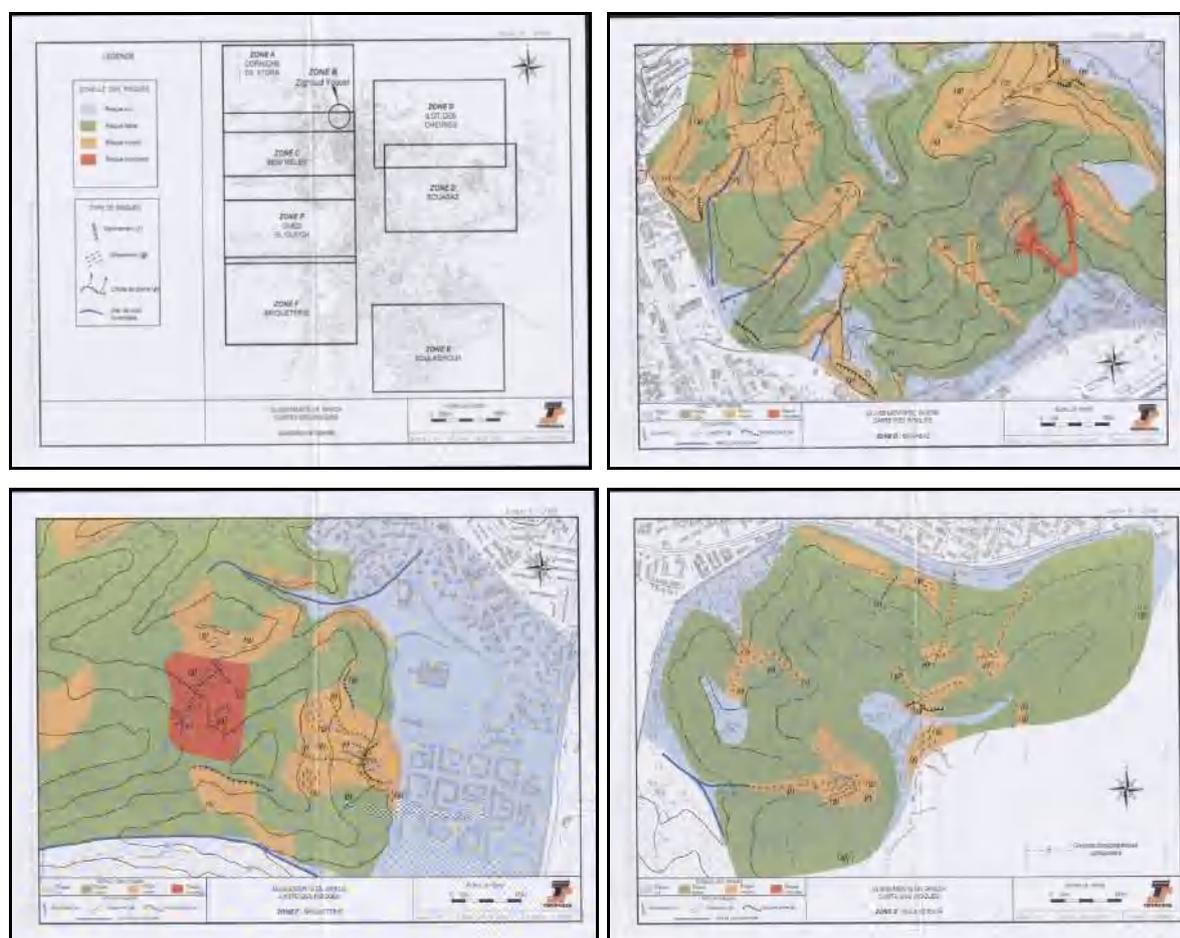


Figure 1.31 : Carte des risques du glissement de la ville de Skikda (TERRASOL, 2007).

Les cartes de la figure 1.31 montrent que les bâtis de ces îlots sont implantés dans des zones de risques moyens à importants. Dans ces sites, plusieurs études sur le glissement du terrain ont été réalisées touchant particulièrement les constructions où se trouve dans un talus instable et/ou ne garantit pas sa stabilité dans le cas d'un séisme.

La majorité des bâtis ont été construits selon les normes parasismiques algériennes (RPA 03, 2003) avec un système mixte en béton armé avec des fondations en semelle surfacique (radier) et des hauteurs moyennes. Les constructions de ces îlots ont été confiées aux sociétés chinoises qui ont été chargées des projets : 3900 logements publics locatifs (LPL) à Zef Zaf, 3750 LPL à Msîouene, 1400 LPL à Bouabaz, 600 Logements sociaux participatifs (LSP) à Msîouene et 520 LSP à Briquèterie (Voir figure 1.32).



Figure 1.32 : Photo des façades principales des bâtiments collectifs des différents sites (Briquèterie, Zef Zaf, Msîouene et Bouabaz).

1.10 Conclusion

Ce chapitre est la partie la plus importante et la plus longue de ce travail, car il comprend la partie de l'inventaire des bâtiments contenant tous les informations nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle.

Dans ce chapitre, on a présenté l'aléa sismique de la ville de Skikda appuyant sur les études de nombreux chercheurs et/ou centres de recherches nationaux (CGS, CRAAG).

D'après la compilation des données sur l'historique sismique de l'Algérie, on a constaté que la ville n'a pas connu des séismes historiques destructeurs et des tectoniques actives sauf que la faille d'El kentour près de la ville qui a produit dernièrement des événements sismiques faibles et moyens comme le séisme du 05 mars 2017, ($M_S = 4,6$) et le séisme du 22 novembre 2020 ($M_S = 5,2$).

Pour ce travail, pour faciliter et accélérer les travaux sur la base de donnée, nous avons utilisé l'outil SIG. Ce dernier, nous a permis de stocker les caractéristiques des bâtiments de la ville de Skikda et les informations d'enquête. Cette technique permette aussi de présenter des résultats spatiaux en forme de cartes pour soutenir les stratégies d'atténuation et la gestion des risques sismiques.

Chapitre 2 :

Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle

2.1 Introduction

Le séisme est l'une des catastrophes naturelles le plus dévastateur et mortel dans le monde entier du fait de son caractère soudain et inattendu, il cause de dégâts importants sur l'environnement urbain, même modéré, car la majeure partie du parc bâti est construite avant l'introduction des normes parasismiques.

Depuis plusieurs années, de nombreuses méthodes d'analyse de la vulnérabilité sismique à grande échelle (à l'échelle urbaine) ont été développées à travers le monde, notamment dans les pays de forte sismicité qui ont souffert des dégâts sismiques importants et ont avancé dans le domaine de la gestion et de la réduction du risque sismique.

Afin de connaître la performance de ces constructions face à un évènement sismique, de déterminer la probabilité d'un niveau de dommages attendus à un type de construction en raison des scénarios sismiques (différents niveaux d'agression sismique), d'identifier de façon préventive les zones urbaines où les typologies sensibles à l'évènement sismique (les plus vulnérables) et de connaître les constructions nécessitant un renforcement, réhabilitation ou éventuellement démolition avec un coût minimal.

Le choix de la méthode d'analyse de l'évaluation de la vulnérabilité sismique dépend des aspects suivants ; nature et objectif de l'étude visée, les données disponibles (qualité et quantité), caractéristiques du bâtiment ou groupe de bâtiments à étudier, méthode d'évaluation adaptée (qualitative ou quantitative) et ainsi que l'organisme qui bénéficiera des résultats de l'étude (par exemple, gouvernement, organisations scientifiques, entreprises, etc.) (Adolfo, 2011).

2.2 Choix d'une méthode de vulnérabilité et les niveaux d'analyse de la vulnérabilité sismique

La définition et la nature des critères de classification analysées (qualitatifs et quantitatifs) s'accordent sur la conformité entre la méthode de vulnérabilité choisie et l'échelle

d'espace considérée pour l'analyse (par exemple, niveau urbain ou niveau du bâtiment, etc.). En particulier, les différentes approches sont décrites suivant l'ordre croissant d'effort de calcul depuis de la vulnérabilité observée jusqu'à une analyse détaillée par l'augmentation des moyens de mettre en œuvre, comme illustré au tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique et leurs échelles d'applicabilité (Combescure et al. 2005).

	augmentation des moyens mis en œuvre				
Echelle d'analyse	Plusieurs centaines de bâtiments		Quelques bâtiments		Bâtiments individuels
Méthodes	Observations post-sismiques	Indice de vulnérabilité	Avis d'experts	Calcul analytiques simples	Analyse numérique - modélisation
Applicabilité	Ville - Commune - Quartier - Parcs immobiliers - Bâtiments Stratégiques				
Moyens humains	Sans formation - Étudiants-Techniciens- Ingénieurs - Ingénieurs confirmés				

Quatre niveaux d'analyse qui sont directement liés à la précision, à la pertinence des données collectées, au volume de bâtiments à traiter (les échelles d'analyse), au moyen d'investissements engagés :

Niveau 0 (Approche des analyses très globales) : à ce niveau des échelles d'analyse est basé sur des répartitions statistiques des dommages selon des échelles d'intensité (échelles MSK, EMS-98, MMI, etc.) et selon des différentes typologies de constructions. Elles utilisent des matrices de probabilité de dommages qui sont la façon de représenter les relations probabilistes entre le niveau de dommages et l'intensité d'un séisme (Whitman, 1974 ; Grünthal et al. 2001). Les matrices de probabilité de dommage sont basées sur les dommages observés et recensés suite à des séismes précédents ainsi que sur des jugements d'experts. En effet, les résultats ne sont valables que pour la zone évaluée ou pour les autres zones dont la typologie des constructions est similaire et de même niveau de risque sismique (la fiabilité des résultats est évidemment très faible), car ils sont basés sur une simple enquête sur le terrain rapide et moins coûteuse (Combescure et al. 2005).

Niveau 1 (Approche des analyses globales) : où les bâtiments ne sont pas analysés individuellement, mais de façon statistique. L'estimation de la vulnérabilité sismique est basée sur les classes des typologies constructives prédéfinies et sur les caractéristiques constructives, structurelles et architecturales (nombre d'étages, technique de construction, régularité structurelle) qui sont identifiées à partir des données collectées par l'inspection

visuelle des bâtiments. Dans cette approche, à chacun de ces paramètres, est attribué un score (plusieurs indices partiels) qui modifie l'indice de vulnérabilité attribué à la typologie. Cette approche établit une corrélation entre le dommage moyen et le niveau de la sollicitation sismique pour connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné. D'autres évaluations représentent l'endommagement par une probabilité de dépassement d'un certain niveau de dommage (par exemple, 60% d'endommagement), intégrant directement la typologie de la construction et le niveau de la sollicitation sismique. La sollicitation s'exprime en fonction de l'intensité ou parfois en fonction d'un niveau d'accélération maximale du sol (PGA) (Combescure et al. 2005).

Niveau 2 et 3 (Approche des analyses précises) : en raison de quantité des données disponibles, comme les caractéristiques mécaniques des matériaux, les plans de la construction, l'étude micro-zonage de site, etc., qui sont suffisantes pour analysés les bâtiments individuellement. Généralement basé sur deux niveaux :

Les approches de second niveau sont basées sur des modèles mécaniques, mais les calculs restent simplifiés. L'estimation de la capacité du bâtiment est évaluée dans le domaine linéaire, et la vérification est effectuée par rapport à la capacité du système de contreventement, en termes d'efforts tranchants à la base.

Le troisième et dernier niveau exige de l'utilisation de techniques de modélisation numérique qui nécessitent une étude complète et rigoureuse des bâtiments individuels. L'analyse de la structure s'effectue dans le domaine non linéaire, elle est basée sur la capacité de dissipation d'énergie de la structure (méthode du spectre de capacité) (Ait-Meziane 2007 ; Combescure et al. 2005).

Une autre classification intéressante proposée par Dolce (1994), qui classe les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité en quatre catégories principales en fonction des informations disponibles : empirique, analytique, expérimentale et hybride.

Méthodes empiriques : sont considérées comme méthodes qualitatives, basées sur l'expérience acquise par les dommages observés sur différents types de bâtiments dus aux séismes passés. Ces méthodes sont utilisées lorsque les informations disponibles sont limitées et pour effectuer rapidement une évaluation préliminaire d'un bâtiment ou d'un grand groupe de bâtiments à l'échelle territoriale. Ces évaluations qualitatives sont couramment développées in situ au moyen d'inspections visuelles. Les résultats donnent un degré de vulnérabilité sismique pour chaque bâtiment allant de faible à élevé. Les méthodes empiriques

les plus utilisées sont incluses par la classe de vulnérabilité (matrice de probabilité de dommages), l'indice de vulnérabilité et courbes de vulnérabilité (Novelli, 2017).

Méthodes analytiques : l'évaluation des dommages sismiques par ces méthodes peut également être appelée une approche purement théorique, contrairement à l'approche empirique, elle n'est pas basée sur l'observation post-sismique, mais plutôt basée sur les simulations théoriques classiques de l'élasticité, de la plasticité et plus récemment dans les théories de la fissuration et des dommages structuraux sous un séisme. La vulnérabilité du bâtiment est exprimée en termes de courbe de capacité qui représente le comportement non linéaire de la structure sous déplacement latéral (Lang, 2012).

Méthodes expérimentales : Ces méthodes consistent à mettre en œuvre des tests dans le but de déterminer les caractéristiques mécaniques et dynamiques d'une certaine structure existante. Généralement, les propriétés mécaniques d'une structure sont évaluées en laboratoire et in situ, alors que les investigations dynamiques sont principalement développées in situ. Les tests mécaniques visent à déterminer les caractéristiques des matériaux constructifs du bâtiment (résistance, densité, module d'Young, coefficient de Poisson, etc.) En revanche, l'objectif principal des investigations dynamiques est d'obtenir les fréquences naturelles et les modes de vibration de la structure au moyen d'un équipement spécial (par exemple des accéléromètres) (Adolfo, 2011).

Les méthodes hybrides : ces méthodes sont basées sur une combinaison de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments (empiriques, analytiques et expérimentales). Par exemple, après avoir évalué la vulnérabilité sismique d'un groupe de bâtiments par les méthodes empiriques, une liste organisée par niveau de vulnérabilité (faible, moyen et élevé) pourrait être générée, en choisissant les plus vulnérables et les plus importants à analyser par des méthodes plus raffinées comme l'analytique et l'expérimental. On obtient ainsi des résultats plus fiables sur la vulnérabilité sismique des bâtiments (Athmani, 2015).

2.3 La description de certaines des méthodes fréquemment utilisées

Dans ce chapitre, on essaie de présenter brièvement les méthodes de l'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle pour les constructions existantes, leur développement au cours du temps, leur limite d'application (spécifique à une ville donnée ou applicable à d'autres villes dans le monde) et leur type de paramètres utilisés pour représenter l'agression

sismique (l'intensité macrosismique, l'accélération maximale du sol (PGA) et plus récente les spectres de réponse obtenues à partir des mouvements du sol), afin de mettre en évidence la plus adaptée au contexte de la ville de Skikda..

2.3.1 La méthodologie RADIUS (Niveau 0)

La méthodologie RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disaster) a été lancée en 1996 par Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (IDNDR), sous la tutelle des Nations Unies, elle est soutenue techniquement et financièrement par le gouvernement du Japon, avec l'aide de Geo-Hazard International (GHI) aux États-Unis. RADIUS a été largement utilisé, en particulier dans les pays en développement, car il est disponible gratuitement et nécessite des ressources informatiques minimales (Okazaki ,2000).

L'objectif principal de RADIUS est de développer un outil de gestion du risque sismique, applicable partout, de comparer le risque sismique urbain à travers le monde et enfin promouvoir l'échange d'informations pour la réduction du risque au niveau d'une ville. Cet outil permettant d'estimer la vulnérabilité sismique en zone urbaine et de réaliser des scénarios sismiques avec la proposition de plans de gestion des risques appropriés, pour la préparation d'une stratégie de renforcement du bâti existant, qui est particulièrement utile pour les décideurs de l'urbanisation et de l'aménagement urbain (Okazaki ,2000).

Sur une liste initiale de 58 villes des pays en développement proposées, où la sismicité est considérée comme active dans ces villes et pour la réalisation de scénarios sismiques avec la proposition de plans de gestion des risques adéquate. Parmi ces villes, neuf villes ont été choisies, à savoir : Addis Abeba (Ethiopie), Antofagasta (Chili), Bandung (Indonésie), Guayaquil (Ecuador), Izmir (Turquie), Skopje (Macédoine), Tashkent (Ouzbékistan), Tijuana (Mexico) et Zigong (Chine) (OYO Corporation, 2000).

Cette méthodologie s'avère facile à utiliser. Elle permet de calculer la distribution d'intensité sismique, les dommages au bâtiment et donne une estimation approximative des dommages moyens du nombre total d'infrastructures routières (ponts, routes et tunnels) et de lignes de vie (systèmes d'eau et d'égouts, systèmes électriques et de télécommunications, stations-services) dans une zone d'étude donnée. Elle prédit également le nombre attendu de pertes humaines et leur répartition spatiale. Bien que les estimations des dommages fournies

par RADIUS soient assez approximatives, elles permettent néanmoins d'identifier et de sensibiliser à l'étendue des dommages dans une ville en cas de séisme majeur.

Cette méthodologie a été implémentée dans un système de traitement de données sous format Excel pouvant être facilement intégré dans un système d'informations géographiques (SIG), le représenter spatialement d'une manière simplifiée, la distribution des enjeux dans une ville, les types de sols et les estimations de dommages obtenues.

Les données de base sont, comme pour tous les modèles de ce type : les scénarios de séismes, les conditions locales du sol, l'inventaire des enjeux ainsi que les courbes d'endommagement (Chiroiu, 2004). Le schéma ci-dessous présente l'organisation générale du modèle :

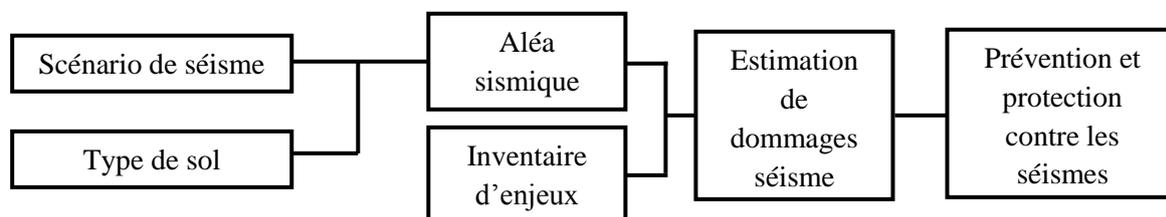


Figure 2.1: Schéma conceptuel du modèle RADIUS (Source RADIUS, 2002).

La méthodologie introduit une approche simplifiée afin de subdiviser la zone d'étude en unités de maillage à éléments carrés, dont l'espacement est défini par l'utilisateur. Des informations diverses sont pues contenir par chaque maillage, tel que des données relatives au sol, aux enjeux ou encore aux dommages. En fonction de l'importance de chaque élément de grille, un poids peut lui être accordé. Des zones homogènes d'étude peuvent également être définies.

Les types des sols sont attribués à chaque unité de maillage de la zone subdivisée, car les conditions locales peuvent être variables selon les différents sites de la ville. En fait, les conditions locales du site sont importantes dans le processus d'évaluation des dommages sismiques parce qu'elles affectent directement par l'amplification sismique.

Le modèle dispose quatre classifications de sol, à savoir "Rocher Dur", " Rocher Mou", Sol Moyen, et " Sol Mou". Cette classification est également adoptée par le code parasismique Algérienne (RPA99 version 2003) (Voir tableau 2.2) (Boukri et al. 2018). Un facteur d'amplification spécifique correspond à chaque type de sol, comme indiqué dans le tableau 2.2. Si l'utilisateur ne connaît pas exactement le type du sol, la valeur utilisée par

défaut est 1. La valeur de tous les facteurs d'amplification peut être personnalisée par les utilisateurs.

Tableau 2.2 : Classification des sols et leurs valeurs d'amplification (Boukri et al. 2018).

Catégorie	Description	Vs (m/s)	L'amplification des sols de surface adoptée par RADIUS
S1	Rocheux	≥ 800	0,55
S2	Ferme	[400 – 800[	0,70
S3	Meuble	[200 - 400[	1,00
S4	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle	[100-200[	1,30

La définition du scénario sismique peut être représentée par le choix d'un séisme majeur déjà survenu (le retour d'un séisme passé particulièrement destructeur), soit par la définition d'un séisme aléatoire, à travers des paramètres tels que la magnitude, la profondeur du foyer, l'épicentre et la loi d'atténuation à partir d'une faille active présente dans la région d'étude.

RADIUS utilise des courbes de fragilité qui fournissent des taux de dommage moyens de chaque classe du bâtiment, réalisée sur la base de l'échelle MMI (Modified Mercalli Intensity). En utilisant les formules empiriques (Equation 2.1) développées par Trifunac et Brady (1975) pour convertir l'accélération maximale au sol (PGA) à l'échelle d'intensité sismique MMI.

$$MMI = \frac{\log_{10}(PGA \times 980) - 0,014}{0,3} \quad (2.1)$$

L'estimation de (PGA) à partir de la magnitude, de la distance épacentrale et de la profondeur hypocentre du séisme connu, peut être calculée par l'une des équations de prédiction du mouvement du sol de Joyner et Boore (1981), Campbell (1981) ou Fukushima et Tanaka (1990) adopté dans RADIUS (Boukri et al. 2018), comme le montrent dans le tableau 2.3 et la figure 2.2.

Tableau 2.3 : Equations de prédiction du mouvement du sol utilisé par RADIUS (Boukri et al. 2018).

Equations de prédiction du mouvement du sol	Référence
$PGA = 10^{0,249 \times M - \log(D) - 0,00255 \times D - 1,02}$, $D = (E^2 + 7,3^2)^{0,5}$	Joyner & Boore (1981)
$PGA = 0,0185 \times e^{(1,28 \times M)} \times D^{-1,75}$, $D = E + 0,147 \times e^{(0,732 \times M)}$	Campbell (1981)
$PGA = \left(10^{(0,41 \times M - \log_{10}(R + 0,032 \times 10^{(0,41 \times M)})) - 0,0034 \times R + 1,30} \right) / 980$	Fukushima & Tanaka (1990)

PGA : Accélération maximale au sol (g) ; M : magnitude ; E : distance épiscoptrale (km) ; R : distance hypocentrale (Km) ; D : Profondeur (Km)

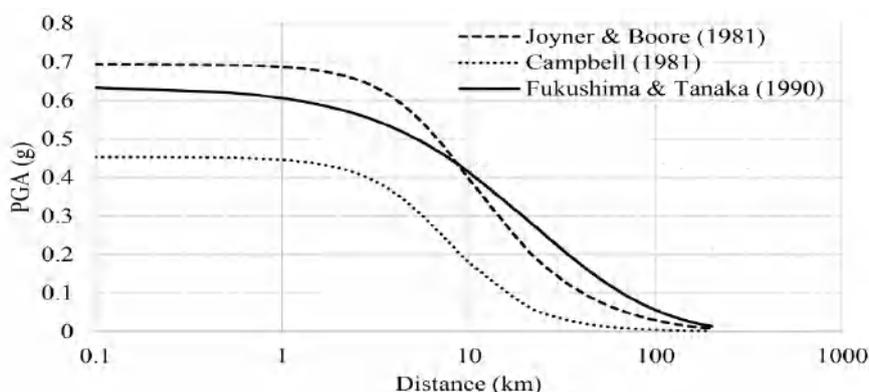


Figure 2.2 : Courbes de prédiction du mouvement du sol utilisées dans l'outil RADIUS (Mazumder et Salman, 2019).

La méthodologie a établi dix (10) classes de bâtiments les plus représentatifs dans divers pays (Amérique latine) et dans d'autres régions similaires dans le monde. Cette classification a été basée sur les paramètres des matériaux de construction, des systèmes de construction, du code sismique appliqué, de l'âge, de l'utilisation et du nombre d'étages qui influencent étroitement sur les dommages observés des bâtiments lors des séismes passés.

Les classes de bâtiments sont définies dans le tableau 2.4, chaque classe du bâtiment est définie par une fonction de vulnérabilité (relation intensité – dommages) (Voir tableau 2.5 et figure 2.3), qui exprime la corrélation entre le paramètre caractéristique du séisme (intensité, accélération, etc.) et le taux de dommages défini comme le ratio entre le coût de réparation et le coût de reconstruction (remplacement). Ces fonctions (courbes) de vulnérabilités utilisées par la méthodologie RADIUS ont été établies de manière empirique sur la base de l'expérience des séismes passés (en utilisant, le retour d'expérience post-sismique). Les niveaux de dégâts pris en compte par l'outil RADIUS sont les dommages « complets »

(effondrement partiel ou total) et les dommages « étendus ou très importants », tandis que les dommages « légers » et « modérés » ne sont pas pris en compte.

Le tableau 2.6 illustre le format typique d'une telle matrice de dommages probables. Dans chaque cellule vide, on assigne le pourcentage de bâtiments subissant le degré de dommages pour l'intensité considérée. Le cumulatif des pourcentages attribués à chaque degré de dommages pour une intensité sismique donnée doivent être de 100 % (Aouane, 2019).

Tableau 2.4 : Classes de vulnérabilité de RADIUS adaptées aux bâtiments algériens (Boukri et al. 2018) et (Mazumder et Salman, 2019).

Code	Classe du bâtiment	Description
RES1	Résidentiel 1	Constructions provisoires : principalement bidonvilles et logements en rangée faits de briques non cuites, de mortier de boue, de murs et de toits mal fixés.
RES2	Résidentiel 2	Constructions en maçonnerie non renforcée - Construction en béton armé: construction de qualité inférieure, non conforme aux dispositions du code parasismique local (construit avant 1981 selon le code Algérienne) (hauteur jusqu'à 3 étages).
RES3	Résidentiel 3	Constructions en maçonnerie non renforcée - Construction composite en béton armé : construction ancienne et détériorée, non conforme aux dernières dispositions du code du bâtiment (construit avant 1981) (hauteur de 4 à 6 étages).
RES4	Résidentiel 4	Constructions en béton armé construites selon différentes versions du code du parasismique algérien (Post 1981): bâtiments nouvellement construits à plusieurs étages à des fins résidentielles et commerciales.
EDU1	Education 1	Bâtiments scolaires et administratifs, jusqu'à 2 étages.
EDU2	Education 2	Bâtiments scolaires et administratifs, de plus de 2 étages.
MED1	Médical 1	Bâtiments à usage hospitalier, jusqu'à 3 étages (de faible à moyenne hauteur).
MED2	Médical 2	Bâtiments à usage hospitalier, de plus de 3 étages (de grande hauteur).
COM	Commerciale	Centres commerciaux
IND	Industrielle	Installations industrielles, à risque faible et élevé

Tableau 2.5 : Données des courbes de vulnérabilité pour les différentes classes de bâtiments (Boukri et al. 2018).

MMI	RES1	RES2	RES3	RES4	EDU1	EDU2	MED1	MED2	COM	IND
4	1,0	0,3	1,0	0,0	0,3	1,0	1,0	1,0	0,3	1,0
5	2,0	0,8	2,0	0,0	0,7	1,0	2,0	2,0	0,8	2,0
6	4,0	2,1	4,0	1,0	2,0	2,5	4,0	4,0	2,2	7,5
7	15,0	5,0	10,0	2,5	5,0	10,0	8,0	10,0	5,0	20,0
8	35,0	25,0	35,0	10,0	15,0	25,0	20,0	25,0	20,0	25,0
9	60,0	40,0	60,0	17,5	35,0	45,0	30,0	45,0	35,0	35,0
10	81,7	58,3	85,0	25,0	48,3	61,7	41,3	61,7	50,0	41,7
11	90,8	75,8	92,5	32,5	63,3	79,2	52,3	79,2	65,0	49,2
12	100,0	93,3	100,0	40,0	78,3	96,7	63,3	96,7	80,0	56,7

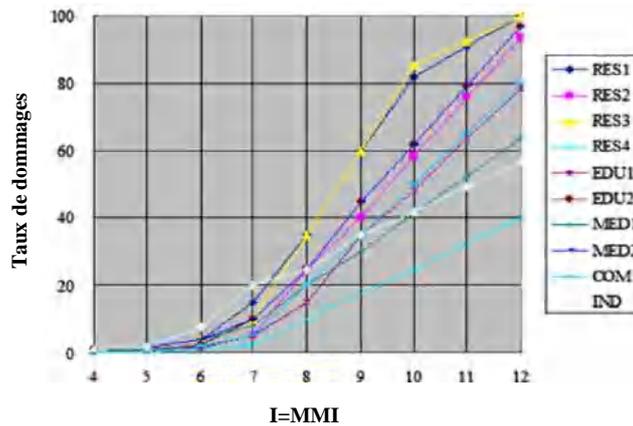


Figure 2.3 : Courbes de vulnérabilité pour les différentes classes de bâtiments (Boukri et al. 2018).

Tableau 2.6 : Matrice de probabilité de dommage (d'après Whitman, 1974).

Etat de dommage	Dommage structurel	Dommage non-structurel	Taux de dommage (%)	Intensité du séisme				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Aucun	Aucun	0-0,05	-	-	-	-	-
1	Aucun	Mineurs	0,05-0,3	-	-	-	-	-
2	Aucun	Localisés	0,3-1,25	-	-	-	-	-
3	Non observables	étendus	1,25-3,5	-	-	-	-	-
4	Mineurs	Substantiels	3,5-4,5	-	-	-	-	-
5	Substantiels	Majeurs	7,5-20	-	-	-	-	-
6	Majeurs	Presque totaux	20-65	-	-	-	-	-
7	Bâtiment condamné		100	-	-	-	-	-
8	Effondrement		100	-	-	-	-	-

Concernant l'estimation des pertes humaines (nombre des victimes) qui viennent compléter cette méthodologie, où le nombre des victimes est dérivé du nombre de bâtiments endommagés, du nombre de personnes supposées être présentes à l'intérieur de ces bâtiments, ce nombre dépendant à la fois de la classe de bâtiment et de la période (nuit ou jour) à laquelle le séisme se produit, comme indiqué dans le tableau 2.7. Par exemple, la population de jour est moins importante que la population de nuit dans les immeubles résidentiels. Alternativement, le nombre de personnes dans les écoles, les administrations ou les usines, par exemple, est plus élevé pendant la journée (et les jours ouvrables).

Tableau 2.7 : Ratio de population (jour ou nuit) pour chaque classe du bâtiment (Boukri et al. 2018).

Temps	Classe du bâtiment									
	RES1	RES2	RES3	RES4	EDU1	EDU2	MED1	MED2	COM	IND
Nuit (18 h à 6 h)	1,0	1,0	4,0	10,0	0,2	0,2	2,0	4,0	0,2	0,2
Jour (6 h à 18 h)	0,5	0,5	2,0	5,0	10,0	25,0	6,0	12,0	4,0	4,0

2.3.2 L'échelle Macrosismique Européenne EMS-98 (Niveau 0)

Créée en 1992 sous la recommandation de la XXIII^e Assemblée générale de la Commission sismologique européenne et révisée en 1998, elle remplace l'échelle d'intensité existante MSK (Medvedev Sponheuer -Karnik) depuis les années 2000, est considérée comme un standard en Europe pour les études d'évaluation du risque ou de la vulnérabilité sismique.

Au début, utilisé pour, mesurer l'intensité d'un séisme à partir des dommages observés sur les bâtiments et les effets des secousses sur les êtres humains et l'environnement, comporte douze degrés d'intensité de I (non ressenti) à XII (complètement dévastateur) (décrites en Annexe A).

L'EMS-98 (Grünthal et al. 2001) est la première échelle parmi les échelles existantes (MSK, MMI, ...etc.) qui contient une définition claire des notions de typologies, la conception parasismique des structures et de la distribution des dommages corrélée à chaque degré d'intensité, car les anciennes échelles d'intensité ont fait une référence très générique à la distribution des dommages pour les différentes intensités du séisme, sans distinction de typologie de construction (presque toute la zone bâtie était en maçonnerie).

L'EMS-98 comporte quinze (15) types de structures, dont sept en maçonnerie, six en béton armé et un en bois et en acier, qui sont classés en six (06) classes de vulnérabilité, désignées par ordre alphabétique de A (vulnérabilité la plus élevée) à F (vulnérabilité la plus faible), qui sont un moyen de regrouper des bâtiments à une même typologie constructive, caractérisés par un comportement sismique similaire. Le type de structure dépend principalement du matériau de construction, le niveau de conception parasismique et d'autres facteurs qui peuvent affecter les performances sismiques des bâtiments, comme exemple un bâtiment en maçonnerie est plus vulnérable qu'un bâtiment en béton armé, un portique en béton armé plus vulnérable qu'un bâtiment à murs porteurs en béton armé, etc. Le tableau 2.8 montre la différenciation des structures en classes de vulnérabilité.

Tableau 2.8 : Différenciation de typologies de structure EMS-98 et la classification en classes de vulnérabilité associées (Grünthal et al. 2001).

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

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

Comme indiqué dans le tableau 2.8 pour chaque type de structure est attribuée une classe de vulnérabilité la plus probable (cercle) et la plage de vulnérabilité probable (ligne plein) et une plage moins probable (ligne discontinue), introduisant ici la notion d'incertitude relative à d'autres facteurs comme l'état d'entretien, la qualité de la construction, l'irrégularité de la forme du bâtiment, etc. L'attribution de la classe la plus probable, est généralement faite à partir d'opinion d'experts qui est issue directement des retours d'expériences des séismes passés.

L'EMS-98 est une méthode probabiliste au sens où elle prédit un pourcentage de bâtiments d'une certaine classe dans un niveau de dommage pour une intensité donnée.

Dans l'EMS-98, cinq degrés de dommages sont considérés : Degré 1 : négligeables à légers, Degré 2 : modérés, Degré 3 : sensibles à importants, Degré 4 : très importants et Degré 5 : destruction. La description des dégâts aux bâtiments est reproduite dans l'annexe A, pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé.

Pour chacune des classes de vulnérabilité, les dommages (D1 à D5) sont exprimés en fonction des niveaux d'intensité (V à XII) en termes de matrice de probabilité de dommages (Voir tableau 2.9). La distribution des niveaux de dommages affectant une classe de bâtiments est connue avec l'incertitude relative aux termes « Peu », « Beaucoup » et « La plupart », traduit en valeurs numériques 5 %, 35 % et 80 %, respectivement selon (Lagomarsino et Giovinazzi 2006 ; Bernardini et al. 2010). Les intervalles aux bornes « floues » de la figure 2.4 explicitent de manière quantitative cette incertitude.

Tableau 2.9 : Distribution de dommages pour différentes intensités et classes de vulnérabilité d'après EMS-98 (Qlq : quelque, Bcp : beaucoup, Plp : la plupart) (Grünthal et al. 2001).

Classe A					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V	Qlq				
VI	Bcp	Qlq			
VII			Bcp	Qlq	
VIII				Bcp	Qlq
IX					Bcp
X					Plp
XI					
XII					

Classe B					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V	Qlq				
VI	Bcp	Qlq			
VII		Bcp	Qlq		
VIII			Bcp	Qlq	
IX				Bcp	Qlq
X					Bcp
XI					Plp
XII					

Classe C					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V					
VI	Qlq				
VII		Qlq			
VIII		Bcp	Qlq		
IX			Bcp	Qlq	
X				Bcp	Qlq
XI					Bcp
XII					Plp

Classe D					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V					
VI					
VII	Qlq				
VIII		Qlq			
IX		Bcp	Qlq		
X			Bcp	Qlq	
XI				Bcp	Qlq
XII					Plp

Classe E					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V					
VI					
VII					
VIII					
IX		Qlq			
X		Bcp	Qel		
XI			Bcp	Qel	
XII					

Classe F					
I	D1	D2	D3	D4	D5
V					
VI					
VII					
VIII					
IX					
X		Qlq			
XI		Bcp	Qel		
XII					

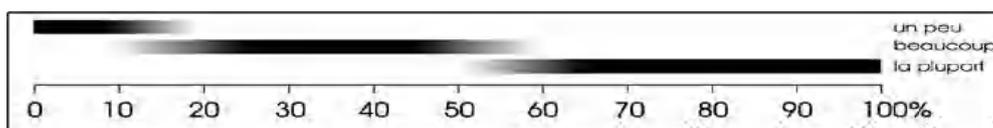


Figure 2.4 : Définition selon l'EMS-98 des notions de quelques, beaucoup et la plupart en pourcentage (Grünthal et al. 2001).

2.3.3 La méthode FEMA 154 (Niveau 1)

En 1988, la méthodologie américaine a été publiée au début en deux volumes FEMA 154 (ATC, 2002) et FEMA 155 (ATC, 1988), elle a été actualisée pour la dernière fois en 2002 (BSSC,2002a ,2000b). Le rapport FEMA 154 décrit la procédure rapide d'évaluation sismique visuelle (RVS) pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment.

RVS utilise un processus basé sur un « enquête sur site » des bâtiments : effectuer une inspection visuelle externe du bâtiment, compléter par un diagnostic interne du bâtiment quand l'accès est possible et consulter les plans du bâtiment, s'ils sont disponibles, pour identifier les systèmes de résistance latérale structurelle primaire et le type des matériaux de structure.

La procédure RVS attribue un score de risque structurel de base (BSH : Basic Structural Hazard) à un bâtiment selon la typologie de 15 types de bâtiments courants aux Etats-Unis définis au tableau 2.10 et selon la sismicité de la région du lieu de localisation du bâtiment, définie par l'accélération maximale au sol (Voir tableau 2.11).

Tableau 2.10 : Classification typologique et scores de risques structuraux de base du FEMA 154 (ATC, 2002).

Type de structure	Description	Sismicité		
		Faible Sismicité	Moyenne Sismicité	Sismicité Élevée
Structure en bois	W1: Ossature bois légère, habitation ou commerce (surface < 5000 pi ²) (465 m ²)	7,4	5,2	4,4
	W2: Ossature bois (> 5000 pi ²)	6	4,8	3,8
Ossature en acier	S1: Ossatures métalliques en portique	4,6	3,6	2,8
	S2: Ossatures métalliques avec triangulation	4,8	3,6	3,0
	S3: Ossatures légères en acier	4,6	3,8	3,2
	S4: Ossatures métalliques avec murs en béton armé coulés en place	4,8	3,6	2,8
	S5: Ossatures métalliques avec remplissage maçonnerie non armée	5,0	3,6	2,0
Béton	C1 : Portiques en béton armé	4,4	3,0	2,5
	C2 : Murs porteurs en béton armé	4,8	3,6	2,8
	C3 : Structures poteaux-poutres avec remplissage maçonnerie non armée	4,8	3,2	1,6
	PC1 : Construction de type "tilt-up" en béton armé	4,4	3,2	2,6
	PC2 : Structures préfabriquées en béton armé	4,6	3,2	2,4
Maçonnerie	RM1 : Maçonnerie armée avec diaphragmes flexibles (planchers et toiture)	4,8	3,6	2,8
	RM2 : Maçonnerie armée avec diaphragmes rigides	4,6	3,4	2,8
	URM : Murs porteurs en maçonnerie non armée	4,6	3,4	1,8

Tableau 2.11 : Sismicité définie dans le FEMA 154 (ATC, 2002).

Sismicité	PGA (T = 0,2 sec)	PGA (T = 1 sec)	MMI
Faible	<0,167g	<0,067g	VI
Moyenne	0,167g à 0,500g	0,067g à 0,200g	VII, VIII
Élevée	> 0,500g	> 0,200g	IX

Ce score de base varie de 1,6 pour les ossatures en béton armé avec remplissage en maçonnerie située en zone de sismicité élevée, à 7,4 pour les structures en bois de charpente en zone de faible sismicité.

Le score structural de base est ensuite modifié par l'addition ou la soustraction de facteurs de modification de la performance *SM* établis selon les déficiences observées pour les différentes classes du bâtiment, afin d'obtenir un score final *S*. Les caractéristiques structurales considérées par les facteurs de modification *SM* sont :

- La hauteur du bâtiment (moyenne ou élevée),
- Les irrégularités géométriques et structurales en plan et en élévation,
- L'année de conception qui présuppose l'application d'un certain code de construction (Pré-code, code renforcé), le niveau de code est exacerbant pour les constructions construites avant l'application des règles parasismiques (pré-code) ;
- Le type de sol (types (A) représentant la roche dure à (F) de faible portance ou très sensible) où les sols de faible portance (classes C, D et E selon la classification adoptée) exacerbent le facteur de classe du sol.

Ce score final *S* exprime la probabilité de ruine lors du séisme maximal prévu. C'est le négatif du logarithme en base 10 de la probabilité d'effondrement (Verrhiest, 2008).

$$S = -\log_{10}(\text{probabilité d'effondrement}) \quad (2.2)$$

Par exemple, un score final $S=2,0$ signifie que la probabilité d'effondrement d'un bâtiment pour un séisme égal ou dépassant le séisme maximum considéré (*MCE*, correspondant à 2% de probabilité de dépassement en 50 ans) est (10^{-2}) ou 0,01 (c'est-à-dire une probabilité d'effondrement est de 1%). Si les résultats mathématiques RVS sont interprétés littéralement, alors un bâtiment avec un score final $S=3,0$ a un facteur de dix fois moins de probabilité d'effondrement qu'un bâtiment avec un score final de 2,0. De même, un bâtiment avec un score final $S=1,0$ est 10 fois plus susceptible de s'effondrer qu'un bâtiment avec un score final $S= 2,0$. Pour référence, les probabilités calculées d'effondrement au *MCE*

correspondant aux scores finaux compris entre 4,0 et 0,0 sont présentées dans le tableau 2.12 (Wang et Goettel, 2007).

Tableau 2.12 : Probabilités d'effondrement calculées par rapport au score final, S (Wang et Goettel, 2007).

Score final, S	Probabilité d'effondrement
4,0	0,01%
3,5	0,03%
3,0	0,10%
2,5	0,32%
2,0	1,00%
1,5	3,16%
1,0	10%
0,5	32%
0,0	100%

Un score élevé du S correspondant à une meilleure performance sismique, c'est-à-dire plus le score est bas, plus la vulnérabilité du bâtiment est élevée (FEMA P-154, 2015). Généralement, en dessous du 2,0 la construction est considérée dangereuse et en dessus du 2,0 les constructions sont considérées sûres.

Sur la base des scores finaux S , différents chercheurs ont mis en corrélation avec les degrés de dommages selon l'Echelle Macrosismique Européenne EMS-98 pour classer les bâtiments en fonction de leur vulnérabilité. L'interprétation du degré de dommage (D_G) pour le S dépend de cinq (05) niveaux de dommage pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé, comme indiqué dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13 : Scores structurels avec les degrés de dommages correspondants (Nanda et Majhi, 2014).

Score final, S	Classe de dommage (D_G)
$S < 0,3$	Forte probabilité de dommages de degré 5; Très forte probabilité de dommages de degré 4
$0,3 < S < 0,7$	Forte probabilité de dommages de degré 4; Très forte probabilité de dommages de degré 3
$0,7 < S < 2,0$	Forte probabilité de dommages de degré 3; Très forte probabilité de dommages de degré 2
$2,0 < S < 2,5$	Forte probabilité de dommages de degré 2; Très forte probabilité de dommages de degré 1
$S > 2,5$	Probabilité de dommages de degré 1

Les typologies définies dans cette méthode sont donc constituées essentiellement de constructions en bois et en acier les plus représentatives en Amérique du Nord, dont certaines n'existent pas et est assez différentes de celle de l'Europe où la majorité des constructions en maçonnerie constituent des vieux centres villes historiques qui ne sont pas représentés.

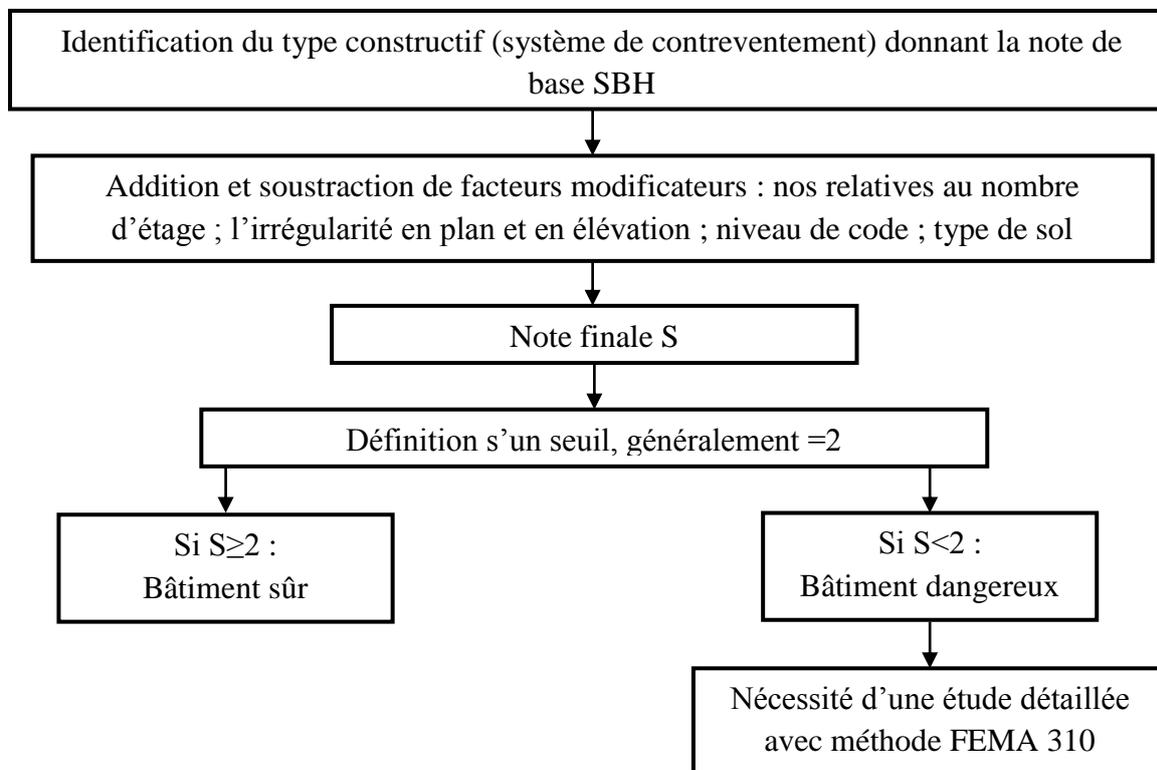


Figure 2.5 : Procédure de l'identification des bâtiments dangereux par la méthode FEMA 154 par un Diagnostic Visuel Rapide (RVS) (Senouci, 2012).

2.3.4 Méthode Risk-UE (Niveau 1)

La méthode Risk-UE a été développée dans le cadre d'un projet européen d'évaluation du risque sismique à sept grandes villes européennes : Barcelone (Espagne), Nice (France), Catania (Italie), Bucarest (Roumanie), Sofia (Bulgarie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine) (Mouroux et Lebrun 2006a ; 2006b ; Spence et Brun 2006). Cette méthode définit des types constructifs (typologie) est basée sur les classes de vulnérabilité du bâti et sur six (06) classes de niveaux de dommages selon l'Echelle Macrosismique Européenne EMS-98 (Grünthal et al. 2001).

Cette méthode comporte deux niveaux d'analyse, soit le premier niveau nommé LM1 est une méthode macrosismique, basée sur l'évaluation d'un indice de vulnérabilité "IV" variant entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable), et qui sera un indicateur de l'état de la

structure. Cette analyse est fondée sur les dommages observés qui ont été causés par des séismes passés (en utilisant, le retour d'expérience post-sismique européenne). (Présentée ici)

Le deuxième niveau nommé LM2 est une méthode analytique qui est basée sur des analyses analytiques de la structure à partir d'une modélisation dynamique ou d'une modélisation simplifiée de la capacité d'une structure à dissiper de l'énergie, généralement adaptée aux environnements urbains possédant des études détaillées de micro-sismicité exprimées en termes de quantités spectrales spécifiques au site, telles que l'accélération spectrale, les vitesses spectrales ou les déplacements spectraux. Ce niveau nécessitant des moyens et des compétences plus larges pour une analyse à grande échelle.

La méthode consiste à classer chaque bâtiment dans des typologies définies par les matériaux et/ou les systèmes structurels. Des indices de vulnérabilité de base sont attribués à chaque classe de typologie (Milutinovic et Trendafiloski 2003), appuyant sur l'Echelle Macrosismique Européenne 1998 (EMS-98) mais plus détaillé que celle-ci, qui a été établie vingt-trois (23) types de bâtiments, correspondant à une valeur moyenne IV^* de chaque typologie constructive, établi avec une fourchette des limites inférieure IV et supérieure IV^+ probables et à la valeur extrême minimale IV^{min} et maximale IV^{max} possibles de l'indice de vulnérabilité. Dans le cas où un bâtiment a une valeur de l'indice de vulnérabilité dépassée de 1,02 ; l'indice final IV sera ramené à la valeur IV^{max} . Les valeurs représentatives des indices de vulnérabilité (IV) et ses limites sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.14 : Typologie constructive selon l'échelle macroséismique européenne EMS-98 (indices de vulnérabilité dans le Risk-UE LM1) (Milutinovic et Trendafiloski, 2003).

Typologie	Description	Valeurs de IV représentatives				
		IV^{min}	IV	IV^*	IV^+	IV^{max}
M1.1	Moellons	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
M1.2	Pierres appareillées	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M1.3	Pierres de taille	0,30	0,49	0,616	0,79	0,86
M2	Adobe (Briques de terre cuite)	0,62	0,687	0,84	0,98	1,02
M3.1	Planchers bois	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M3.2	Voûtes en Maçonnerie	0,46	0,65	0,776	0,95	1,02
M3.3	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
M3.4	Planchers en béton armé	0,30	0,49	0,616	0,79	0,86
M4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0,14	0,33	0,451	0,63	0,70
M5	Maçonnerie globalement renforcée	0,3	0,49	0,694	0,95	1,02
RC1	Structures poteaux-poutres en béton armé	-0,02	0,047	0,442	0,80	1,02
RC2	Murs porteurs en béton armé	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC3.1	Murs de remplissage en maçonnerie,	-0,02	0,007	0,402	0,76	0,98
RC3.2	Structures poteaux-poutres irrégulières	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
RC4	Structures mixtes en béton armé	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC5	Murs préfabriqués en béton armé (tilt-up walls)	0,14	0,207	0,384	0,51	0,70
RC6	Structures préfabriquées en béton armé	0,30	0,367	0,544	0,67	0,86
S1	Ossatures métalliques en portique	-0,02	0,467	0,363	0,64	0,86
S2	Ossatures métalliques avec triangulation	-0,02	0,467	0,287	0,48	0,70
S3	Portiques + remplissage en maçonnerie non armée	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
S4	Portiques + murs en béton armé coulés en place	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
S5	Structure mixte béton-acier	-0,02	0,257	0,402	0,72	1,02
W	Structures en bois	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

Les facteurs modificatifs (aggravants) sont ensuite appliqués à IV^* , pour tenir compte de la hauteur, de l'état d'entretien, des irrégularités en plan et en élévation, de la position, etc. L'indice de vulnérabilité finale (Milutinovic et Trendafiloski 2003), indépendant de l'aléa, est la somme de IV^* et des valeurs pondérées des facteurs de modification qui est donné par la formule suivante :

$$IV = IV^* + \Delta V_m + \Delta V_R \quad (2.3)$$

Où les variables sont définies par :

IV^* : indice de typologique,

ΔV_m : Facteurs modificatifs représentant l'influence de paramètres autres que la typologie sur le comportement et la réponse du bâti aux sollicitations sismiques. Ces facteurs modificatifs de vulnérabilité sont présentés dans le tableau 2.15.

Le facteur ΔV_m est calculé comme la somme de facteurs de vulnérabilité V_m correspondant aux différents paramètres identifiés.

$$\Delta V_m = \sum V_m \quad (2.4)$$

La méthode Risk-UE niveau 1, comme présenté dans le (work package 4, 2011) donne des valeurs de ΔV_m (facteurs aggravants) seulement pour les structures en maçonnerie (M), et celle en béton armé (RC). Les structures métalliques (S) et en bois (W) ne sont pas traitées.

Tableau 2.15 : Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé (Milutinovic et Trendafiloski, 2003).

Facteurs de vulnérabilité	bâtiments en maçonnerie		bâtiments en béton armé			
	Paramètres	Valeurs de V_m	Paramètres	Niveau de la réglementation		
			Pas de code	Niveau moyen	Niveau haut	
Niveau de code	Néant		Niveau de code	+0,16	0	-0,16
État d'entretien	Bon	-0,04	Bon	Néant		
	mauvais	+0,04	mauvais	+0,04	+0,02	0
Nombre d'étages	Peu élevée (1 ou 2)	-0,02	Peu élevée (1 ou 2)	-0,04	-0,04	-0,04
	Moyennement élevée (3, 4 ou 5)	+0,02	Moyennement élevée (3, 4 ou 5)	0	0	0
	Élevée (6 étages ou plus)	+0,06	Élevée (6 étages ou plus)	+0,08	+0,06	+0,04
Etage souple	Transparence, démolition	+0,04	Néant			
Irrégularité en plan		+0,04	Forme	+0,04	+0,02	0
			Torsion	+0,02	+0,01	0
Irrégularité en élévation		-0,02		+0,04	+0,02	0
	Néant		Poteaux courts	+0,02	+0,01	0
			Fenêtre arquée (bow windows)	+0,04	+0,02	0
Interventions de confortement		-0,08 +0,08				
Eléments asismiques	Barbacanes, contreforts, arcs	Pas d'indication	Néant			
Interaction entre bâtiments : position dans l'îlot	Au centre	-0,04	Joint parasismique insuffisant	+0,04	0	0
	En coin	+0,04				
	En tête d'îlot	+0,06				
Interaction entre bâtiments élévation	Planchers décalés	+0,02	Néant			
	Bâtiments de hauteurs différentes	-0,04 +0,04				
Fondations	Fondations à des niveaux différents	+0,04	Semelles filantes	-0,04	0	0
			Semelles filantes avec longrines	0	0	0
			Semelles isolées	+0,04	0	0
Morphologie du sol	Pente	+0,02	Pente	+0,02	+0,02	+0,02
	Escarpement	+0,04	Escarpement	+0,04	+0,04	+0,04

ΔV_R : facteur de vulnérabilité régionale, peut-être introduit pour prendre en considération le caractère particulier de certains types de bâtiments à l'échelle régionale (facteur rarement retenu (considéré égal à 0)).

À partir d'indice de vulnérabilité évalué précédemment, le degré de dommage moyen μ_d est introduit pour caractériser les dommages prévisibles pour les bâtiments de même indice de vulnérabilité soumis à une intensité donnée (l'effet de l'aléa sismique) par l'équation suivante :

$$\mu_d = 2,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6,25IV - 13,1}{Q} \right) \right] \quad (2.5)$$

Où I représente l'effet de l'aléa sismique décrit en termes de l'intensité selon EMS-98 ;

Q : un indice de ductilité, qui est évaluée en tenant compte de la typologie du bâtiment et de ses caractéristiques géométriques et matérielles (Lagomarsino et Giovinazzi 2006). Pour les bâtiments résidentiels, il prend une valeur de 2.3 (Lantada et al. 2010)

μ_d Varie de 0 (aucun dommage) à 5 (dommages graves ou destruction) suivant l'échelle de dommages de six (06) niveaux D_k donnés par l'EMS-98. Une équivalence entre la valeur de la variable d'endommagement moyen μ_d et les degrés de dommage de l'échelle EMS-98 est donnée par le tableau 2.16.

Tableau 2.16 : Equivalence entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS-98 (Guettiche, 2017).

États de dommages	Niveau de dommage	Domage moyen	Description du dommage
Aucune	D0, D1	0-0,5	Pas de dommages à légers (Aucuns dégâts structuraux Dégâts non structuraux légers)
Légère	D2	0,5-1,5	Dommages moyens (Dégâts structuraux légers Dégâts non structuraux modères)
Modéré	D3	1,5-2,5	Dommages sévères (Dégâts structuraux modères Dégâts non structuraux importants)
Sévère	D4	2,5-3,5	Dommages très sévères (Destruction partielle)
Complet	D5	3,5-5	Destruction (Dégâts structuraux très importants)

La méthode LM1 définit les courbes de vulnérabilité correspondant à chaque typologie du bâtiment qui corrèle le taux de dommage moyen μ_d avec l'intensité macrosismique EMS-98 et l'indice de vulnérabilité VI caractérisant la qualité sismique du bâti, qui estiment le niveau de dommage probable, comme indique dans la figure 2.6.

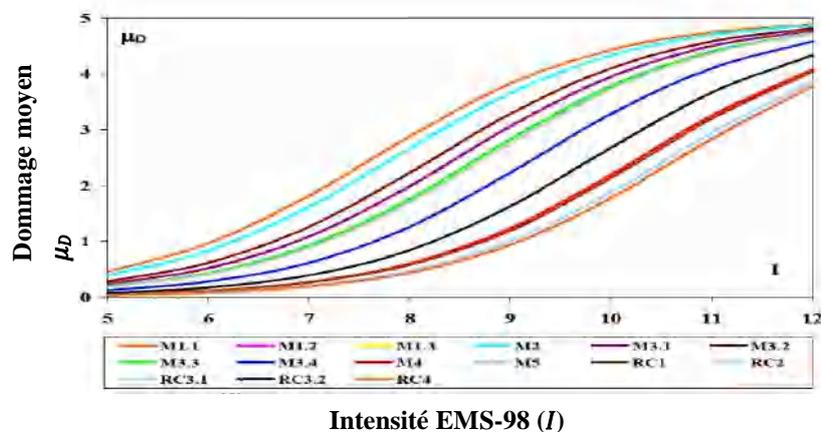


Figure 2.6 : Risk-UE LM1 - Courbes de vulnérabilité - Dommage moyen (μ_d) Par typologie en fonction de l'intensité EMS-98 (Desprez, 2010).

La répartition des probabilités des dommages $P(D_k)$ de chaque degré de dommage D_k ($k \in [0, 5]$) pour un certain dommage moyen selon l'équation 2.6 peut se calculer à l'aide de la distribution binomiale proposée par Lagomarsino et Giovinazzi (2006) comme suit :

$$P(D_k) = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \quad \text{Où : ! indique l'opérateur factoriel.} \quad (2.6)$$

Où D_k représente l'état de dommage indiqué dans l'EMS-98, avec six degrés ($k \in [0, 5]$) allant de l'absence de dommages (D_0) à la destruction complète (D_5). Ces résultats se présentent sous forme de courbes de fragilité, déterminant la probabilité cumulée pour chaque niveau de dommage dans une typologie donnée, en fonction de l'intensité EMS-98 (Voir figure 2.7).

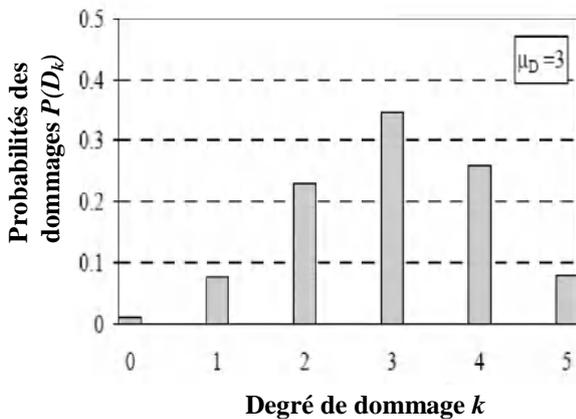


Figure 2.7.a : Distribution binomiale discrète des probabilités de dommage pour obtenir chaque niveau de dommage EMS-98 pour une typologie et une intensité fixée (Giovinazzi, 2005).

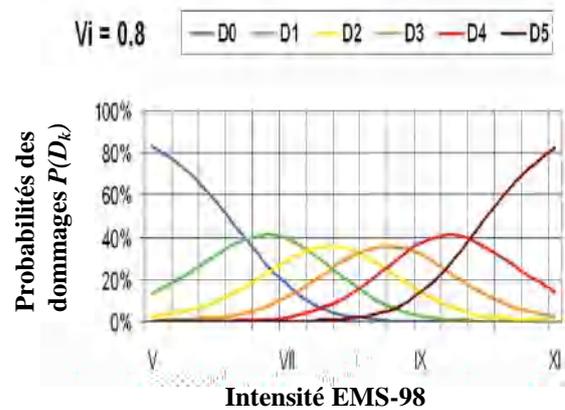


Figure 2.7.b : Distribution des probabilités de dommage pour obtenir chaque niveau de dommage pour une typologie donnée en fonction de l'intensité EMS-98 (Desprez, 2010).

L'échelle macrosismique l'EMS-98, a défini six classes de vulnérabilité décroissante (de A à F) comme le montre le tableau 2.17 chaque type de construction est caractérisé par un intervalle plausible de variation de vulnérabilité (Lagomarsino et Giovinazzi, 2006) Guettiche, 2017). La classe "A", par exemple, représente la classe de vulnérabilité la plus élevée, elle est affectée aux constructions en maçonnerie en Adobe (brique crue) ou en moellon brut. (Mammar et al, 2016).

Tableau 2.17 : Correspondance entre les classes de vulnérabilité de l'EMS-98 et les indices de vulnérabilité IV de Risk-UE (Lagomarsino et Giovinazzi, 2006).

Classe EMS-98	Valeurs de IV
A	$IV > 0,82$
B	$0,66 < IV \leq 0,82$
C	$0,50 < IV \leq 0,66$
D	$0,34 < IV \leq 0,50$
E	$0,18 < IV \leq 0,34$
F	$IV \leq 0,18$

2.3.5 La méthode Italienne GNDT (Niveau 1)

La méthode GNDT a été développée dès 1984 (Benedetti et Petrini, 1984) par le Groupe national de Défense contre les séismes s'appliquant sur les bâtiments en béton armé et en maçonnerie. Après avoir collecté une grande base de données sur les constructions italiennes, un deuxième niveau de la méthode a été développé en 1994, appelé « niveau II ». Donc, deux niveaux d'analyse étaient utilisés qui traduisaient la qualité et la quantité d'informations disponibles à partir du diagnostic visuel effectué par les enquêteurs.

- **Le niveau 1** consistait à rechercher des informations générales facilement collectées sur la construction, identifier les différentes typologies de construction. Elle nécessite une inspection visuelle externe du bâtiment sur la base d'une fiche d'enquête unique pour tous les types de structures. Ils traitent la localisation de la structure, de son usage, de son état de conservation, de sa géométrie et de ses matériaux de construction, etc.
- **Le niveau 2** : est basé sur l'approche statistique, caractérise de façon plus précise de la structure grâce aux paramètres structuraux et non structuraux, ils étaient évalués sur la base des informations de niveau 1. Les informations nécessaires sont regroupées en onze paramètres (Voir tableau 2.18). Au deuxième niveau, la méthode GNDT distingue deux typologies de bâtiments ; maçonnerie et structures en béton armé.

Cette méthodologie de niveau 2 de vulnérabilité sismique est basée sur le calcul de l'indice de vulnérabilité IV qui est la somme pondérée des indices de vulnérabilité pour chaque bâtiment IV_i de 11 paramètres (la description de ces paramètres est présentée dans l'annexe A). Ces 11 paramètres ont été répartis dans 4 classes de vulnérabilité croissante : A, B, C et D (Benedetti et al.1988). Chaque paramètre a évalué un aspect lié à la réponse sismique du bâtiment. Par la suite, une pondération w_i a été attribuée à chacun des paramètres, allant de

0.25 pour les paramètres moins importants (en termes de vulnérabilité structurelle) à 1.5 pour le plus important, mais pour les paramètres 5,7 et 9, la pondération w_i varie entre 0.5 et 1 suivant la classe de vulnérabilité, l'indice de vulnérabilité est ramené par la suite à 100.

- **La classe A** : représente les bâtiments conçus selon les normes parasismiques et donc ayant une bonne résistance aux événements sismiques.
- **Les classes B et C** : correspondent à des normes intermédiaires selon les normes parasismiques et présentent une résistance moyenne aux événements sismiques.
- **La classe D** : représente les bâtiments dont le comportement sismique est mauvais.

Tableau 2.18: Paramètres GNDT pour les bâtiments en maçonnerie et classes de vulnérabilité associée avec la pondération w_i (d'après GNDT, 1993) (Vicente et al.2005).

Paramètres	Classes				Facteurs de pondération (w_i)
	A	B	C	D	
1. Type et organisation du système résistant	0	5	20	45	1,00
2. Qualité du système résistant	0	5	25	45	0,25
3. Résistance conventionnelle sous chargement horizontal	0	5	25	45	1,50
4. Localisation de la structure et fondations	0	5	25	45	0,75
5. Caractéristiques des planchers (diaphragmes)	0	5	15	45	Variable
6. Irrégularité en plan	0	5	25	45	0,5
7. Irrégularité en élévation	0	5	25	45	Variable
8. Distance entre murs	0	5	25	45	0,25
9. Caractéristiques des toitures	0	15	25	45	Variable
10. Eléments non-structuraux	0	0	25	45	0,25
11. Etat de conservation	0	5	25	45	1,00

Le coefficient de pondération « w_i » présente l'importance de chaque paramètre et sa contribution dans la vulnérabilité sismique de la construction.

Initialement, la méthode a été élaborée pour les constructions en maçonnerie et par la suite de son développement, les bâtiments en béton armé ont été également analysés moyennant quelques adaptations (Voir Figure 2.8).

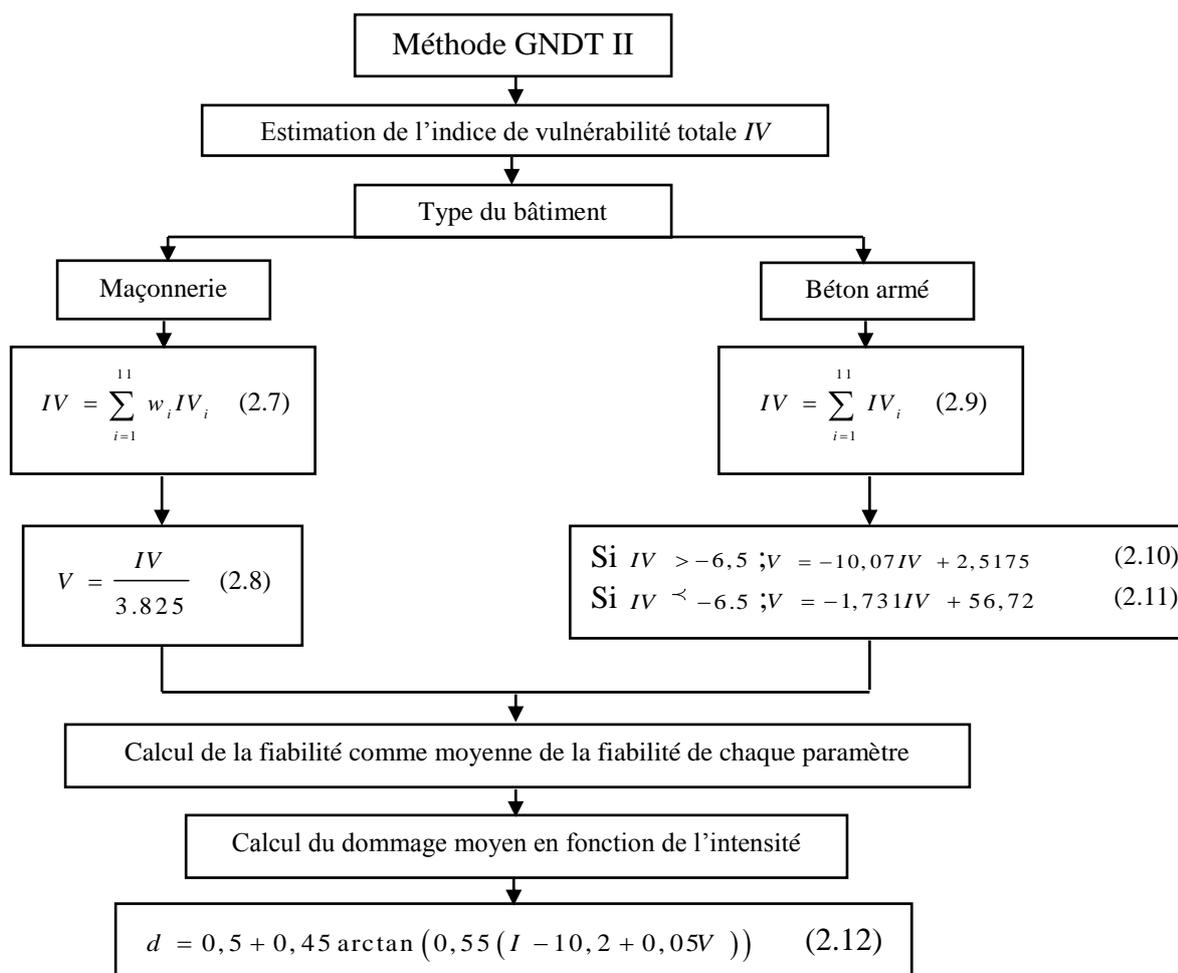


Figure 2.8 : Organigramme des étapes de calcul de l'indice de vulnérabilité et du dommage probable par la méthode GNDT II (Senouci, 2012).

Enfin le dommage moyen « d » est calculé par la formule proposée par Giovanazzi et Lagomarsino (2003) en fonction l'intensité du séisme (I) (échelle EMS-98) et l'indice de vulnérabilité (IV) selon la fonction 2.12 pour $0 \leq d \leq 1$.

Le degré de dommage calculé s'exprime en degrés de l'échelle des dommages EMS-98 qui sont représentés sous une forme discrète à travers cinq degrés de dommages D_{Gk} ($k = 1 \div 5$) (Grünthal et al. 2001). Le tableau 2.19 donne une équivalence entre la valeur de la variable de dommage moyen d et les degrés de dommage de l'échelle EMS-98 :

Tableau 2.19: Equivalence des dommages entre l'échelle EMS-98 et la méthode GNDDT
(Guéguen et Taliercio, 2007).

Echelle EMS-98	1	2	3	4	5
Maçonnerie					
Béton armé					
Niveau de dommage (DG)	D _{G1}	D _{G2}	D _{G3}	D _{G4}	D _{G5}
Dommages structurels	Nul à léger	Modéré	Important	Très important	Destruction
Dommage moyen	[0,0 – 0,2[	[0,2 – 0,4[	[0,4 – 0,6[	[0,6 – 0,8[	[0,8 – 1,0[

De plus, le dommage moyen permet de connaître le pourcentage de bâtiments p_k dans un niveau de dommage k donné à l'aide d'une loi binomiale.

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} d^k (1-d)^{5-k} \quad (2.13)$$

2.3.6 La méthode Française VULNERALP (Niveau 1)

C'est une méthode empirique simplifiée développée dans le cadre de projets VULNERALP (VULNERALP, 2004). Cette méthode a été adaptée selon la méthode GNDDT en raison d'une certaine similitude entre les constructions anciennes italiennes et françaises (GNDDT, 1993 ; Seismocare, 1998). En l'absence de données exhaustives sur des séismes passés dommageables subis en France (aucun retour d'expérience post-sismiques en France), on utilise par conséquent les coefficients de pondération et le score (l'indice) de chaque paramètre structural et non structural selon la méthode du GNDDT. Cependant, le GNDDT a été élaboré sur la base d'observation de dommage, la situation ou la construction est mise en nue et les critères structuraux plus facilement renseignent. Les typologies des constructions utilisées dans VULNERALP sont identiques à celles détaillées dans l'EMS-98 (Guéguen, 2007). La méthode VULNERALP propose quatre niveaux principaux d'analyse (0 ; 1.0 ; 1.1 et 2.0).

- **Le premier niveau**, le plus rudimentaire, **appelé 0**, se base uniquement sur la typologie des bâtiments rencontrés en référence à la typologie EMS-98. Il permet un rapide screening des niveaux probables de dommages pour une typologie présente

dans la ville. Ce niveau mobilise des données issues de la bibliographie, des photos aériennes ou de base de données relatives au bâti.

- **Le second niveau**, assez sommaire, **appelé 1.0**, est un questionnaire assorti d'un guide informatif qui peut être renseigné par les gestionnaires de parc eux-mêmes. Sur cette base, est alors estimé un indice de vulnérabilité, assorti d'une grande marge d'incertitude. Les informations nécessaires sont d'ordre qualitatif et géométrique : matériau de construction, âge, terrain d'implantation, nombre d'étages, régularité géométrique, toiture (Verrhiest, 2008).
- **Le troisième niveau, plus précis et appelé 1.1**, met en œuvre des fiches un peu plus détaillées renseignées par un technicien dûment formé après inspection visuelle extérieure. Les informations complémentaires ainsi obtenues permettent d'affiner l'estimation de l'indice de vulnérabilité : réduction de la marge d'incertitude.
- **Le quatrième niveau, appelé 2.0**, nécessite l'intervention d'un ingénieur spécialiste en bâtiment pour acquérir des informations sur la structure elle-même par inspection extérieure et intérieure et consultation des plans de construction. La fiche est plus détaillée que la précédente. Elle permet notamment d'identifier le système de contreventement structural mobilisable pour la résistance aux séismes, les contributions des éléments non structuraux extérieurs et intérieurs et surtout d'identifier d'éventuels défauts structuraux visibles (Verrhiest, 2008).
- Chaque niveau d'analyse comporte des éléments supplémentaires à diagnostiquer par rapport au niveau inférieur.

L'indice de vulnérabilité niveau 1 est calculé sur la base de neuf paramètres de modification par bâtiment étudié : (1) type de matériau (maçonnerie, béton armé, bois, acier), (2) âge de la construction, (3) régularité d'élévation, (4) position du bâtiment (site en pente ou plat) et des fondations (roches ou sédiments), (5) position du bâtiment dans un bloc (dans un coin, isolé, entre les deux, à l'extrémité), (6) régularité du plan, (7) type de matériau et forme du toit (maçonnerie ou béton armé, à plat ou en pente), (8) état de maintenance (bonne ou mauvaise) et (9) modifications. (Khalfet Mansour et al, 2013)

Des indices de vulnérabilité IV_i pour chaque paramètre structurel i sont ensuite proposés par Guéguen et Taliercio (2007) (Voir tableau 2.20), avec des scores correspondant à une valeur moyenne IV_i^M et ses limites inférieure IV_i^- et supérieure IV_i^+ des valeurs possibles de l'indice de vulnérabilité données par GNDT, en particulier pour les paramètres de

l'état d'entretien et les «modifications», les scores utilisés sont également conformes à ceux appliqués par Boukri et Bensaïbi (2007) à Alger (Algérie).

Tableau 2.20 : Scores extraits de la méthode GNDT pour les critères structuraux retenus dans la méthode niveau 1.0 VULNERALP (VULNERALP, 2004).

Type de matériau et âge de construction IV_1												
$W_1 = 2,5$	Avant 1945			Entre 1945 et 1970			Entre 1970 et 2000			Après 2000		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	45	25	15	45	25	15	25	15	5	25	15	5
Béton arme	25	25	25	25	15	5	15	5	0	5	2,5	0

Localisation de la structure et fondations IV_2												
$W_2 = 0,75$	Sédiment – Terrain en pente			Rocher – Terrain en pente			Sédiment – Terrain plat			Rocher – Terrain plat		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	45	25	5	45	15	5	5	5	5	0	0	0
Béton arme	25	10	5	15	10	5	5	5	5	0	0	0

Position de construction dans l'îlot IV_3

	En coin	En extrémité	En travée	Isolée
Maçonnerie	1,5	1,3	1	1
Béton arme	1	1	1	1

Régularité en élévation IV_4

$W_4 = 1$	Irrégularité			Régularité		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	45	25	15	25	15	0
Béton arme	15	10	5	15	5	0

Régularité en plan IV_5

$W_5 = 0,5$	Irrégularité			Régularité		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	45	25	25	5	2,5	0
Béton arme	15	10	10	5	2,5	0

Forme du toit IV_6

$W_6 = 0,5$	Pente			Plat		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	45	25	15	15	7,5	0
Béton arme	25	20	0	0	0	0

État d'entretien IV_7						
$w_7 = 1$	Bon			Mauvais		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	25	15	0	45	25	5
Béton arme	10	5	0	15	10	5

Modifications IV_8						
$w_8 = 0,5$	Non			Oui		
	IV^+	IV^M	IV^-	IV^+	IV^M	IV^-
Maçonnerie	5	2,5	0	45	25	25
Béton arme	5	2,5	0	15	15	10

Dans la méthodologie VULNERALP, les valeurs IV_i^M , IV_i^- et IV_i^+ concernant la qualité de la construction sont intégrées dans le processus à travers le type et l'âge de la construction, qui reflète l'évolution du code du bâtiment en France et le matériau utilisé par les entreprises de construction françaises.

Les valeurs de l'indice de vulnérabilité totale moyenne pour chaque construction IV^M et ses limites minimale et maximales (IV^- et IV^+) sont calculées par la formule suivante :

$$IV = \sum_{i=1}^n IV_i w_i \quad (2.14)$$

IV_i : est l'indice partielle de vulnérabilité ;

w_i : est le coefficient de pondération de chaque paramètre structurel.

La valeur de IV est normalisée à 100, où 0 représente les constructions les moins vulnérables et 100 les plus vulnérables.

Selon cette méthode, la relation entre le dommage moyen d , l'intensité macrosismique I_{EMS-98} et l'indice de vulnérabilité IV est également déterminée par la méthode GNDT (GNDT, 1993) par la formule suivante :

$$d = 0,5 + 0,45 \arctan (0,55 (I_{EMS-98} - 10,2 + 0,05 IV)) \quad (2.15)$$

2.3.7 La méthodologie HAZUS (Niveau 2)

La première version de la méthodologie HAZUS a été développée et financée par NIBS (National Institute of Building Science) et supportée par la (Federal Emergency Management Agency (FEMA)) HAZUS (1999), publiée aux Etats-Unis en 1997, pour estimer les pertes socioéconomiques et humaines à cause de dommages physiques des bâtiments, des

infrastructures et des installations essentielles (hôpitaux, écoles, postes de police, etc.), aux installations à hauts risques (centrales nucléaires, etc.), aux lignes de transports et les lignes d'alimentation dites de survie (eau, électricité, communication, etc.), à la suite d'un séisme. La méthodologie a été élaborée sous forme de logiciel (HAZUS-MH) interactif public intégrée sur une plate-forme du SIG qui permet également de cartographier les résultats. Bien que la méthode de HAZUS soit l'une des approches d'évaluation des risques sismiques en milieu urbain le plus sophistiqué (Duzgun et al. 2011). En 2004, une version multi-risques appelée (HAZUS-MH) a été publiée, qui comprenait les modèles du séisme, d'inondation et d'ouragan. En 2011, un nouveau modèle d'ondes de tempête côtières a été développé. Des travaux sont en cours pour ajouter une capacité de modélisation du tsunami (Nastev, 2013).

Trois types d'analyse peuvent être réalisés par logiciel HAZUS-MH, en fonction du niveau de complexité de l'étude. Ainsi, un premier niveau d'analyse, basé sur les données contenues par défaut (Default Data Analysis) sur la population et les biens à risque, appelés inventaires, fournit des résultats bruts. Des données de plus en plus détaillées fournies par l'utilisateur permettent d'améliorer le niveau de détail et la précision des estimations de pertes (analyse de niveau 2 ou 3). Un deuxième niveau d'analyse est basé sur des données complémentaires spécifiques fournies par l'utilisateur (User Supplied Data Analysis) telles que les cartes des sols du programme national de réduction des risques sismiques (NEHRP) pour améliorer les facteurs d'amplification du sol, la susceptibilité à la liquéfaction, les améliorations de l'inventaire spécifique des bâtiments et des infrastructures, et les relations de fragilité améliorées. Finalement, un troisième niveau d'analyse avancée et plus précis au niveau local est défini à partir de données complémentaires relatives aux inventaires, aux parcs immobiliers qu'aux coûts économiques (Advanced Data and Models Analysis), ce qui nécessite généralement du temps, des ressources et des efforts.

L'approche modulaire de HAZUS est illustrée par l'organigramme de la figure 2.9. Les modules sont regroupés sous le nom de "Potential Earth Science Hazards-PESCH". En général, chacun des composants de cet organigramme est exigé pour l'évaluation des pertes (Mehani, 2010).

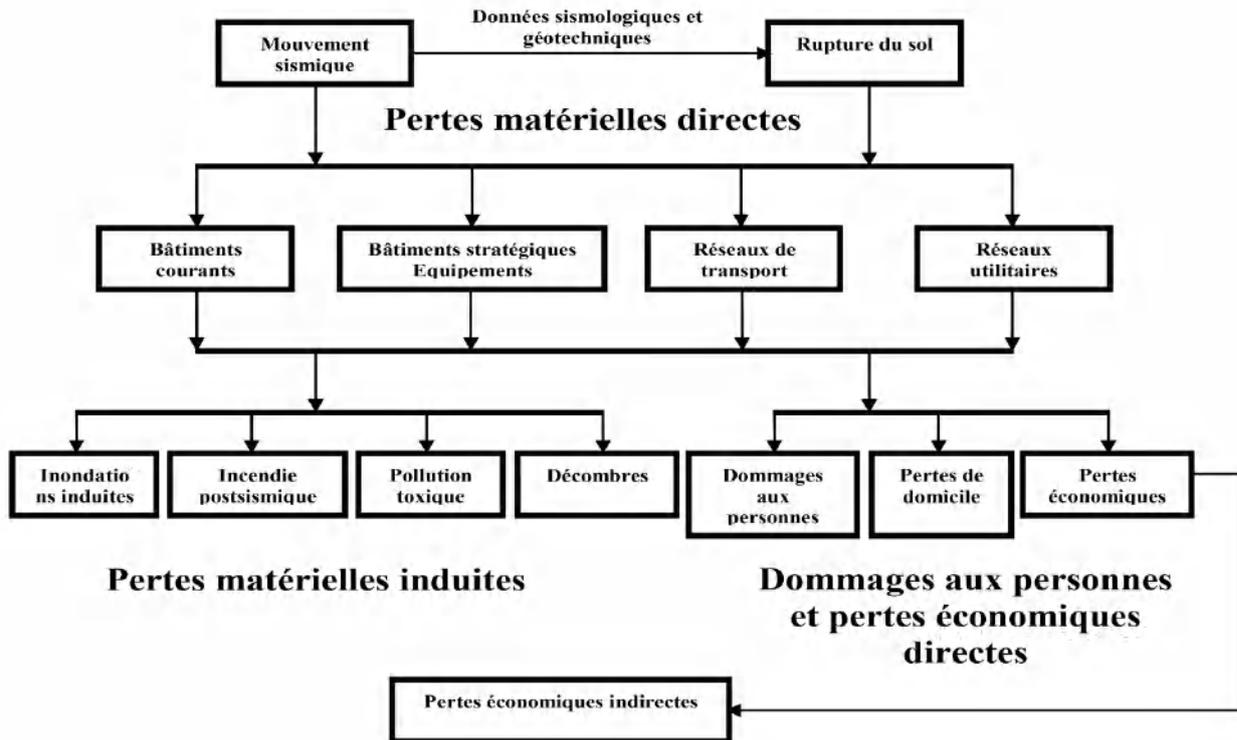


Figure 2.9 : Organigramme de la méthodologie HAZUS (HAZUS, 2003c).

La méthodologie HAZUS classe trente-six (36) typologies de bâtiments, pour associer à chaque bâtiment une courbe de fragilité préalablement définie. Ces courbes de fragilité donnent la probabilité que le bâtiment atteigne un degré de dommages en fonction d'un paramètre de demande sismique (c'est-à-dire déplacement spectral, accélération spectrale, accélération maximale au sol PGA ou déplacement maximal au sol PGD) (Nollet et al.2013). La classe typologique est définie à partir de leur matériau de construction, du système porteur définissant le comportement général de la structure et du nombre d'étages. Ainsi, 16 systèmes structurels sont définis : W1 et W2 pour les bâtiments en bois, S1 à S5 pour les bâtiments en acier, C1 à C3 pour les bâtiments en béton, PC1 et PC2 pour les bâtiments composés d'éléments en béton préfabriqué, RM1 et RM2 pour les bâtiments en maçonnerie renforcée, URM pour les bâtiments en maçonnerie non renforcée et MH pour la classe particulière des mobil-homes (Perrault, 2013). Le tableau 2.21 présente une description de l'ensemble de ces typologies.

Outre ces typologies, la méthode HAZUS tient compte de la conception parasismique des bâtiments via l'année de construction. Quatre niveaux de conception parasismique sont en effet introduits :

- Pre Code : le bâtiment n'a aucune conception parasismique. Pour les zones à forte sismicité, comme la côte californienne, il convient de considérer qu'un bâtiment à ce niveau de conception s'il a été construit avant 1940.
- Low Code : faible conception parasismique.
- Moderate Code : dimensionnement parasismique modéré. La méthode HAZUS considère que les bâtiments construits après 1940 dans les zones à forte sismicité respectent ce dimensionnement.
- High Code : plus haut niveau de conception parasismique, pour les bâtiments construits après 1973 (Perrault, 2013).

Tableau 2.21 : Classification par typologie des bâtiments selon la méthodologie HAZUS (HAZUS, 2003c).

Type de structure	No.	Typologie	Description	Hauteur				
				Intervalle		Typique		
				Nom	Etages	Etages	Mètres	
Structure de bois	1	W1	Charpente de bois (< 5000 pi ²)		1-2	1	4,27	
	2	W2	Charpente de bois (> 5000 pi ²)		All	2	7,32	
Ossature en acier	3	S1L	Résistant au moment	Faible hauteur	1-3	2	7,32	
	4	S1M		Hauteur moyenne	4-7	5	18,29	
	5	S1H		grande hauteur	8+	13	47,55	
	6	S2L	Contreventée en acier	Faible hauteur	1-3	2	7,32	
	7	S2M		Hauteur moyenne	4-7	5	18,29	
	8	S2H		grande hauteur	8+	13	47,55	
	9		Légère en acier		All	1	4,57	
	10	S4L	Avec murs de cisaillement en béton	Faible hauteur	1-3	2	7,32	
	11	S4M		Hauteur moyenne	4-7	5	18,29	
	12	S4H		grande hauteur	8+	13	47,55	
	13	S5L	Avec murs de remplissage en maçonnerie	Faible hauteur	1-3	2	7,32	
	14	S5M		Hauteur moyenne	4-7	5	18,29	
	15	S5H		grande hauteur	8+	13	47,55	
	Béton	16	C1L	Ossature en béton résistant aux moments	Faible hauteur	1-3	2	6,10
		17	C1M		Hauteur moyenne	4-7	5	15,24
18		C1H	grande hauteur		8+	12	36,58	
19		C2L	Murs de béton travaillant en cisaillement	Faible hauteur	1-3	2	6,10	
20		C2M		Hauteur moyenne	4-7	5	15,24	
21		C2H		grande hauteur	8+	12	36,58	
22		C3L	Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie	Faible hauteur	1-3	2	6,10	
23		C3M		Hauteur moyenne	4-7	5	15,24	
24		C3H		grande hauteur	8+	12	36,58	
25			Murs en béton préfabriqués		All	1	4,57	
26	PC2L	Ossature en béton préfabriquée	Faible hauteur	1-3	2	6,10		
27	PC2M		Hauteur moyenne	4-7	5	15,24		
28	PC2H		grande hauteur	8+	12	36,58		
Maçonnerie	29	RM1L	Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes flexibles	Faible hauteur	1-3	2	6,10	
	30	RM1M		Hauteur moyenne	4+	5	15,24	
	31	RM2L	Murs porteurs en maçonnerie armée avec diaphragmes rigides	Faible hauteur	1-3	2	6,10	
	32	RM2M		Hauteur moyenne	4-7	5	15,24	
	33	RM2H		grande hauteur	8+	12	36,58	
	34	URML	Maçonnerie non armée	Faible hauteur	1-2	1	4,57	
	35	URMM		Hauteur moyenne	3+	3	10,67	
36	MH	Mobil-Home		All	1	3,05		

L'évaluation du dommage physique par ce logiciel est basée sur la méthode du spectre de capacité et les courbes d'endommagement ou courbes de fragilité, celle-ci implique essentiellement la comparaison de la capacité d'une structure représentée par le spectre de capacité, avec la demande sismique (solicitation du séisme) représentée par un spectre de réponse au format Acceleration-Displacement. Le point de performance est obtenu à partir de l'intersection de la courbe du spectre de capacité d'un type du bâtiment donné avec la courbe du spectre de demande sismique et il est ensuite entré les coordonnées du point de performance dans des courbes de fragilité qui obtient la probabilité d'endommagement d'un type du bâtiment donné, en fonction de plusieurs niveaux de dommages, la figure 2.10 représente schématiquement les étapes de modélisation d'estimation des dommages sismiques.

Dans la méthodologie HAZUS, la fonction analytique représentant la probabilité qu'une typologie soit endommagée suivant un certain niveau de dommage est donné par la fonction de répartition de la loi log-normale (Perrault, 2013). Le niveau de dommage (ds) provoqué par un déplacement spectral (S_d) donné, la probabilité d'endommagement s'exprime par la formule suivante :

$$P [ds | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (2.16)$$

Où :

$\overline{S_{d,ds}}$: est la valeur moyenne du déplacement spectral s_d pour le niveau d'endommagement (ds),

β_{ds} : est l'écart-type du logarithme naturel du (s_d) pour un niveau de dommage ds ,

Φ : est la fonction de répartition de la loi normale.

Des courbes sont également définies en représentant le mouvement du sol par son accélération maximale.

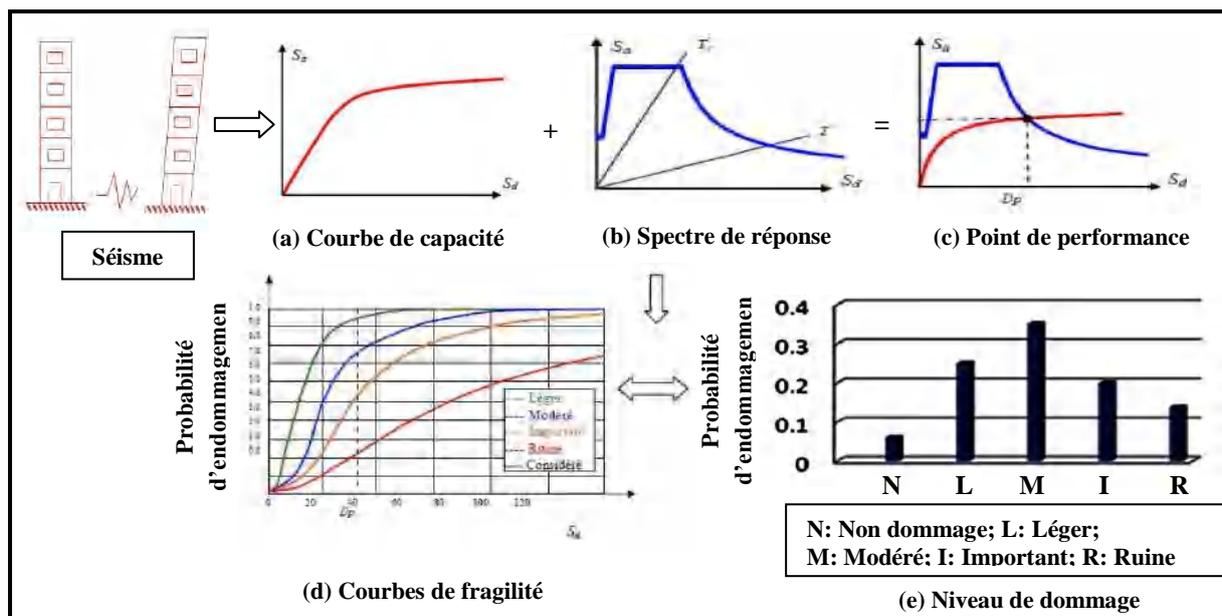


Figure 2.10 : Etapes de modélisation d'estimation des dommages sismiques par méthode HAZUS (HAZUS, 2003a).

Ici, le mouvement du sol est caractérisé par la réponse spectrale, le PGA et le PGV Il est défini à travers une approche déterministe ainsi qu'une approche probabiliste, ou bien par scénario de séisme réalisé indépendamment de HAZUS.

Ces courbes ont été intégrées dans la base de données de logiciel HAZUS qu'elles s'appuient sur des données de dommages dérivées d'enquêtes post-séisme, sur l'avis d'experts ainsi que sur des tests en laboratoire.

Cette méthodologie a défini cinq niveaux de dommages : D0 : pour l'absence de dommages ; D1 : pour les dommages légers ; D2, pour les dommages modérés ; D3 : pour les dommages importants ; et enfin D4 : pour les dommages très importants (ruine). Ces niveaux de dommages sont définis pour les 16 systèmes structurels décrits au tableau 2.20. Par exemple, les niveaux de dommages pour la typologie des bâtiments en béton armé C2, sont définis dans le tableau 2.22:

Tableau 2.22 : Etats de dommage pour bâtiment de classe C2 (HAZUS, 2003a)

Niveau de dommage	Description
	Léger
	Modéré
	Important
	Ruine

2.4 La méthode ARL (Data-mining)

Les méthodes classiques sont basées sur les enquêtes sur site. Mais les enquêtes sur site s'avèrent longues et coûteuses, ne permettant pas l'actualisation rapide de l'information et ne sont pas disponibles pour toutes les zones urbaines du fait du grand nombre de structures présentes dans un parc immobilier. De plus, cette méthode engendre de grandes marges d'erreur à cause de difficultés liées à l'identification des systèmes structuraux et la qualité des matériaux de construction par le manque d'information disponibles.

Ces dernières années, de nombreuses études de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine ont été basées sur les techniques de fouille de données (Data-mining (DM)), comme : les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks (ANN)) (Jena et al. 2019 ; Ferreira et al.2020), machine à vecteurs de support (Support Vector Machine (SVM)) (Riedel et al. 2015 ; Harirchian et al.2020) et règles d'association (Association Rule Learning (ARL)) (Riedel et al. 2014 ; Riedel et al. 2015 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a), etc., qui ont été adoptées pour réduire les coûts et la durée des enquêtes sur sites, réduire les procédures traditionnelles par les méthodes classiques et améliorer l'efficacité de l'évaluation de la

vulnérabilité sismique par l'utilisation des photographies aériennes (drones et/ou télédétection), des images satellites. Ces initiatives visent à simplifier et à augmenter la phase d'inventaires visuels en ne considérant que les paramètres clés dont les contributions à l'évaluation de la vulnérabilité sismique sont importantes (Guéguen et al. 2007 ; Riedel et al. 2014).

Dans cette thèse, on va utiliser une méthode basée sur le domaine de fouille de données (Data-mining (DM)) appelée le concept de règles d'association (Association Rule Learning (ARL)) (Agrawal et al. 1993) qui a pour objet d'exploration de données pour révéler des relations intéressantes « cachées » entre les variables d'une grande base de données et de résumer les données d'une nouvelle manière, de façon qu'elles soient plus compréhensibles et utiles.

Le Data-mining repose sur l'utilisation d'un ensemble d'algorithmes de diverses disciplines scientifiques comme la probabilité, l'informatique ou encore les statistiques, pour construire des modèles à partir des données, c'est-à-dire trouver des structures intéressantes ou des motifs selon des critères fixés au préalable, et d'en extraire un maximum de connaissances.

Ces techniques sont utilisées dans de nombreux domaines de recherche scientifique notamment la génétique, les mathématiques, la cybernétique, la gestion des risques et dans de nombreux domaines, où se trouvent une grande quantité de données comme ; le marketing, les banques, les opérateurs de téléphonie mobile et les assureurs.

L'exemple le plus classique, c'est la règle découverte dans les données de ventes dans un supermarché pourrait indiquer qu'un client achetant des oignons et des pommes de terre simultanément, serait susceptible d'acheter un hamburger. Une telle information peut être utilisée comme base pour prendre des décisions marketing telles que par exemple des promotions ou des emplacements bien choisis pour les produits associés (Guettiche, 2017).

Récemment, de nombreux chercheurs (Riedel et al. 2014 ; Riedel et al. 2015 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a ; Liu et al. 2019 ; Diana et al. 2019 ; Karmenova et al. 2020) ont appliqué cette méthode dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité sismique, elle consiste à établir des corrélations à l'aide d'algorithmes mathématiques (si / puis déclarations) entre les attributs de base de bâtiments facilement collectés à partir d'images de

bâtiments (attribut X = nombre d'étage, la forme du toit, l'année de construction et matériaux de construction) et les classes de vulnérabilité EMS-98 (cible $Y_i = A, B, C, D$ et E).

ARL prend également la forme $X \rightarrow Y_i$, où X (antécédent) et Y_i (conséquent) représentent deux ensembles d'éléments indépendants. Chaque relation entre X et Y_i peut-être présentée dans un format binaire $[0, 1]$: connaissant l'attribut de construction X , la probabilité d'appartenir à la classe Y_i est définie comme suit :

$$P(Y_i | X) = \frac{P(Y_i \cap X)}{P(X)} \quad (2.17)$$

X et Y ne sont pas totalement indépendants, car presque toutes les méthodes empiriques ont affirmé que la classe de vulnérabilité dépend également des caractéristiques structurelles élémentaires. En pratique, $P(Y_i | X)$ peut-être calculé comme suit :

$$P(Y_i | X) = \frac{N_{XY}}{N_X} \quad (2.18)$$

Où :

N_X : est le nombre total des constructions avec attribut X ;

N_{XY} : est le nombre des constructions dont l'attribut X et appartenant à la classe Y_i .

S'il n'y a pas de limitation de la méthode ARL, cela conduit à un risque important de fausses associations qui peuvent survenir lors de la recherche sur un grand nombre d'associations possibles, car les résultats incluraient par conséquent des incohérences (Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a).

Pour cela, nous avons utilisé deux phases appliquées à une base de données assez grande (4454 constructions) afin de tester et assurer la qualité du proxy de vulnérabilité à Skikda.

- La première est une phase d'apprentissage : consiste à définir un proxy (Règle) de vulnérabilité en utilisant un échantillon de bâtiments pour lesquels les caractéristiques structurelles élémentaires (ou attributs) et les classes de vulnérabilité sont disponibles et le proxy est développé permettant de définir la relation la plus performante entre les attributs et la classe de vulnérabilité.

- La deuxième phase est une application du proxy obtenu sur un échantillon différent de celle de la phase d'apprentissage où les mêmes attributs élémentaires sont disponibles, mais pas les classes de vulnérabilité. (Friedel et Guéguen, 2015 ; Guettieche, 2017).

2.5 Conclusion

D'après ce chapitre, on a conclu que la plupart des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtis existant à grande échelle sont basées sur le retour d'expérience post sismique, les jugements des experts, la typologie constructive prédéfinie et les caractéristiques structurales des bâtiments. Il n'y a pas de méthode idéale qu'une autre qui peut être appliquée dans le contexte en Algérie. Cependant, dans les régions à risque sismique modéré, les modèles de vulnérabilité et de perte sont difficiles à appliquer, car le niveau d'information est souvent limité à cause de l'absence ou l'insuffisance de dommages observés qui ont été causés par des séismes passés. Le choix de la méthode se repose essentiellement sur ; son adaptation à la typologie locale et sa crédibilité scientifique élevée.

Dans le cas de la ville Skikda, en profitant la similitude dans le cadre bâti les plus représentatifs dans divers pays européens et dans d'autres régions similaires dans le monde comme les pays méditerranéens (Algérie, Tunis, Marco, etc.) qui étaient d'anciennes colonies européennes pour justifier notre choix de la méthode européenne Risk-UE.

Pour rattraper le problème du manque de données concernant les bâtiments dans une ville à sismicité modérée comme Skikda, dont les moyens de diagnostic restent limités, on utilise une autre méthode basée sur la découverte de connaissances dans les bases de données, s'appelle (Data-mining ARL) consistent à rechercher des informations bien ciblées (à partir de certains paramètres déjà disponibles ou facilement collectés) dans de grandes quantités de données, à explorer et à analyser, par des moyens automatiques ou semi-automatiques, afin de découvrir des modèles, des règles et des relations significatives.

Chapitre 3 :

Evaluation de la vulnérabilité sismique et les dommages sismiques des bâtiments selon la méthode Risk-UE LM1

3.1 Introduction

L'estimation des pertes joue un rôle important dans la mise en œuvre des stratégies de planification et de modernisation urbaine, car elle permet de comparer les coûts selon diverses mesures prises visant à évaluer les avantages des travaux de réhabilitation et réparation, ce qui inclut la sécurité des personnes et la réduction des conséquences des dommages (D'Ayala et al. 1997).

Ce chapitre porte sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtis à l'échelle urbaine, afin de connaître les qualités sismiques de la zone concernée par l'étude et la prévision des dommages selon différents scénarios sismiques et leur répartition spatiale.

Comme il a été indiqué dans le chapitre 2 et sur la base de l'inventaire des bâtiments réalisés, la méthode Risk-UE LM1 est la plus adaptée aux contextes et aux typologies de bâtiments de la ville de Skikda, elle est considérée comme méthode de base pour cette première évaluation des situations sismiques probables de la ville, en raison de la qualité et de la fiabilité des résultats obtenus et du niveau de validation scientifique avec une méthode, ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Les résultats présentés sous forme de cartes peuvent servir comme informations pertinentes aux autorités publiques, afin de cibler le processus de rénovation urbaine individuelle ou à plus grande échelle (urbaine).

La création d'une grande base de données pour cette étude, nécessite l'utilisation d'un système d'informations géographiques (SIG). En outre, les cartes géoréférencées de répartition des dommages générées par le SIG ont également l'avantage d'être d'une lecture facile et utilisable par les urbanistes et les gestionnaires de risques (Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a, 2017b).

3.2 Répartition des bâtiments selon la typologie Risk-UE LM1

Selon la méthode Risk-UE LM1, la typologie constructive joue un rôle très important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique. Les figures ci-après, présentent les distributions sous forme d'histogramme de typologies constructives existantes dans chaque zone sur plate-forme du SIG, en utilisant l'image du satellite à haute résolution de Google Hybrid Maps.

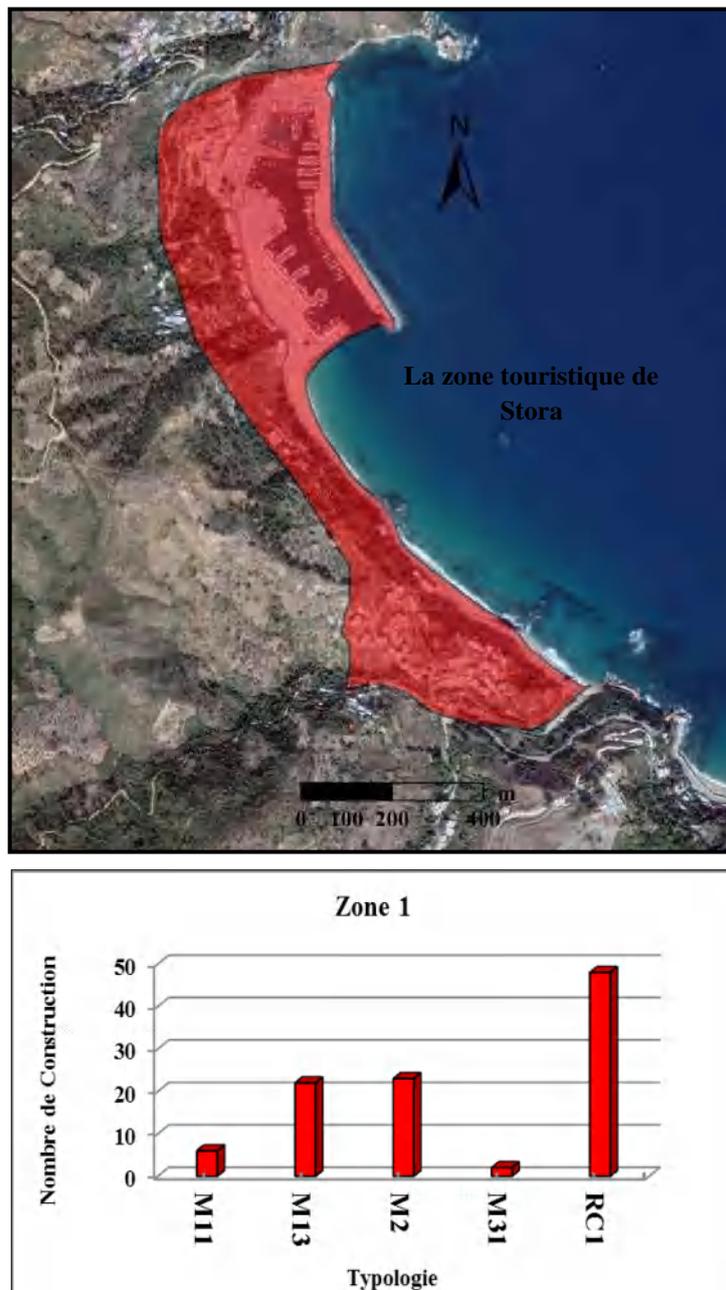


Figure 3.1 : Carte de la zone 1 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.

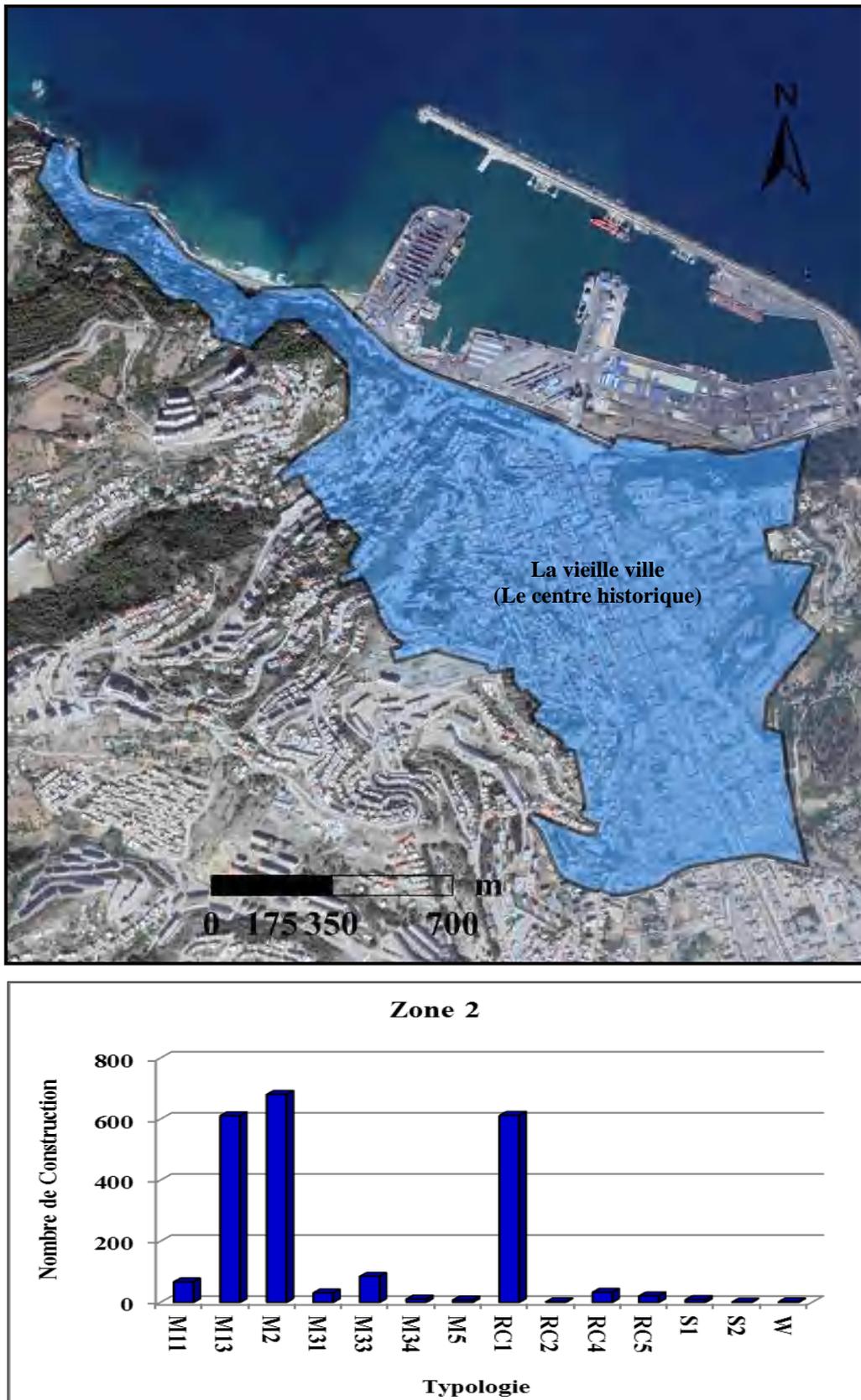


Figure 3.2 : Carte de la zone 2 plates-formes SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.

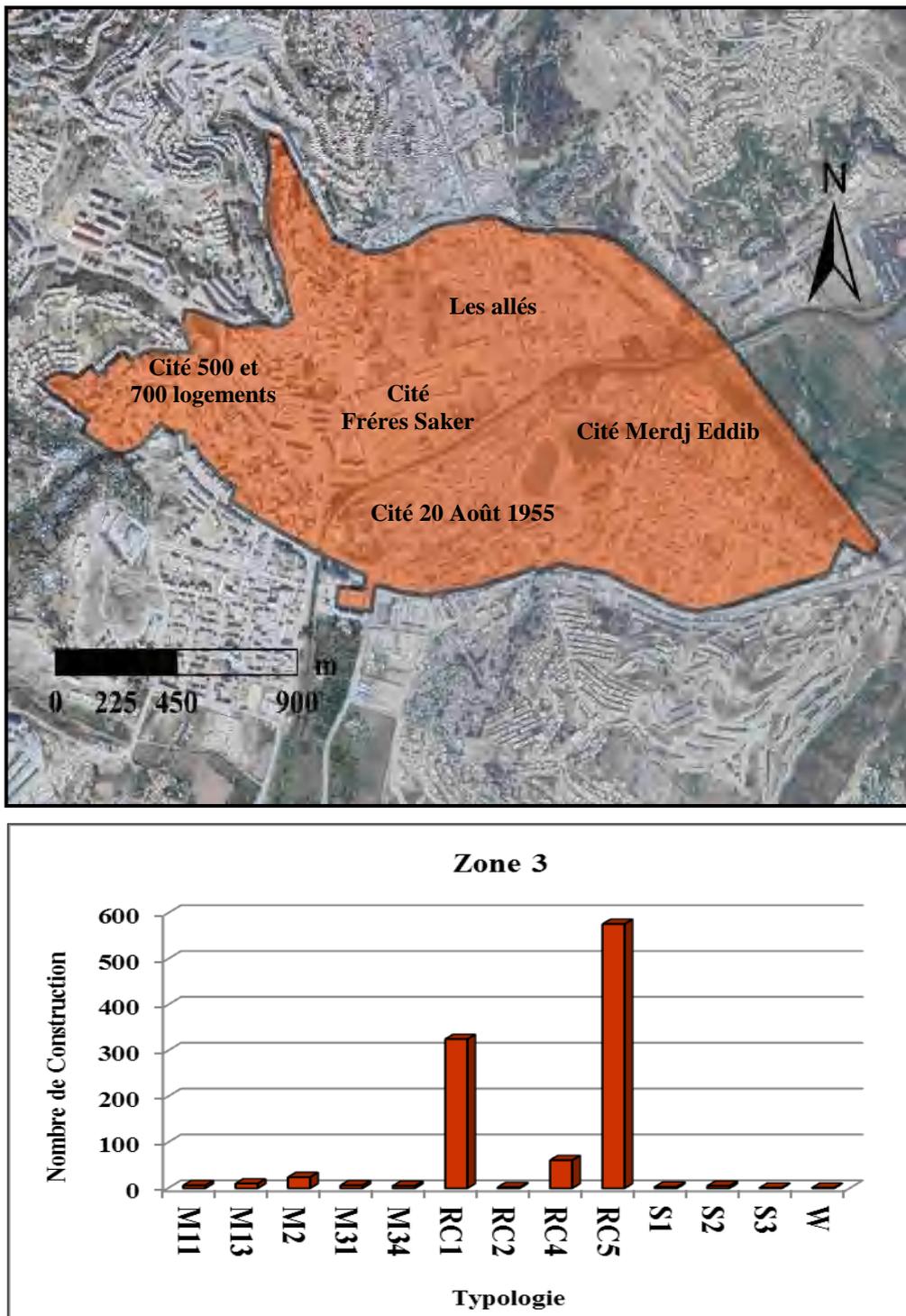


Figure 3.3 : Carte de la zone 3 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.

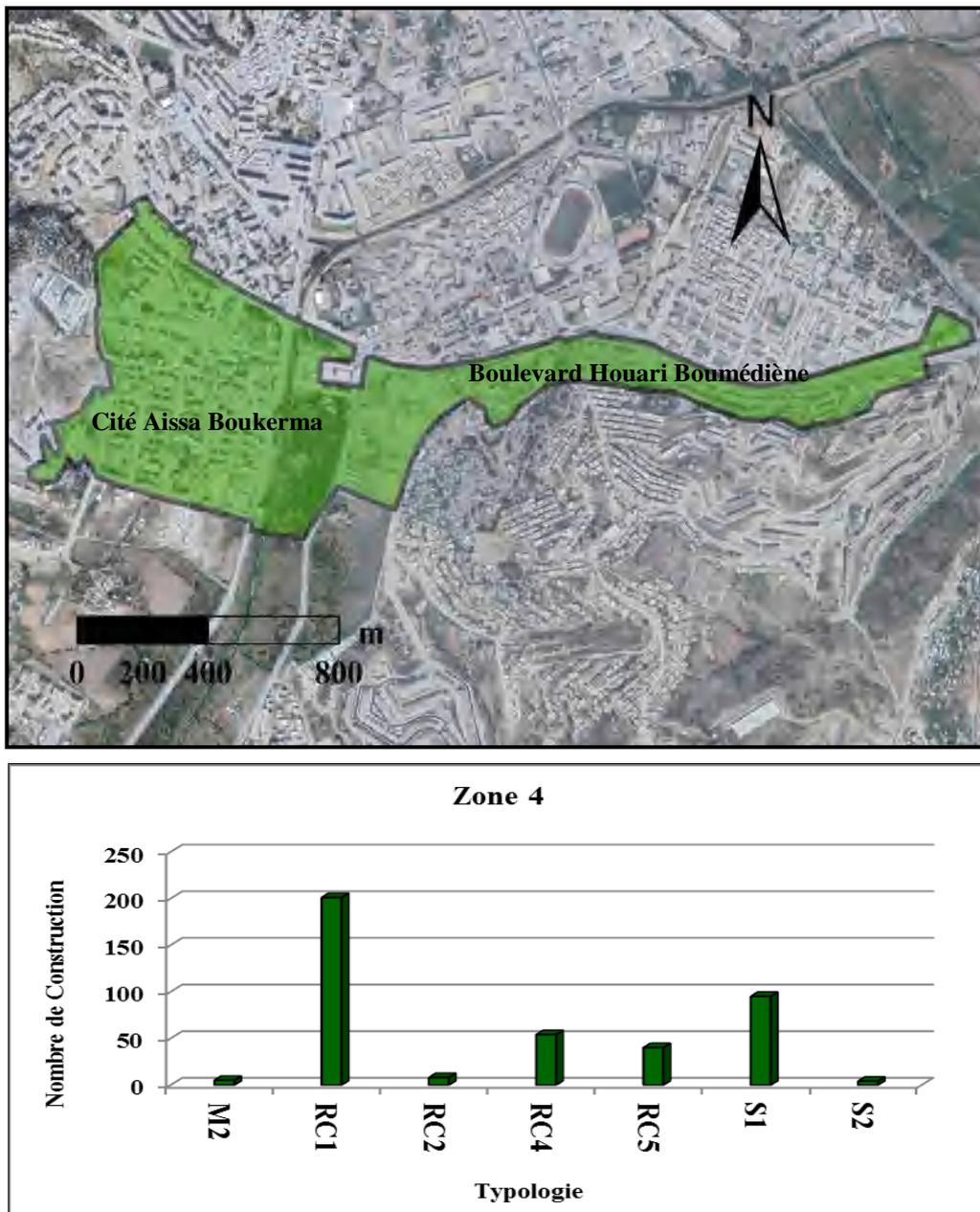


Figure 3.4 : Carte de la zone 4 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.

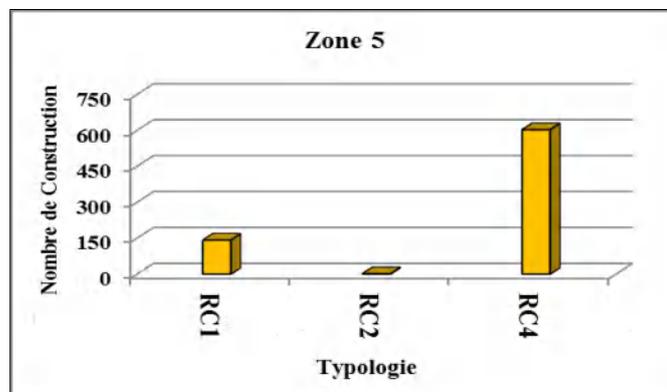
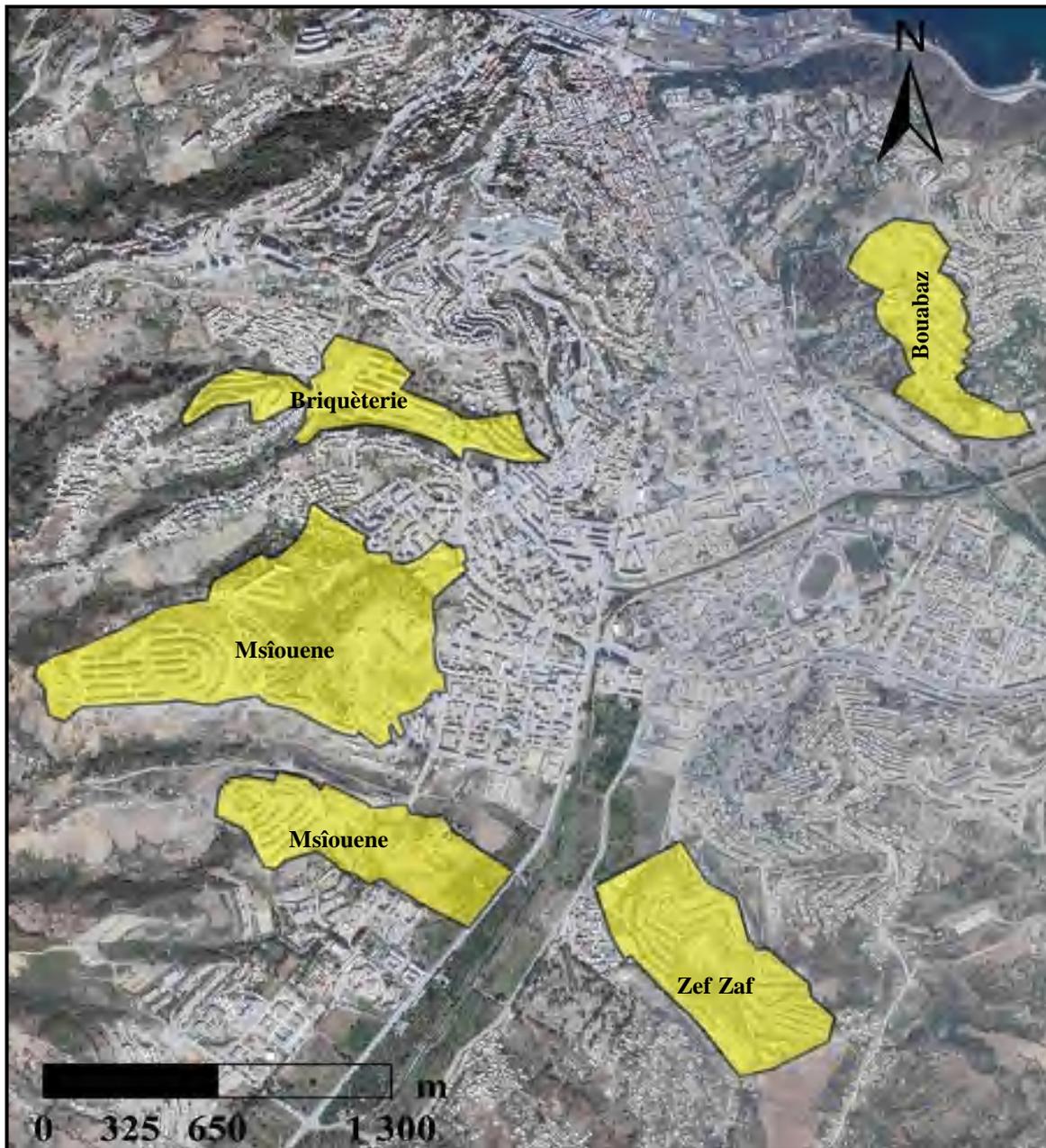


Figure 3.5 : Carte de la zone 5 sous plate-forme SIG à l'aide de l'image satellitaire à haute résolution de Google Hybrid Maps avec l'historgramme présente le nombre total de la typologie constructive existante selon Risk-UE LM1.

Les figures 3.1 à 3.5, ont fourni les données de base pour définir les typologies constructives des bâtiments de cette ville en fonction de Risk-UE LM1, dont les cinq zones ont été choisies de manière à pouvoir présenter les principales typologies existantes les plus dominantes pour chaque zone comme ci-dessous :

- Zone 1 : on trouve un mélange entre les typologies de la maçonnerie en pierre de taille (M13) et en brique de terre cuite (Adobe) (M2) et les constructions en béton armé du système portique (RC1) ;
- Zone 2 : le centre historique était le noyau de cette ville et la principale agglomération urbaine de la ville avant toute expansion, une grande partie des bâtiments de cette zone en maçonnerie non renforcée telle que : pierre de taille (M13) et en Adobe (brique de terre cuite) (M2) et des bâtiments en béton armé du système portique (RC1), généralement construits avant l'établissement du premier règlement parasismique Algérien en 1981 (RPA 81, 1981) ;
- Zone 3 : cette zone est située au sud du centre historique de la ville. C'était la première extension de la ville après l'indépendance, la zone se caractérise par des constructions en béton armé du système portique (RC1) et en mur préfabriqué (RC5), la majorité construite avant 1981 ;
- Zone 4 : la majorité des constructions, de cette zone, sont en béton armé du système portique (RC1) et du système mixte (RC4) et en mur préfabriqué (RC5), construites entre 1981 et 2003 et la présence d'un nombre très important de constructions en acier ;
- Zone 5 : la zone la plus récente, la majorité des bâtiments en béton armé du système mixte (RC4), construites selon les normes parasismiques Algériennes (RPA 03, 2003).

L'analyse statistique des figures ci-dessus et l'évolution urbanistique et historique de la ville ont permis de constater que la répartition de la typologie constructive n'est pas distribuée de manière aléatoire.

Tableau 3.1 : Distribution des constructions enquêtées selon la méthode Risk-UE LM1.

Type de structure	Typologie Risk-UE LM1	zone	Nombre	%	Total
Maçonnerie non chaînée	M1.1 Moellons	1,2 et 3	79	1,77%	35,82%
	M1.3 Pierres de taille	1,2 et 3	643	14,44%	
	M2 Adobe (Briques de terre cuite)	1,2, 3 et 4	733	16,46%	
	M3.1 Planchers bois	1,2 et 3	39	0,88%	
	M3.3 Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	2	85	1,91%	
	M3.4 Planchers en béton armé	2 et 3	16	0,36%	
Maçonnerie renforcée	M5 Maçonnerie globalement renforcée	2	8	0,18%	0,18%
Béton Armé	RC1 Structures poteaux-poutres en béton armé	1,2, 3 4 et 5	1328	29,82%	61,29%
	RC2 Murs porteurs en béton armé	2, 3, 4 et 5	14	0,31%	
	RC4 Structures mixtes en béton armé	2, 3, 4 et 5	751	16,86%	
	RC5 Murs préfabriqués en béton armé (tilt-up walls)	2, 3 et 4	637	14,30%	
Construction Métallique	S1 Ossatures métalliques en portique	2, 3 et 4	107	2,40%	2,64%
	S2 Ossatures métalliques avec triangulation	2, 3 et 4	10	0,22%	
	S3 Portiques + remplissage en maçonnerie non armée	3	1	0,02%	
Bois	W Structures en bois	2 et 3	3	0,07%	0,07%

D'après le tableau 3.1, qui présente la distribution de 4454 bâtiments enquêtés dans la zone d'étude selon les typologies constructives Risk-UE LM1, on constate que les bâtiments en béton armé sont prédominants tels que : RC1, RC4 et RC5 constituant 61,29% de l'ensemble de bâtiments et la grande majorité des bâtiments en maçonnerie sont en pierre de taille M1.3 et en Adobe (briques de terre cuite) M2.

Le classement des constructions par la méthode Risk-UE LM1 selon la typologie est basé essentiellement sur le type de matériaux de construction, le type de plancher et le type de système porteur. Les figures 3.6 à 3.9, présentent les différentes typologies constructives à Skikda selon le classement de cette méthode.



Figure 3.6 : Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en maçonnerie à Skikda.



Figure 3.7 : Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en béton armé à Skikda.



Figure 3.8 : Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en acier à Skikda.



Figure 3.9 : Classification selon Risk-UE LM1 des constructions en bois à Skikda.

3.3 Evaluation la qualité sismique des constructions à l'aide de l'indice de vulnérabilité

Dans cette étude, on divise la zone d'étude en 115 îlots couplés avec la carte de la distribution de la population (échelle du district de recensement) qui indique le nombre d'habitants conformément au dernier recensement de l'office nationale des statistiques en 2020 (office national des statistiques, ONS 2020). La figure 3.10 montre les limites des îlots de chaque section.

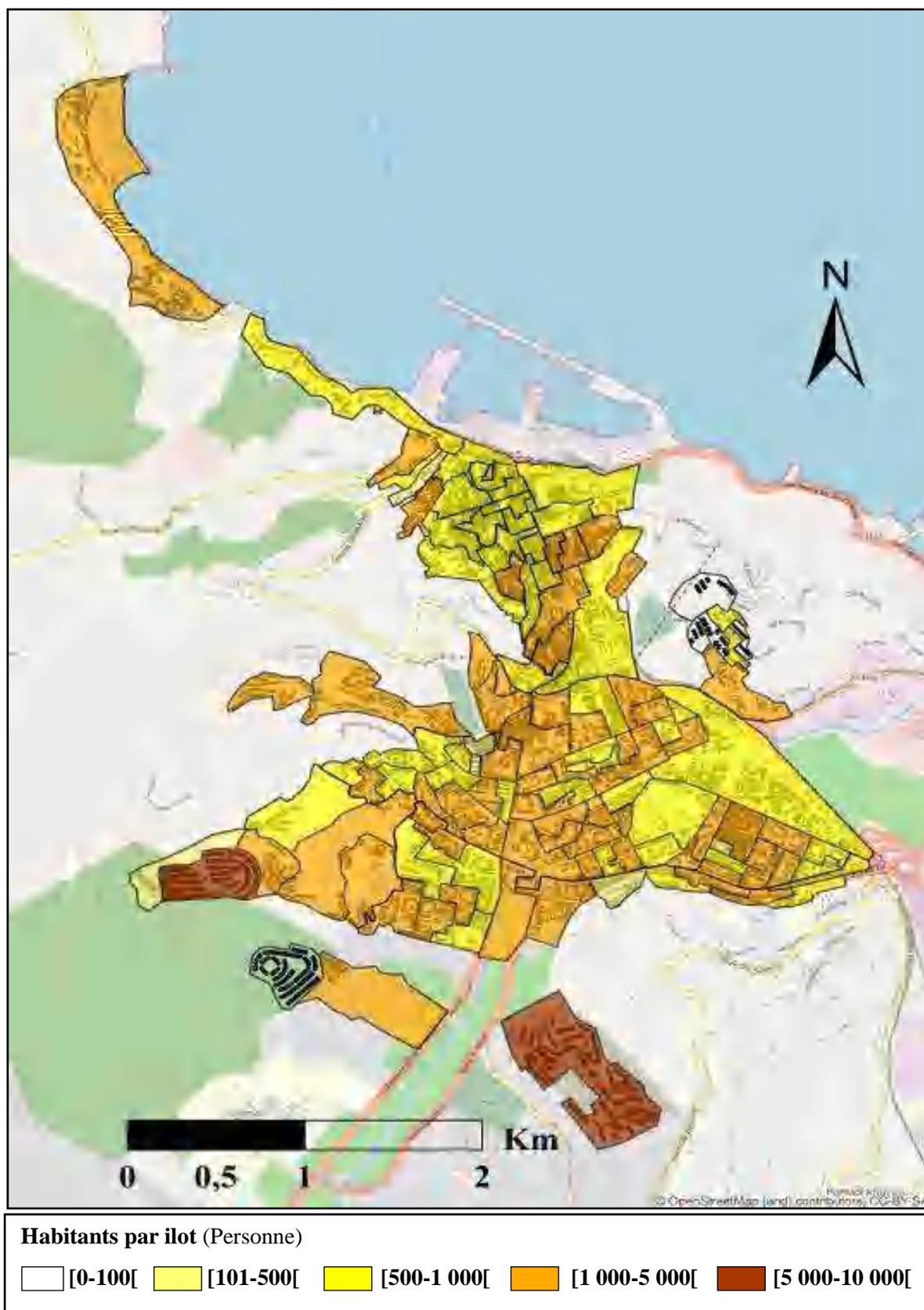


Figure 3.10 : Distribution des îlots selon (ONS 2020) et le nombre d’habitants par îlots sous plateforme SIG en utilisant l’Open Street Map.

Les figures 3.11 et 3.12 représentent les résultats sous forme graphique de l'évaluation de l'indice de vulnérabilité *IV* par bâtiment et îlot qui a été calculé par la formule (2.2) (chapitre précédent) selon la méthode Risk-UE LM1 (la distribution des résultats est présentée par des cartes pour chaque zone dans l'annexe B). Elle propose cinq (05) degrés de vulnérabilité comme le montre dans le tableau 3.2, chaque degré de vulnérabilité est caractérisé par un intervalle plausible de variation de l'indice vulnérabilité.

Tableau 3.2 : Correspondance entre l'indice de vulnérabilité *IV* de Risk-UE LM1 et le degré de vulnérabilité.

Indice <i>IV</i> de Risk-UE LM1	[0,0-0,2[	[0,2-0,4[	[0,4-0,6[	[0,6-0,8[	[0,8-1[
Degré de vulnérabilité	Très faible	faible	Moyen	Elevé	Très élevé

D'après les histogrammes de la figure 3.13. On a compté :

- **La zone 1 :** la zone touristique : 79 bâtiments représentent plus de 78% de la totalité des constructions de la zone étudiée ont des intervalles des indices de vulnérabilité [0,6-0,8[et [0,8-1[;
- **La zone 2 :** le centre historique de la ville : 1627 bâtiments représentent près de 75% de la totalité des constructions de la zone étudiée ont des intervalles des indices de vulnérabilité [0,6-0,8[et [0,8-1[;
- **La Zone 3 :** les allées, la cité 20 Août 1955, cité Merdj Edib, cité Frères Saker, cité 500 et 700 logements : 889 bâtiments représentent près de 87% de la totalité des constructions de la zone étudiée ont des intervalles des indices de vulnérabilité [0,4-0,6[et [0,6-0,8[;
- **La zone 4 :** le Boulevard Houari Boumédiène, cité Aissa Boukerma : 387 bâtiments représentent plus de 95% de la totalité des constructions de la zone étudiée ont des intervalles des indices de vulnérabilité [0,2-0,4[et [0,4-0,6[;
- **La zone 5 :** les îlots : Briquèterie, Msîouene, Zef Zaf et Bouabaz : 618 bâtiments représentent près de 83% de la totalité des constructions de la zone étudiée ont un intervalle de l'indice de vulnérabilité [0,2-0,4[.



Figure 3.11: Distribution de l'indice de vulnérabilité par bâtiment.

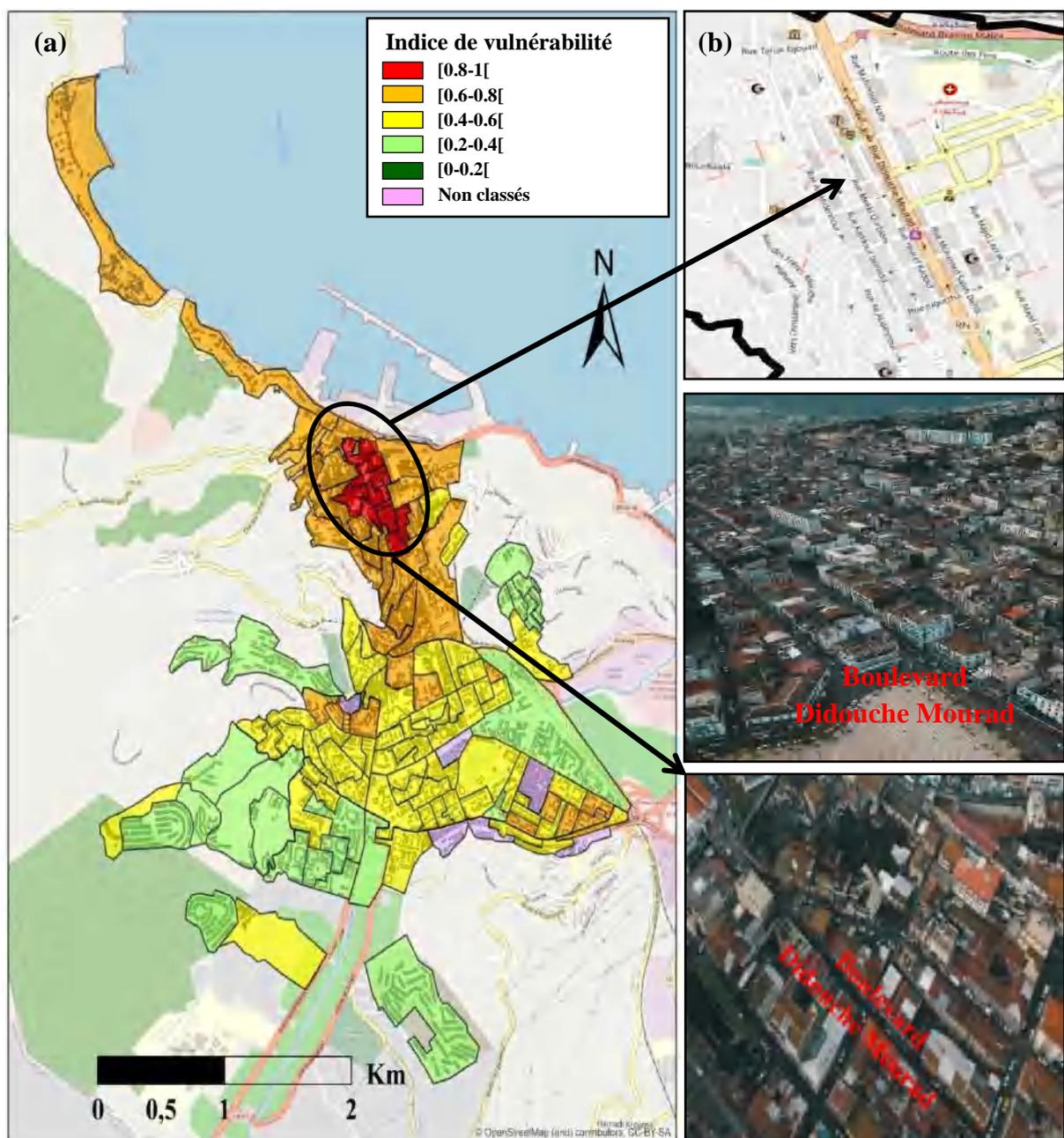
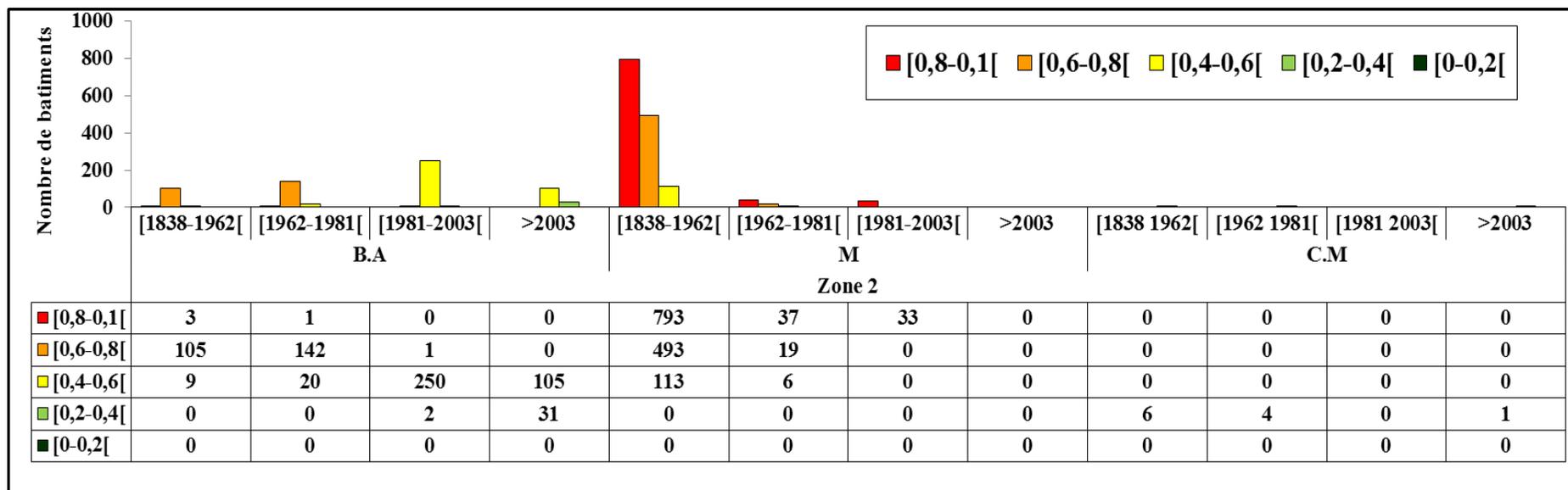
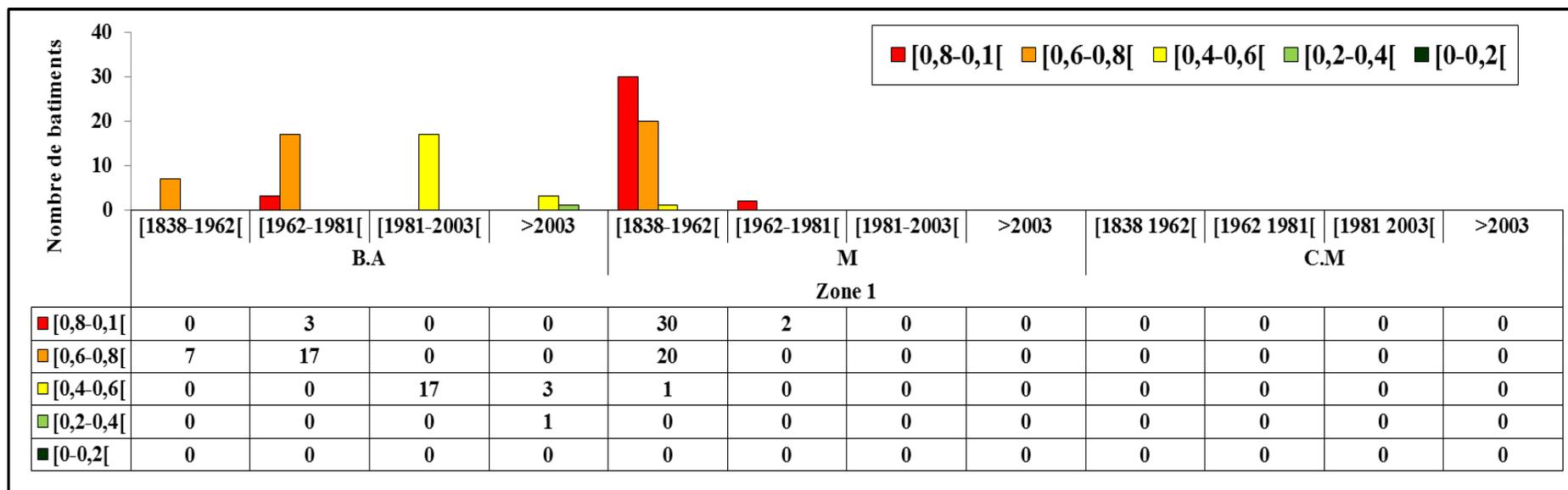
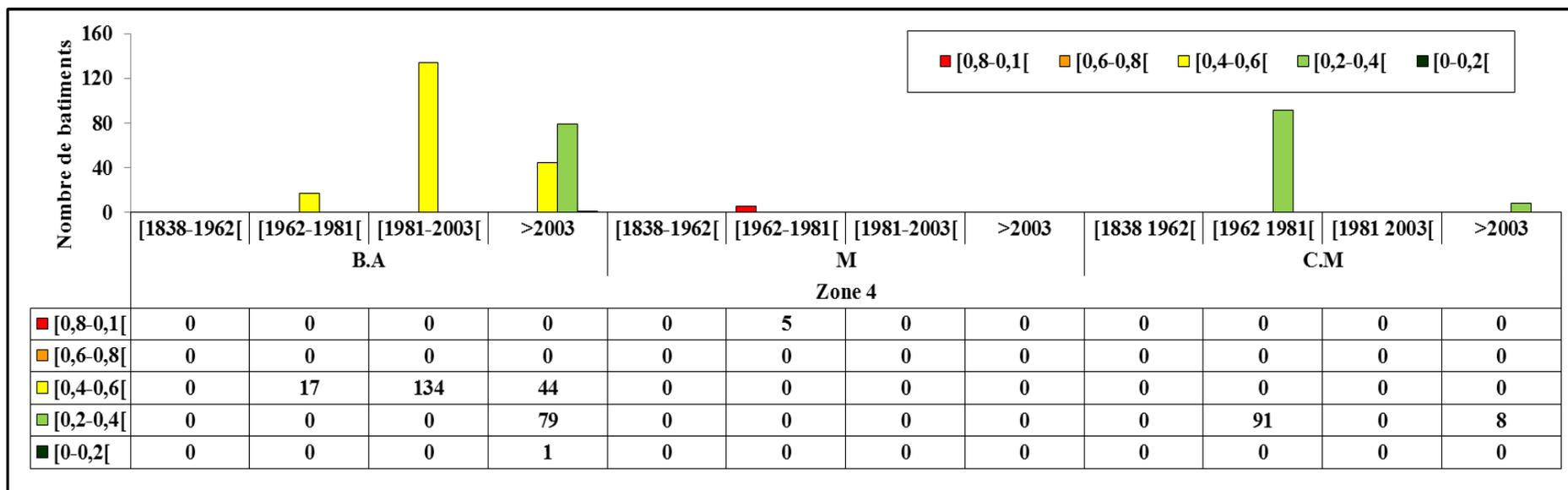
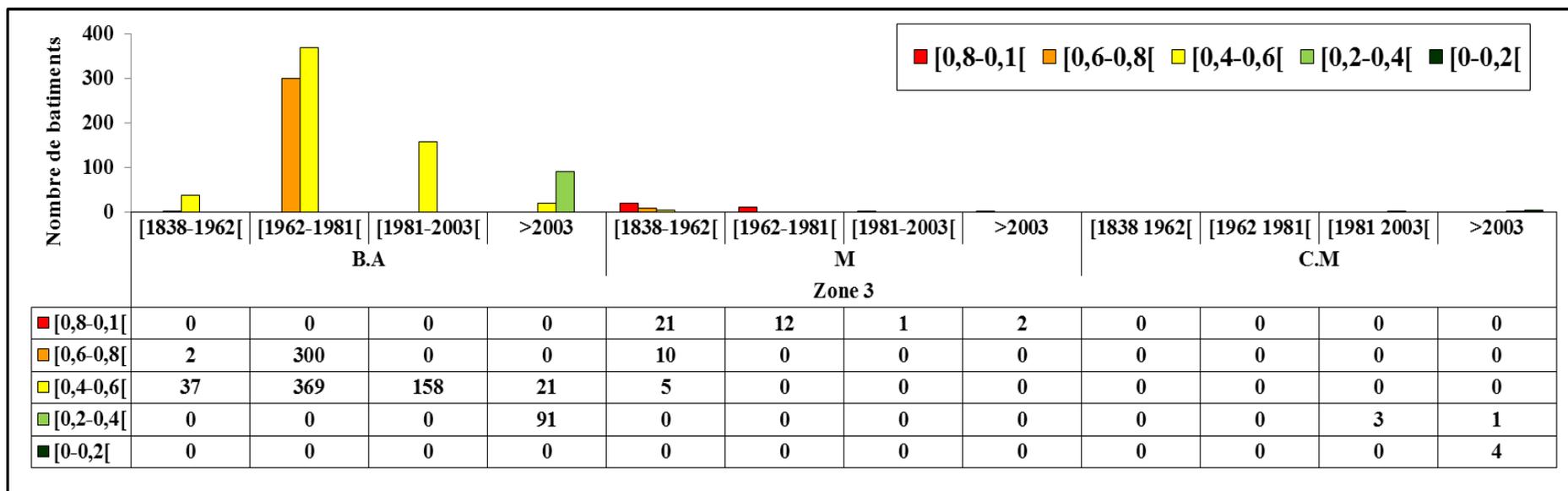


Figure 3.12: a). Distribution de l'indice de vulnérabilité par îlot ; b). Images sur le boulevard Didouche Mourad.





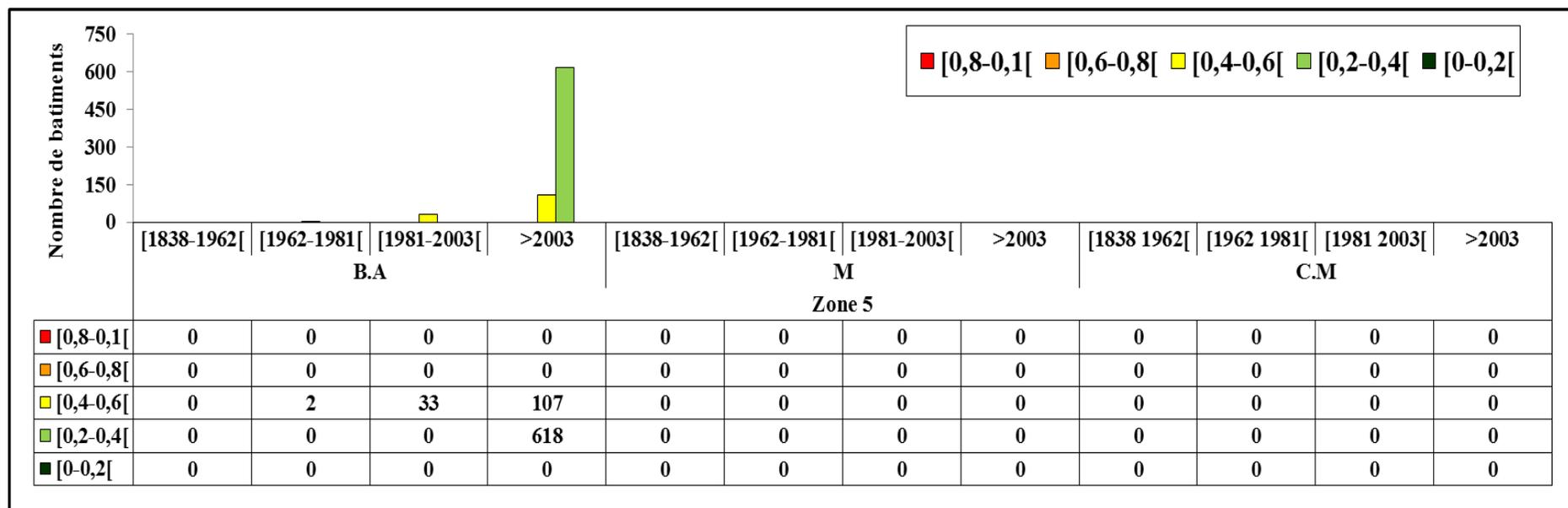


Figure 3.13 : Histogrammes de la distribution de l'indice de la vulnérabilité par la méthode Risk-UE LM1 selon les matériaux de construction et l'époque de la construction
(B.A : Béton Armé ; M : Maçonnerie ; C.M : Construction Métallique).

La comparaison entre les différentes zones donne une première idée sur la distribution de la vulnérabilité dans la ville de Skikda, on constate que :

- **Les zones 1 et 2**, sont les plus vulnérables (degré de vulnérabilité élevé et très élevé) avec plus de 57% ; près de 71% des bâtiments ont été construits dans la période coloniale (1938-1962). La majorité des constructions en maçonnerie non chaînée qui représentent 51% (soit 51 bâtiments) ; plus de 63% (soit 1374 bâtiments) et des constructions en béton armé ont un niveau de réglementation parasismique bas 7% (soit 7 bâtiments) ; plus de 5% (117 bâtis), respectivement. On remarque aussi que les quartiers les plus anciens de la ville (Boulevard Didouche Mourad) sont les plus vulnérables (degré de vulnérabilité très élevé), où la majorité des constructions sont en maçonnerie ;
- **Dans la zone 3**, la majorité des bâtiments ont été construits entre 1962 et 1981, constitués presque entièrement de bâtiments en béton armé (structures poteaux-poutres et panneaux préfabriqués en béton armé), ont un niveau de réglementation parasismique bas et ont un degré de vulnérabilité moyen ;
- **La zone 4**, la majorité des bâtiments ont été construits entre 1982 et après 2003, constitués de bâtiments en béton armé (structures poteaux-poutres, structures mixtes et murs préfabriqués en béton armé), ont un niveau de réglementation parasismique moyen et caractérisé par un degré de vulnérabilité moyenne et faible, les bâtiments en construction métallique (de type portiques + remplissage en maçonnerie non armée) ont un degré de vulnérabilité faible ;
- **La zone 5**, près de 95% des bâtiments cette zone ont été construits après 2003 avec un système mixte en béton armé, ont un niveau de réglementation parasismique haut, la zone a un degré de vulnérabilité faible.

Selon les résultats du paragraphe précédent, le tableau 3.3 résume les estimations des indices de vulnérabilité moyens pour différentes zones ont des valeurs comprises entre 0,307 et 0,739.

Tableau 3.3 : Indices de vulnérabilité moyens pour différentes zones.

zones	Nombre de bâtiments inspectés	Indices de vulnérabilité moyens	Degré de vulnérabilité
1	101	0,725	Elevé
2	2176	0,739	Elevé
3	1038	0,545	Moyen
4	379	0,414	Moyen
5	760	0,307	Faible

3.4 Scénarios sismiques pour l'estimation des dommages

Il est possible de connaître et de donner une idée sur la qualité sismique d'une construction à partir du calcul de l'indice de vulnérabilité, mais du point de vue sismique, l'indice de vulnérabilité n'est pas un critère suffisant pour caractériser un bâtiment. Effectivement, il nous sert seulement pour le calcul du niveau de dommage pour un scénario sismique donné.

La simulation de scénarios sismiques, dans cette étude, est basée sur l'étude de micro-zonage sismique de la ville. Les scénarios ont été définis en termes d'intensité macrosismique selon différents scénarios : un scénario déterministe d'intensité VII qui a affecté la ville et des scénarios probabilistes des intensités : VII-VIII, VIII et VIII-IX, qui correspondent à des périodes de retours de 100 ans, 200 et 500 ans respectivement. Sachant que Skikda est classée comme une zone à sismicité modérée.

3.4.1 Distribution des dommages moyens

L'estimation des dommages est présentée sous forme de scénarios de dommages pour les intensités sismiques entre VII à VIII-IX, est effectuée à l'aide de la méthode européenne Risk-UE LM1 qui permet d'attribuer le dommage moyen (μ_D) soumis à une intensité macrosismique donnée et l'indice de vulnérabilité calculé (IV) et la ductilité équivalente du bâtiment (Q) qui est fixée à une valeur de $Q = 2,3$ d'après la formule analytique (2.5 chapitre précédent).

La figure 3.14, présente les scénarios sismiques sur la base de l'étude micro-zonage pour l'évaluation de la distribution de dommage moyen qui varie entre 0 (aucun dommage) à 5 (dommages graves ou destruction). Les résultats de variation de dommages moyens, selon différents scénarios sismiques, sont représentés dans le tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : Récapitulatif des résultats de variation des dommages moyens selon des scénarios déterministe et probabilistes.

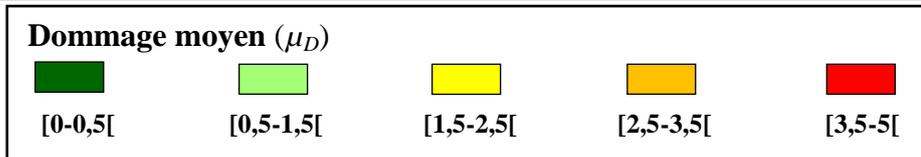
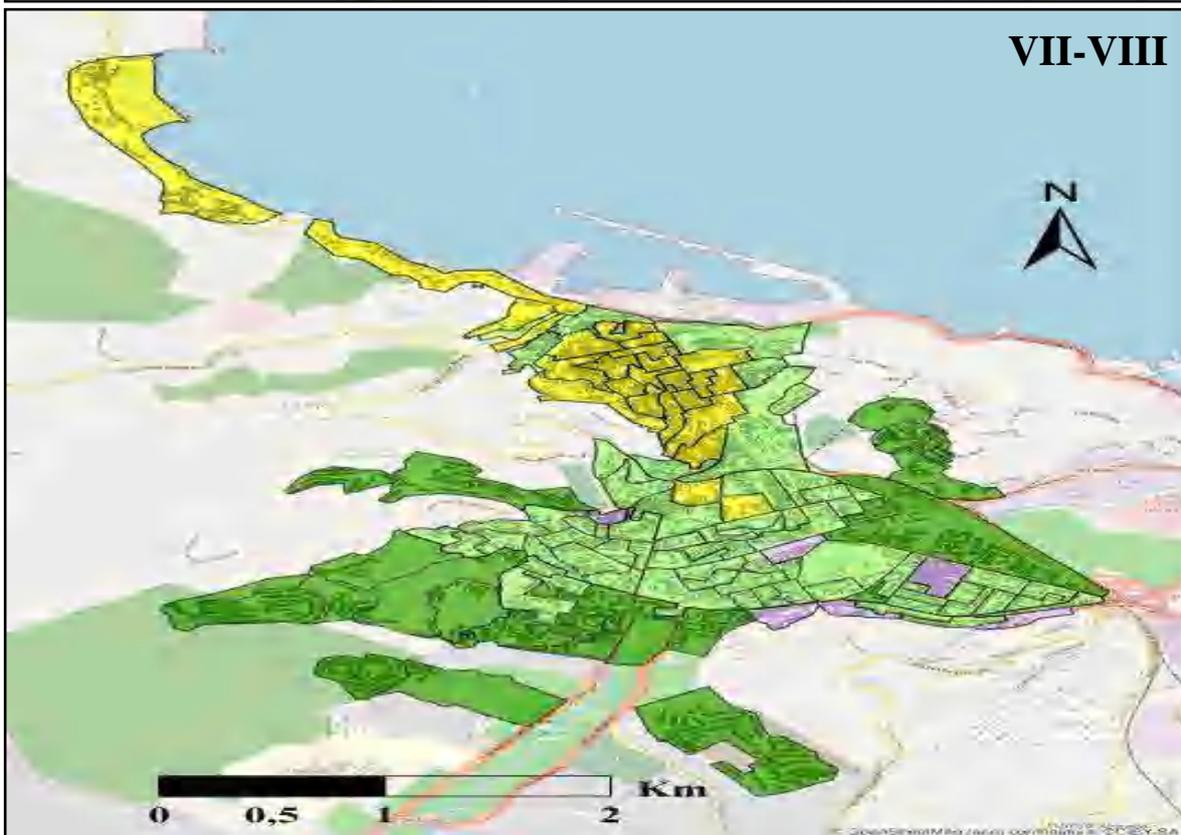
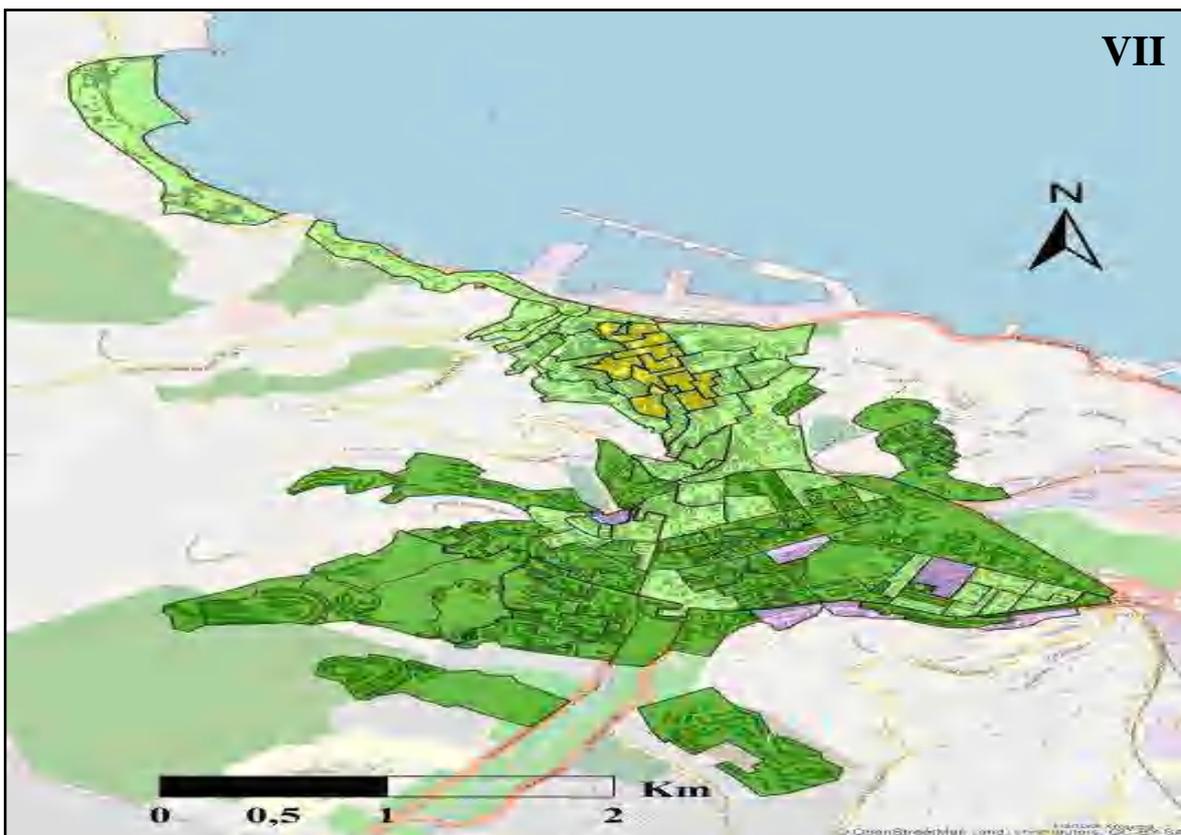
Types de scénarios sismiques	Degré d'intensité sismique	Variation de dommages moyens
Scénario déterministe	VII	0,067 à 2,663
	VII-VIII	0,112 à 3,247
Scénarios probabilistes	VIII	0,171 à 3,735
	VIII-IX	0,307 à 4,225

Comme le montre dans les histogrammes de la figure 3.15, concernant l'intensité VII qui a affecté la ville, les états de dommages attendus vont D0, D1 et D2 ($0 \leq \mu_D < 1,5$), où aucun dommage et dommage léger sont attendus pour environ 53% et 29% des bâtiments, respectivement, seulement 11% et 8% des bâtiments analysés ont subis des degrés de dommage de D3 et D4, respectivement. Pour le pire scénario probabiliste d'un séisme d'intensité VIII-IX, la grande majorité des bâtiments en maçonnerie et des bâtiments en béton armé avec un niveau de réglementation parasismique bas ont des degrés de dommage moyen compris entre D3, D4 et D5 ($1,5 < \mu_D \leq 5$), où destruction partielle et destruction complète sont attendus pour environ 22%, 16% et 19% des bâtiments, respectivement. Le tableau 3.5 présente l'intervalle des degrés de dommages moyens et l'état de dommages correspondants.

Tableau 3.5 : Degrés de dommages moyens et états de dommages de l'EMS-98 correspondants.

Intervalle des degrés de dommages moyens	États de dommages	Niveau de dommage
0-0,5	Aucune	D0, D1
0,5-1,5	Légère	D2
1,5-2,5	Modéré	D3
2,5-3,5	Sévère	D4
3,5-5	Complet	D5

D'après les différents scénarios sismiques, les zones 1 et 2 sont les plus sensibles aux agressions sismiques.



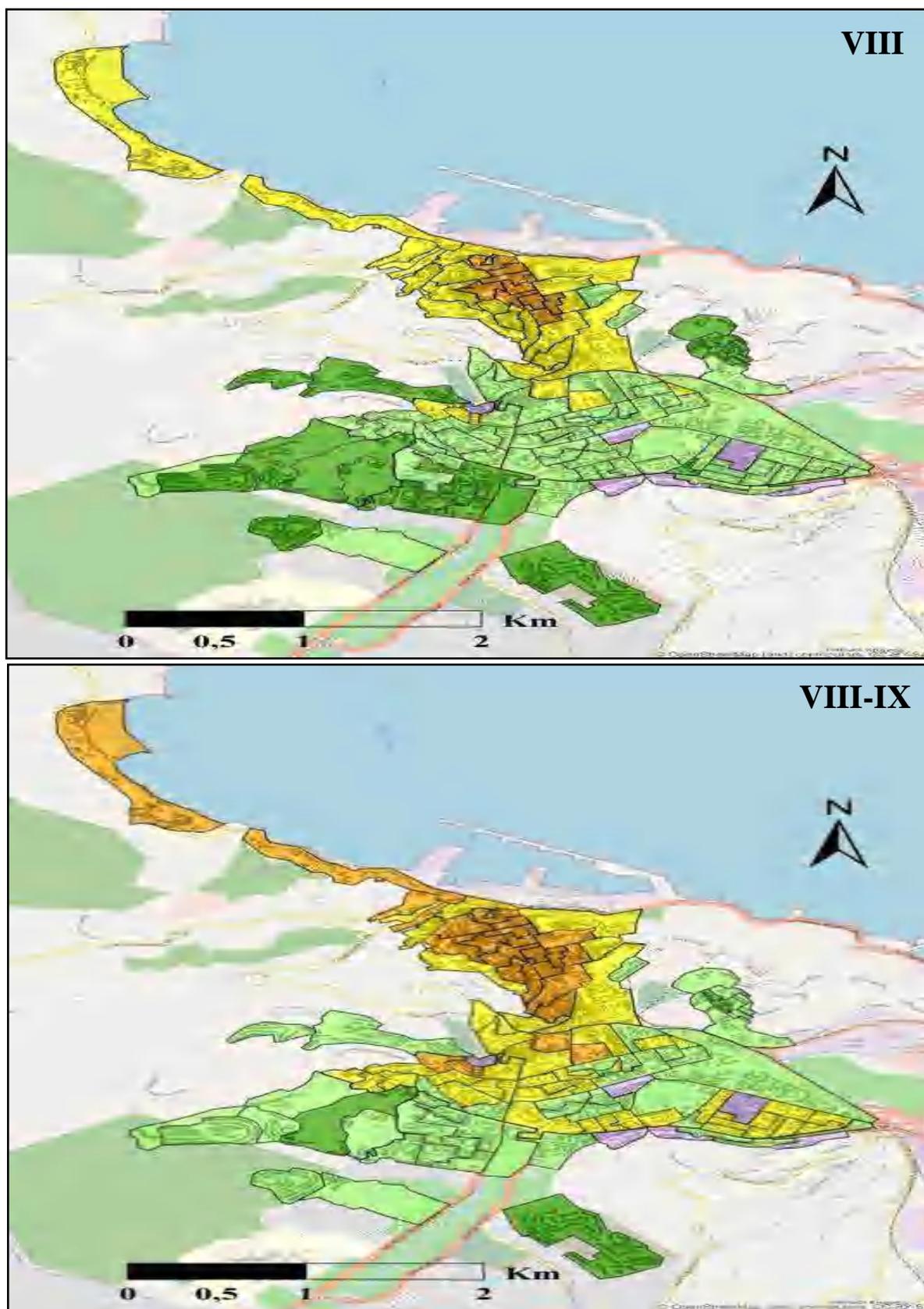


Figure 3.14 : Distribution spatiale des dommages moyens pour différents scénarios sismiques (scénarios déterministe et probabilistes).

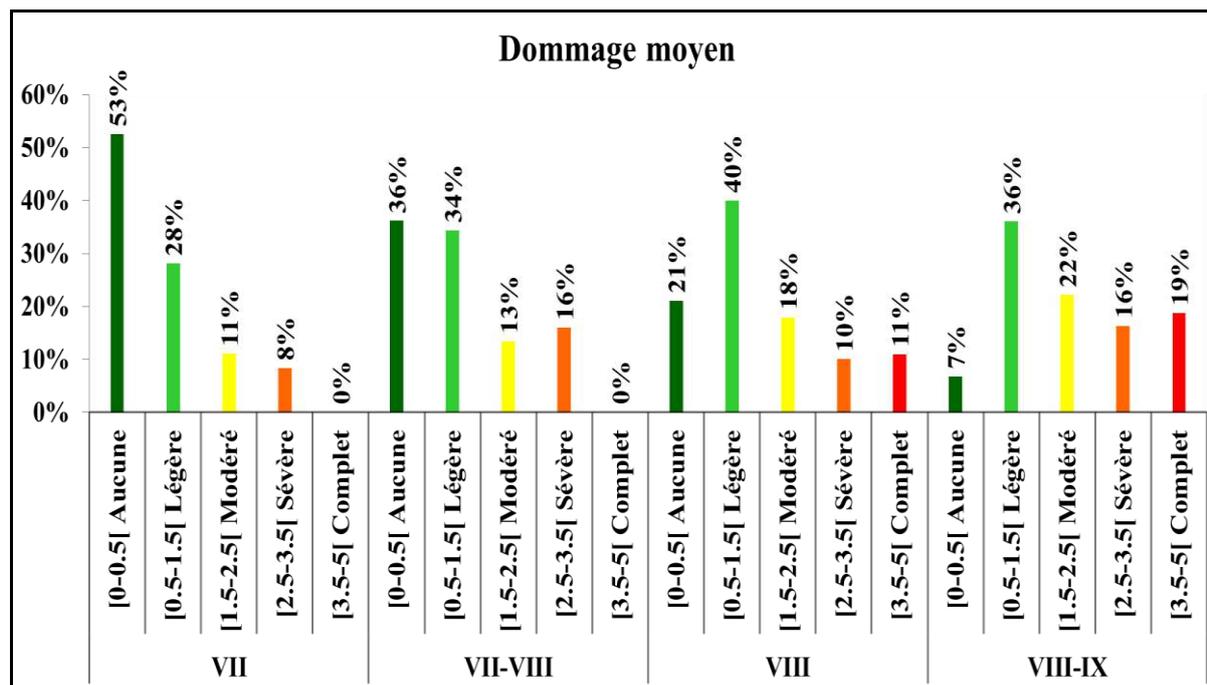


Figure 3.15 : Histogramme de la distribution de dommages moyens pour différents scénarios sismiques donné par l'étude de micro-zonage (les scénarios déterministe et probabilistes).

3.4.2 Probabilité des dommages

À partir des valeurs moyennes des degrés de dommage (μ_D), il est possible de définir différents histogrammes de distribution des dommages pour divers événements d'intensité sismiques et leurs valeurs respectives de l'indice de vulnérabilité, se basant sur une approche probabiliste (Shakya et al. 2014). L'idée est de compléter le modèle EMS-98 en introduisant une distribution de probabilité discrète appropriée du degré de dommage. La méthode la plus couramment utilisée est basée sur la fonction de masse de probabilité binomiale proposée par Lagomarsino et Giovinazzi (2006) selon l'équation (2.6) présentée dans le chapitre 2.

Les résultats sont représentés sous format SIG pour permettre de visualiser la répartition spatiale des pertes physiques pour chaque intensité de séisme (chaque scénario), ils sont illustrés à la figure 3.16 qui montre le nombre de constructions subissant un certain niveau de degré de dommages. On a adopté cette classification de dommage pour avoir la même classification utilisée par les organismes de contrôle (CTC et CGS) dont les travaux d'expertise post-sismiques en Algérie où les degrés de dommages représentent en trois couleurs ; vert (dommage léger), orange (dommage modéré) et rouge (dommage sévère) correspondant aux dommages [D0+D1], [D2+D3] et [D4+D5] estimées par la méthode Risk-UE LM1 respectivement.

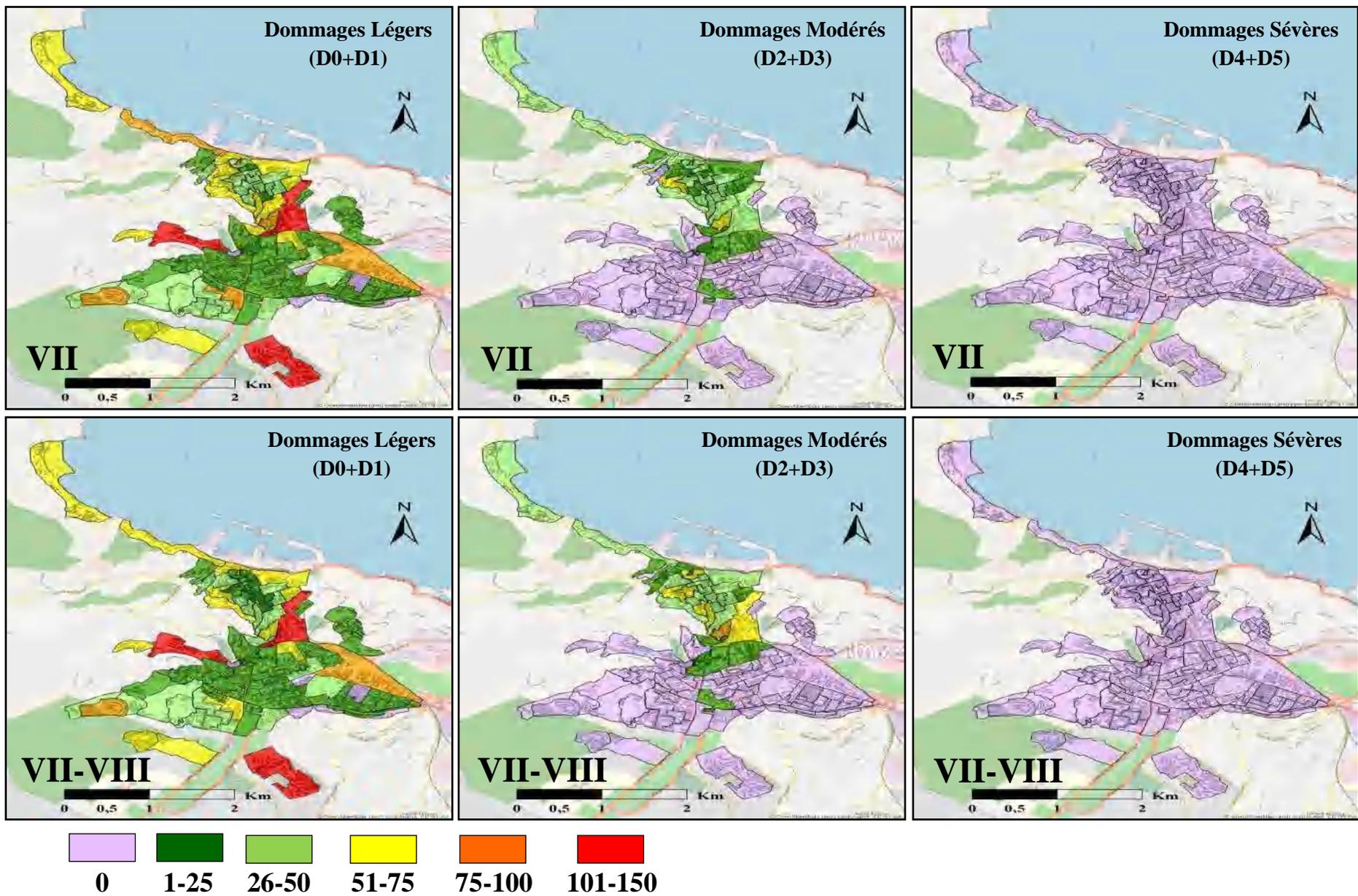
La lecture du tableau 3.6, permet d'estimer pour chaque intensité de séisme quels seront les dommages aux constructions en termes de nombre de constructions, soit en trois degrés de dommage (légers, modérés sévères). Pour les différents scénarios sismiques déterministe et probabilistes (VII, VII-VIII, VIII et VIII-IX), on prévoit à ce que :

- Pour un séisme comparable à celui du 1985 d'intensité VII (scénario déterministe), le degré de dommage montre que près de 81% des bâtiments de la zone étudiée subissent des dommages légers [D0+ D1], tandis qu'environ 19% des bâtiments subissent des dommages modérés [D2+D3], mais sans aucun dommage sévère [D4+D5] ;
- Pour le pire scénario probabiliste (I= VIII-IX), 50% des bâtiments subissent des dommages légers [D0+ D1], tandis qu'environ 31% des bâtiments subissent des dommages modérés [D2+D3], et plus de 19% des bâtiments subissent des dommages sévères [D4+D5] (habituellement considéré comme des constructions à démolir).

Tableau 3.6 : Distribution des classes de dommages estimées à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques Degré d'intensité macrosismique		Scénario déterministe		Scénarios probabilistes					
		VII		VII-VIII		VIII		VIII-IX	
Classe de dommage		Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
D0+D1	léger	3625	81%	3281	74%	2802	63%	2222	50%
D2+D3	modéré	829	19%	1173	26%	1102	25%	1384	31%
D4+D5	sévère	0	0%	0	0%	550	12%	848	19%

Les résultats indiquent que le pourcentage des constructions classées dans la catégorie de dommage sévère [D4+D5], continue d'augmenter au fur et à mesure de l'augmentation de l'agression sismique pour l'intensité VIII d'environ 12 % et les constructions atteignant la catégorie de dommage sévère [D4+D5] de 19 % pour l'intensité VIII-IX.



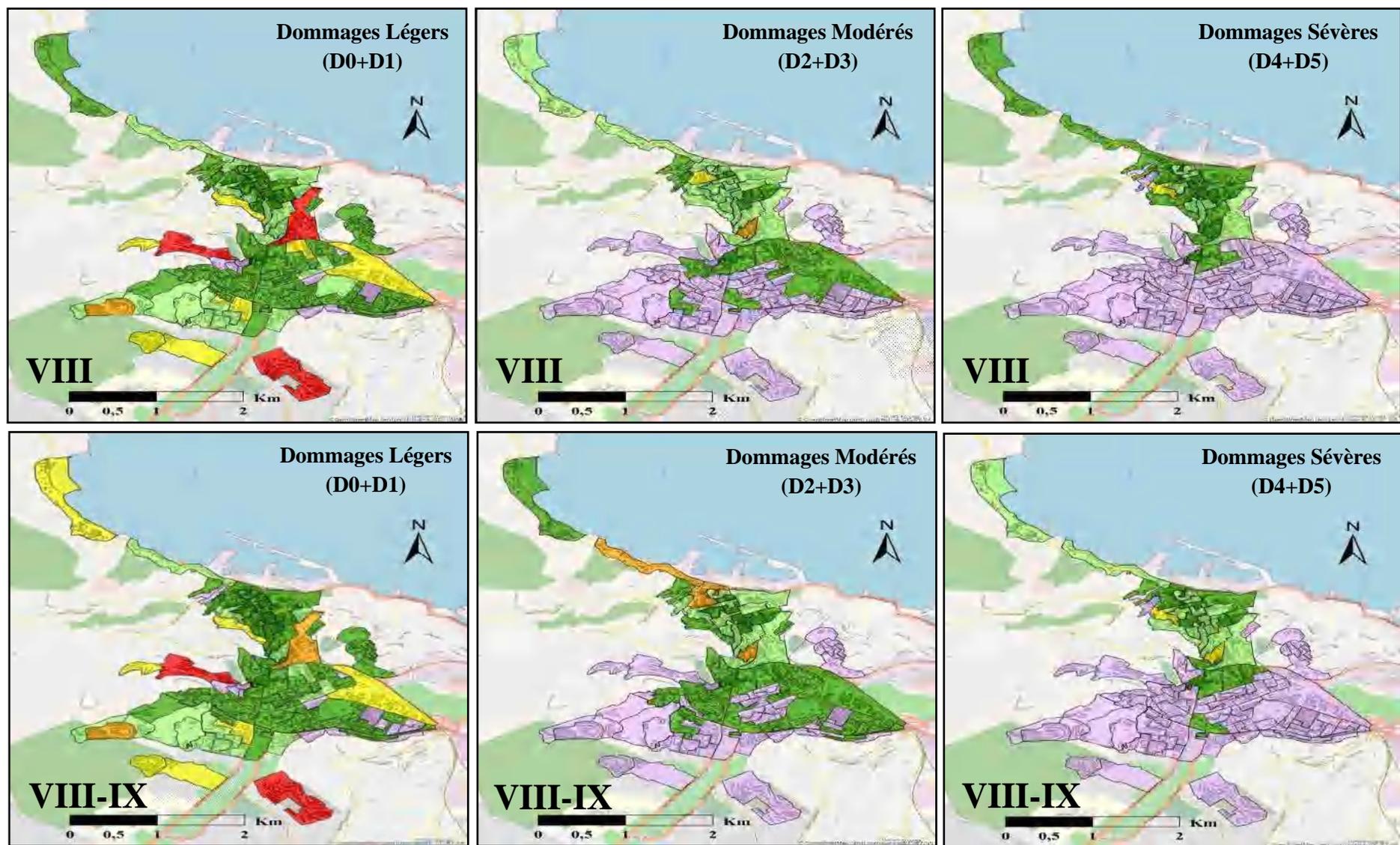


Figure 3.16 : Répartition spatiale des dommages à Skikda sur la base de l'étude de micro-zonage.

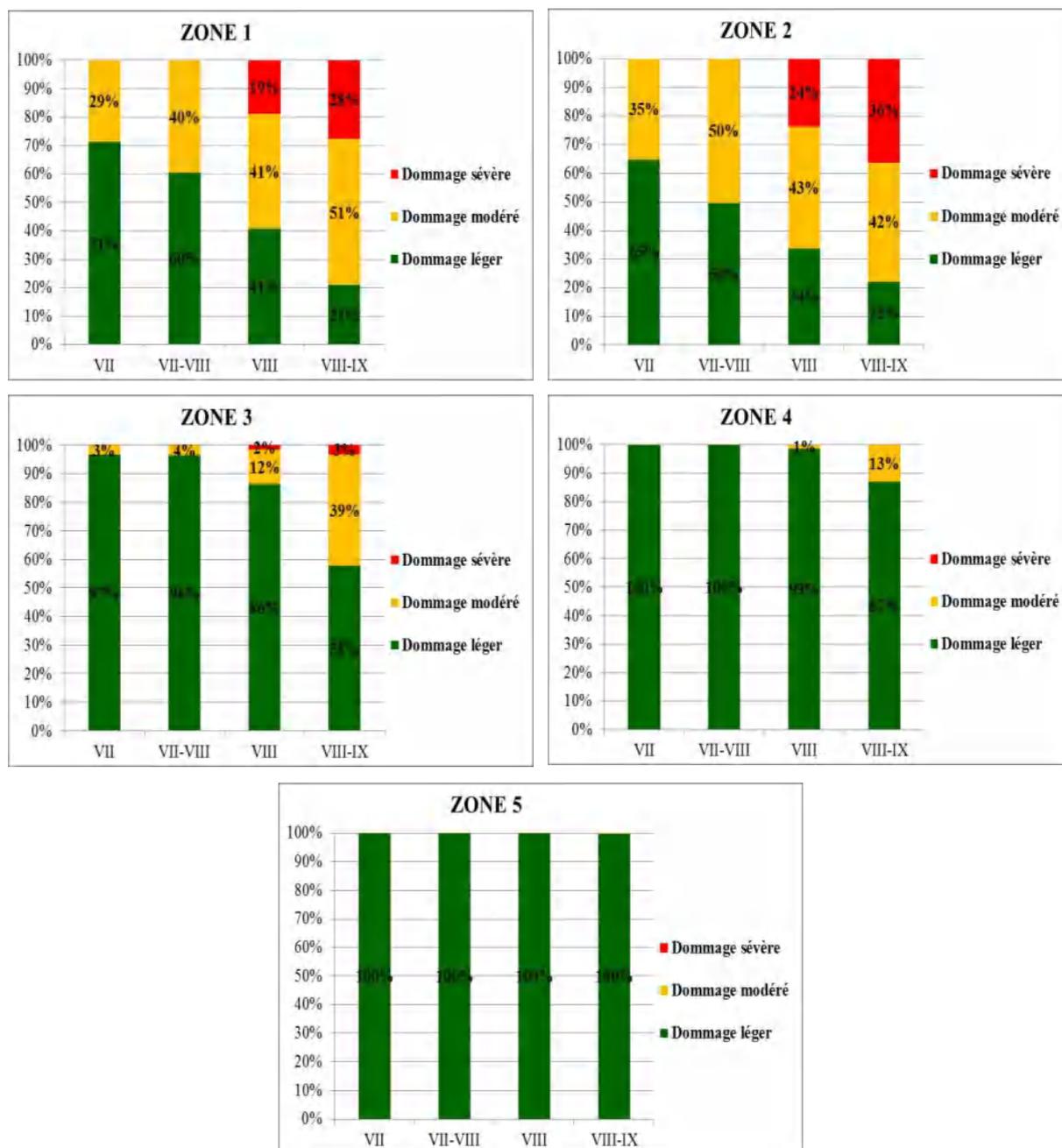


Figure 3.17 : Répartition des dommages par différentes zones, en fonction de scénarios sismiques.

La figure 3.17 représente la distribution des degrés de dommages selon les scénarios déterministe et probabilistes pour les différentes zones :

- Pour le scénario déterministe d'intensité VII, les zones 1 et 2 subissent des dommages légers et modérés ; la zone 3 subit des dommages légers fortement supérieurs au niveau de dommages modérés, avec un taux de 3% ; les autres zones 4 et 5 ne subissent que de dommages légers.

- Pour le scénario probabiliste d'intensité VII-VIII, on constate presque les mêmes résultats que le scénario déterministe d'intensité VII, mais avec une légère augmentation du pourcentage de l'ensemble des bâtiments subissant des dommages modérés pour les zones 1 et 2.
- Pour le scénario probabiliste d'intensité VIII, les zones 1 et 2 subissent trois degrés de dommages ; la zone 3 subit des dommages légers et modérés et seulement 2% du total des bâtiments de la zone subissent des dommages sévères ; sachant que les zones 4 et 5 ne subissent que des dommages légers.
- Pour le pire scénario probabiliste d'intensité VIII-IX, les zones 1 et 2 subissent un degré de dommage fortement supérieur au degré des dommages légers, soit un pourcentage de 51% et 28% des dommages modérés et sévères, respectivement pour la zone 1 et 36% et 42% des dommages modérés et sévères pour la zone 2 ; la zone 3 subit des dommages légers et modérés et seulement 3% des dommages sévères ; la zone 4, 87% des bâtiments subissent des dommages légers et 13% de dommages modérés ; la zone 5 ne subit que de dommages légers.

Les dommages les plus élevés sont concentrés principalement dans la zone touristique de Stora et la vieille ville, où se concentrent des bâtiments en maçonnerie non renforcée. Ces dommages sont également dus au vieillissement des bâtiments et à la dégradation due à l'absence d'entretien périodique.

Pour connaître les constructions ayant subi des dommages sévères [D4+ D5], selon le matériau de construction pour les différentes zones, il faut effectuer la distribution statistique des dommages sévères par type de matériau de construction de l'ensemble des bâtiments en tenant compte des différents degrés d'intensité. La figure 3.18 illustre les constructions les plus vulnérables : les bâtiments en maçonnerie qui présentent le nombre le plus élevé de dommages sévères pour les deux scénarios probabilistes d'intensité : VIII, VIII-IX. Le plus grand nombre de bâtiments ayant subi des dommages sévères font partie de la zone 2 (la vieille ville). On peut constater aussi que les zones (3, 4 et 5) où se concentrent les bâtiments en béton armé et en acier ne subissent que peu de dommages sévères, cette constatation permet de conclure que les bâtiments en béton armé et en acier, même anciens et conçus sans réglementation parasismique, possèdent une certaine résistance face au séisme.

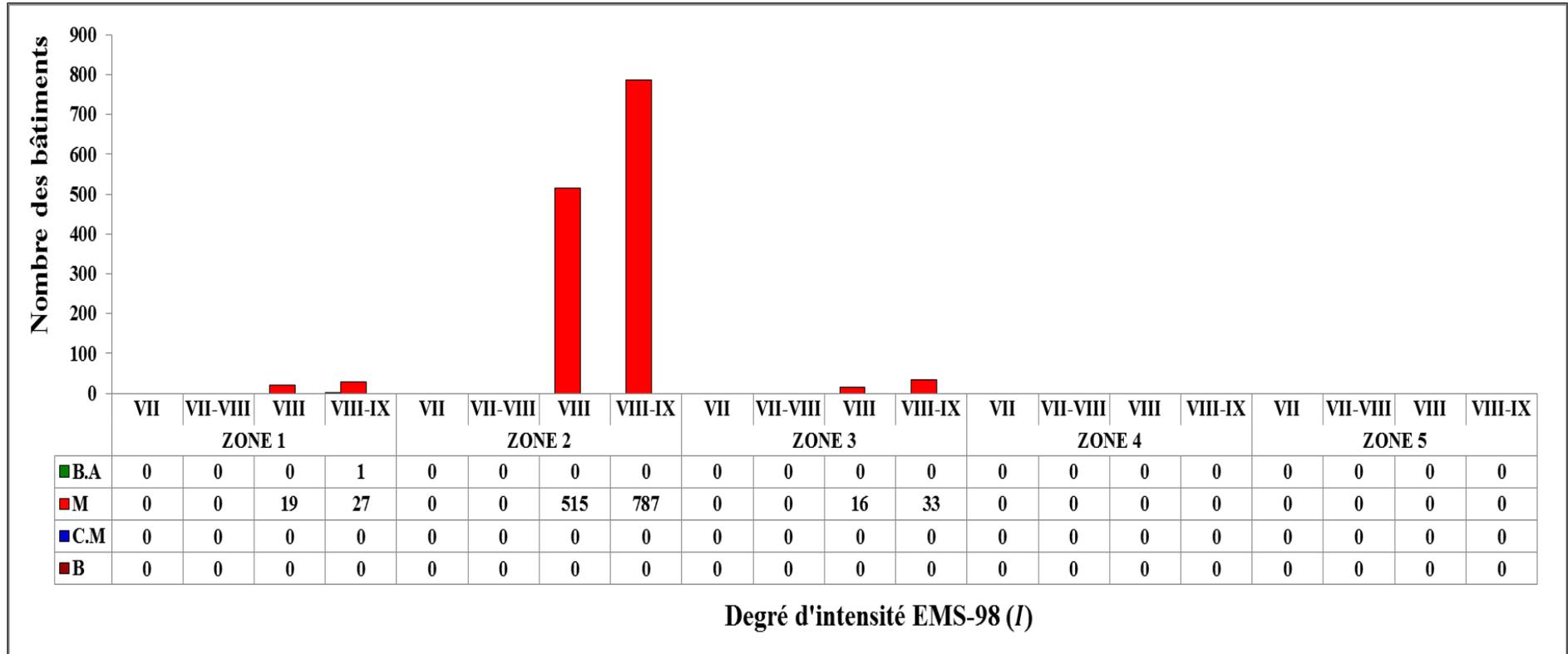


Figure 3.18 : Distribution des dommages sévères [D4+D5] par matériaux de construction pour différentes zones, en fonction de scénarios sismiques

(B.A : Béton Armé ; M : Maçonnerie ; C.M : Construction Métallique).

La figure 3.19 montre la distribution des dommages [D4+D5] calculés par Risk-UE LM1 pour les différents scénarios sismiques de la zone 2 la plus vulnérable.

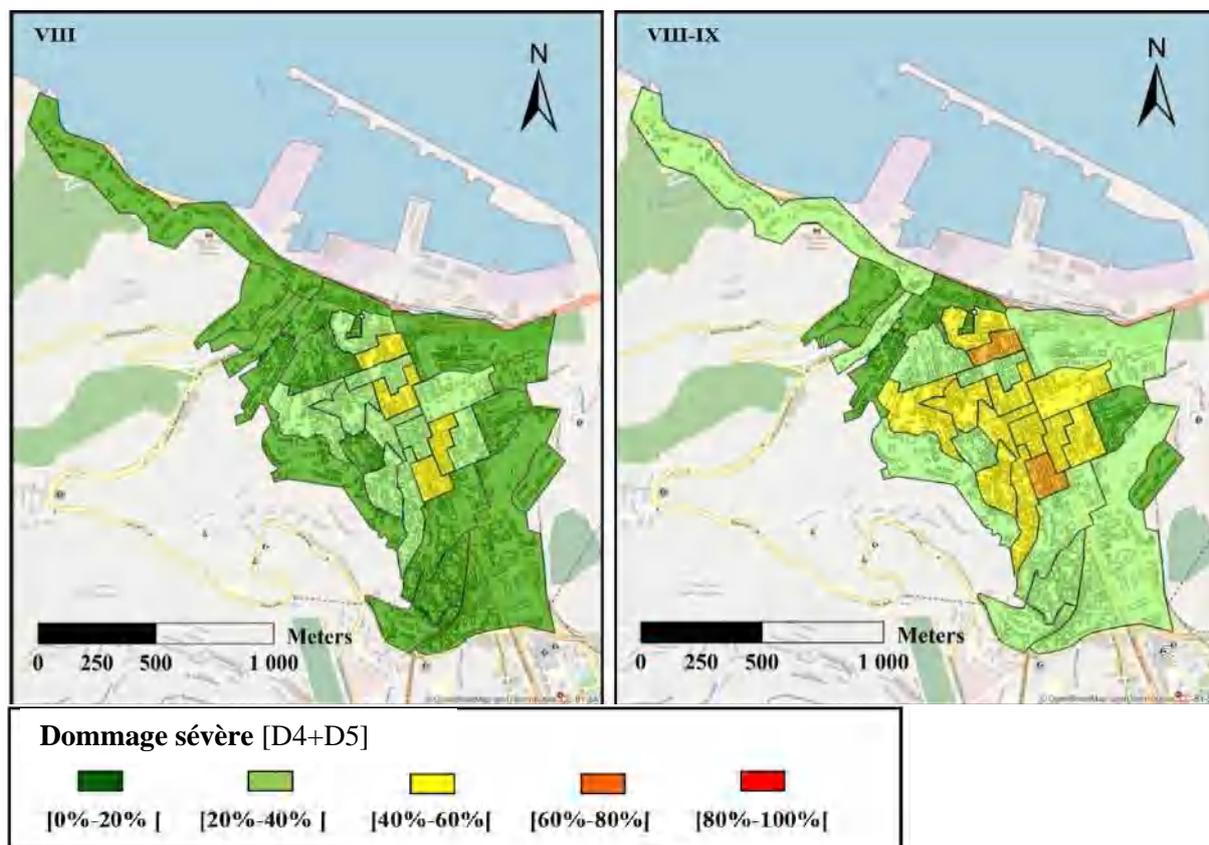


Figure 3.19 : Résultats pour deux scénarios probabilistes de dommages sismiques [D4+D5] de la zone 2.

3.4.3 Courbes de vulnérabilité moyenne

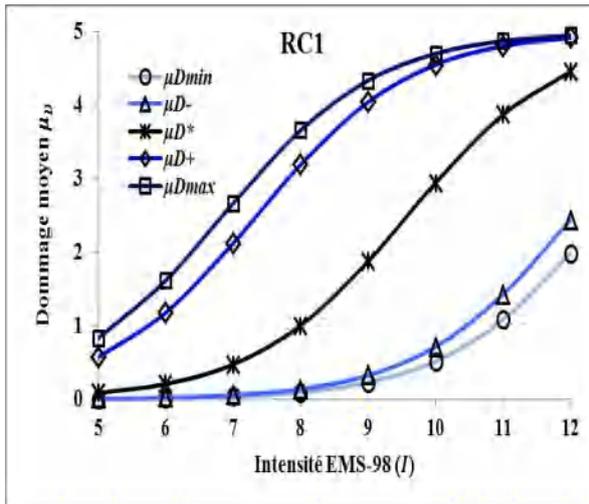
Les courbes de vulnérabilité moyenne sont une autre façon de représentation des dommages estimés par l'échelle EMS-98 (Grünthal, 1998). L'indice de vulnérabilité final pour quelques bâtiments historiques en maçonnerie, stratégiques, d'importance vitale et les centres de décision dans la gestion du risque sismique, sont utilisés pour calculer son degré de dommage moyen attendu pour différentes intensités en utilisant la fonction de vulnérabilité indiquée dans l'équation (2.5) présentée au chapitre 2. Ainsi, les courbes de vulnérabilité des bâtiments ont été calculées pour les valeurs moyennes des indices de vulnérabilité (IV^*) affectées par leur valeur d'écart-type pour calculer les bornes supérieure et inférieure probable (IV , IV^+) et les bornes extrêmes minimale et maximale (IV^{min} , IV^{max}) possibles, qui sont également donnée dans le tableau 3.7.

- Pour le bloc, médecine légale (établissement hospitalier Saad Guermech), ce bâtiment est très vulnérable ;
- Pour les logements, la mairie, la gare ferroviaire, palais de justice, la grande poste, Algérie télécom et le théâtre sont également vulnérables,
- Pour le siège de Wilaya, centre culturel Aisset Idir, bloc médecine (établissement hospitalier Abderrezak Bouhara) sont moyennement vulnérable, comme on peut le voir sur la figure 3.20.

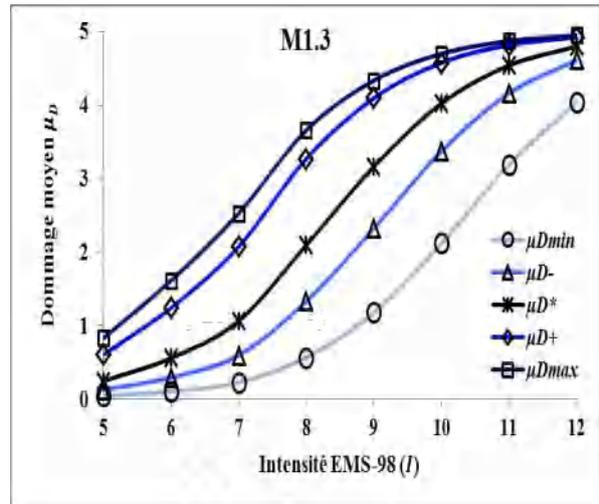
Tableau 3.7 : Valeurs de l'indice de vulnérabilité et type de typologie selon Risk-UE LM1 pour quelques typologies de bâtiments importants (M2 : Adobe (Briques de terre cuite) ; M13 : Pierres de taille ; RC1 : Structures poteaux-poutres en béton armé).

Types de construction	Typologie Risk-UE LM1	Indices de vulnérabilité				
		IV^{min}	IV	IV^*	IV^+	IV^{max}
a) Siege de la wilaya	RC1	0,100	0,167	0,562	0,920	1,000
b) La mairie	M13	0,440	0,630	0,756	0,933	1,000
c) La grande poste et Algérie télécom	RC1	0,300	0,367	0,762	1,000	1,000
d) Centre culturel Aisset Idir	M13	0,260	0,450	0,576	0,753	0,820
e) La gare ferroviaire	RC1	0,300	0,367	0,762	1,000	1,000
f) Théâtre	M2	0,540	0,607	0,760	0,900	0,940
g) Palais de justice	M2	0,540	0,607	0,760	0,900	0,940
h) Administration et bloc médecine légale (EPH Saad Guermech)	M2	0,580	0,647	0,800	0,940	0,980
i) Etablissement hospitalier Abderrezak Bouhara	RC1	0,100	0,167	0,562	0,920	1,000
j) 38 logements	RC1	0,280	0,347	0,742	1,000	1,000

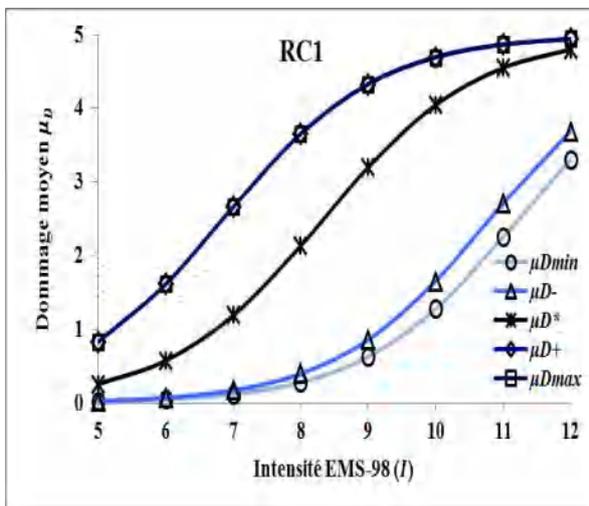
(a) Siege de de la wilaya



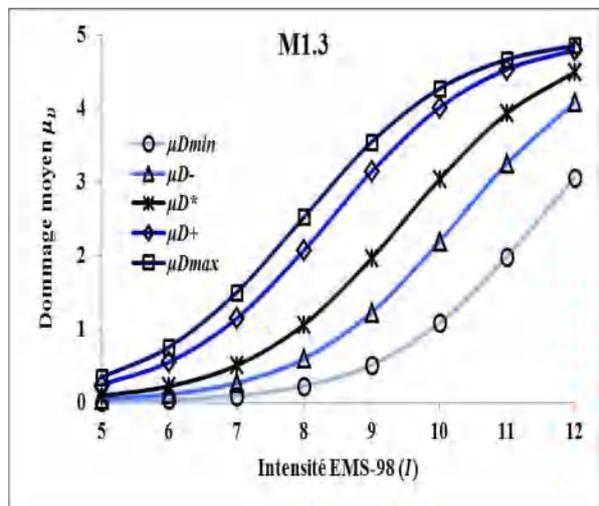
(b) La mairie



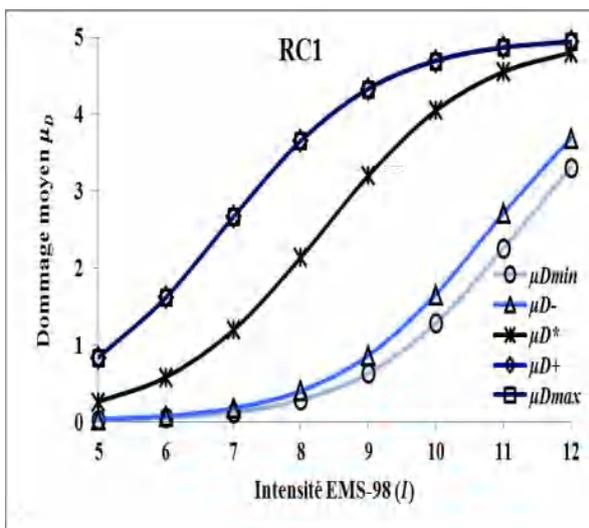
(c) La grande poste et Algérie télécom



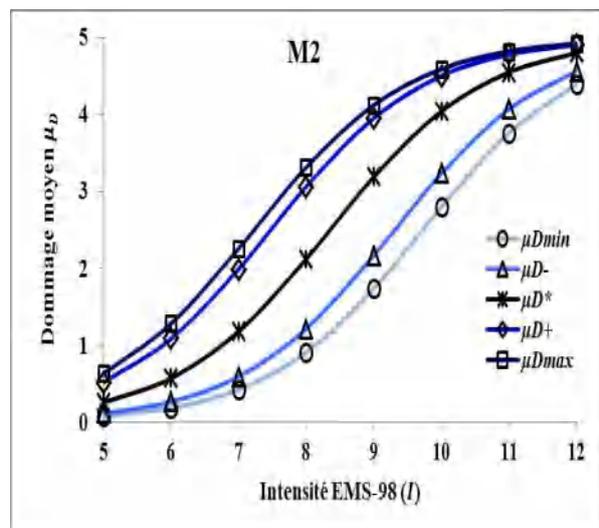
(d) Centre culturel Aisset Idir



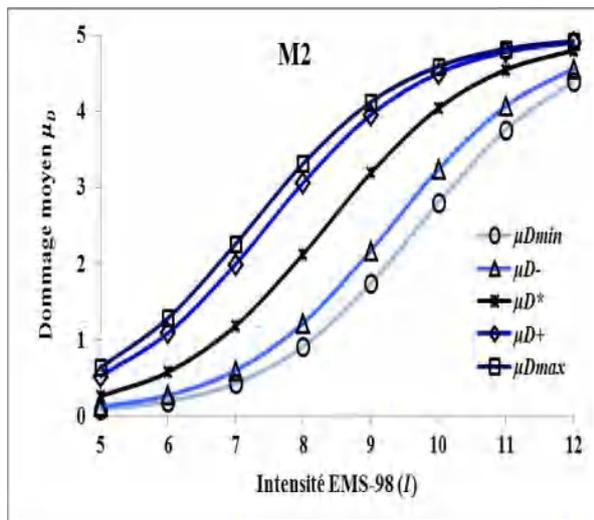
(e) La gare ferroviaire



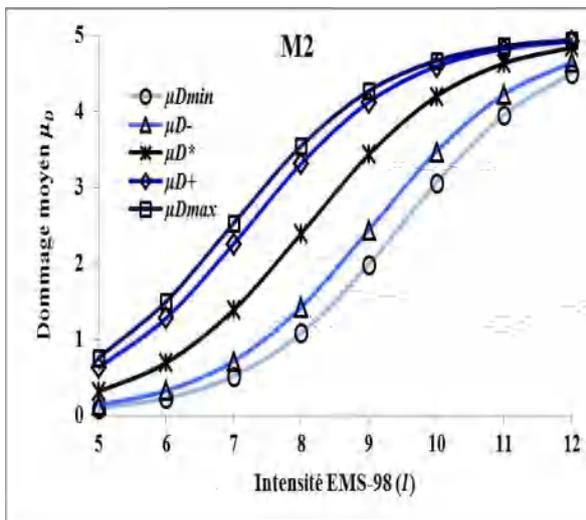
(f) Théâtre



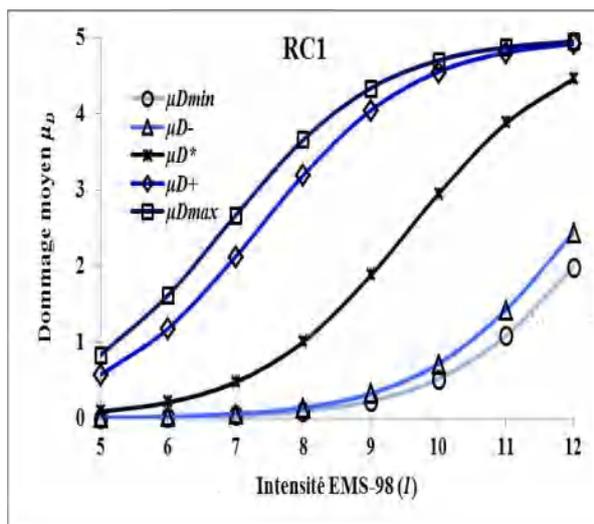
(g) Palais de justice



(h) Bloc médecine légale (EPH Saad Guermech)



(i) Etablissement hospitalier Abderrezak Bouhara



(j) 38 logements

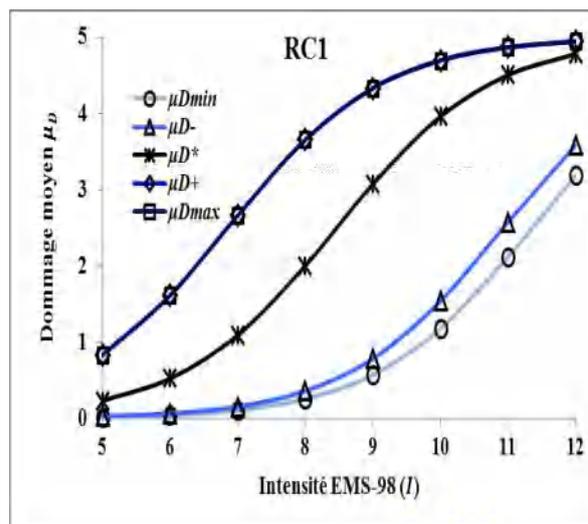


Figure 3.20 : Courbes de vulnérabilité pour différents types bâtiments selon l'intensité sismique.

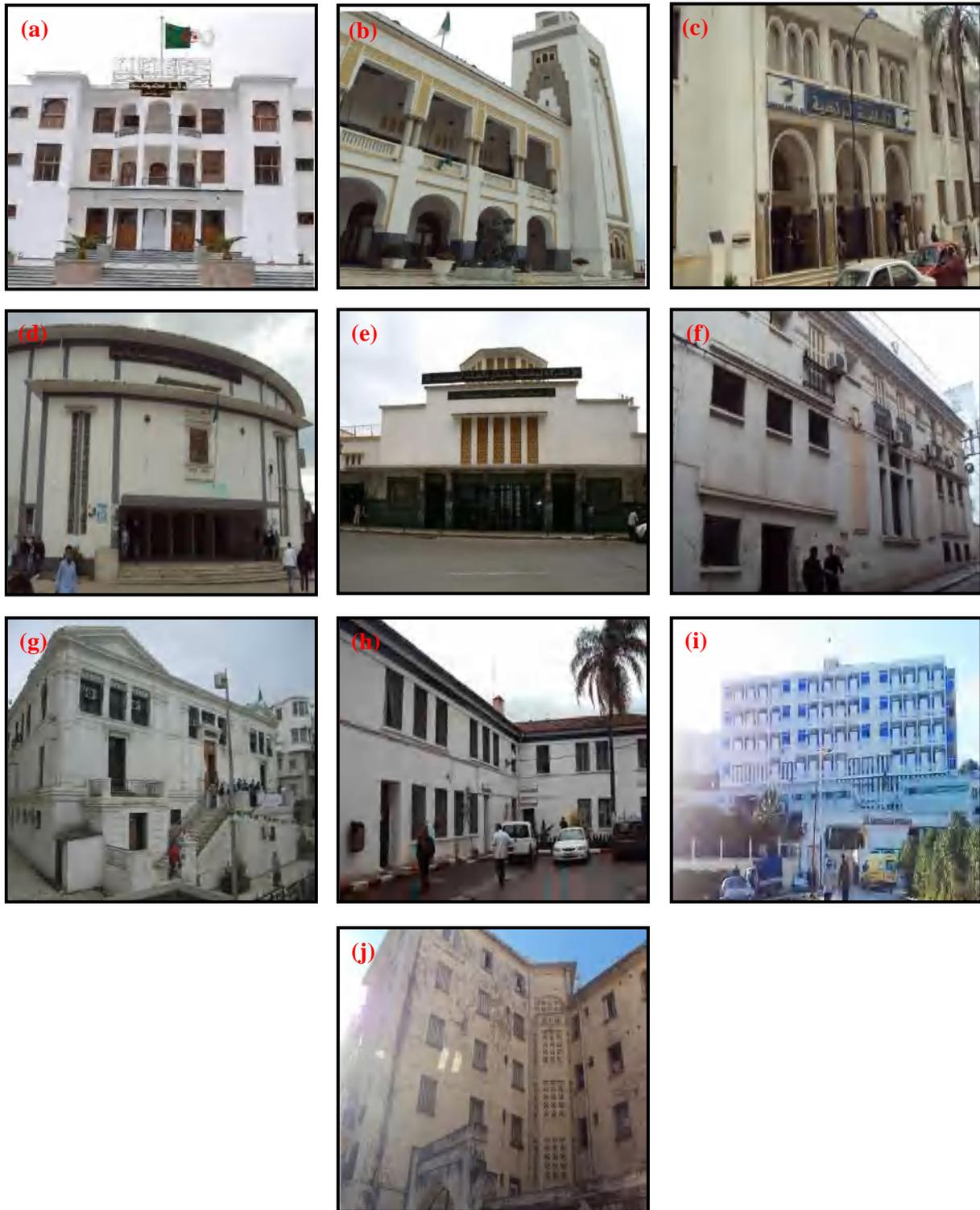


Figure 3. 21 : Photo des façades de quelques bâtiments importants : a) Siège de wilaya, b) la mairie, c) la grande poste et Algérie télécom, d) centre culturel Aisset Idir, e) la gare ferroviaire, f) théâtre, g) palais de justice, h) administration et bloc médecine légale (EPH Saad Guermech), i) établissement hospitalier Abderrezak Bouhara et j) 38 logements.

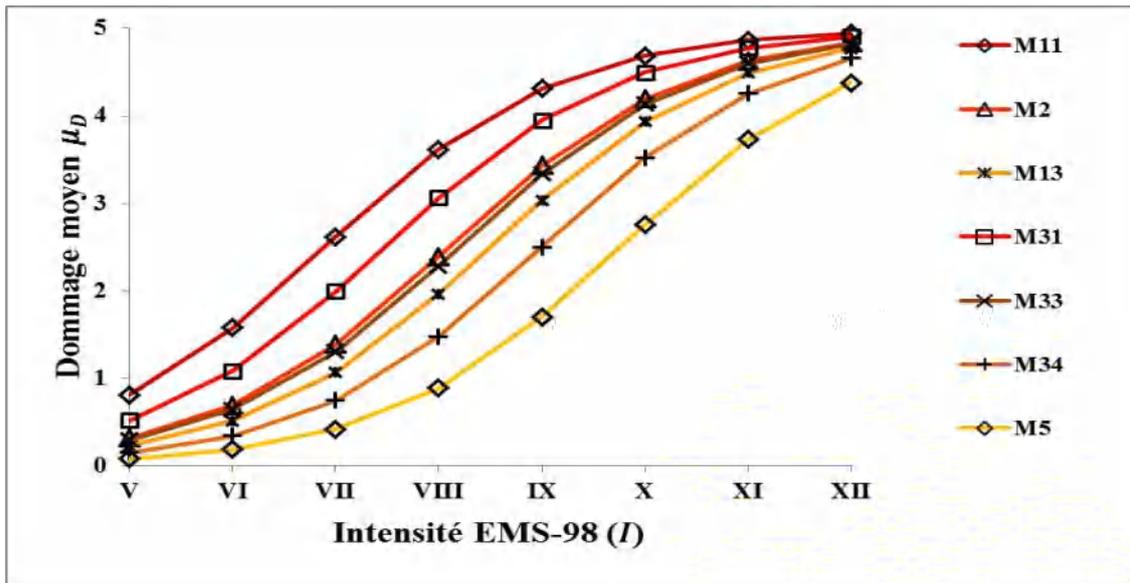


Figure 3.22 : Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en maçonnerie.

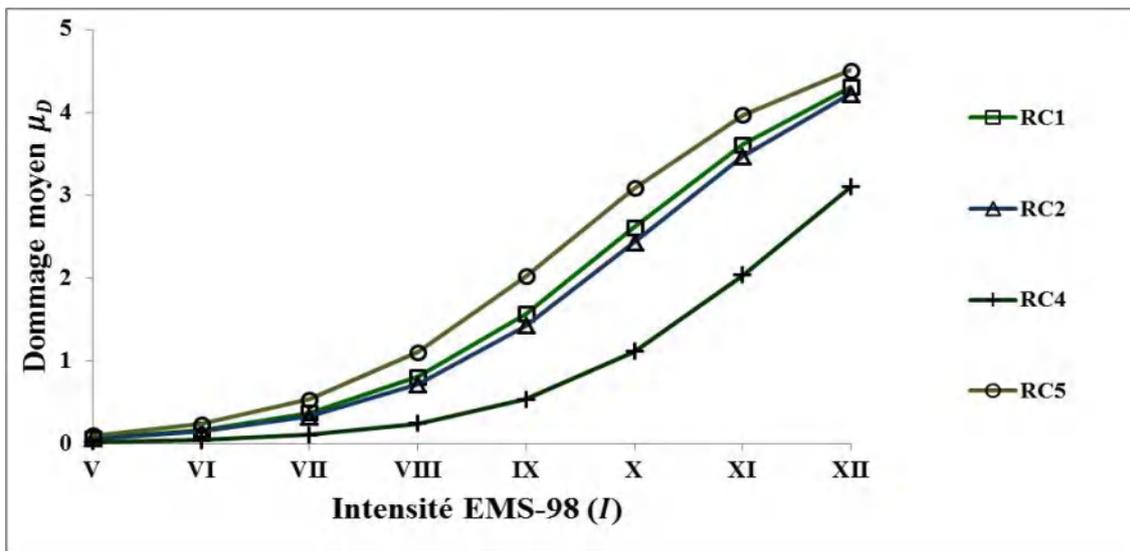


Figure 3.23 : Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé.

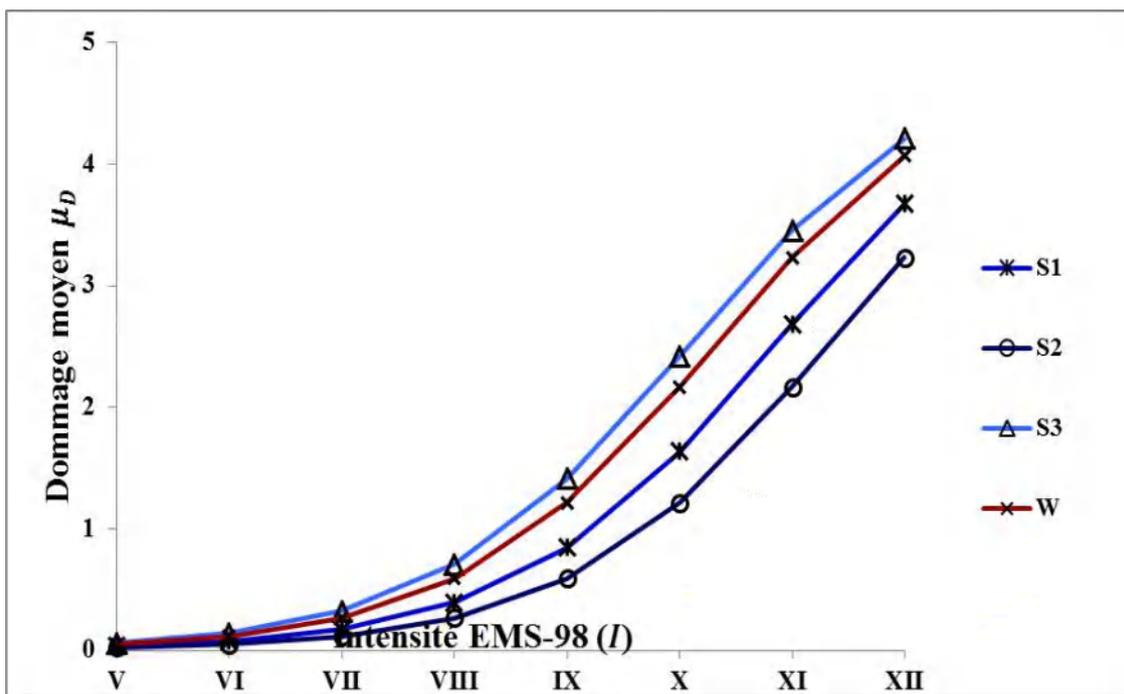


Figure 3.24 : Courbes de vulnérabilité pour les bâtiments en acier et en bois.

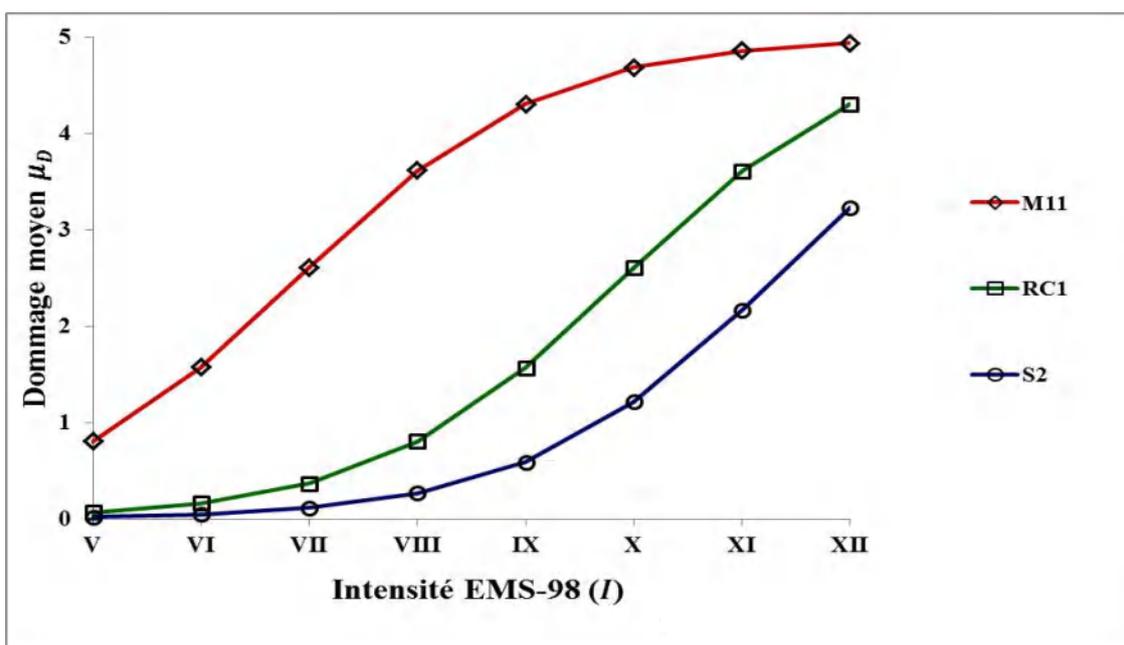


Figure 3.25 : Courbes de vulnérabilité pour trois types de typologies (maçonnerie, béton armé et acier).

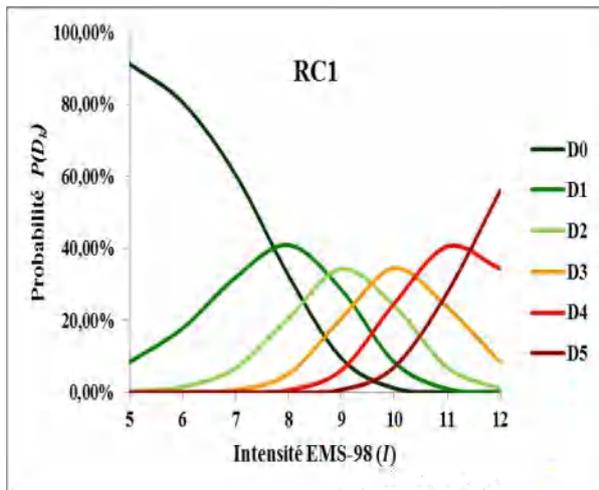
La figure 3.22 à 3.25, présentent les courbes de vulnérabilité obtenues pour chaque bâtiment selon la typologie Risk-UE LM1, pour une partie des constructions de la ville de Skikda. Il est à noter que, les bâtiments en moellons, en Adobe (briques de terre cuite) et les bâtiments en maçonnerie avec plancher en bois constituent les typologies les plus vulnérables.

Pour les bâtiments en maçonnerie renforcée, ils sont moyennement vulnérables, et montrent une bonne résistance aux événements sismiques. Les bâtiments de typologie en murs porteurs en béton armé, murs préfabriqués en béton armé et structures poteaux-poutres en béton armé possèdent une certaine résistance vis-à-vis des événements sismiques, malgré leur construction avant l'établissement de la première règle parasismique 1981 (RPA 81, 1981) et la dernière règle parasismique RPA 99/Version 2003. De plus, les bâtiments de typologie en structures mixtes en béton armé et acier sont les plus résistants (moins vulnérables).

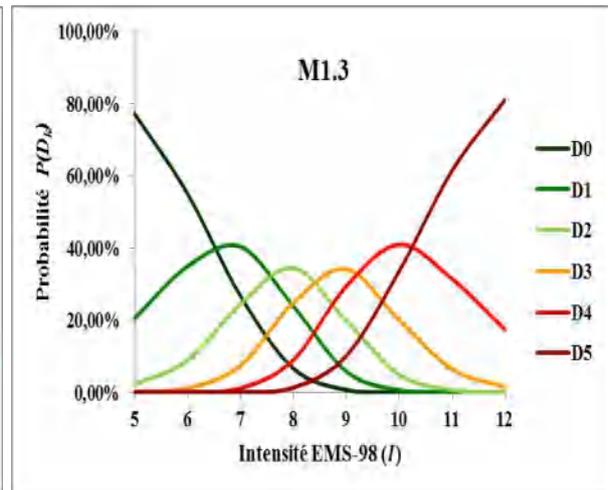
3.4.4 Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité sont une autre façon de représentation des dommages estimés et permettent de définir la probabilité de dépasser un certain degré ou état de dommage, D_k ($k \in [0 ; 5]$). Cette probabilité est obtenue directement à partir des distributions de dommages physiques aux bâtiments, dérivée de la fonction de probabilité binominale pour une typologie donnée. Les courbes de fragilité définissent la relation entre l'intensité du séisme et les dommages (dans six (06) degrés de dommages) au moyen d'une fonction de probabilité, exprimant la probabilité cumulative conditionnelle d'atteindre ou de dépasser un certain degré de dommage. Pour les bâtiments historiques en maçonnerie, stratégiques, d'importance vitale et les centres de décision dans la gestion inventoriée, la figure 3.26, illustre la distribution des degrés de dommages (D_0 à D_5) pour différentes intensités.

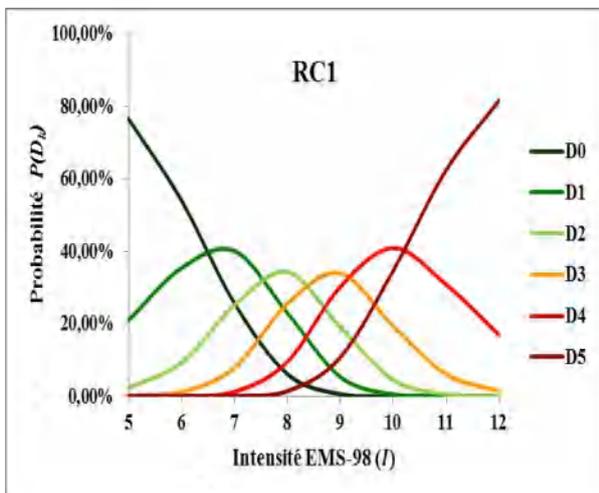
(a) Siege de la wilaya



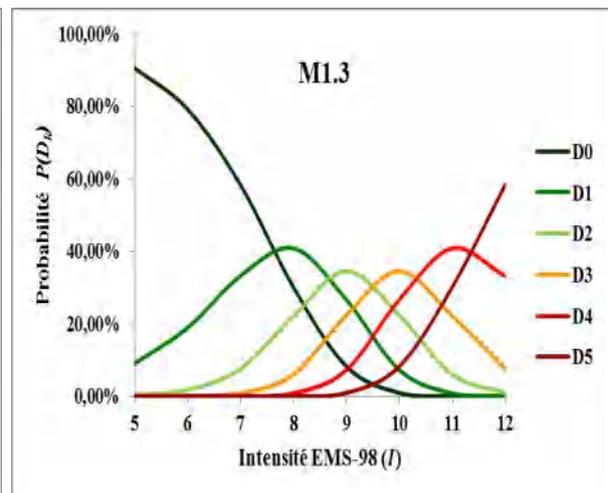
(b) La mairie



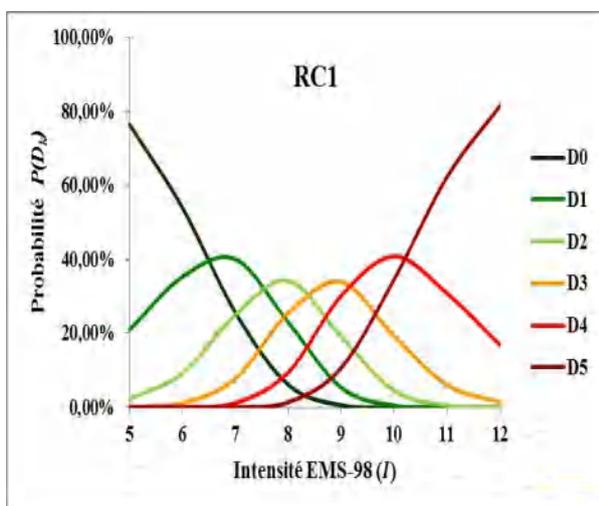
(c) La grande poste et Algérie télécom



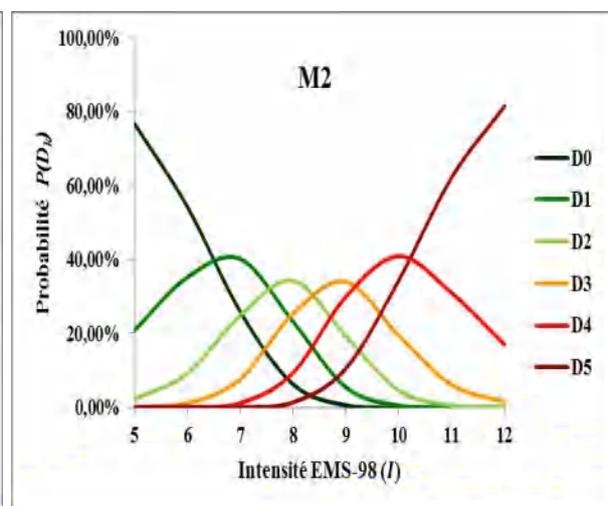
(d) Centre culturel Aisset Idir



(e) La gare ferroviaire



(f) Théâtre



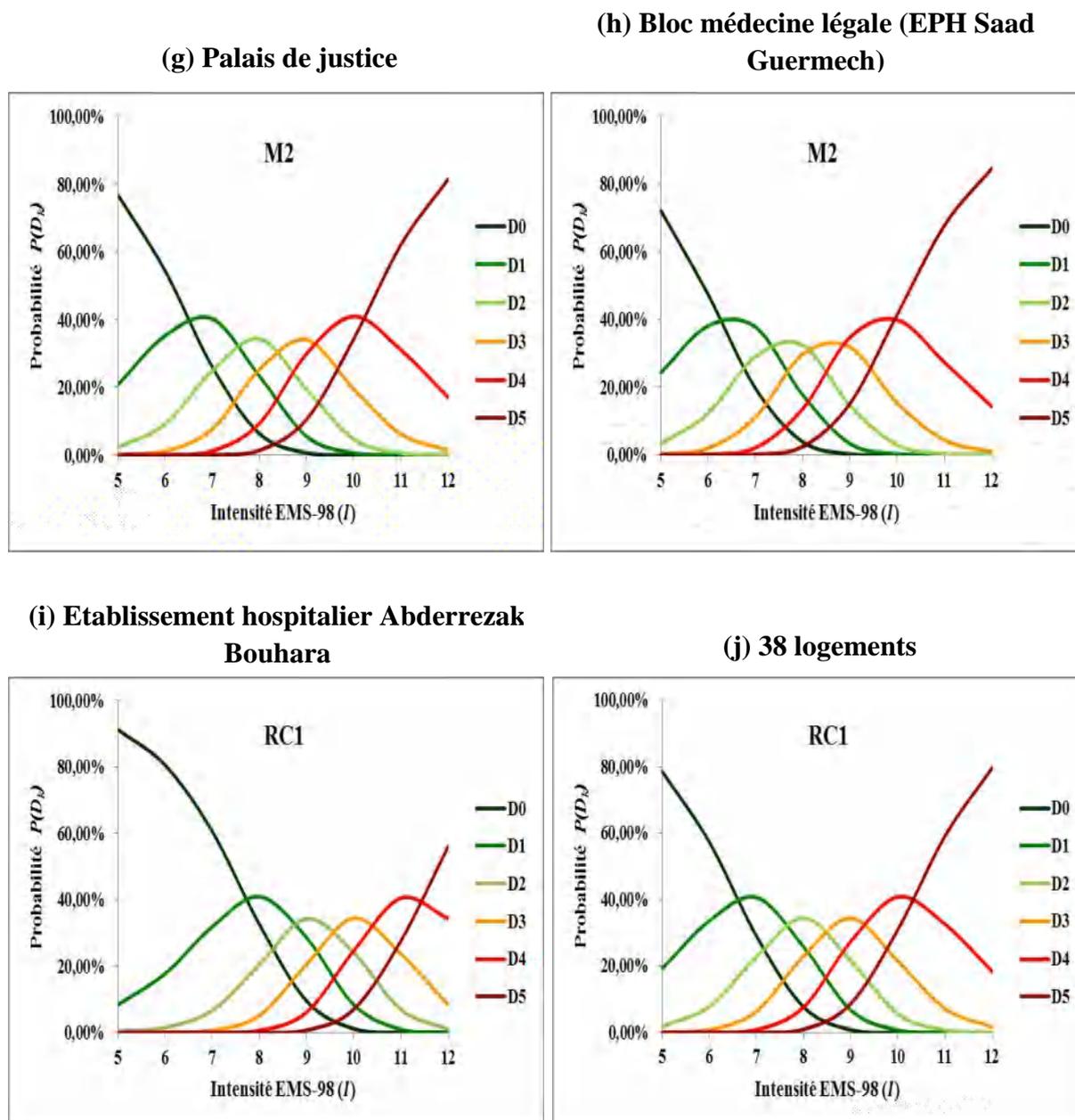


Figure 3.26 : Courbes de fragilité pour différents types bâtiments selon l'intensité sismique.

Les figures 3.26 (a, b, c) présentent respectivement le siège de la wilaya, la mairie et la grande poste et le siège d'Algérie télécom. Ces trois bâtiments ont une importance vitale dans la gestion de crise et constituent des centres de décision et d'orientation. En effet, le siège de la wilaya, la mairie accueillent les cellules de gestion de crise et des opérations de secours et de sécurité, et la poste assure les communications en cas d'un évènement sismique.

Les figures 3.26 (d, e, f, g) présentent de nombreux monuments historiques respectivement centre culturel Aisset Idir, la gare ferroviaire, théâtre et palais de justice. Ces monuments ont des valeurs esthétiques, symboliques et historiques.

Les figures 3.26 (h, i) présentent respectivement le bloc médecine légale (établissement hospitalier (Saad Guermech) où se situe dans la zone 2) et bloc des opérations (établissement hospitalier (Abderrezak Bouhara) où se trouve dans la zone 4). Ces deux bâtis sont les plus vitaux pour les opérations de sauvetage visant à sauver des vies et à atténuer les blessures graves après les premières 24 heures du séisme.

La dernière figure (figure 3.26.j) présente un bâtiment collectif de 8 étages de type habitation à loyer modéré (HLM) réalisé dans le cadre du « plan de Constantine (1958) », comprenant 38 logements, soit 150 à 250 personnes. Il a donc été choisi pour son importance en terme de nombre de logements, se trouve actuellement dans un état de vétusté très avancé et a été conçu à une époque où les dispositions des codes parasismiques pour les constructions ne figuraient pas.

Ces figures présentent les dommages probables, selon différentes intensités sismiques pour les bâtiments d'importance vitaux et stratégiques ou ceux qui présentent un risque inacceptable qui doivent faire l'objet, en priorité, d'un diagnostic plus précis.

Dans le cas de la mairie, et à partir de leurs courbes de fragilité, pour un séisme comparable à celui du 1985 d'intensité VII, on constate les dommages suivants : 66% de probabilité d'avoir de dommage léger, 33% de dommage modéré et seulement 1% de dommage sévère, donc la mairie est classée dans le dommage léger.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la vulnérabilité sismique par la méthode macrosismique européenne Risk-UE LM 1, en se basant sur deux types de scénarios sismiques selon l'étude de micro-zonage de la ville de Skikda. Il s'agit d'un scénario déterministe qui tient compte du séisme du 27 octobre 1985 qui a frappé la région de Constantine (séisme de référence) et des scénarios probabilistes avec des périodes de retour de 100, 200 et 500 ans, exprimés en termes d'intensité macrosismique EMS-98.

Les résultats montrent que la vulnérabilité élevée est concentrée dans les zones 1 et 2, où se concentrent les constructions en maçonnerie non renforcée (Pierre, brique ou Adobe) et en béton armé qui ne respectent pas les normes parasismiques. Par contre, les zones 3, 4 et 5 (construits après 1962) où la plupart des bâtiments sont construits selon les normes parasismiques en vigueur.

La méthode Risk-UE LM 1, nous a permis d'identifier les zones urbaines les plus vulnérables et de prévoir les dommages physiques. Par conséquent, plusieurs cartes de risque sismique sont développées et de générées qui facilitent après la mission des autorités locales dans la préposition des opérations de renforcement. Les résultats obtenus dans cette partie seront utilisés pour estimer les pertes socio-économiques, les coûts de réhabilitation ainsi que les quantités de débris.

La méthode Risk-UE LM1 exige des informations détaillées sur les éléments de la structure et qui peuvent être observées par des enquêtes sur terrain uniquement qui a été la tâche la plus longue qui est consommée le temps et les moyens. Pour surmonter ces difficultés, nous proposons dans le chapitre suivant une méthode qui se base sur l'intelligence artificielle (ARL) inspirée du domaine informatique et qui s'appuie sur quelques paramètres de la structure facilement collectés.

Chapitre 4 :

Evaluation de la vulnérabilité et les dommages sismiques des bâtiments selon la méthode ARL (Association Rule Learning) et les pertes économiques et sociales

4.1 Introduction

L'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine, effectuée par les méthodes macrosismiques, est une tâche longue et complexe. Le grand nombre de bâtiments présents dans un parc immobilier exige également des ressources financières considérables. En plus d'un personnel qualifié, puisque la collection d'informations détaillées nécessite des techniques modernes de diagnostic (enquêtes très détaillées).

Dans ce chapitre, on se propose d'appliquer une approche d'évaluation sismique, des bâtiments à l'échelle urbaine, basée sur les techniques d'exploration de données (Data-mining) (Association Rule Learning, ARL) à l'aide de quatre informations de base facilement consultables à partir d'images de bâtiments. Ces informations sont relativement faciles à recueillir au niveau d'une ville par rapport aux informations habituellement obtenues par les méthodes macrosismiques.

Dans la continuité des travaux de Guettiche, Guéguen & Mimoune (2017a) sur la méthode ARL qui a permis d'évaluer le niveau de danger sismique dans la ville de Constantine, on va donc appliquer cette méthode à la ville de Skikda profitant de la similitude entre les typologies de bâtiments existants, afin de généraliser son application aux villes similaires et de vérifier sa fiabilité sur une base de données plus large que celle déjà utilisée.

Pour vérifier la fiabilité et la crédibilité des résultats, on va procéder par une comparaison entre les résultats obtenus précédemment, par la méthode macrosismique Risk-UE LM1, aux résultats obtenus par la méthode ARL (niveau 0 et niveau 1), qui a nécessité moins de paramètres par rapport à la méthode macrosismique Risk-UE LM1.

Pour l'évaluation des pertes socio-économiques, une technique a été utilisée qui consiste à diviser la zone urbaine en un certain nombre de sous-zones distinctes, dans chacune d'elles la combinaison des types de bâtiments supposés uniformes, les conditions du sol sont

supposées uniformes et aussi le nombre de la population totale (ou le nombre de bâtiments) est connu (Soltane et al.2022).

Pour les évaluations des pertes économiques, ils sont estimés en termes de pertes directes, on se basant par sur le PIB par habitant (Schumacher et Strobl, 2011) et de pertes indirectes représentées par les coûts de réhabilitation ou de reconstruction qui dépendent inévitablement des degrés de dommages physiques, approche développée par (ATC-13 1985 ; Brammerini et al. 1995 ; HAZUS 1999 ; BU-KOERI 2003 ; Tyagunov et al. 2006).

4.2 Etapes de la méthode ARL

Dans cette méthode l'ensemble de la base de données de la ville de Skikda est divisé en deux catégories pour deux phases successives : phase d'apprentissage et phase d'application :

- La première phase utilise 30% de la base de données sélectionnée au hasard formant ainsi l'ensemble d'apprentissage utilisé pour définir les corrélations (proxy) entre les attributs des bâtiments, qui sont disponibles suite à l'enquête sur site (les quatre paramètres de base) et la classe de vulnérabilité selon EMS-98 pour chaque bâtiment.
- La deuxième phase, prend en compte le reste de la base de données (70%) qui sont définis la répartition des classes EMS-98 dans la zone d'étude et évaluer l'exactitude de l'attribution de classe EMS-98. Ceci est obtenu en utilisant les corrélations définies à partir de la phase de l'apprentissage (après l'établissement du proxy de vulnérabilité).

Les étapes de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions, par cette méthode, sont indiquées dans l'organigramme de la figure 4.1 :

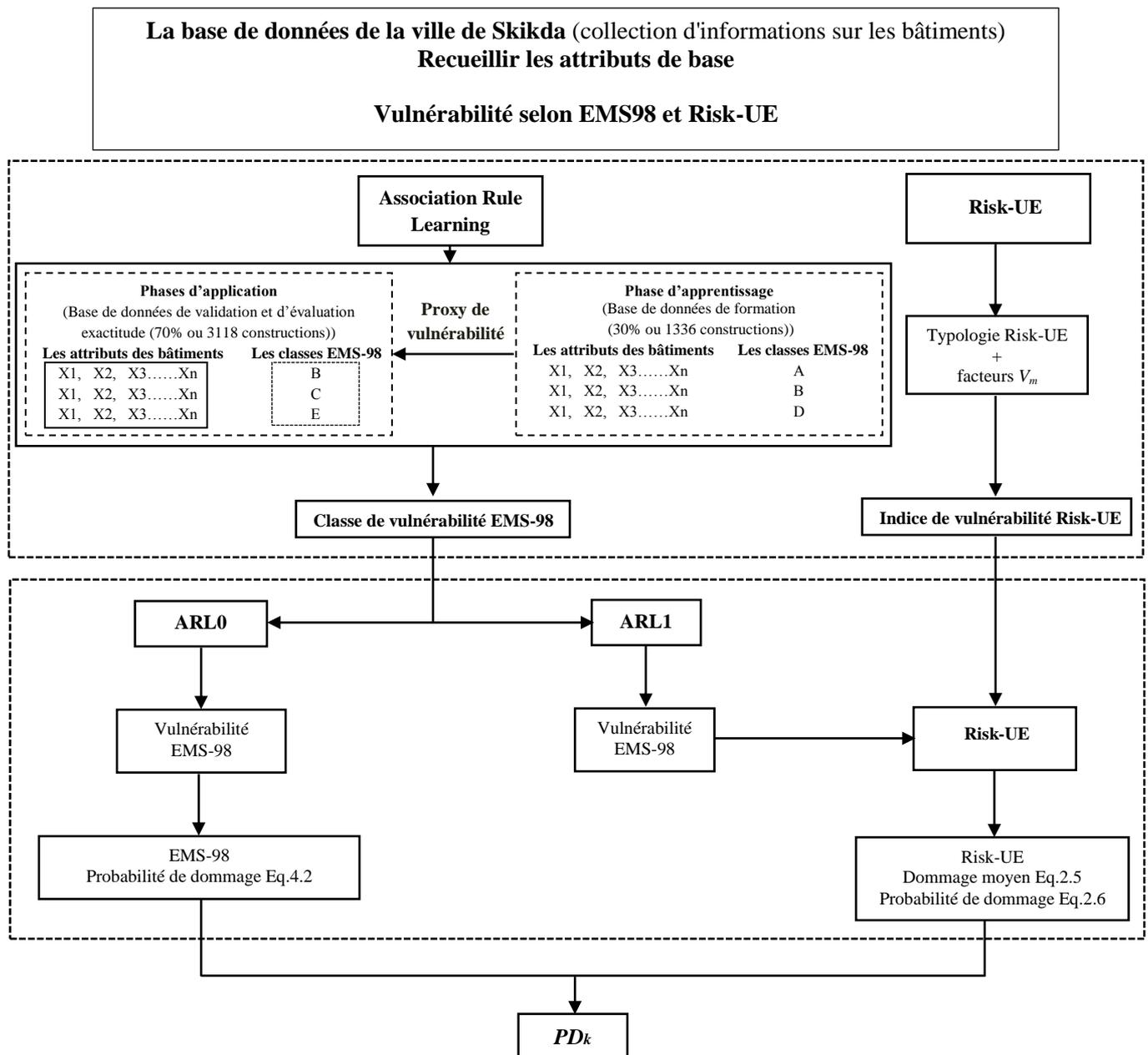


Figure 4.1 : Organigramme de la méthodologie ARL utilisé.

4.2.1 Collection de la base de données des attributs

Le but de la méthode ARL est de déterminer et de définir les relations entre les attributs (paramètres de base) et les classes de vulnérabilité. Elles sont stockées dans une base de données, de taille importante, dont l'intérêt est l'évaluation de la vulnérabilité sismique. On s'est appuyé sur la base de données déjà créée et exploitée dans la méthode Risk-UE LM1, qui contient divers paramètres, notamment les quatre attributs de bases déjà choisis. Les bâtiments sont ensuite regroupés selon les quatre attributs suivants :

- Le type de matériaux de construction : la maçonnerie, le béton armé, l'acier et le bois.

- L'époque de construction : divisée en cinq périodes selon l'évolution urbanistique de la ville, l'historique de la ville et le développement du code parasismique Algérien.
- Le nombre d'étages précis selon l'intervalle donné dans la méthode Risk-UE (Lagomarsino et Giovinazzi 2006 ; Mouroux et Lebrun 2006a, 2006b) : faible hauteur (1 à 2 étages), moyenne hauteur (3 à 5 étages), et grande hauteur (≥ 6 étages).
- La forme du toit, identifié et classé en deux groupes : plat et en pente.

D'après les travaux de (Riedel et al. 2015 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a ; Liu et al. 2019 ; Diana et al. 2019), on a choisi ces quatre attributs pour accélérer l'évaluation de la vulnérabilité sismique et réduire les incertitudes des résultats. La répartition et la proportion de ces quatre attributs sur les constructions inventoriées sont illustrées dans la figure 4.2

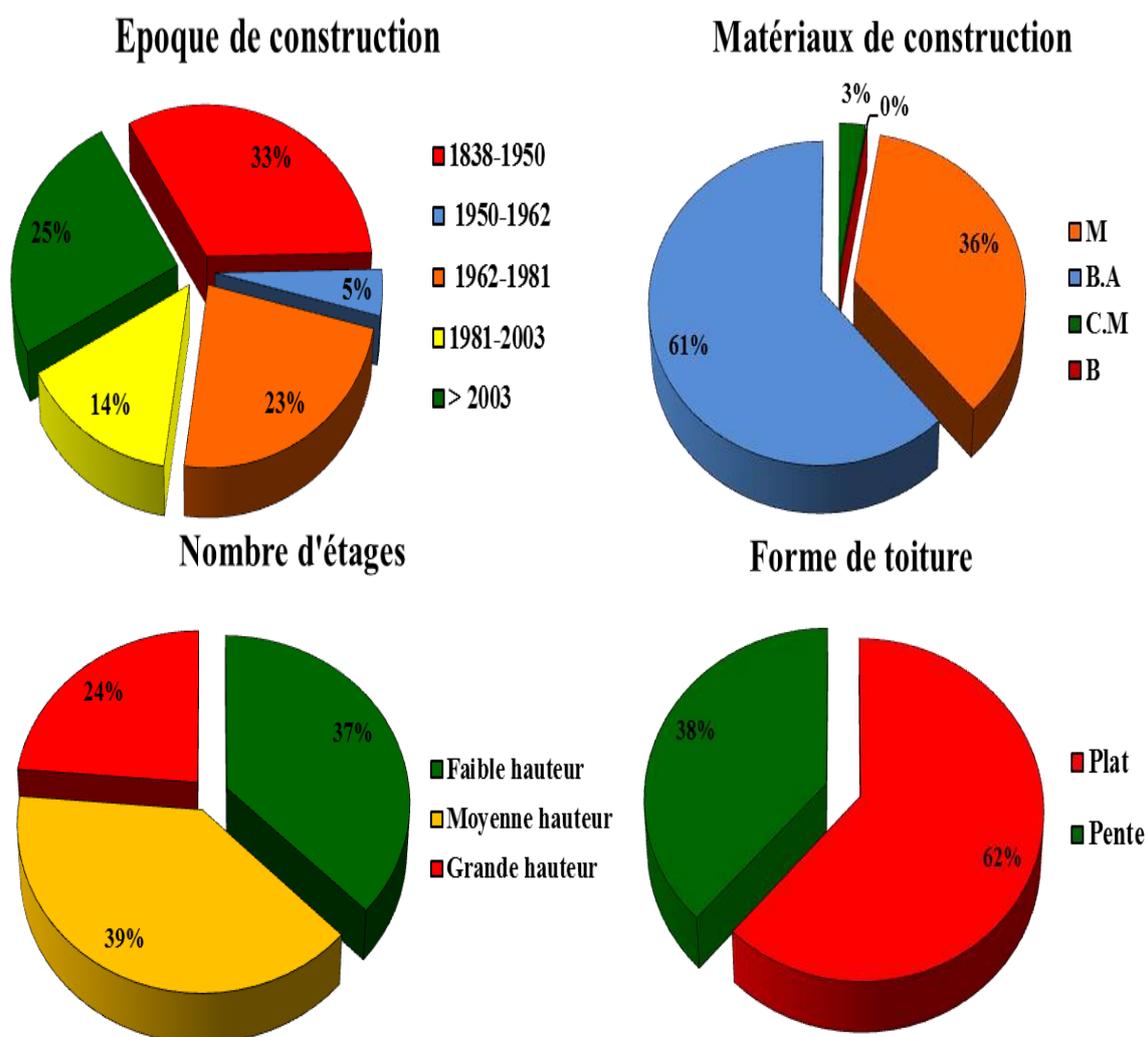


Figure 4.2 : Répartition des quatre attributs selon : l'époque de construction, le type de matériau, le nombre d'étages et la forme du toit dans la base de données de la zone d'étude.

Le plus grand pourcentage est celui des constructions en béton armé (61 %) qui représentent le type de matériaux de construction le plus prépondérant dans la zone d'étude ; suivi par les constructions en maçonnerie de (36 %), et les constructions en acier (3 %) et seulement trois constructions en bois (<0.1 %). La base de données comporte 4454 bâtiments, se distribue comme suit :

- 1469 bâtiments construits entre 1838-1950 ; se combine deux périodes [1838-1920] et [1920-1950], comprenant principalement des constructions traditionnelles en maçonnerie, réalisées avec l'adobe et la pierre. Ces bâtiments sont classés comme non parasismiques.
- 119 constructions construites entre 1951-1962, correspondant à la période de généralisation du béton armé. Durant cette période les bâtiments sont classés non parasismiques.
- 1027 bâtiments construits entre 1963-1981, réalisés avant l'entrée en vigueur du premier règlement parasismique algérien (RPA 81).
- 642 bâtiments construits entre 1982-2003, réalisés en tenant compte du règlement parasismique Algérien (RPA 1981).
- 1117 bâtiments construits après 2003, réalisés et conçus en tenant compte du règlement parasismique algérien (RPA 2003).

Un total de 1663 (soit 37%) constructions sont des structures de faible hauteur (moins de 2 étages), tandis que 1735 (soit 39%) sont des structures de hauteur moyenne (3 à 5 étages) et 1056 (soit 24%) constructions sont des structures de grande hauteur (6 étages ou plus).

38% des bâtiments ont été construites dans deux premières périodes allant du 1838 à 1962 qui correspondent à la période coloniale française. La plupart des constructions des trois dernières périodes (période après l'indépendance 1962) sont des bâtiments en béton armé.

Selon la période de construction, on constate que presque de 61% de bâtiments construits avant l'établissement du premier règlement parasismique Algérien en 1981, 14% de bâtiments construits entre 1981 et la date de publication de la dernière version de règlement parasismique algérien de 2003 (RPA03, 2003), considérés comme des bâtiments d'un niveau de conception parasismique moyen selon la méthode Risk-UE, 25% de bâtiments construits après 2003, considère comme des bâtiments d'un niveau parasismique élevé.

La forme de toiture est primordiale pour identifier une corrélation plus effective entre les attributs et la classe de vulnérabilité. Cet attribut est obtenu directement grâce à l'utilisation d'images à haute résolution de télédétection (en utilisant l'image satellite haute

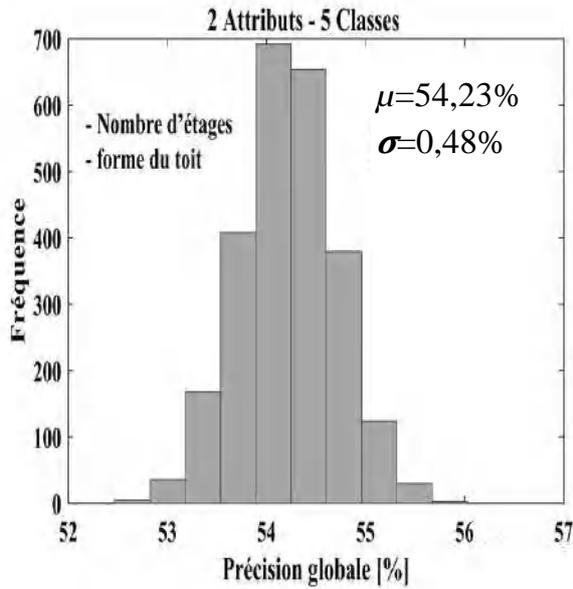
résolution de Google Hybrid Maps) sans enquête sur terrain. Il fournit des informations sur la nature des matériaux de construction de l'ensemble du bâtiment. A travers l'interprétation de l'image de télédétection, 38% des bâtiments ont été identifiés comme ayant des toits en pente, tandis que 62% des bâtiments ont des toits plats.

4.2.2 Première phase de la méthode ARL : Apprentissage (Learning)

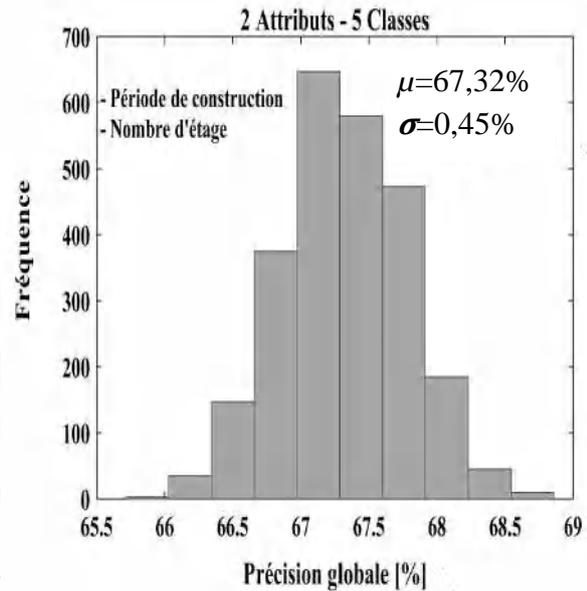
Après la préparation de la base de données, une phase d'apprentissage est effectuée sur un échantillon de la base de données. Sachant que la taille de l'échantillon d'apprentissage et les différentes combinaisons d'ensemble de données utilisées ont une influence sur la précision de la classification (Riedel et al. 2015 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a ; Liu et al. 2019).

Pour évaluer les performances des corrélations (proxy) entre les attributs des bâtiments et la classe de vulnérabilité, selon EMS-98, pour chaque bâtiment, (Riedel et al. 2014 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a) ont montré que l'utilisation de 30% de la base de données de l'ensemble d'échantillons d'apprentissage aboutit à des valeurs stables.

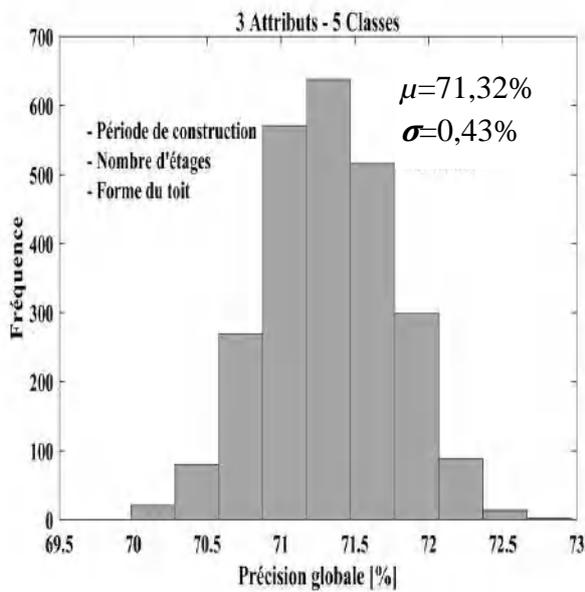
Par la suite, on sélectionne au hasard des échantillons d'apprentissage avec plusieurs combinaisons et chaque calcul a été répété et testé 3500 fois. La combinaison peut prendre deux ou plusieurs attributs de base (l'époque de construction, le nombre d'étages, la nature du matériau et la forme du toit) afin de calculer la précision moyenne (c'est-à-dire la valeur « centrale » ou « médiane ») du type gaussien, dont les résultats sont présentés à la figure 4.3.



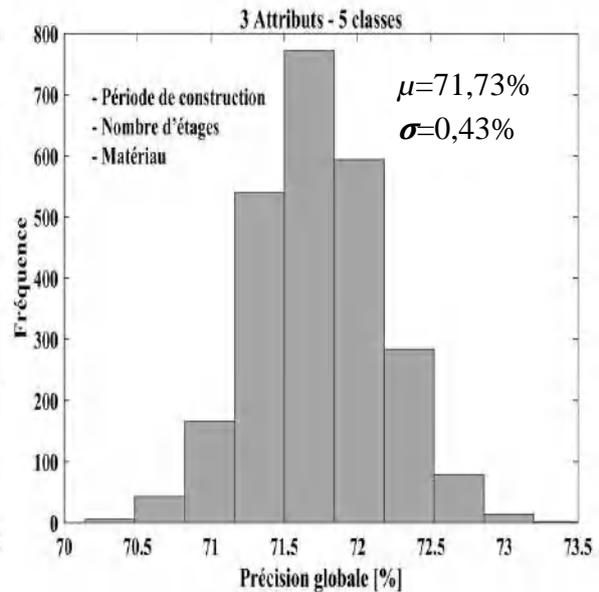
a) Le nombre d'étages et le forme de toiture.



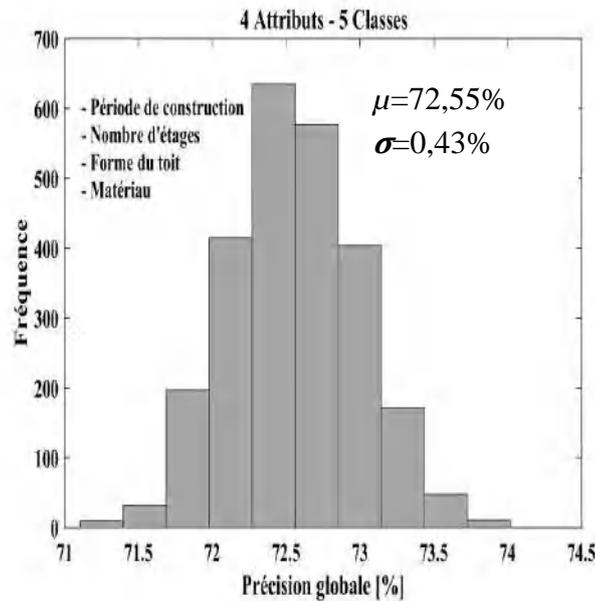
b) La période de construction et le nombre d'étages.



c) La période de construction, le nombre d'étages et la forme de toiture.



d) La période de construction, le nombre d'étages et la nature du matériau.



e) La période de construction, le nombre d'étages, la forme du toit et la nature du matériau.

Figure 4.3 : Précision de la classification de vulnérabilité des différentes combinaisons d'attributs, considérant 3500 générations aléatoires de 30% de la base de données des constructions à Skikda.

Cinq (05) classes de vulnérabilité ont été établies dans la zone d'étude, allant de A à F (de la plus vulnérable à la moins vulnérable) ont été prédéfinies par une étude détaillée basée sur l'échelle macrosismique Européenne EMS-98.

Les histogrammes de la figure 4.3, montrent la distribution des précisions des résultats obtenus en utilisant un proxy de vulnérabilité selon la méthode ARL, où la précision globale constitue le pourcentage des classes de vulnérabilité convenablement classées. Il faut noter que, la variabilité de la distribution de précision (écart type) est inférieure à 1 % ($\sigma \leq 0,48\%$) dans l'ensemble des cas.

La figure 4.3a, montre que la précision moyenne est d'environ 54,23%, si l'on ne tient compte que de deux attributs (le type de toit et le nombre d'étages). Elle atteint 67,32%, si on combine la période de construction avec le nombre d'étages (Voir figure 4.3b). En comparant les figures 4.3a et 4.3b, il est évident que le type du toit n'est pas complètement indépendant puisque la précision associée est plus petite que la précision correspond à la période construction.

Si on ajoute le troisième paramètre (la forme de toiture) aux deux attributs (la période de construction et le nombre d'étages), qui a été obtenu par l'interprétation manuelle de l'imagerie de télédétection, la précision moyenne des constructions correctement classées est augmentée à 71,32% (Voir figure 4.3c). Ainsi, on remplace l'attribut de la forme de toiture par le type de matériaux de construction, la précision moyenne est légèrement augmentée à 71,73% (Voir figure 4.3d).

La figure 4.3e, montre que la précision moyenne de la classification en considérant les quatre attributs et les cinq classes EMS-98 atteint 72,55 %.

Le tableau 4.1, résume les résultats de précision de la classification obtenus par les différentes combinaisons d'attributs :

Tableau 4.1 : Récapitulatif Attributs/ Précision.

Combinaisons d'attributs	Précision moyenne
Le nombre d'étages et le forme de toiture	54,23%
La période de construction et le nombre d'étages	67,32%
La période de construction, le nombre d'étages et la forme de toiture	71,32%
La période de construction, le nombre d'étages et la nature du matériau	71,73%
La période de construction, le nombre d'étages, la forme du toit et la nature du matériau	72,55%

Ce résultat montre que le paramètre de la période de construction joue un rôle important dans l'analyse de la vulnérabilité sismique, car 81 % des bâtiments avec une toiture inclinée étaient des constructions en maçonnerie. Avec une toiture plate étaient 96% en béton armé, pour le type de matériaux de construction où 100% des bâtiments construits avant 1950 étaient des constructions en maçonnerie, et environ de 90% des constructions construites après 1950 étaient des constructions en béton armé.

Tableau 4.2 : Probabilités conditionnelles obtenues d'après la méthode ARL à 30% de la base de données in situ pour la ville de Skikda, avec deux attributs (la période de construction et le nombre d'étages).

Attributs	P(A)	P(B)	P(C)	P(D)	P(E)
]1838-1950] et ≤ 2 étage	0,500	0,291	0,143	0,066	0
]1838-1950] et (3-5) étage	0,579	0,339	0,071	0,011	0
]1838-1950] et ≥ 6 étage	0,571	0,429	0	0	0
]1951-1962] et ≤ 2 étage	0	0,440	0,440	0,120	0
]1951-1962] et (3-5) étage	0,083	0,458	0,458	0	0
]1951-1962] et ≥ 6 étage	0	1,000	0	0	0
]1963-1981] et ≤ 2 étage	0,278	0,389	0,333	0	0
]1963-1981] et (3-5) étage	0,022	0,198	0,621	0,159	0
]1963-1981] et ≥ 6 étage	0,017	0,250	0,733	0	0
]1982-2003] et ≤ 2 étage	0,105	0	0,010	0,886	0
]1982-2003] et (3-5) étage	0	0	0,208	0,792	0
]1982-2003] et ≥ 6 étage	0	0	0,814	0,186	0
> 2003 et ≤ 2 étage	0,013	0	0	0,649	0,338
> 2003 et (3-5) étage	0	0	0,129	0,500	0,371
> 2003 et ≥ 6 étage	0	0	0,005	0,010	0,985

Le tableau 4.2, présente la valeur de classification conditionnelle dans les classes de vulnérabilité EMS-98, comprenant les 15 combinaisons des deux attributs (c'est-à-dire pour cinq types de périodes de construction et trois gammes pour le nombre d'étages). Par exemple, un bâtiment choisi de façon aléatoire dans la zone d'étude, dont on sait qu'il a été construit entre]1982-2003] et qui compte six étages et plus (≥ 6 étages), il a une probabilité de 81,4% d'appartenir à la classe C (EMS-98) et 18,6% d'appartenir à la classe D (EMS-98). Donc un bâtiment de l'ensemble des attributs (]1982-2003] et ≥ 6 étage) se classe dans la catégorie C.

4.2.3 Deuxième phase de la méthode ARL : application

Après la phase d'apprentissage (Learning phase) qui a défini le proxy de vulnérabilité de la zone d'étude de la ville de Skikda, le proxy de vulnérabilité va être testé pour le reste de la base de données (70%) pour évaluer la conformité de l'attribution de classe EMS-98.

Après l'établissement du proxy de vulnérabilité, nous utilisons ensuite la formule proposée par Riedel et al. (2015), pour obtenir la distribution des classes EMS-98.

$$P_j(Y) = \sum_1^n \frac{N_{ji} P(Y|X_i)}{N} \quad (4.1)$$

Où :

$P_j(Y)$: la probabilité d'une construction d'être de classe $Y_i = \{A, B, C, D, E\}$.

N_{ji} : le nombre de bâtiments avec des attributs X_i de classe Y_j .

$P(Y|X_i)$: est la valeur de la probabilité donnée par le proxy de la vulnérabilité pour le $X \rightarrow Y_i$ dans le tableau. 4.2

N : le nombre total des constructions.

n : nombre de combinaisons possibles.

On calcule ensuite, un exemple de matrice de confusion qui compare la vulnérabilité « estimé » avec la vulnérabilité « réelle » des constructions obtenus par les enquêtes sur site, en utilisant les quatre attributs et les cinq classes de vulnérabilité. Les valeurs en diagonale sont les constructions, pour lesquelles des classes ont été correctement attribuées, divisé par le nombre total de bâtiments (Voir tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Exemple d'une matrice de confusion obtenue par la méthode ARL pour classer les constructions à Skikda selon les classes de vulnérabilité EMS-98 basé sur quatre attributs, en considérant 70% de la base de données in situ pour la ville de Skikda.

EMS-98 CLASSE		Vulnérabilité estimée (Classification ARL)						Conformité (%)
		A	B	C	D	E	Σ	
Vulnérabilité Risk-UE LM1)	A	578	32	2	0	0	612	94%
	B	305	84	185	0	0	574	15%
	C	100	32	571	40	1	744	77%
	D	32	1	15	540	4	592	91%
	E	0	0	0	112	484	596	81%
	Σ	1015	149	773	692	489	3118	
	Conformité (%)	57%	56%	74%	78%	99 %		72%

Le pourcentage des constructions correctement classées dans leur classe de vulnérabilité de Risk-UE LM1 est d'environ 72%. La conformité est plus faible pour les classes A et B : où 84 constructions de classe B ont été correctement classés, mais 305 et 185 constructions ont été mal classées en A et C respectivement.

Les études réalisées par Riedel et al. (2015) ; Guettiche, Guéguen & Mimoune (2017a) ; Liu et al. (2019), ont montré la difficulté de faire une distinction entre les constructions de

classe A et B (où la plupart des constructions en maçonneries sont non chaînées), en raison de leurs vulnérabilités équivalentes selon EMS-98. La majorité des constructions de classe A sont en fait mal classés en B et vice-versa, pour améliorer la conformité de la classification, nous fusionnons ces deux classes (Voir figure 4.4, tableau 4.4). Les trois autres classes présentent de meilleurs résultats de classification relative à la conformité.

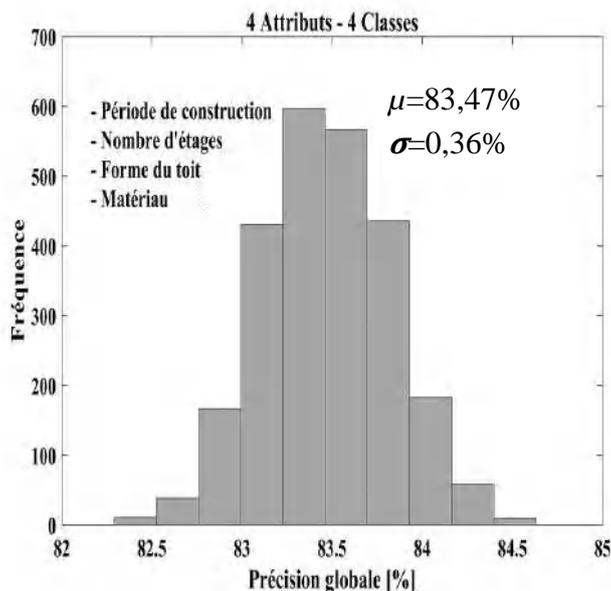


Figure 4.4 : Précision de la classification de vulnérabilité des différentes combinaisons d'attributs, considérant 3500 générations aléatoires de 30% de la base de données des constructions avec fusion des classes A et B ; tenant compte de quatre attributs : la période de construction, le nombre d'étages, la forme du toit et la nature du matériau.

Tableau 4.4 : Exemple de la matrice de confusion obtenue par la méthode ARL pour classer les constructions selon les classes de vulnérabilité EMS-98 avec fusion des classes A et B ; tenant compte de quatre attributs, et 70% de la base de données.

EMS-98 CLASSE		Vulnérabilité estimée (Classification ARL)					Conformité (%)
		A+B	C	D	E	Σ	
Vulnérabilité (Risk-UE LMI)	A+B	984	192	0	0	1,176	84%
	C	130	576	33	2	741	78%
	D	37	19	561	3	620	90%
	E	0	0	107	474	581	82%
	Σ	1151	787	701	479	3118	
Conformité (%)		85 %	73%	80%	99%		88%

La figure 4.4 montre la conformité globale de la classification après la fusion de deux classes A et B. on note une augmentation de 72,55% à 83,47% et la diminution de l'écart type (variation) de ($\sigma = 0,43\%$) à ($\sigma = 0,36\%$).

Le tableau 4.4, montre que le pourcentage, des constructions correctement classées dans leur classe de vulnérabilité de Risk-UE LM1 sont augmentés de 72% à 88% après la fusion des classes A et B. Donc la fusion des classes A et B améliorer la précision de la classification.

4.3 Dommages physiques selon les différents scénarios sismiques

Une fois que les classes de vulnérabilité et les indices de vulnérabilité des constructions, de la zone d'étude, ont été attribués, les degrés de dommages physiques éventuels selon différents degrés d'intensité macrosismique (scénarios sismiques) sont calculés suivant deux niveaux d'analyse de la méthode ARL (ARL0, AR1) :

- La première approche nommée ARL0 (niveau 0) qui est une approche probabiliste, basée sur les matrices de probabilité de dommages de l'EMS-98 issues directement du retour d'expérience post-sismique et des jugements d'experts. Elle est basée sur cinq échelles de dommage de l'EMS-98. Autrement dit, la DPM exprime, dans une forme discrète la probabilité d'avoir un degré de dommage D_{Gk} dû à un séisme d'intensité I_{EMS-98} pour une classe de typologie définie. Dans l'EMS-98, les dommages attendus de chaque type sont définis en termes linguistiques (« peu », « beaucoup », « la plupart ») en considérant cinq degrés de dommage. Ces termes ont été traduits en valeurs numériques correspondant à 5%, 35% et 80%, respectivement (Dubois et Parade, 1980). La probabilité de dommages pour une intensité donnée $P_{EMS-98}(D_k)$ est alors calculée par l'équation (4.2) (Riedel et al. 2015 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017a) :

$$P_{EMS-98}(D_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=A}^{i=E} N_i P(D_k | i, I_{EMS-98}) \quad (4.2)$$

Où : N : Le nombre total des constructions

N_i : Le nombre des constructions avec une classe de vulnérabilité i ; ($i=A, B, C, D, E$)

$P(D_k | i, I_{EMS-98})$: La probabilité de dommages de degré D_k pour une classe de vulnérabilité i et intensité donnée selon l'EMS-98 « I_{EMS-98} » donnée au tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Distribution de probabilité d'occurrence des dommages selon l'EMS-98 pour les différentes classes de vulnérabilité et différentes intensités macroséismiques européennes de V à XII (Riedel et al. 2015).

A grade de dommage							B grade de dommage						
I	D0	D1	D2	D3	D4	D5	I	D0	D1	D2	D3	D4	D5
V	0,95	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	V	0,95	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
VI	0,60	0,35	0,05	0,00	0,00	0,00	VI	0,60	0,35	0,05	0,00	0,00	0,00
VII	0,05	0,20	0,35	0,35	0,05	0,00	VII	0,25	0,35	0,35	0,05	0,00	0,00
VIII	0,00	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	VIII	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	0,00
IX	0,00	0,00	0,05	0,25	0,35	0,35	IX	0,00	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05
X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,80	X	0,00	0,00	0,05	0,20	0,40	0,35
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	XI	0,00	0,00	0,00	0,05	0,15	0,80
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

C grade de dommage							D grade de dommage						
I	D0	D1	D2	D3	D4	D5	I	D0	D1	D2	D3	D4	D5
V	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	V	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VI	0,95	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	VI	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VII	0,60	0,35	0,05	0,00	0,00	0,00	VII	0,95	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
VIII	0,25	0,35	0,35	0,05	0,00	0,00	VIII	0,60	0,35	0,05	0,00	0,00	0,00
IX	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	0,00	IX	0,25	0,35	0,35	0,05	0,00	0,00
X	0,00	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	X	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,10	0,55	0,35	XI	0,00	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,95	XII	0,00	0,00	0,05	0,05	0,10	0,80

E grade de dommage						
I	D0	D1	D2	D3	D4	D5
V	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VI	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VII	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VIII	0,95	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
IX	0,60	0,35	0,05	0,00	0,00	0,00
X	0,25	0,35	0,35	0,05	0,00	0,00
XI	0,05	0,2	0,35	0,35	0,05	0,00
XII	0,00	0,00	0,05	0,05	0,20	0,70

- La deuxième approche nommée ARL1 (niveau 1), est une approche basée sur une équation binominale de répartition des probabilités des dommages utilisée dans la méthode européenne Risk-UE LM1 (équation (2.6)). On convertit les classes de vulnérabilité de l'EMS-98 en indices de vulnérabilité selon le tableau 4.6, proposé par Bernardini et al. (2007). L'approche ARL1 est fondée sur des courbes de vulnérabilité, se distinguant de la précédente (ARL0) en indiquant les dommages moyens " μ_D " correspondant le degré d'intensité macrosismique Européen (EMS-98).

Tableau 4.6 : Valeurs de l'indice de vulnérabilité correspondant aux classes de l'EMS-98, suivant la méthode Risk-UE LM1 (Bernardini et al. 2007).

Classe de vulnérabilité EMS-98	A	B	C	D	E	F
Indices de vulnérabilité (<i>IV</i>)	0,88	0,72	0,56	0,40	0,24	0,08

4.4 Validation des résultats

Pour évaluer la conformité et la robustesse des résultats, il est nécessaire de vérifier si la répartition générale de chaque classe est maintenue entre la méthode ARL et la méthode macrosismique européenne Risk-UE –LM1 présentées dans le chapitre précédent.

4.4.1 Evaluation de la conformité de distribution de la vulnérabilité sismique entre Risk-UE LM1 et ARL

Comme, on l'a mentionnée déjà dans le deuxième chapitre, l'estimation de la vulnérabilité sismique, par la méthode Risk-UE LM1, est basée sur sa classe de typologie constructive prédéfinie et ses facteurs aggravants (état de conservation, le nombre d'étages, irrégularités en plan et en élévation, interventions de confortement, niveau du code parasismique, etc.), afin de calculer un indice de vulnérabilité. Cet indice est converti en une classe de vulnérabilité de l'EMS-98, basée sur les typologies constructives et les intervalles de l'indice de vulnérabilité pour chaque classe de vulnérabilité donnée par le tableau 2.17, présentée dans le chapitre 2. Pour la méthode ARL, la classe de vulnérabilité est calculée à l'aide du proxy de vulnérabilité ARL extrait de la base de données de la zone d'étude.

Les histogrammes de la figure 4.5, présentent la répartition des classes de vulnérabilité selon EMS-98 des constructions de la zone d'étude par la méthode Risk-UE-LM1 et la méthode ARL.

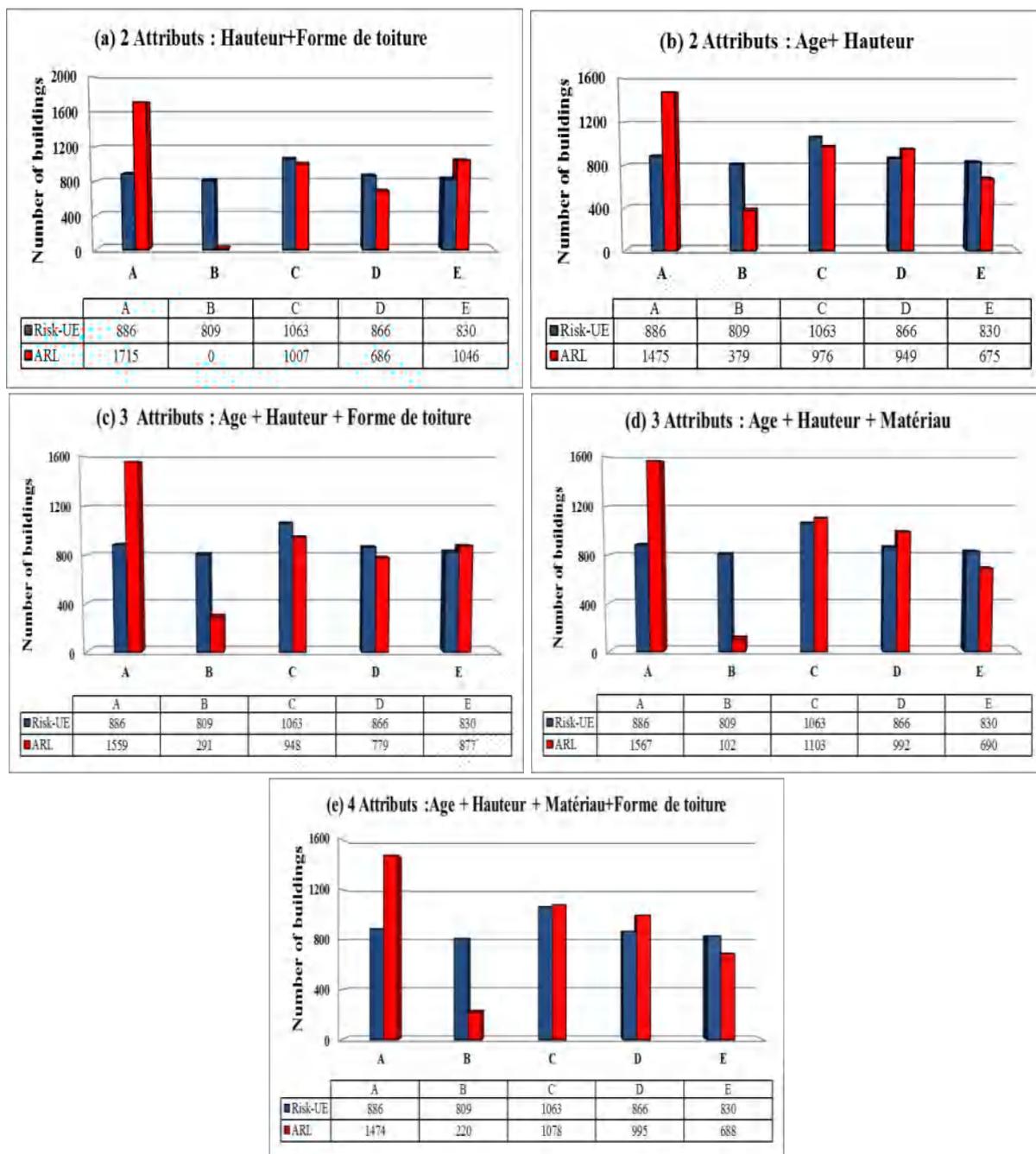
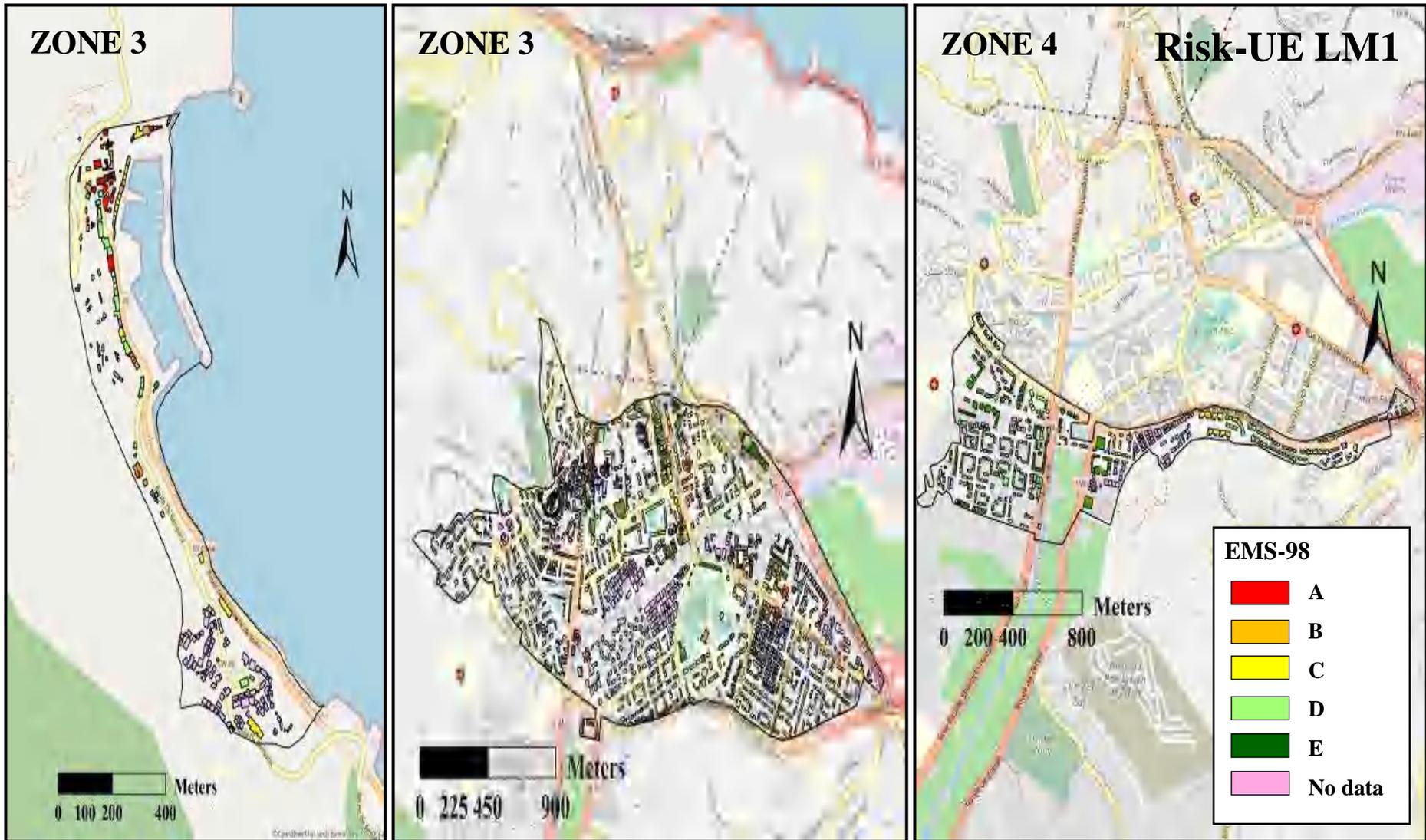


Figure 4.5 : Répartition des classes de vulnérabilité EMS-98 obtenus avec les deux méthodes (Risk-UE LM1 et ARL) pour l'ensemble de constructions de la zone d'étude.

D'après les histogrammes de la figure 4.5, on constate une différence, entre les deux méthodes de Risk-UE et ARL particulièrement remarquable dans le cas des classes A et B. Ceci est dû aux difficultés liées à la distinction entre la typologie des constructions de classe A et B (constructions en maçonneries non chaînées). Une légère différence est constatée entre les classes de vulnérabilité C, D et E. On constate aussi que l'écart de répartition des classes de vulnérabilité entre les deux méthodes diminue avec l'augmentation des attributs.



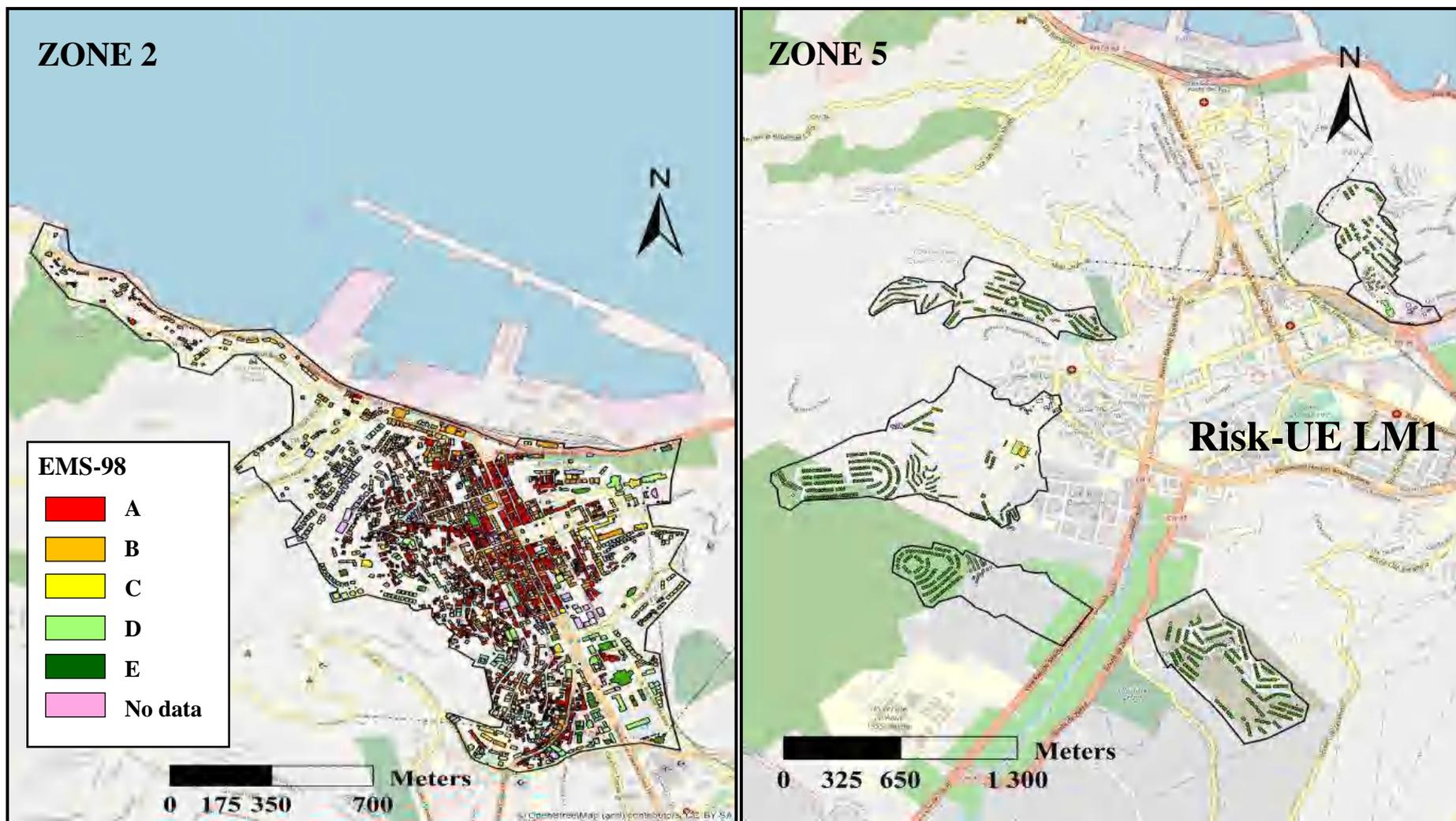
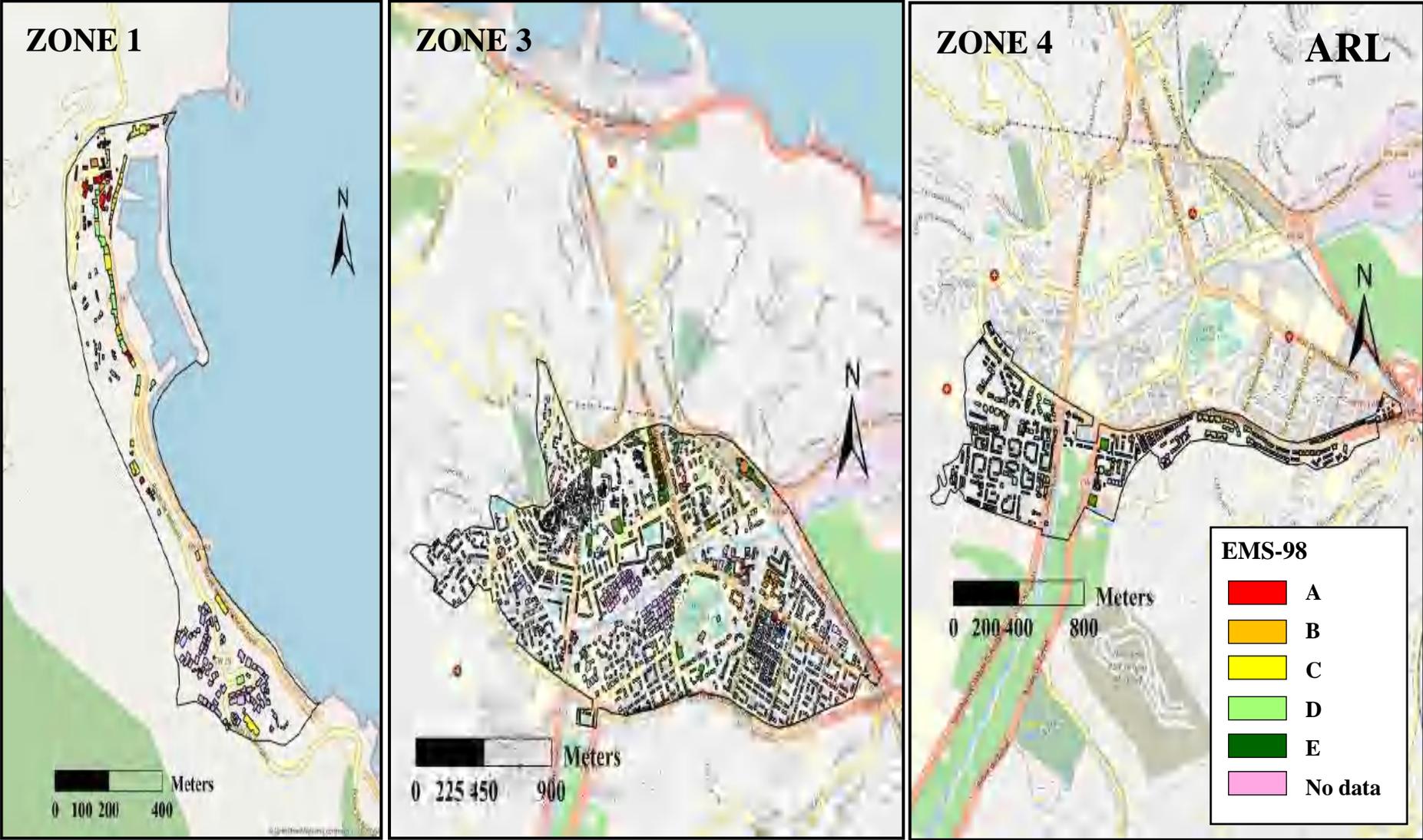


Figure 4.6 : Distribution des classes de vulnérabilité de l'EMS-98 des constructions dans les différentes zones d'étude obtenues par la méthode Risk-UE LM1.



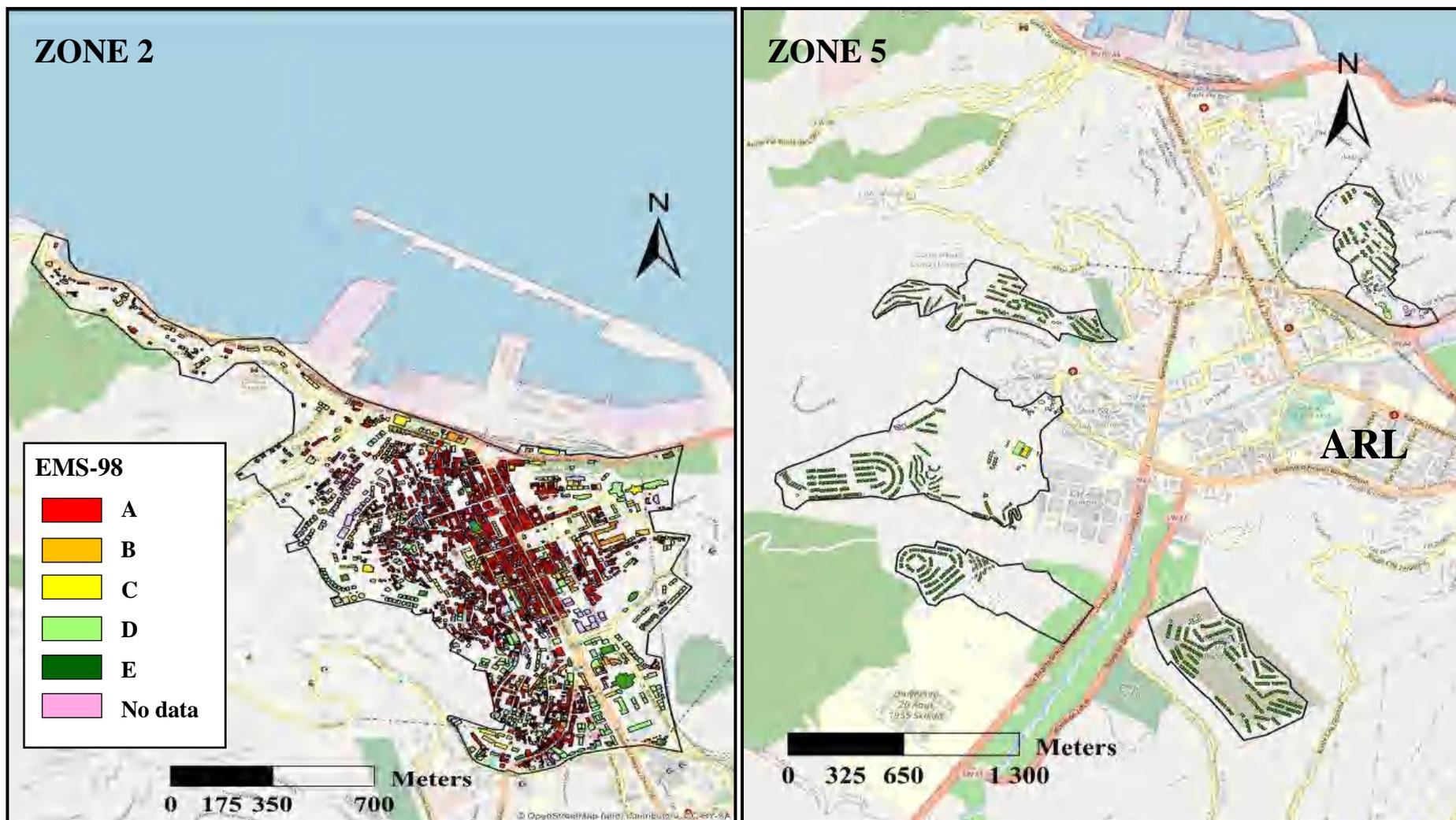


Figure 4.7 : Distribution des classes de vulnérabilité de l’EMS-98 des constructions dans les différentes zones d’étude utilisée le proxy obtenu par la méthode ARL considérée quatre attribus.

D'après les figures 4.6 et 4.7, qui représentent la distribution des classes de vulnérabilité pour les différentes zones selon les deux méthodes, les représentations graphiques indiquent clairement que les zones urbaines les plus vulnérables se situent dans les zones 1 et 2 caractérisées par de nombreuses constructions en maçonnerie construites avant 1962.

Selon Risk-UE, plus de 38% (1695) des constructions sont des classes de vulnérabilité A et B relatifs aux intervalles de l'indice de vulnérabilité $IV > 0,82$ et $[0,66 < IV \leq 0,82]$ et plus de 43% (1929) des constructions de classes C et D, correspondent à des intervalles de l'indice de vulnérabilité variant de $[0,50 < IV \leq 0,66]$ et de $[0,34 < IV \leq 0,50]$ respectivement, caractérisés des constructions moyennement vulnérables et près 19% (830) de classe E caractérisé par l'intervalle de l'indice de vulnérabilité $[0,18 < IV \leq 0,34]$. En comparaison, selon la méthode ARL, 38% (1694) des constructions sont dans des classes A et B, près de 47% (2073) en classes C et D et plus de 15% (688) en classe E, ce qui assure la fiabilité de cette méthode pour évaluer la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine.

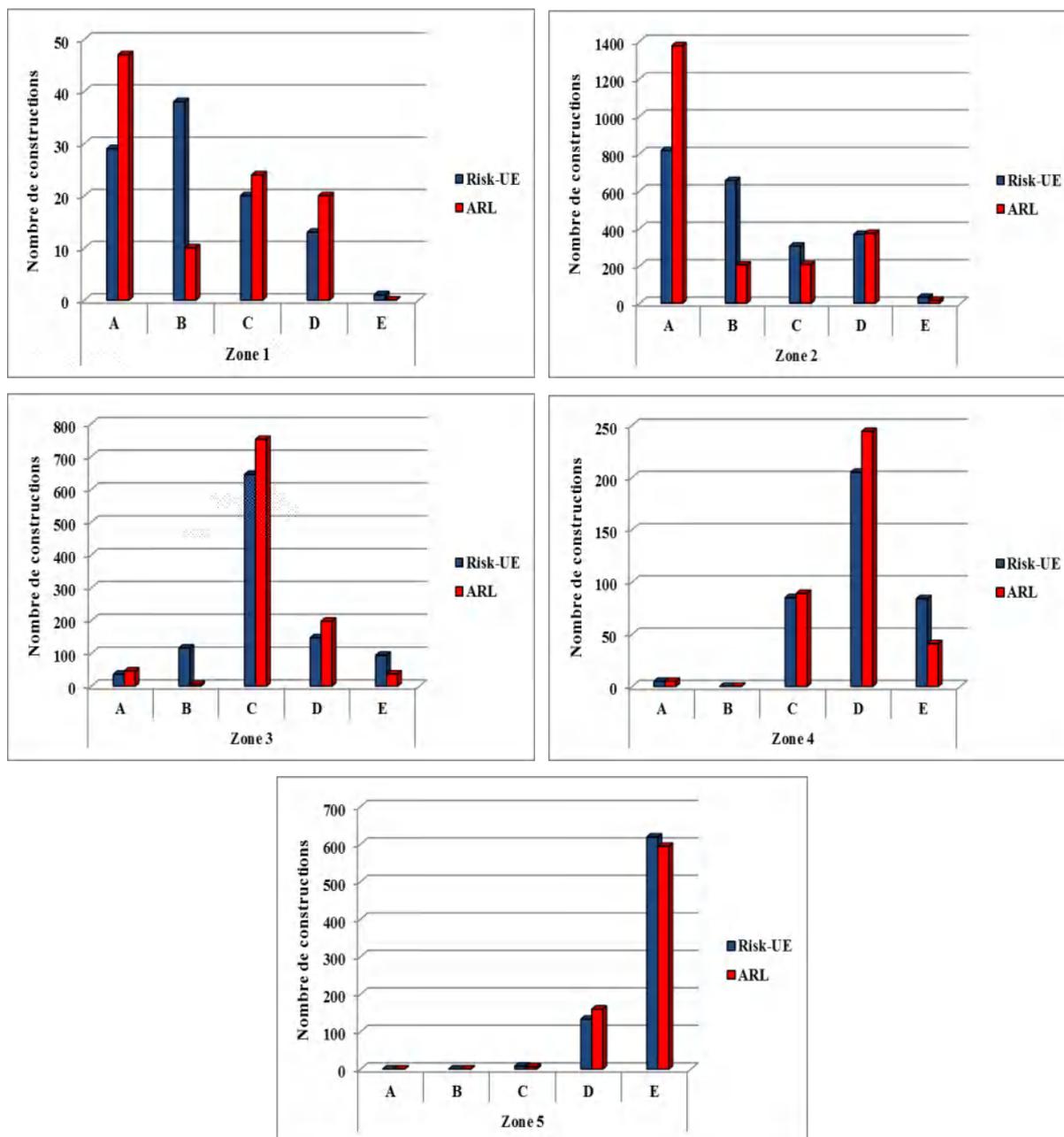


Figure 4.8 : Répartition des classes de vulnérabilité EMS-98 obtenue avec les deux méthodes (Risk-UE LM1 et ARL) pour les différentes zones d'étude.

D'après les histogrammes des différentes zones de la figure 4.8, on note dans la zone 1, une hétérogénéité où toutes les époques de construction sont représentées regroupant toutes les classes de vulnérabilité (A, B, C et D).

La zone 2, près de 71% des bâtiments leur construction remonte à la période 1938-1962, elle est constituée en grande partie de bâtiments en maçonnerie non renforcée (64%), correspondant le plus souvent à des classes de vulnérabilité (A et B). Les bâtiments en béton

armé, construits avant 1962, considérés comme ayant un niveau parasismique faible, représentent plus de 5% des bâtiments qui sont en majorité de classe de vulnérabilité B. Plus de 8% des bâtiments en béton armé, construits entre 1962-1981 se caractérisent par des classes de vulnérabilité (B et C). Cette zone est la plus vulnérable par rapport aux autres zones.

La zone 3 considérée comme la première extension de la ville après l'indépendance, la majorité des constructions en panneaux préfabriqués en béton armé qui ont été construites entre la période 1962 à 1981, la classe prédominante est la classe C, la zone est moyennement vulnérable.

La zone 4, caractérisée par les classes de vulnérabilité moyennes à faibles (C, D et E) où la classe D est prédominante, car la majorité des constructions sont en béton armé, construites entre 1981 et 2003 et présence un nombre très important de constructions en construction métallique.

La zone 5 (les îlots), est la partie de la ville où les normes parasismiques Algériennes (RPA, 2003) sont supposées appliquées, elle est composée uniquement de bâtiments en béton armé. Elle est caractérisée par les classes les moins vulnérables D (plus de 17%) et E (plus de 81%).

D'après les cartes des figures 4.6 et 4.7 et les histogrammes de la figure 4.8, illustrant la distribution des classes de vulnérabilité de différentes zones pour les deux méthodes, nous avons constaté une bonne concordance entre les deux méthodes où la répartition de la vulnérabilité est approximativement identique, avec un petit écart dans la répartition géographique.

4.4.2 Evaluation de la conformité de distribution des dommages entre Risk-UE LM1 et ARL

Pour mieux comprendre les différences entre les méthodes Risk-UE LM1, ARL0 et ARL1, on a estimé la précision du degré de dommage en prenant en compte les trois classes (dommages légers [D0+D1], dommages modérés [D2+D3], et dommages sévères [D4+D5]) afin de faciliter la comparaison, pour plusieurs scénarios sismiques (V, VI, ..., XII), ces classements sont similaires à la classification adoptée par les organismes nationaux de contrôle (CTC et CGS) dans les travaux d'expertise post-sismiques en Algérie. Cette classification prend :

- La couleur verte : bon état (aucun risque et intervention nécessaire, légère intervention non structureaux) ;
- La couleur orange : présence de pathologies (nécessité de réparations et d'interventions) ;
- La couleur rouge : construction à risque (nécessité d'une intervention lourde ou démolition).

La précision est calculée comme la somme des différences en valeur « la valeur absolue » et « la valeur réelle » pour chaque classe de dommage, la précision calculée selon la formule. (4.3) développée par (Diana et al. 2018), pour chaque intensité macrosismique EMS-98, à savoir : les précisions entre Risk-UE LM1 et ARL1 (P2) sont principalement dues à la différence des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique ; les précisions entre ARL0 et ARL1 (P3) sont dues au modèle de calcul des dommages avec la même vulnérabilité ; et les précisions entre Risk-UE LM1 et ARL0 (P1) sont la combinaison des deux raisons précédentes.

$$accuracy_{deg.} = 1 - \frac{\sum_{k=D0+D1}^{D4+D5} |n^{\circ}build_{k_{real}} - n^{\circ}build_{k_{attr}}|}{tot.build} \quad (4.3)$$

Les résultats de comparaison entre les trois méthodes sont représentés sur la figure 4.9:

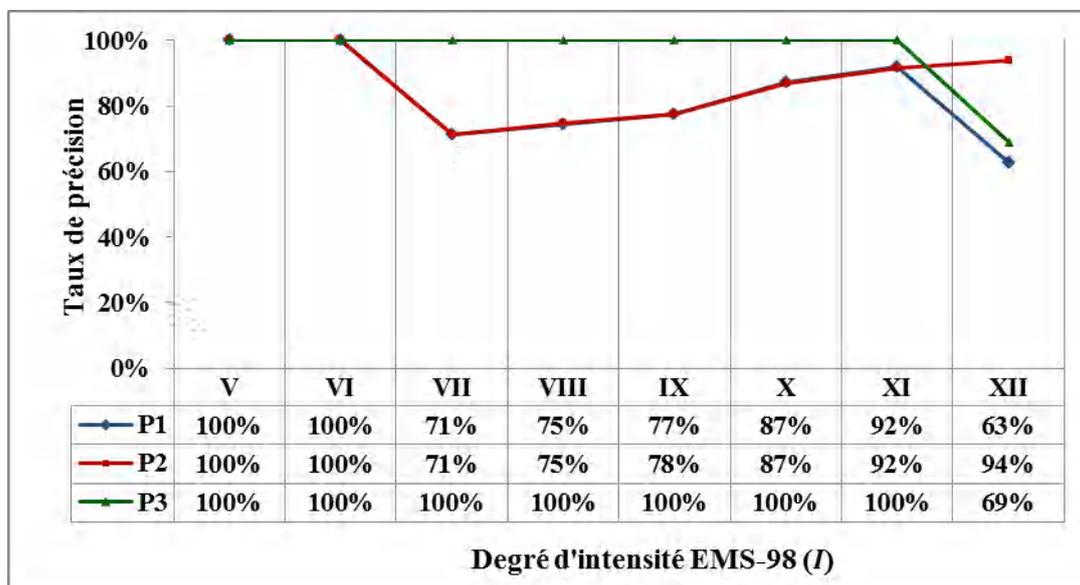


Figure 4.9 : Précisions du degré de dommage entre les méthodes Risk-UE LM1, ARL0 et ARL1 pour des intensités macrosismiques EMS-98 entre V à XII.

On constate que pour toutes les intensités (Voir figure 4.9), la précision est globalement supérieure à 70%, avec une précision de l'ordre 100% dans les cas d'intensités de V à XI pour P 3 (les précisions entre ARL0 et ARL1).

On constate qu'à partir de l'intensité VII, les précisions P1 (les précisions entre Risk-UE LM1 et ARL0) et P2 (les précisions entre Risk-UE LM1 et ARL1) correspondent à 71% ; les précisions augmentent au fur et à mesure de l'augmentation de l'intensité et atteignent 92% pour I=XI et 94% pour I=XII.

Néanmoins, il est à signaler que, les faibles précisions sont remarquées à l'intensité XII pour P1 (63%) et P3 (69%).

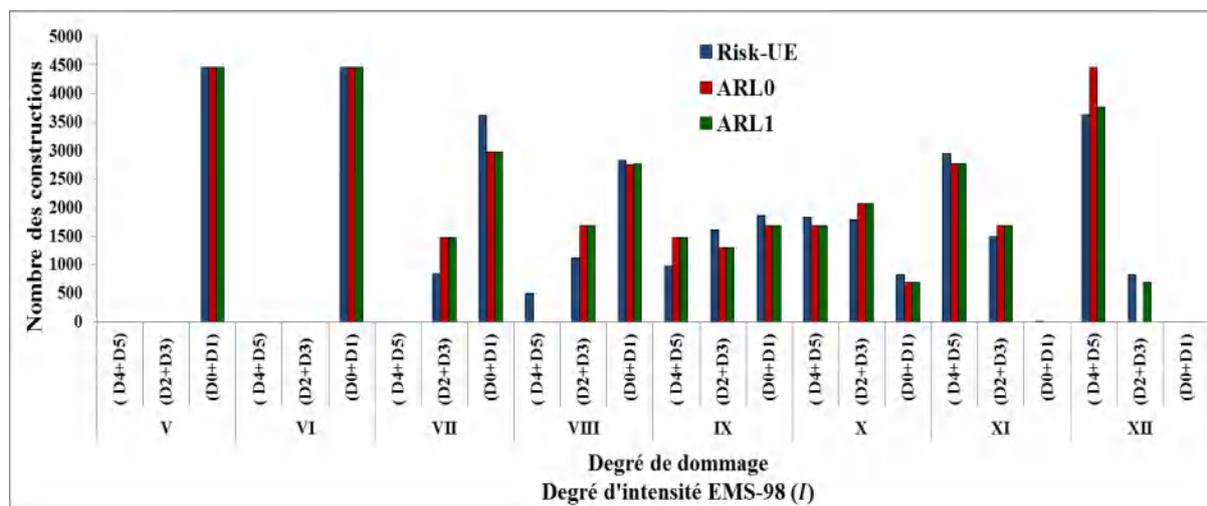


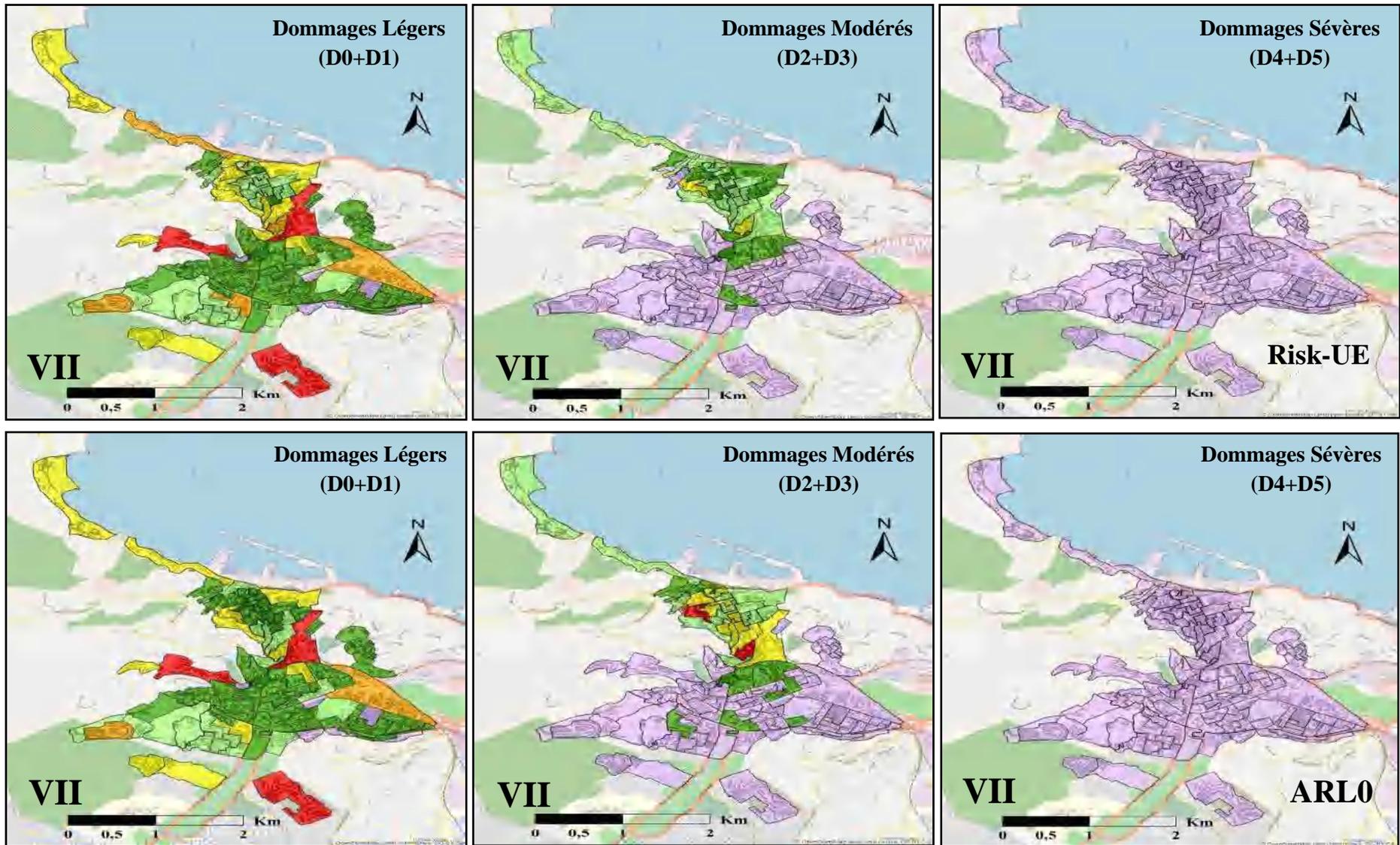
Figure 4.10 : Distribution des dommages de bâtiments en fonction de différents scénarios sismiques obtenus par ARL et Risk-UE LM1 à Skikda.

La figure 4.10, montre la répartition des dommages en fonction du nombre de bâtiments pour différents scénarios sismiques. L'analyse détaillée indique une similitude approximativement sur le nombre de bâtiments non endommagés entre les trois méthodes, en particulier pour les intensités faibles (V, VI), qui n'ont pas engendré de dommages moyens et sévères. On observe par contre de légères différences dans la répartition des dommages pour les intensités moyennes et élevées (VII à XII). En outre, on constate un accord parfait entre ARL0 et ARL1 pour toutes les intensités sauf pour l'intensité la plus élevée (XII), ceci est lié au modèle de calcul adopté.

Sur la base de comparaisons des figures 4.9 et 4.10, on peut conclure que la prévision des dommages et l'évaluation de la vulnérabilité sismique, à l'aide de la méthode ARL, permettent d'obtenir la même grandeur de dommages que la méthode Risk-UE LM1.

Les figures 4.11 et 4.12, montrent les probabilités de survenance des dommages dans différents îlots conformément à la carte de la distribution de la population 2020, pour deux scénarios sismiques : le scénario déterministe (VII qui a affecté la ville) et le pire scénario probabiliste d'un séisme d'intensité VIII-XI (prendre les grands événements sismiques correspond à la période de retour 500 ans de $PGA=0,27g$) respectivement, en fonction du nombre de constructions qui ont subi des dommages allant de légers à sèvres.

Les cinq zones sont divisées en îlots conformément à la carte de distribution de la population 2020, ceci est jugé comme la meilleure échelle d'évaluation des scénarios pour notre étude, déjà actualisée récemment. Cette distribution est adoptée par les autorités locales de la ville de Skikda dans le suivi et l'évolution urbanistique de la ville. Nous avons observé des résultats similaires pour les trois approches.



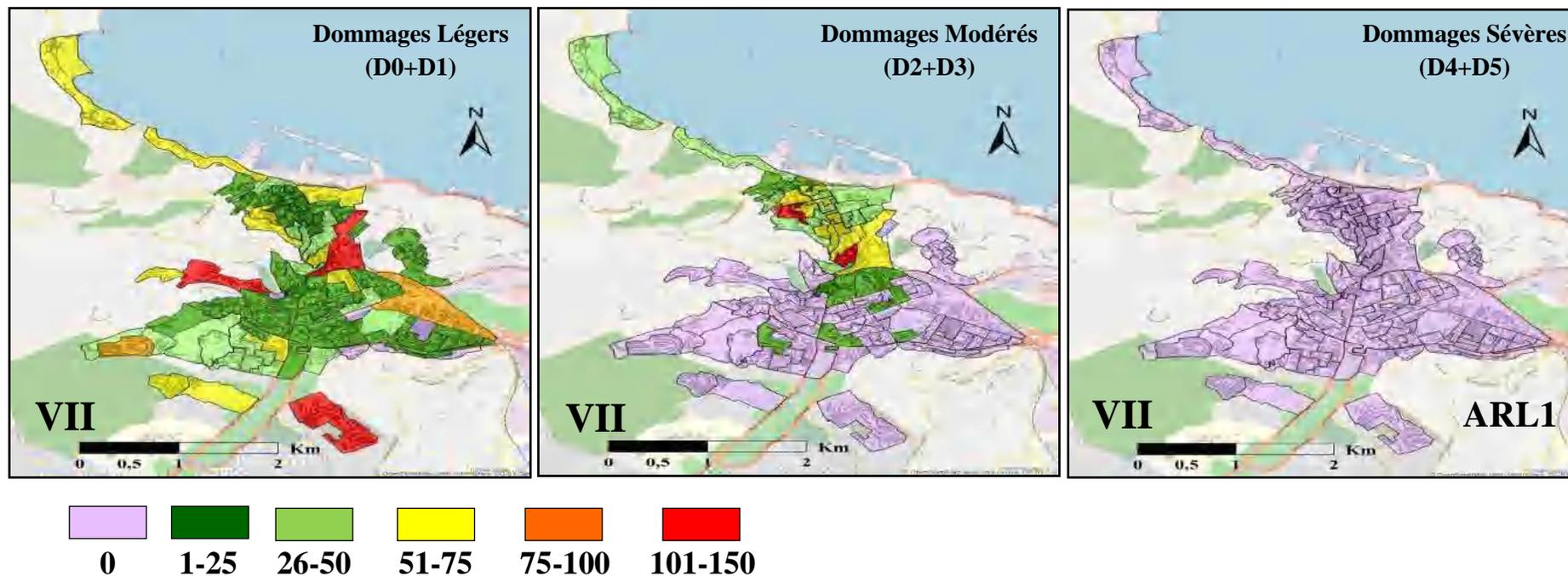
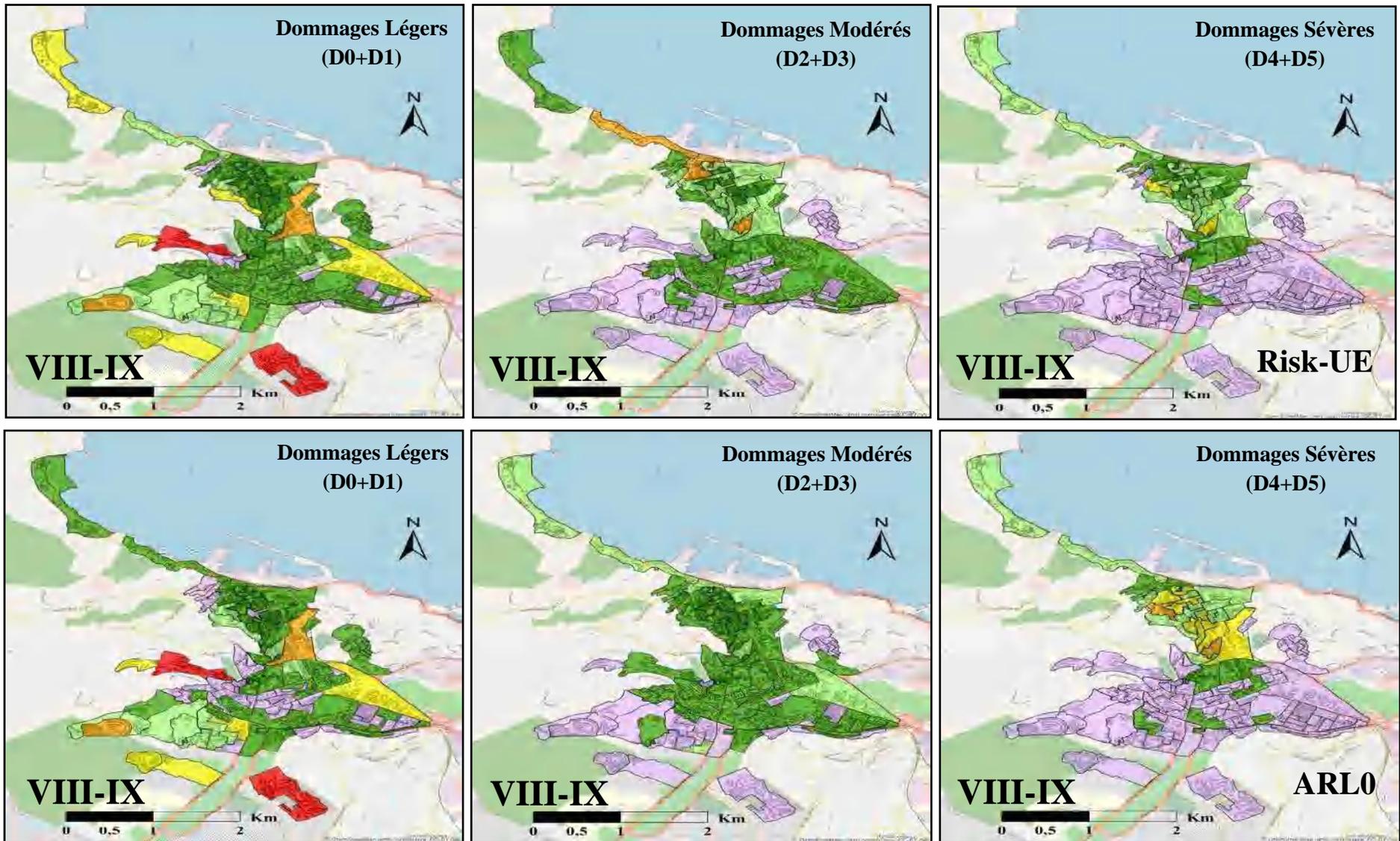


Figure. 4.11 : Répartition spatiale des dommages pour les îlots conformément à la carte de la distribution de la population 2020, pour un scénario déterministe d'intensité VII, selon Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1).

D'après les résultats des cartes de scénario sismique déterministe, l'intensité VII engendre des dommages légers à modérés dans la zone touristique de Stora (zone 1) et le centre historique de la ville (zone 2), quelle que soit l'approche de calcul (Risk-UE LM1, ARL0 et ARL1). Des dommages modérés sont constatés dans la zone 3. Pour la zone 4 et la zone 5, les dommages sont légers, en raison du fait que la majorité des bâtiments en béton armé sont construits conformément aux normes parasismiques algériennes (RPA, 2003), et des bâtiments construits entre 1981 et 2003 conformément aux premières normes parasismiques algériennes (RPA, 1981), et la présence d'un nombre non négligeable de constructions à ossature métallique. Il n'existe pas de dommages sévères estimés pour toutes ces zones.



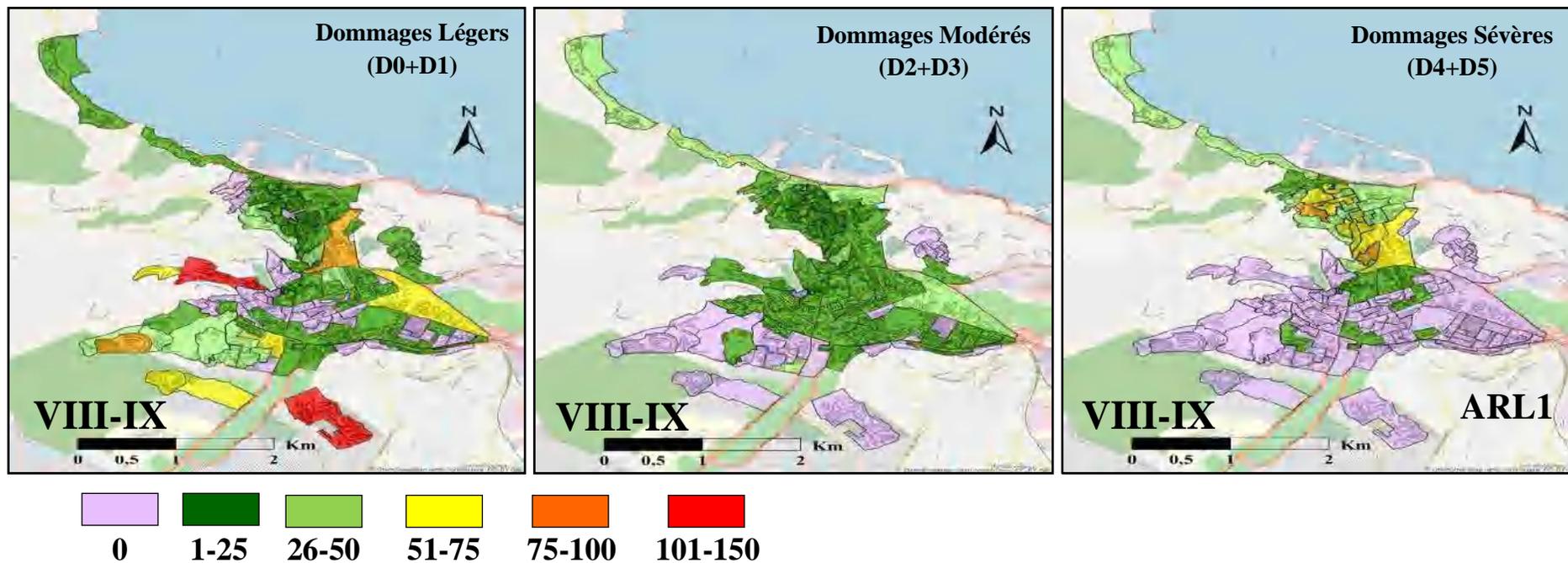


Figure. 4.12 : Répartition spatiale des dommages pour les îlots conformément à la carte de la distribution de la population 2020, pour le pire scénario probabiliste d'intensité VIII-XI, selon Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1).

Les résultats de scénario sismique probabiliste d'intensité IIIV-XI, fait ressortir par les dommages sèvres subis la zone 1 et la zone 2 selon toutes les approches de calcul (Risk-UE, ARL0 et ARL1). Ceci est dû notamment à la mauvaise qualité sismique des bâtiments dans les zones 1 et 2, dont (66% (Risk-UE) et/ou 56% (ARL)) des constructions de la zone 1 (la touristique de Stora) et (68% (Risk-UE) et/ou 73% (ARL)) de la zone 2 (la vieille ville), sont classées en A et B, ces zones constituées principalement de constructions en maçonnerie (51% (zone 1) et (plus 64%(zone 2)). La zone 3 subit des dommages sévères avec des taux minimales, elle est généralement constituée de constructions du système poteaux-poutres et des panneaux préfabriqués en béton armé construits entre 1962 et 1981 qui ont une certaine résistance sismique. Les zones 4 et 5 n'indiquent que des dommages légers.

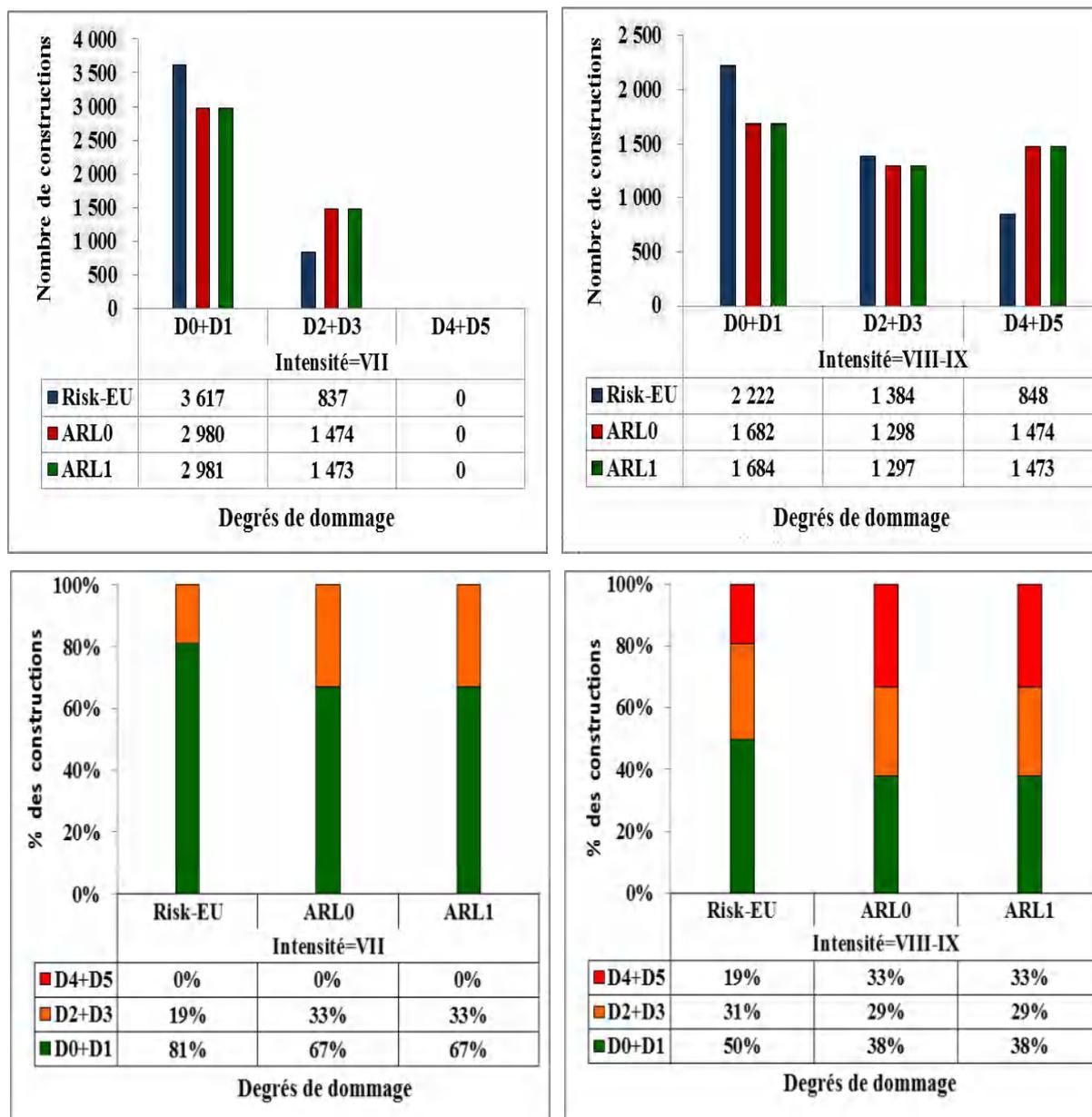


Figure 4.13 : Comparaison de la réparation des dommages (en nombre des bâtiments et en pourcentage) obtenus par Risk-UE LM1 et ARL (Niveau 0 et Niveau 1) pour les deux scénarios sismiques : scénario déterministe (VII) et le pire scénario probabiliste (VIII-IX).

Les résultats de figure 4.13, servent pour la comparaison et conduisent aux commentaires :

- Les méthodes ARL0 et ARL1 prévoient globalement des degrés de dommages plus rigoureux que la méthode Risk-UE, par exemple pour le VIII-IX, le pourcentage de bâtiments à un degré de dommages sévères par les méthodes ARL0 et ARL1, est supérieur à celui estimé par la méthode Risk-UE LM1 19% et 31% pour (ARL0 et ARL1).

- Le faible écart peut être attribué aux difficultés souvent, constatées, pour situer la limite entre les classes de vulnérabilité A et B.
- Les méthodes Risk-UE et ARL conduisent approximativement à des résultats globaux similaires pour les deux scénarios : d'intensité VII et d'intensité VIII-IX correspondant à l'accélération maximale au sol $PGA=0,27g$ de période de retour de 500 ans.

4.5 Pertes socio-économiques

L'estimation des pertes socio-économiques prend une grande importance dans l'analyse du risque sismique dans les dernières années. Il existe plusieurs méthodologies pour estimer les pertes en vies humaines telles que proposées par Vacareanu et al. (2004) dans le cadre de projets Risk-UE. Cette approche est basée sur la densité de population, corrélant le ratio de mortalité à la magnitude du séisme. Une autre approche, pour la prédiction du nombre de morts, est basée sur le nombre de population et le niveau d'intensité selon l'échelle MMI, tiré des données du séisme de Northridge (les Etats-Unis) 1994 (Peek-Asa et al. 2000). Les inconvénients des deux approches précédentes ne tiennent pas compte de la typologie structurale, le degré de dommage physique ou la gravité des blessures. Pour cette raison (ATC-13 1985 ; Coburn et Spence, 1992 ; Brammerini et al. 1995 ; HAZUS 2003b ; Giovinazzi, 2005) ont développé des modèles de pertes en vies humaines, basés sur les dommages structuraux et sur la base d'observations et jugements d'experts.

4.5.1 Evaluation des pertes humaines

On sait que les séismes peuvent entraîner la perte des vies humaines, particulièrement dans les agglomérations qui se distinguent par des constructions de types maçonnerie. De ce fait, il est indispensable d'établir un plan d'urgence, afin d'assurer la protection des personnes afin d'atténuer le nombre de victimes en cas de séisme. Durant les cent dernières années, on a assisté à un nombre important de séismes qui ont conduit à la perte de près de 1,5 million de personnes (Coburn et Spence 2002).

L'évaluation des pertes humaines, des personnes ayant devenu sans-abri, des blessés et des décès, sont obtenus à l'aide des équations empiriques de Guettiche, Guéguen & Mimoune (2017b), développés et appliqués à une ville similaire à celle de Skikda. Les calculs ont été conduits avec des scénarios de séismes antécédents.

Dans ces équations, on relève que les variables prédictives de perte humaine sont liées à la densité de la population (nombre de populations) et au nombre de bâtiments de degrés de dégâts [D4+ D5], évalués selon différents scénarios sismiques.

Tableau 4.7 : Equations empiriques de régression pour évaluer les pertes humaines en fonction des variables [D4+D5] et la population affectée (Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017b).

Type de pertes humaines	Formules
Séisme en Algérie :	
Dégâts (D) +Population (P)	
Sans-abri	$H = 0,77D + 0,25P + 0,40$ (4.4)
Blessures	$I = 0,63D + 0,39P - 1,50$ (4.5)
Décès	$F = 0,40D + 0,64P - 2,35$ (4.6)

$H \log_{10}$ (Homeless), $I \log_{10}$ (Injuries), $F \log_{10}$ (Fatalities), $D \log_{10}(D4 + D5)$, $P \log_{10}(POP.Unit)$.

Dans cette étude, le nombre de population exposée est extrait des rapports directs fournis par l'office national des statistiques (ONS 2020), où les données démographiques géolocalisées sont présentées par îlots urbains (Voir figure 4.14).

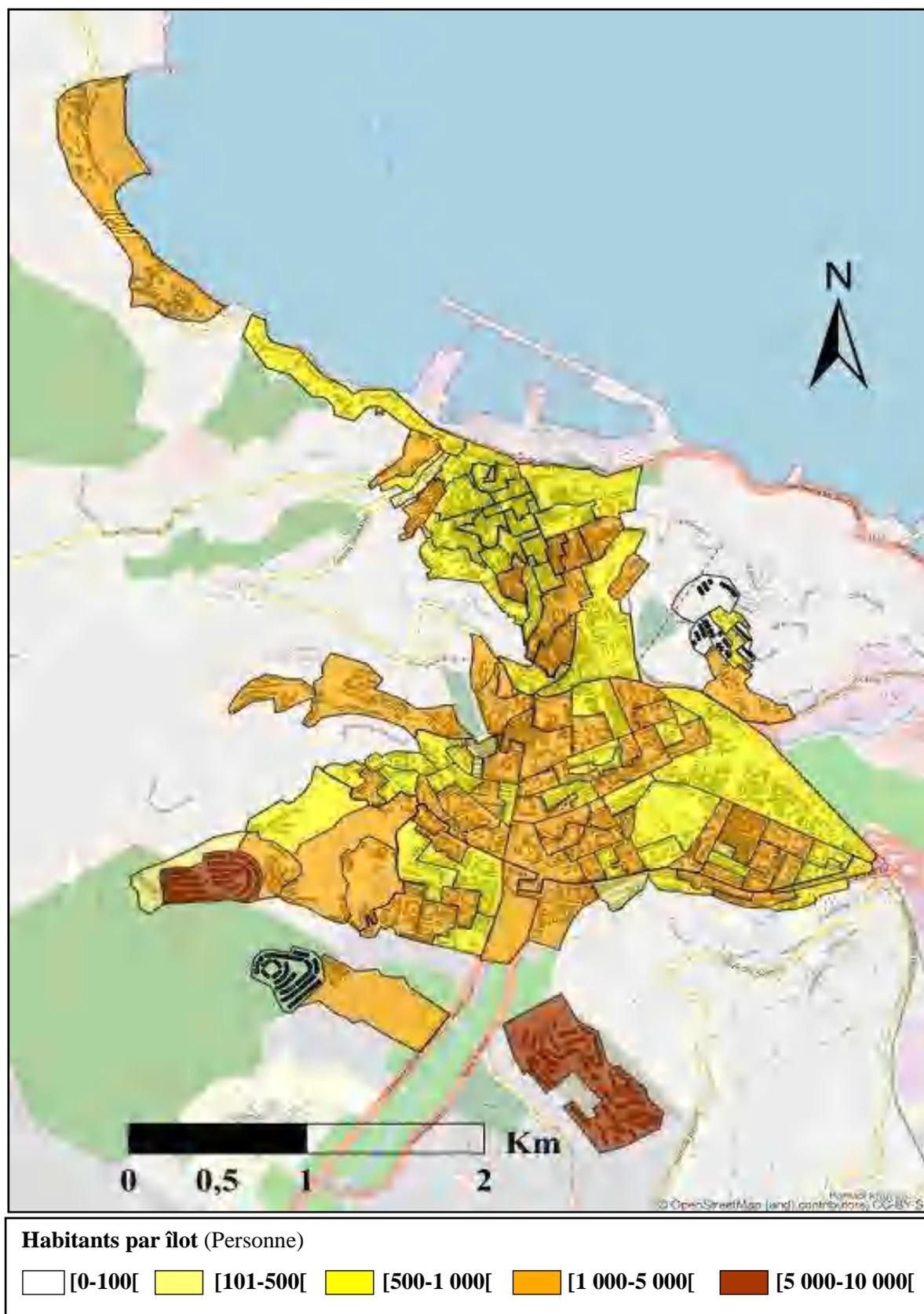


Figure 4.14 : Distribution des îlots selon (ONS 2020) et le nombre d’habitants par îlots sous plateforme SIG en utilisant l’Open Street Map.

On prend en compte le nombre total de bâtiments référencés avec des dommages sévères à très sévères, classés dans les grades de dommages [D4+D5] selon l'échelle de dommages EMS-98. Ce processus combine la distribution spatiale de la population et l'état des dommages. Selon les différents rapports d'experts, réalisés après des tremblements de terre dans le monde, les pertes sont généralement calibrées aux états de dommages sévères [D4+D5] pour déterminer les pertes directes.

Dans cette étude, il n'existe pas de dommages de dégâts [D4 + D5] estimée pour les deux scénarios (intensité VII qui affecte la ville (événements historiques), VII-VIII pour une période de retours 100 (scénario probabiliste)), mais pour les deux scénarios sismiques probabilistes des intensités VIII et VIII-IX, qui correspondent respectivement à des périodes de retour de 200 et 500 ans, il y a un dommage [D4+D5]. Les résultats de répartition des pertes humaines pour chaque section, causées par deux scénarios sismiques probabilistes pour chaque section sont présentés à la figure 4.15.

Selon les statistiques de l'ONS 2020 (ONS 2020), les zones d'étude comptent à environ de 136477 habitants.

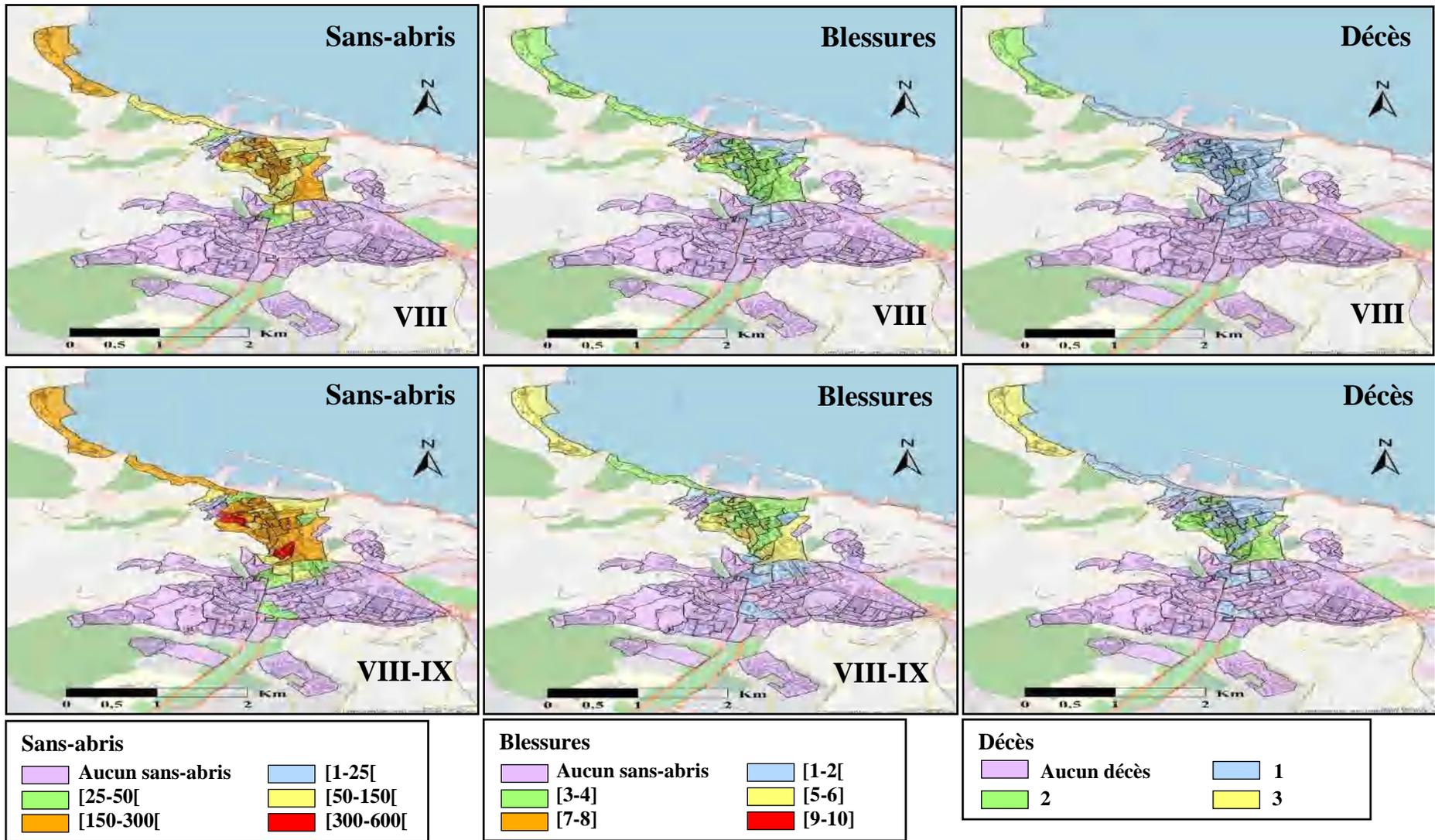


Figure 4.15 : Scénarios des pertes humaines (Sans-abris, Blessures et Décès) selon deux sismiques probabilistes.

Le tableau 4.8 résume les pertes pour chaque section selon différents scénarios, pour chaque zone :

Tableau 4.8 : Pertes humaines calculées pour des scénarios déterministe et probabilistes dans la zone d'étude.

Les pertes en vies humaines	Scénarios Sismique	Zone	1		2		3		4		5		Total ; Taux par rapport au POP Unit
		Nom de la zone	La zone touristique de Stora		La vieille ville		Les allées, la cité 20 Août 1955, cité Merdj Edib, cité 500 et 700 Logements		Le Boulevard Houari Boumédiène et cité Aïssa Boukerma		Les îlots : Briqueterie, Msiouene, Zef Zaf et Bouabaz		
			D4+D5	Résultat	D4+D5	Résultat	D4+D5	Résultat	D4+D5	Résultat	D4+D5	Résultat	
Sans-abri	VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VII -VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VIII	19	175	515	3502	16	154	0	0	0	0	3831 (2,8%)	
	VIII-IX	28	236	787	4898	33	305	0	0	0	0	5439 (4%)	
Blessures	VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VII -VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VIII	19	4	515	76	16	4	0	0	0	0	84 (0,6‰)	
	VIII-IX	28	6	787	99	33	7	0	0	0	0	112 (0,82 ‰)	
Décès	VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VII -VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	VIII	19	2	515	27	16	3	0	0	0	0	32 (0,23‰)	
	VIII-IX	28	3	787	36	33	3	0	0	0	0	42 (0,31‰)	
POP.Unit			2703		29621		58384		15935		29834		136477

D'après le tableau 4.8, les pertes humaines sont concentrées dans la zone 2 (la vieille ville) qui est très peuplée et qui contient rarement des bâtiments renforcés. La plupart des bâtiments ont été construits pendant la période coloniale en maçonnerie non chaînée ainsi que les constructions en béton armé construites avant l'établissement des premières règles parasismiques qui présentent un mauvais état de conservation.

4.5.2 Evaluation des pertes économiques

Les pertes économiques sont soit directes : généralement calculées en termes de dommages aux constructions et de leur valeur, qui est liée à la richesse de la zone d'étude (PIB (produit intérieur brute par habitant) et la concentration de la population ; soit indirectes : telles que les coûts de réhabilitation et de reconstruction.

a. Perte économique directe

(Chen et al. 1997 ; Cha 1998 ; Chen et al. 2001 ; Dunbar et al. 2002 ; Heatwole et Rose, 2013 ; Guettiche, Guéguen & Mimoune, 2017b) ont été développés une approche d'estimation rapide et approximative des pertes économiques dues aux séismes en combinant les données détaillées sur le produit intérieur brut (PIB (GDP)), les données démographiques (le nombre de la population locale) et les données publiées sur les pertes dues aux tremblements de terre pour chaque intensité sismique.

Guettiche, Guéguen & Mimoune (2017b) ont proposé un modèle de calcul des pertes économiques ajustées pour l'année 2015 à la valeur en USD ($L_{\$2015}$), pour différents scénarios sismiques prenant en compte les degrés de dommages [D4+D5] et le produit intérieur brut (PIB (GDP)) de la zone touchée à la date du séisme, ainsi que les données démographiques à partir de la relation suivante :

$$L_{\$2015} = 0,47D + 0,46G + 3,07 \quad (4.7)$$

$L_{\$2015}$: $\log_{10}(L_{\$2015})$, D : $\log_{10}(D4+ D5)$, G $\log_{10}(GDP.Unit)$.

Où : $GDP.Unit$: produit intérieur brut "PIB" (GDP) de la zone touchée exprimée en millions dollars américains.

Le PIB par habitant (GDP_{PC}) en Algérie correspondant à l'année 2019 (World Bank, 2020) est de 3973,964 USD. Pour une zone considérée, ($GDP.Unit$) peut-être défini comme suit :

$$GDP\ Unit = GDP_{PC} \times POP\ Unit \quad (4.8)$$

Pour actualiser la valeur de la perte économique ajustée pour l'année 2015 ($L_{\$2015}$) à la valeur actuelle en 2021 ($L_{\$2021}$), on utilise l'équation développée par (Dollet et Guéguen, 2021) :

$$L_{\$2021} = L_{\$2015} * Ide_{2021} / Ide_{2015} + \sigma \tag{4.9}$$

Où : $L_{\$2015}$: est la perte économique en USD \$ par an, Ide_{2015} : est l'indice de conversion en 2015, Ide_{2021} : est l'indice de conversion en 2021 et σ : est l'erreur associée. La variation de l' Ide (Indice économique moyen) en fonction de l'année (Yr) est donnée par les équations développées par (Dollet et Guéguen, 2021) ; dans le présent travail, on n'utilise que l'équation après 1967 :

$$Ide = 1,9 * 10^{-2} Yr - 37,03 \pm 0,02 \text{ après } 1967 \tag{4.10}$$

Les résultats sont présents sur la figure 4.16 :

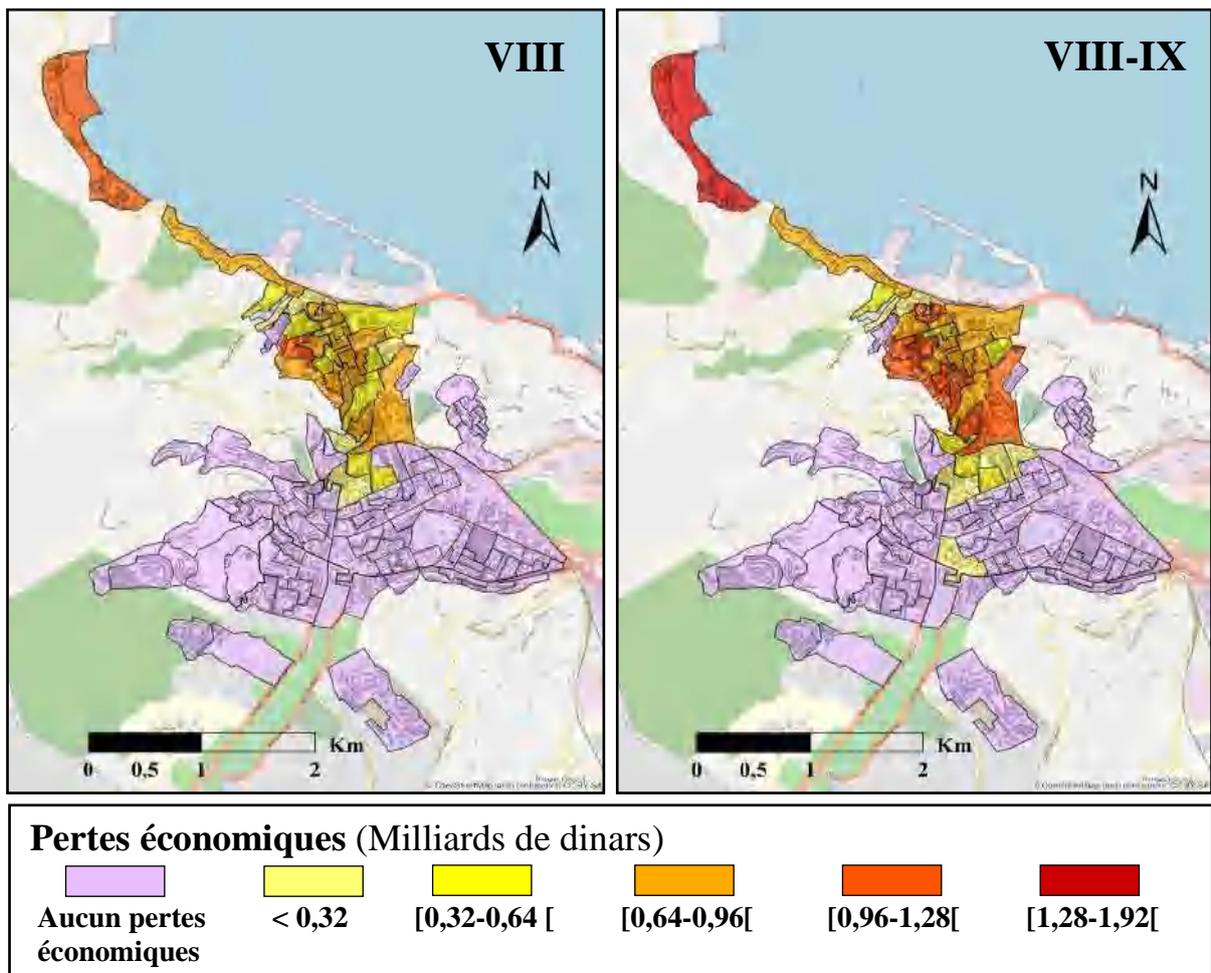


Figure 4.16 : Distribution des pertes économiques directes selon deux scénarios sismiques probabilistes.

La figure 4.16, montre que les coûts totaux des pertes économiques en milliards de dinars pour chaque section, engendrée par les deux scénarios sismiques probabilistes.

Tableau 4.9 : Pertes économiques en USD calculées pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques		Scénario déterministe	Scénarios probabilistes		
Degré d'intensité macrosismique		VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX
Pertes économiques ajustées à la valeur en USD 2021 (L_{2021}) (en millions d'USD) pour chaque zone	Zone 1	0	0	9	10
	Zone 2	0	0	132	163
	Zone 3	0	0	9	17
	Zone 4	0	0	0	0
	Zone 5	0	0	0	0
Pertes économiques totales ajustées à la valeur en USD 2021 (L_{2021}) (en millions d'USD)		0	0	150	190

Tableau 4.10 : Pertes économiques en dinar calculées pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques		Scénario déterministe	Scénarios probabilistes		
Degré d'intensité macrosismique		VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX
Pertes économiques ajustées à la valeur en dinar 2021 (L_{2021}) (en milliards de dinars) pour chaque zone	Zone 1	0	0	1,08	1,30
	Zone 2	0	0	16,91	20,94
	Zone 3	0	0	1,13	2,21
	Zone 4	0	0	0	0
	Zone 5	0	0	0	0
Pertes économiques totales ajustées à la valeur en dinar 2021 (L_{2021}) (en milliards de dinars)		0	0	19,12	24,45

Les tableaux 4.9 et 4.10, présentent les pertes économiques estimées en millions d'USD et en milliards de dinars, respectivement, pour tous les ilots de la zone d'étude. Les pertes économiques attendues dépendront du nombre de classes de dommages [D4+D5] aux bâtiments, qui varieront selon le scénario sismique considéré. Un séisme d'intensité VII ne produit quasiment pas de dommages importants, par contre un séisme d'intensité VIII-IX peut engendrer des pertes estimées à près de 190 millions d'USD (soit 24,45 milliards de dinars).

b. Pertes économiques indirectes (Coût de la restauration)

Les pertes économiques indirectes sont estimées selon le coût actuel de la réhabilitation et/ou de la reconstruction des bâtiments endommagés. Cette valeur n'inclut pas le coût du terrain. Le coût économique absolu (S_{Cost}) en milliers de dollars (\$USD) est donné par l'équation suivante (HAZUS 1999) :

$$S_{Cost} = \sum_{k=2}^5 CS(k) = V_c \cdot \sum_{k=2}^5 \sum_{j=1}^{Nb} [Area(j) \cdot P_s(k, j) \cdot RC(k, j)] \quad (4.11)$$

Où : S_{Cost} est la somme des coûts de réparation $C_S(k)$ dus aux dommages k (le degré 1 n'est pas considéré puisqu'il n'y a aucun coût induit); V_C est le coût par unité de surface (m^2), une valeur constante de V_C est supposée pour tous les types de bâtiments; $Area$ est la superficie du bâtiment j ; $P_S(k, j)$ est la probabilité pour la construction j d'être dans un état de dommages k et $R_C(k, j)$ est la valeur de la réparation suite au degré de dommages k pour la construction j ; $R_C(k, j)$ est donné en un pourcentage du coût de repositionnement par mètre carré.

Pour le modèle utilisé dans cette étude, on va ajouter le coût par unité de surface est divisé en deux valeurs pour les bâtiments soit en béton armé et soit en maçonnerie dans cette équation, devient comme suit :

$$S_{Cost} = \sum_{k=2}^5 CS(k) = V_c(t) \cdot \sum_{k=2}^5 \sum_{j=1}^{Nb} [Area(j, t) \cdot P_s(k, j) \cdot RC(k, j, t)] \quad (4.12)$$

Où : $V_C(t)$ est le coût par unité de surface du type du bâtiment j soit pour les bâtiments en béton armé et pour les bâtiments en maçonnerie.

Tableau 4.11 : Coût de réparation absolu par unité de surface pour chaque état de dommage et les pourcentages de réparation pour repositionner le coût sont également indiqués par (ATC-13 1985).

États de dommages	Niveau de dommage	Description du dommage	Pourcentages (ATC-13 1985)	Valeurs absolues pour construction en maçonnerie (m ² en USD)	Valeurs absolues pour construction en béton armé (m ² en USD)
Aucun	D1	Pas de dommages a légers	2	15 USD	15 USD
Léger	D2	Dommages moyens (Dégâts structuraux légers Dégâts non structuraux modères)	10	75 USD	74 USD
Modéré	D3	Dommages sévères (Dégâts structuraux modères Dégâts non structuraux importants)	50	377 USD	372 USD
Sévère	D4	Dommages très sévères (Destruction partielle (dommages irréparables))	100	754 USD	743 USD
Destructeur	D5	Destruction (Dégâts structuraux très importants (dommages irréparables))	100	754 USD	743 USD

En 2016, les autorités locales ont lancé un programme de réhabilitation au niveau de la zone d'étude, réalisé par office de promotion et de gestion immobilière (OPGI) de Skikda, le coût de la réhabilitation a été estimé de façon raisonnable par mètre carré pour un bâtiment en maçonnerie à **48183,00 dinar** soit **377 USD**, ce coût correspondant à un état de dégât **D3** (Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants); fissures importantes dans la plupart des murs), car les bâtiments touchés par la réhabilitation sont classés à un état de dégradation moyen et la réhabilitation a concerné les murs porteurs et les planchers endommagés.

Donc la valeur raisonnable de V_C pour un bâtiment en maçonnerie est de **754 USD/m²**, pour un bâtiment en béton armé le prix de mètre carré de réalisation est de **95000,00 dinar/m²** soit **743 USD/m²** (le prix de vente du logement promotionnel public, proposé par le ministère de l'habitat, l'urbanisme et de la ville de l'Algérie en 2018) (Avec un taux de **1 USD = 127,88 dinar, Septembre 2020**) (Bank of Algeria, 2020).

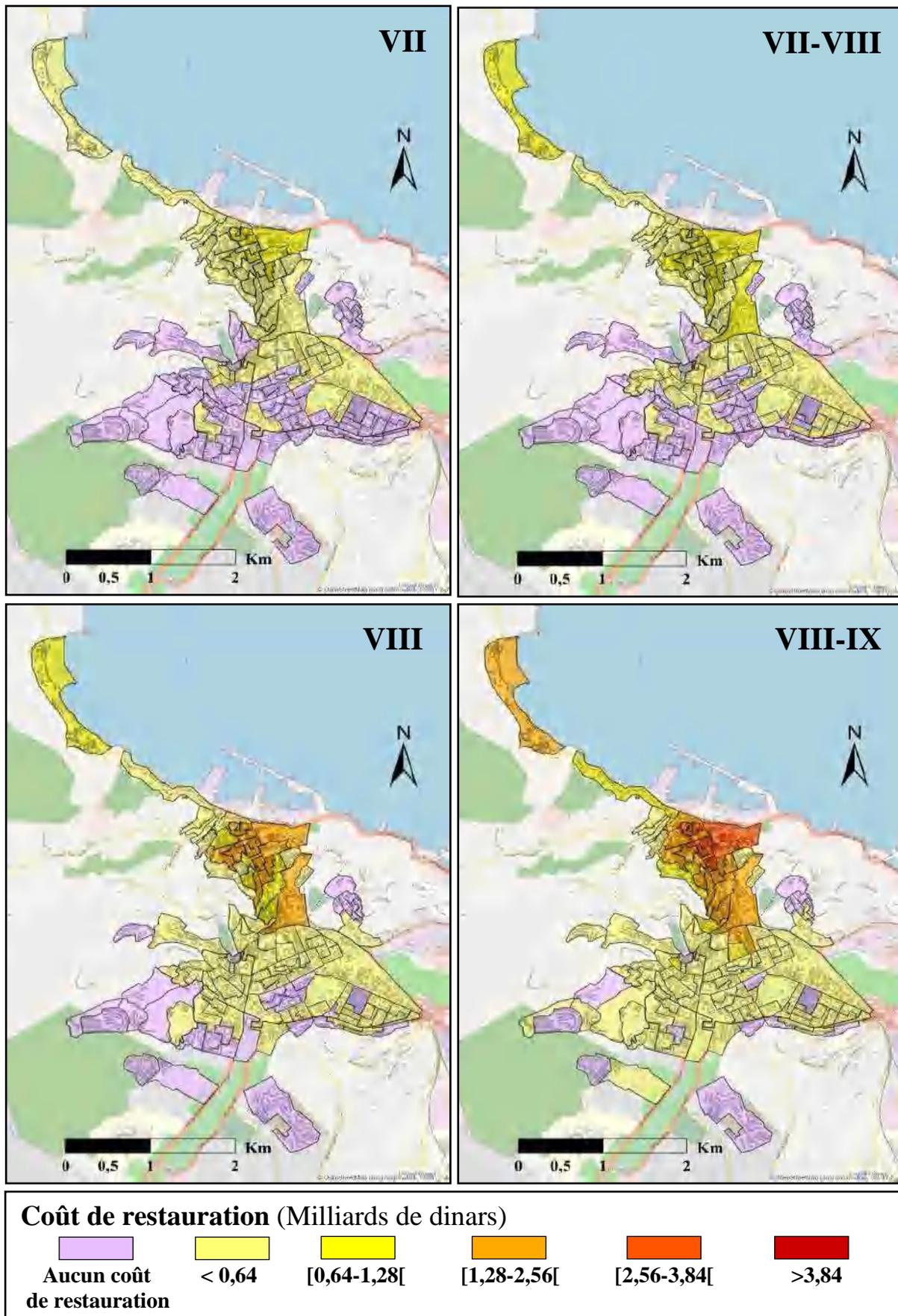


Figure 4.17 : Distribution des coûts de réhabilitation en milliards de dinars.

La figure 4.17, montre les coûts de réhabilitation en milliards de dinars pour chaque section et pour les différents scénarios déterministes et probabilistes. Les tableaux 4.12 et 4.13, montrent les coûts totaux de réhabilitation en millions d'USD et en milliards de dinars, respectivement, pour les bâtiments endommagés dans la zone d'étude. Le coût estimé va de 89,2 millions d'USD (soit 11,58 milliards de dinars) pour le scénario déterministe d'intensité VII à 508 millions d'USD (soit 65,05 milliards de dinars) pour le scénario probabiliste le plus défavorable d'intensité VIII-IX.

Tableau 4.12 : Coût de restauration en USD calculé à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques		Scénario déterministe	Scénarios probabilistes		
Degré d'intensité macrosismique		VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX
Coût de la restauration (en millions d'USD) pour chaque zone	Zone 1	2	5	8.8	15
	Zone 2	83	128	253	393
	Zone 3	4	8	31	86
	Zone 4	0,2	1	3	13
	Zone 5	0	0	0.2	1
Coût total de la restauration (en millions d'USD)		89,2	142	296	508

Tableau 4.13 : Coût de restauration en dinar calculé à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques		Scénario déterministe	Scénarios probabilistes		
Degré d'intensité macrosismique		VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX
Coût de la restauration (en milliards de dinars) pour chaque zone	Zone 1	0,34	0,66	1,14	1,90
	Zone 2	10,67	16,47	32,36	50,29
	Zone 3	0,57	1,11	3,91	11,00
	Zone 4	0	0,01	0,40	1,66
	Zone 5	0	0	0.03	0,20
Coût total de la restauration (en milliards de dinars)		11,58	18,25	37,81	65,05

4.5.3 Estimation des débris générés

Les débris sont considérés comme un danger induit ou un effet secondaire d'un séisme (Tantala et al. 2008). L'estimation des débris est effectuée de manière empirique, sur la base d'observations de dommages survenus lors de séismes passés, pour les états de dommages des éléments structurels et non structurels (FEMA/NIBS 2002). Deux types de débris sont considérés : le premier est celui qui tombe en gros morceaux, par exemple des éléments en acier ou des éléments en béton armé ; le second est les débris plus petits, tels que la brique, le bois, le verre, etc. Le poids total des débris, en tonne, est obtenu pour chaque bâtiment de typologie k et pour chaque type de débris i , en multipliant la surface construite par la fraction de débris attendue. $EDF_S(i, k)$ dus à l'état de dommage structurel j (D_k) (Irizarry et al. 2011). Cette fraction est modélisée par l'équation suivante :

$$EDF_S(i, k) = \sum_{k=2}^5 P_S(j, k) \cdot DF_S(i, j, k) \quad (4.13)$$

$P_S(j, k)$ est la probabilité d'un état de dommage structurel j pour la classe de construction k ; et $DF_S(i, j, k)$ est la fraction de débris de type i pour la classe de bâtiments k si l'état de dommages structurels j se produit. Cette fraction de débris est calculée au moyen de l'équation suivante :

$$DF_S(i, j, k) = WE(i, k)GF_S(i, j, k) \quad (4.14)$$

Où $WE(i, k)$ sont les poids d'éléments structuraux pour les matériaux de type i et pour le type du bâtiment k (tableau 4.14). $GF_S(i, j, k)$ sont les fractions du poids de l'élément structurel qui devrait produire des débris dus au séisme et qui dépendent de l'état des dommages j , de la classe de construction k et du type de débris i . Ces coefficients sont donnés dans le tableau 4.15. Enfin, le poids total des débris, en tonne, est obtenu en faisant la somme, pour chaque bâtiment de classe k et pour chaque type de débris i , de la surface construite multipliée par la fraction de débris $EDF_S(i, k)$ (Barbat et al. 2006).

Comme le montre dans l'équation (4.13), il existe une corrélation directe entre la quantité de débris et la surface construite, mais pas avec le nombre de victimes, parce que la quantité de débris due à un séisme n'est pas directement liée à la densité de population. De plus, dans le modèle supposé, le nombre de victimes ne dépend que de l'état de dommage dû à l'effondrement, tandis que les débris sont produits par tout état de dommage non nul (voir l'équation 4.13) (Barbat et al. 2006).

Tableau 4.14 : Poids des éléments structurels et non structurels (en tonnes par m²) à utiliser dans le calcul des quantités de débris pour chaque classe de construction (adaptés de HAZUS 2003c).

Classe de construction	Brique, bois et autres		Béton armé et acier	
	Structurel	Non structurel	Structurel	Non structurel
Structurel	Non structurel	0,053 tonne par m ²	0,98 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
RC2	0 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	1,12 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
RC4	0 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	1,00 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
RC5	0,055 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	0,41 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
M1.1, M1.3, M2, M3.1, M3.3, M3.4	0,35 tonne par m ²	0,105 tonne par m ²	0,41 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
M5	0,245 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	0,78 tonne par m ²	0,04 tonne par m ²
S1	0 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	0,44 tonne par m ²	0,05 tonne par m ²
S2	0 tonne par m ²	0,053 tonne par m ²	0,44 tonne par m ²	0,05 tonne par m ²
W	0,065 tonne par m ²	0,121 tonne par m ²	0,15 tonne par m ²	0 tonne par m ²

Tableau 4.15 : Débris générés à partir de différents états de dommages structurels et non structurels (% du poids unitaire de l'élément) (adaptés de HAZUS 2003c).

Type de débris	Classe de construction	États de dommages							
		Léger		Modérer		Sévère		Destructeur	
		Structurel	Non structurel	Structurel	Non structurel	Structurel	Non structurel	Structurel	Non structurel
Brique, bois et autres débris	RC1	0	0,01	0	0,07	0	0,35	1	1
	RC2	0	0,01	0	0,07	0	0,35	1	1
	RC4	0	0,01	0	0,07	0	0,35	1	1
	RC5	0	0,02	0,06	0,11	0,32	0,42	1	1
	M1.1, M1.3, M2, M3.1, M3.3, M3.4	0,05	0,02	0,25	0,12	0,55	0,45	1	1
	M5	0,05	0,01	0,25	0,07	0,60	0,35	1	1
	S1	0	0,01	0	0,07	0	0,35	1	1
	S2	0	0	0	0	0	0	1	1
W	0	0,02	0,05	0,08	0,34	0,35	1	1	
Béton armé et acier détruit	RC1	0	0,001	0,05	0,08	0,33	0,28	1	1
	RC2	0,01	0,001	0,08	0,1	0,35	0,30	1	1
	RC4	0,02	0,001	0,07	0,09	0,35	0,30	1	1
	RC5	0,02	0,001	0,10	0,10	0,35	0,30	1	1
	M1.1, M1.3, M2, M3.1, M3.3, M3.4	0	0	0,03	0,10	0,25	0,29	1	1
	M5	0	0,001	0,03	0,09	0,305	0,30	1	1
	S1	0	0,001	0,04	0,08	0,30	0,28	1	1
	S2	0	0,001	0,04	0,08	0,30	0,28	1	1
	W	0	0	0,03	0	0,27	0	1	1

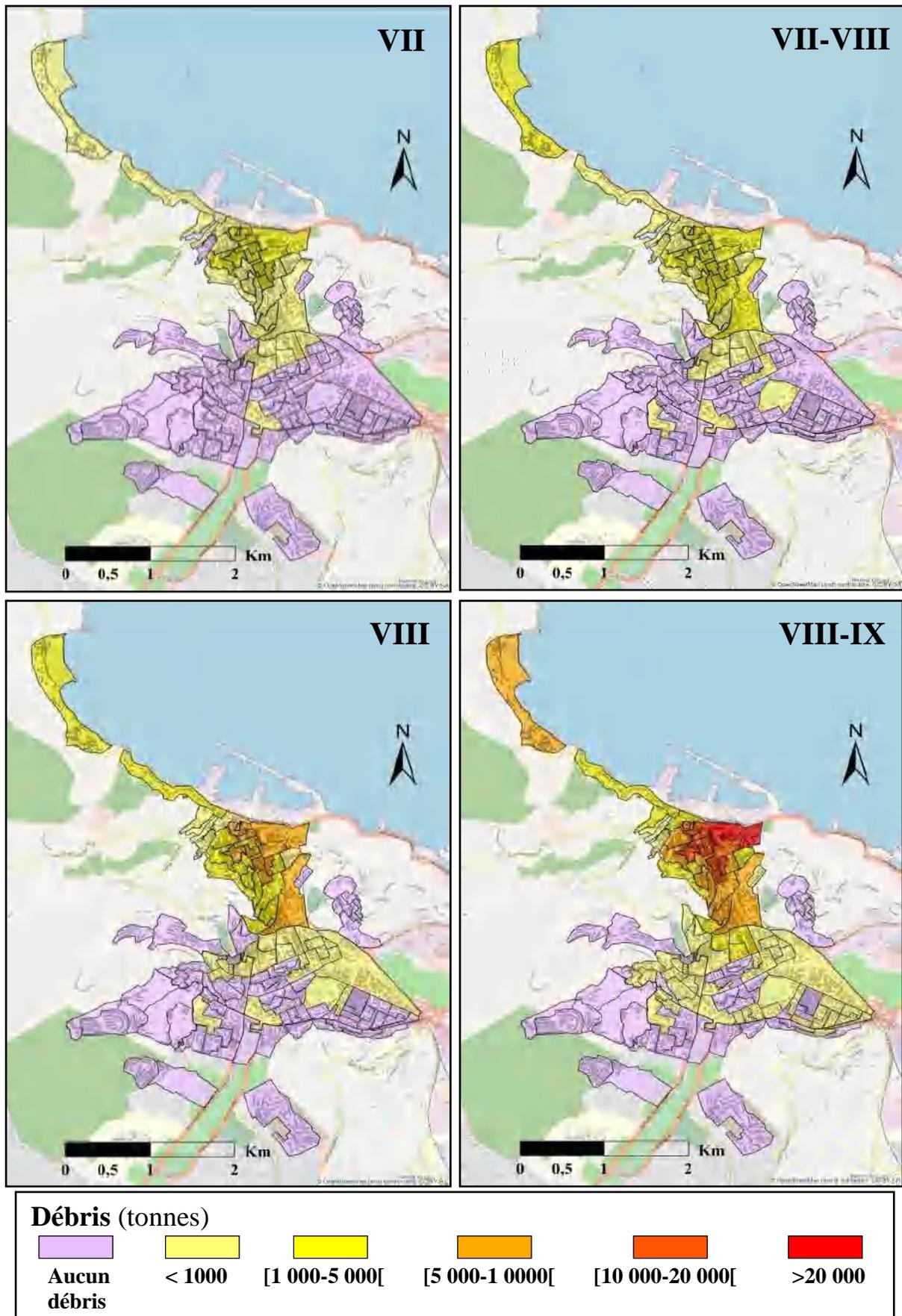


Figure 4.18 : Quantités de débris en tonnes générées pour différents scénarios sismiques.

La figure 4.18 montre la distribution des quantités de débris en tonnes générées pour différents scénarios déterministes et probabilistes.

Tableau 4.16 : Débris générés calculés à Skikda pour les scénarios déterministe et probabilistes.

Types de scénarios sismiques		Scénario déterministe	Scénarios probabilistes		
Degré d'intensité macrosismique		VII	VII-VIII	VIII	VIII-IX
Débris générés (en milliers de tonnes) pour chaque zone	Zone 1	0.6	1	2.6	7,5
	Zone 2	24	36,4	103	245
	Zone 3	0.4	0,6	3.2	13
	Zone 4	0	0	0,2	0,5
	Zone 5	0	0	0	0
Total des débris générés (en milliers de tonnes)		25	38	109	266

Le tableau 4.16, indique les quantités totales de débris produits par les bâtiments endommagés dans la zone d'étude. Cependant, dans le cas de deux intensités : l'intensité VIII et l'intensité supérieure VIII-IX, qui augmente d'un demi-degré, la quantité de débris est considérablement augmentée et atteint une augmentation d'environ 144 % entre elles.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a testé une nouvelle approche pour la ville de Skikda, basée sur la méthode de data-mining (ARL). Un des aspects les plus remarquables de cette méthode consiste à découvrir les corrélations "cachées" entre les différentes caractéristiques des bâtiments et la vulnérabilité sismique. On obtient ensuite un proxy de vulnérabilité, notamment de la zone d'étude, qui consiste à attribuer la classe de vulnérabilité aux différentes combinaisons possibles entre les caractéristiques des constructions. On a dérivé le proxy lors de la phase d'apprentissage, puis on l'a appliqué au reste de la base de données des constructions de la zone d'étude.

On peut constater, après la comparaison des résultats, que les deux méthodes aboutissent à des résultats très proches, même si l'on n'utilise que deux ou trois attributs de base pour les méthodes d'analyse simplifiées et moins coûteuses par rapport aux méthodes classiques.

L'une des conséquences les plus graves d'un séisme est la perte de vies humaines et, par conséquent, l'un des principaux objectifs de toutes les stratégies d'atténuation des risques est d'assurer la sécurité humaine. De plus, la modélisation des victimes du séisme (mort et gravement blessé) est fondamentale non seulement pour la gestion des interventions d'urgence et pour la planification des stratégies d'atténuation, mais aussi pour la planification de la préparation sanitaire.

Pour l'évaluation des pertes socio-économiques, les résultats montrent que les pertes humaines et les pertes économiques directes dans la ville sont faibles pour les deux scénarios (VII et VII-VIII). À Skikda, le nombre total de bâtiments endommagés se situe entre 0 (VII) et 787 (36%) (VIII-IX), et le nombre total de personnes sans abri se situe entre 0 et 4898 (16%), et le nombre total de personnes blessées varie entre 0 et 99 (3‰), et le nombre de décès varie entre 0 et 36 (1,2‰).

Dans cette étude, on a prédit des conséquences catastrophiques pour le centre historique de la ville (zone 2) en termes de pertes de population et de pertes économiques prévues en cas de séisme moyen, en raison du grand nombre de bâtiments endommagés et de la forte concentration de population et de l'activité socio-économique.

Cette estimation, basant sur la modélisation de scénarios sismiques peut fournir des informations appropriées aux gestionnaires ayant un pouvoir décisionnel pour prévoir l'impact de ces stratégies de modernisation sur la réduction des pertes.

Conclusion et perspectives

Dans cette thèse, l'objectif principal était l'étude de la vulnérabilité et du risque sismique d'une partie de la ville de Skikda, ce qui a permis d'aboutir au développement d'un outil de modélisation de scénarios sismiques. La modélisation a pris en compte les caractéristiques des zones urbaines et de micro-zonage sismique local.

Le travail dans cette thèse, sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine, s'articule autour deux méthodes distinctes : la méthode européenne classique Risk-UE LM1 s'appuie sur l'inventaire des bâtiments existants dans la zone d'étude, elle est basée sur une approche statistique et observation des dommages. Cette méthode a été développée principalement pour les villes de la région méditerranéenne. Elle s'applique à la typologie des constructions de la ville de Skikda. La seconde méthode qui est rapide et innovante, elle est basée sur le principe de la fouille de données, appelée (Association Rule Learning (ARL)). Les paramètres de base sont relativement faciles à collecter à partir de simple enquête ou d'images des bâtiments. Ceci permet d'éviter le procédé coûteux relatif aux enquêtes sur le terrain pour recueillir les paramètres structurels et non-structurels des bâtiments, souvent déconseillé de l'associer aux opérations et démarches d'évaluation du risque sismique.

La méthode ARL est basée sur l'établissement de corrélations entre les attributs de la construction (hauteur, âge du bâtiment) et les classes de vulnérabilité de l'échelle macrosismique européenne EMS-98.

En comparant les résultats obtenus par la méthode Risk-UE et la méthode ARL, on a pu constater que les deux méthodes donnent des résultats similaires et concordants. Sauf que la conformité des résultats, entre les deux méthodes, semble diminuer avec l'augmentation du volume de la base de données, si on la compare aux travaux précédents, sur la ville de Constantine.

Ce travail, est une continuité des recherches de Guettiche, Guéguen & Mimoune (2017a) sur la méthode ARL qui ont permis d'évaluer et de comprendre le niveau du risque sismique dans la ville de Constantine, celle-ci est appliquée avec succès à la ville de Skikda, en profitant de la similitude entre les typologies de bâtiments existants, afin de généraliser son application et d'exploiter les règles de vulnérabilité (proxy) développée dans ce travail

facilement applicable pour d'autres villes similaires notamment dans les villes de Jijel, Bejaia et Guelma qui sont récemment sujettes à des activités sismiques.

Concernant de l'effet du séisme sur la partie de la ville, dans le cas d'un scénario déterministe avec séisme d'intensité VII, résultant du séisme historique : celui de séisme de Constantine ($M_s = 5,9$, 27 octobre 1985), les bâtiments de la zone étudiée ne subissent pas de dommages sévères [D4+D5]. 19% subissent des dommages moyens [D2+D3] et 81% des dommages légers [D0+D1]. Dans le cas du pire scénario probabiliste d'un séisme d'intensité VIII-IX (l'événement sismique majeur correspond à une accélération de base associée de 0.27g pour une période de retour de 500 ans) plus de 19% de bâtiments de la zone d'étude subissent des dommages sévères, près de 31% subissent des dommages moyens et 50% des dommages légers. On enregistre, aussi, 4% de la population seront sans abri, 0,82‰ de la population sera blessée et 0,31‰ décès. Ces dommages sont dus en grande partie à la concentration de l'ancien tissu urbain dans le périmètre de l'ancienne ville, surtout dans la zone 2 qui correspond au centre historique de la ville.

L'impact économique global qui englobe les pertes économiques et les coûts de réhabilitation dans la zone d'étude peut aller de 89,2 millions d'USD (soit 11,58 milliards de dinars) pour une intensité macrosismique de degré VII à 698 millions d'USD (soit 89,50 milliards de dinars) pour une intensité macrosismique VIII-IX, soit une augmentation de 682%. Dans cette étude, les quantités de débris qui ont été générées pour l'effet de la crise sismique sur les routes et les réseaux routiers sachant que le centre historique de la ville est caractérisé par des rues étroites et irrégulières, et que la mobilité serait sérieusement compromise en raison d'impacts cumulés de la quantité considérable de débris attendue, qui peut varier entre 25 mille tonnes et 266 mille tonnes pour le scénario déterministe d'un séisme d'intensité VII et le scénario probabiliste le plus défavorable d'un séisme d'intensité VIII-IX, respectivement. Le fait que l'objectif de la production de débris est de fournir une idée globale sur la situation des routes afin que les autorités locales élaborent une stratégie de sauvetage et un plan d'intervention après chaque événement sismique.

Dans cette étude a pu montrer les conséquences qui peuvent être catastrophiques pour le centre historique de la ville, en termes de pertes humaines et économiques attendues en cas de séismes d'intensité relativement moyenne. Ceci est lié au grand nombre de bâtiments endommagés et à la forte concentration de la population et les activités socio-économiques.

En ce qui concerne la zone 2, située également dans le centre historique de la ville, on enregistre un grand nombre de bâtiments de qualité sismique insuffisante classés dans la catégorie de vulnérabilité A et B. Il est clair que même un tremblement de terre modéré, aurait des conséquences catastrophiques en termes de vies humaines et un impact économique très significatif. Sachant que plusieurs programmes de réhabilitations ont été réalisés dans cette zone, mais semblent ne pas être efficace dans la réduction de la vulnérabilité sismique, puisque se limitant uniquement au traitement des problèmes liés à l'état de conservation. Cela nous permet de dire que, les études de risque et de vulnérabilité sismiques sont importantes avant tout programme de réhabilitation afin d'estimer, plus ou moins correctement, le degré de vulnérabilité sismique et de choisir le type de techniques de renforcement sismiques adéquates. Ceci permet de rationaliser les dépenses publiques et améliorer la qualité sismique des bâtiments.

L'intégration des résultats dans l'outil SIG est indispensable pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle urbaine, car il s'agit d'un outil de prise de décision pour permettre la mise en place de priorités d'intervention par les autorités locales.

Enfin, les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité sismique et le développement de scénarios de pertes sismiques obtenus, en termes de pertes économiques et sociales, sont importants. Ils permettront aux autorités de la ville de décider des mesures à prendre, dans le but de réduire au maximum les pertes humaines et économiques en cas de tremblement de terre.

Les recherches futures pourront intégrer sur les méthodes hybrides, qui reposent sur une combinaison de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique empiriques et analytiques, en se concentrant sur les bâtiments stratégiques (hôpitaux, casernes, établissements sensibles de l'état, etc.). De cette façon, les résultats les plus fiables de plans de sauvetage, de suivi et sur la vulnérabilité sismique des bâtiments, aboutissent à la mise au point des techniques de réhabilitation et de renforcement sismique adéquates.

Références bibliographiques

- [1] Ademović N, Hadzima-Nyarko M, Zagora N (2020) Seismic vulnerability assessment of masonry buildings in Banja Luka and Sarajevo (Bosnia and Herzegovina) using the macroseismic model. *Bull Earthq Eng* 18 :3897-3933. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00846-8>.
- [2] Adolfo, P. Q. (2011) Seismic Vulnerability Reduction of Historical Masonry Towers by External Prestressing Devices. Academic, University of Braunschweig – Institute of Technology and the Faculty of Engineering University of Florence, Mexico.
- [3] Agrawal R, Imielinski T, Swami A (1993) Mining association rules between sets of items in large databases. In: Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD international conference on Management of data, SIGMOD '93. doi:10.1145/170035.17007.
- [4] Aguad JLP, Ferreira TM, Lourenço PB (2018) The Use of a Large-Scale Seismic Vulnerability Assessment Approach for Masonry Façade Walls as an Effective Tool for Evaluating, Managing and Mitigating Seismic Risk in Historical Centers. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1503366>.
- [5] ANAT (1998) Maitrise de la croissance urbaine de la ville de Skikda, Guelma, p2.
- [6] Ait-Meziane Y (2007) Evaluation de la vulnérabilité et contribution à la réduction du risque sismique construction de scénarios-cas de l'agglomération d'Alger. Thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB) Alger.
- [7] Aouane A (2019) Simulation sismique avec une approche SMA (Systèmes Multi Agents). Application de la méthode RISK DZ à la ville d'Arzew (Oran). Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [8] ATC (1985) Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC-13 Report, Applied Technology Council (ATC-13), Redwood City.
- [9] ATC (1988) FEMA 155 Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation. Washington DC, USA.
- [10] ATC (2002) FEMA 154 Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards. a handbook, federal emergency management agency (FEMA) and applied technology council (ATC-21), Washington DC, USA.
- [11] Athmani A (2015) Seismic vulnerability and Risk assessment of Annaba region (Algeria). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [12] Athmani A, Gouasmia AEH, Ferreira TM, Vicente R, Khemis A (2014) Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey. *Bull Earthq Eng* 13:2283-2307. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9717-7>.
- [13] Athmani A (2020) A Simplified Mechanical Approach for a Large-Scale Seismic Vulnerability Assessment of the Algerian Masonry Buildings. *International Journal of Architectural Heritage* 1-7 <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1777595>.
- [14] Ayadi A, Bezzeghoud M (2015) Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum observed intensity map (MOI2014). *Seismological Research Letters* 86(1): 1–9. <https://doi.org/10.1785/0220140075>.

- [15] Baddari K and Djeddi M (2002) Les séismes et leur prévision. ISBN 9961.0.0556.2. Office des Publications Universitaires. Alger. Algérie.
- [16] Bank of Algeria. US Dollar to Algerian Dinar exchange rate. Accessed September 01, 2020. <https://www.bank-of-algeria.dz/html/marcheint2.htm>.
- [17] Barbat A. H, Pujades L.G, Lantada N (2006) Performance of Buildings under Earthquakes in Barcelona, Spain. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 21 (2006) 573–593.
- [18] Bendjama H, Yelles-Chaouche A, Boulahia O, Abacha I, Mohammedi Y, Beldjoudi H, Rahmani S. TE, Belheouane O (2021) The March 2017 earthquake sequence along the E-W trending Mcid Aïcha-Debbagh Fault, northeast Algeria. *Geosciences Journal*. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0059-y>.
- [19] Benedetti D, Petrini V (1984) On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure, *L'Industria delle Costruzioni* 18:66–78.
- [20] Benedetti D, Benzoni G, Parisi M.A (1988) Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 16, 183–201.
- [21] Benhallou H, Roussel J (1971) Catalogue des séismes Algériens de 1951 à 1970, Note I.M.P.G.A, Alger.
- [22] Benhallou H (1985) Les Catastrophes Séismiques de la Région d'Echeliff dans le contexte de la Séismicité Historique de l'Algérie. Thesis, University of Algiers.
- [23] Benouar D (1993) The seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century, PhD-Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine. Univ, London, 712 pp.
- [24] Benouar D (1994) An earthquake catalogue for the Maghreb region 20°-38°N, 10°W- 12°E for the period 1900–1990, *Annali di Geofisica* 37, 511–528.
- [25] Benouar D (1996) Seismic Hazard Evaluation at Algiers Using Benouar's Earthquake Catalogue *Natural Hazards* 13: 119-131.
- [26] Bernardini A, Giovinazzi S, Lagomarsino S, Parodi S (2007) Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98.
- [27] Bernardini A, Lagomarsino S, Mannella A, Martinelli A, Milano L, Parodi S (2010) Forecasting seismic damage scenarios of residential buildings from rough inventories: a case-study in the Abruzzo Region (Italy), *Proc Inst Mech Eng Part O J Risk and Reliab* 224(4):279–296.
- [28] Blyth A, Di Napoli B, Parisse F, Namourah Z, Anglade E, Giatreli AM, Rodrigues H, Ferreira TM (2020) Assessment and mitigation of seismic risk at the urban scale: an application to the historic city center of Leiria, Portugal. *Bull Earthq Eng* 18:2607-2634. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00795-2>.
- [29] Boukri M, Bensaïbi M (2007) Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger. Actes du congrès AFPS, France.
- [30] Boukri M, Farsi MN, Mebarki A, Belazougui M, Amellal O, Mezazigh B, Guessoum N, Bourenane H, Benhamouche A (2014) Seismic risk and damage prediction: case of the buildings in Constantine city (Algeria). *Bull Earthquake Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9594-0>.
- [31] Boukri M, Farsi MN, Mebarki A, Belazougui M, Ait-Belkacema M, Yousfia N, Guessouma N, Ait Benamara D, Nailia M, Mezouara N, Amellal O (2018) Seismic vulnerability assessment at urban scale: Case of Algerian buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 31: 555–575. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.014>.

- [32] Boulahia O, Abacha I, Yelles-Chaouche A, Bendjama H, Kherroubi A, Mohammedi Y, Aidi, C Chami A (2021) Recent Seismic Activity in the Bejaia–Babors Region (Northeastern Algeria): The Case of the 2012–2013 Bejaia Earthquake Sequences. *Pure Appl. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02711-4>.
- [33] Boulkaibet A (2011) La question du risque industriel et le développement durable en Algérie cas de la wilaya de skikda (la zone pétrochimique et la cimenterie de Hadjar Assoud). Mémoire de magister, Université Frères Mentouri Constantine, Algérie.
- [34] Boutaraa Z, Negulescu C, Arab A, Sedan O (2018) Buildings Vulnerability Assessment and Damage Seismic Scenarios at Urban Scale: Application to Chlef City (Algeria). *KSCE J Civ Eng* 22: 3948-3960. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0961-2>.
- [35] Bramerini F, Di Pasquale G, Orsini A, Pugliese A, Romeo R, Sabetta F (1995) Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale SSN/RT/95/01. Roma, Servizio Sismico Nazionale (In Italian).
- [36] Brennet G, Badoux M (2002) Seismic inventory of the City of Aigle (Switzerland). Proceeding of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London. Paper reference 621.
- [37] BSSC (2002a) Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook FEMA 154, 2nd Edition, Washington D.C.: Buildings Seismic Safety Council. Developed For The Federal Emergency Management Agency.
- [38] BSSC (2002b) Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation FEMA 155, 2nd Edition.), Washington D.C.: Buildings Seismic Safety Council, Developed For The Federal Emergency Management Agency.
- [39] BU-KOERI (2003) Earthquake risk assessment for the İstanbul Metropolitan area. Boğaziçi University Press, İstanbul.
- [40] Catulo. R, Falcão. A.P, Bento. R Ildefonso. S (2018) Simplified evaluation of seismic vulnerability of Lisbon Heritage City Centre based on a 3D GIS-based methodology. *Journal of Cultural Heritage*, 32(0) 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.014>.
- [41] CGS (2003) Rapport final du 20/11/2003 : Etude de l'aléa sismique de la région de Constantine. Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique Alger, Algérie.
- [42] CGS (2004) Rapport final : Etude de l'aléa sismique de la région de Constantine, Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique Alger, Algérie.
- [43] CGS (2013) Recueil synthétique des activités scientifiques et techniques 2008-2013, (Loi de programmation de la Recherche 2008-2013). Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique Alger, Algérie.
- [44] CGS (2014) Etude de micro zonage sismique des sites urbains de la wilaya de Skikda – première phase – A1 : Cartes des intensités et d'accélération maximales au roche. Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique Alger, Algérie.
- [45] CGS (2015) Etude de micro zonage sismique des sites urbains de la wilaya de Skikda – première phase – A2 : Cartes photogéologiques. Centre National de la recherche appliquée en Génie Parasismique Alger, Algérie.

- [46] Cha L.S (1998) Assessment of global seismic loss based on macroeconomic indicators. *Natural Hazards* 17(3): 269–283.
- [47] Chabassière J, Bertrand L (1903) Russicade d'après ses ruines, in revue Philippeville. p 8.
- [48] Chaguetmi F (2011) Urbanisation autour des sites industriels à haut risque- cas de Skikda. Mémoire de magister, Université Frères Mentouri Constantine, Algérie.
- [49] Chaibedra B, Benanane A, Boutaraa Z (2018) Seismic vulnerability assessment to earthquake at urban scale: A case of Mostaganem city in Algeria. *Jàmbá - Journal of Disaster Risk Studies* 10(1), a473. <https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.473>.
- [50] Chen Q.F, Chen Y, Chen L (1997) Earthquake loss estimation with GDP and population data. *Acta Seimologica Sinica* 10(4): 791–800.
- [51] Chen Y, Chen Q.F, Chen L (2001) Vulnerability analysis in earthquake loss estimate. *Natural Hazards* 23(2–3): 349–364.
- [52] Cherif SE, Chourak M, Abed M, Douiri A (2018) Potential seismic damage assessment of residential buildings in Imzouren City (Northern Morocco). *Buildings* 8:179. <https://doi.org/10.3390/buildings8120179>.
- [53] Chieffo N, Formisano A, Ferreira TM (2019) Damage scenario-based approach and retrofitting strategies for seismic risk mitigation: an application to the historical Centre of Sant'Antimo (Italy). *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1596164>.
- [54] Chiroiu L (2004) Modélisation de dommages consécutifs aux séismes. Extension a d'autres risques naturels - Volume I. Thèse de doctorat. Université Paris 7 – Denis Diderot. Paris.
- [55] Coburn AW, Spence R (2002) *Earthquake protection*, 420. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- [56] Combescure D, Guéguen P, Lebrun B (2005) Vulnérabilité sismique du bâti existant : approche d'ensemble. *Cahier technique AFPS*, n°25.
- [57] CRAAG (1994) *Les séismes de l'Algérie de 1365 à 1992*. Publication du CRAAG, Alger, pp. 227. Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique Alger, Algérie.
- [58] CRAAG (2001) *La lettre du CRAAG*, Numéro 4, Septembre - Octobre 2001. Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique Alger, Algérie.
- [59] CTC (WCC) (1985) *Étude de l'aléa sismique et micro zonage de neuf sites urbains de la région d'Ech Cheliff*, vol. 1.
- [60] CTC (2012) *Etude d'expertise technique du vieux bâti de la ville de Skikda*. Organisme National de Contrôle technique de la construction de Skikda, Algérie.
- [61] D'Ayala D, Spence R, Oliveira CS, Pomonis A (1997) Earthquake Loss Estimation for Europe's Historic Town Centres. *Earthq Spectra* 13(4):773–793. EERI. <https://doi.org/10.1193/1.1585980>
- [62] Dekoumi D (2007) *Pour une nouvelle politique de conservation de l'environnement historique bâti algérien : - Cas De Constantine -*. Thèse de docteur de doctorat d'état. Université des Frère Mentouri Constantine 1, pp 44.
- [63] Desprez C.A (2010) *Analyse et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes : renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (TFC)*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble délivré par l'institut polytechnique de Grenoble.

- [64] Diana L, Manno A, Lestuzzi P, Podestà S, and Luchini C (2018) Impact of displacement demand reliability for seismic vulnerability assessment at an urban scale. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 112, 35–52. doi: 10.1016/j.soildyn.2018.05.002
- [65] Diana L, Thiriot J, Reuland Y, Lestuzzi P (2019) Application of Association Rules to Determine Building Typological Classes for Seismic Damage Predictions at Regional Scale: The Case Study of Basel. *Built Environment* 5 (51). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00051>.
- [66] Djema F (2013) Problématique du développement urbain vis-à-vis des risques technologiques majeurs- Cas de la ville de Skikda-. Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- [67] Dolce, M. (1994) Vulnerability and Risk Analysis. Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, 28 August-2 September 1994, Vienna, Austria.
- [68] Dollet C, Guéguen P (2021) Global occurrence models for human and economic losses due to earthquakes (1967–2018) considering exposed GDP and population. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04950-z>.
- [69] Dubois D, Parade H (1980) Fuzzy Sets and Systems. New York, NY: Academic Press.
- [70] Dunbar P, Bilham R, Laituri M (2002) Earthquake loss estimation for India based on macroeconomic indicators. In *Risk science and sustainability: Science for reduction of risk and sustainable development of society*, ed. T. Beer, and A. IsmailZadeh, 163–180. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [71] Duzgun H.S.B, Yucemen M. S, Kalaycioglu H. S, Celik K, Kemec S, Ertugay K, Deniz A (2011) An integrated earthquake vulnerability assessment framework for urban areas. *Nat Hazards* 59:917–947. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9808-6>.
- [72] Ferreira TM, Maio R, Vicente R (2017) Analysis of the impact of large scale seismic retrofitting strategies through the application of a vulnerability-based approach on traditional masonry buildings. *Earthq Eng & Eng Vib* (2017) 16: 329-348. <https://doi.org/10.1007/s11803-017-0385-x>.
- [73] Ferreira TM, Estêvão J, Maio R, Vicente R (2020) The use of Artificial Neural Networks to estimate seismic damage and derive vulnerability functions for traditional masonry. *Front. Struct. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0623-6>.
- [74] FEMA/NIBS (2002) HAZUS Technical Manual-SR2. Washington D.C: Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS.1, 2, 3
- [75] FEMA P-154 (2015) Third Edition, Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook. Applied Technological Council (ATC).
- [76] Giovinazzi S, Lagomarsino S (2004) A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. Proc of 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- [77] Giovinazzi S (2005) The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic Risk analysis. Thèse de Doctorat, Spécialité: Risk Management on the Built Environment, University of Florence, 210 p.
- [78] GNDT (1993) Rischio sismico di edificio pubblici, parte I: aspetti metodologici. Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai terremoti, Roma, Italy.
- [79] GNDT (1994) Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici - Istruzioni per la compilazione della scheda di 2° livello: Muratura. Roma, Italy.

- [80] Groupement CTC et AQUIDOS (2016) Etudes intégrées de réhabilitation du vieux bâti de la ville de Skikda, wilaya de Skikda, 127 immeubles de la Rue Didouche Mourad à Skikda.
- [81] Grünthal G, Musson R M W, Schwarz J, Stucchi M (2001) European Macroseismic Scale 1998, EMS-98. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, ISBN 2-9599804-3-3, Conseil de l'Europe, Luxembourg.
- [82] Guéguen P (2007) Evaluation de la Vulnérabilité Sismique à l'échelle d'une ville de Rhône-Alpes- Application à Grenoble. Programme Thématiques Prioritaires. Laboratoire de Géosciences Interne et Technophysique. Université de Grenoble.P17.
- [83] Guéguen P, Michel C, LeCorre L (2007) A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bull Earthq Eng* 4(3):467–490.
- [84] Guéguen P, Taliercio G (2007) Gestion du patrimoine bâti et risque sismique : automatisation de calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments, Pôle Grenoblois Risques Naturels.P15.
- [85] Guettiche A (2007) Évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville – cas de la ville de Constantine. Thèse de doctorat. Université des Frère Mentouri Constantine 1.
- [86] Guettiche A, Guéguen P, Mimoune M (2017a) Seismic vulnerability assessment using association rule learning: application to the city of Constantine, Algeria. *Nat Hazards* 86:1223–1245. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2739-5>.
- [87] Guettiche A, Guéguen P, Mimoune M (2017b) Economic and Human Loss Empirical Models for Earthquakes in the Mediterranean Region, with Particular Focus on Algeria. *Int J Disaster Risk Sci*, 8(4), 415–434. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0153-6>.
- [88] Hadeff R (2011) Quel projet de renouvellement urbain Pour le centre-ville de Skikda ? Actes du colloque international réhabilitation et revalorisation du patrimoine bâti. pp 336-351. ISSN : 1112-8151. REHABATI. Les 23 et 24 Mai 2011 à Skikda, Algérie.
- [89] Hamdache M, Peláez José A, Talbi A, López Casado C (2010) A Unified Catalog of Main Earthquakes for Northern Algeria from AD 856 to 2008. *Seismological Research Letters* 81(5): 732–739. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.732>.
- [90] Hamidatou M, Sbartai B (2017) Probabilistic seismic hazard assessment in the Constantine region, Northeast of Algeria. *Arab J Geosci* (2017) 10:156. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2876-5>.
- [91] Harbi A (2001) Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents actifs dans le Nord-Est Algerien. Thesis, University of Algiers.
- [92] Harbi A, Maouche S, Ayadi A, Benouar D, Panza G.F, Benhallou H (2004) Seismicity and tectonic structures in the site of Algiers and its surroundings: a step towards microzonation, *Pure Appl Geophys*,161:949–67.
- [93] Harbi A (2006) Evaluation de l'aléa sismique en Algérie du nord par la modélisation de l'input sismique dans les zones urbaines et l'établissement d'un catalogue, these doctorat, Science and Technology Houari Boumedienne (USTHB), Algeria.
- [94] Harbi A, Peresan A, Panza G.F (2010) Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. *Nat Hazards* (2010) 54:725–747. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9497-6>.

- [95] Harirchian E, Lahmer T, Kumari V, Jadhav K (2020) Application of Support Vector Machine Modelling for the Rapid Seismic Hazard Safety Evaluation of Existing Buildings. *Energies* 2020, 13, 3340. <https://doi.org/10.3390/en13133340>
- [96] HAZUS (1999) Technical manual, Earthquake loss estimation methodology. Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C.
- [97] HAZUS (2003a) Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. HAZUS-MH MR1. Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C.
- [98] HAZUS (2003b) Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. HAZUS-MH MR3. Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C.
- [99] HAZUS (2003c) Technical Manual, Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model. HAZUS-MH MR4. Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C.
- [100] Heatwole N, Rose A (2013) A reduced-form rapid economic consequence estimating model: Application to property damage from US earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Science* 4(1): 20–32.
- [101] http://skikda.boussaboua.free.fr/skikda_histoire_02_antiquite.htm.
- [102] Irizarry J, Lantada N, Pujades L.G, Barbat A.H, Goula X, Susagna T, Roca A (2011) Ground-shaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the Risk-UE capacity spectrum based method. *Bull Earthquake Eng* (2011) 9:441–466. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9222-6>.
- [103] Jena R, Pradhan B, Beydoun G, Nizamuddin, Ardiansyah , Sofyan H, Affan M (2019) Integrated model for earthquake risk assessment using neural network and analytic hierarchy process: Aceh province, Indonesia. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.07.006>.
- [104] JICA (2006) Etude de Microzonage Sismique de la Wilaya d'Alger, Rapport Final, Oyo International Corp. Nippon Koei Co., Ltd.
- [105] Karmenova M, Nugumanova A, Tlebaldinova A, Beldeubaev A, Popova G, Sedchenko A (2020) Seismic Assessment of Urban Buildings Using Data Mining Methods. ICCTA '20: Proceedings of the 2020 6th International Conference on Computer and Technology Applications April (2020) 154–159. <https://doi.org/10.1145/3397125.3397152>.
- [106] Kazantzidou-Firtinidou D, Kassaras I, Ganas A (2018) Empirical seismic vulnerability, deterministic risk and monetary loss assessment in Fira (Santorini, Greece). *Nat Hazards*. 93: 1251-1275. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3350-8>.
- [107] Khalfet Mansour A, Bouden Romdhane N, Boukadi N (2013) An inventory of buildings in the city of Tunis and an assessment of their vulnerability. *Bull Earthquake Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9450-7>.
- [108] Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4:415–443.
- [109] Lang D.H (2012) Earthquake damage and loss assessment – Predicting the unpredictable. Dr. Philos. thesis. University of Bergen, Bergen, Norway.

- [110] Lantada N, Pujades LG, Barbat AH (2009) Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. *Nat Hazards*. 51: 501-524. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9212-4>.
- [111] Lantada N, Irizarry J, Barbat AH, Goula X, Roca A, Susagna T, Pujades LG (2010) Seismic hazard and Risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bull Earthquake Eng*, DOI 10.1007/s10518-009-9148-z.
- [112] Lantada N, Pujades LG, Barbat AH (2018) Earthquake Risk Scenarios in Urban Areas: A Review with Applications to the Ciutat Vella District in Barcelona, Spain. *International Journal of Architectural Heritage*.12:1112-1130. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1503367>.
- [113] Lestuzzi P, Podestà S, Luchini C, Garofano A, Katzantidou-Firtinidou D, Bozzano C, Bischof P, Haffter A, Rouiller J-D (2016) Seismic vulnerability assessment at urban scale for two typical Swiss cities using Risk-UE methodology. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2420-z>.
- [114] Liu Y, Li Z, Wei B, Li X, Fu B (2019) Seismic vulnerability assessment at urban scale using data mining and GIScience technology: application to Urumqi (China). *Eomatics, Natural Hazards AND Risk AND RISK* 10 (1): 958-985. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1524400>.
- [115] Liu Y, So E, Li Z, Su G, Gross L, Li X, Qi W, Yang F, Fu B, Yalikun A, Wu L (2020) Scenario-based seismic vulnerability and hazard analyses to help direct disaster risk reduction in rural Weinan, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 48: 101577. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101577>.
- [116] Mammari L, Mouli M, Senouci A, Said A, Allout A (2016) Indices of vulnerability of existing buildings in Oran; *J. Mater. Environ. Sci*. 7 (3): 942-955. ISSN: 2028-2508
- [117] Mansour AK, Romdhane NB, Boukadi N (2013) An inventory of buildings in the city of Tunis and an assessment of their vulnerability. *Bull Earthq Eng* 11: 1563-1583. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9450-7>.
- [118] Mazumder R.K, Salman A.M (2019) Seismic Damage Assessment Using RADIUS and GIS: A Case Study of Sylhet City, Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 34 (2019) 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.11.023>.
- [119] Meghraoui M (1988) Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie (paléosismologie, Tectonique active et synthèse sismotectonique). Thèse de Doctorat. Université de Paris sud, Orsay, France, 356 pp.
- [120] Mehani Y (2010) Analyse non linéaire de la vulnérabilité sismique des bâtiments stratégiques de la ville d'Alger. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne, Alger.
- [121] Mokrane A, Ait Messaoud A, Sébaï A, Ayadi A, Bezzeghoud M, Benhallou H (1994) Les séismes en Algérie de 1365 à 1992, Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique. Département : Etudes et Surveillance Sismique, ESS, CRAAG, Alger-Bouzaréah, 277 pp.
- [122] Mouroux P, Lebrun B (2006a) RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns. In *Assessing and managing earthquake risk*, eds. C. S. Oliveira, A. Roca, and X. Goula, 479–508. Berlin: Springer.
- [123] Mouroux P, Lebrun B (2006b) Presentation of RISK-UE Project. *Bull Earthq Eng. Special Issue: Earthquake Scenarios for European Cities* 4 (4):323–39. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3>.

- [124] Milutinovic ZV, Trendafiloski GS (2003) Risk-UE an advanced approach for earthquake Risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings. Risk-UE Project, European Commission.
- [125] Nanda RP, Majhi DR (2014) Rapid seismic vulnerability assessment of building stocks for developing countries. *KSCE J Civil Eng* 18(7):2218–2226. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0050-0>.
- [126] Nastev M (2013) Adapting Hazus for seismic Risk assessment in Canada. *Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada Can. Geotech. J.* 51: 217–222. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0080>.
- [127] Nemouchi H (2005) Crise multidimensionnelle des villes algériennes : entre discours et réalité, la gestion du patrimoine foncier le cas de la ville de Skikda (nord-est algérien), Université de Caen, Basse-Normandie.
- [128] Nocquet J.M, Calais E (2004) Geodetic Measurements of Crustal Deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure appl. geophys.* 161, 000–000.
- [129] Nollet M.J, Désilets C, Abo-El-Ezz A, Nastev M (2013) Approche méthodologique d’inventaire de bâtiments pour les études de risque sismique en milieu urbain : Ville de Québec, Arrondissement La Cité – Limoilou. Commission Géologique Du Canada Dossier Public 7260. <https://doi.org/10.4095/292281>.
- [130] Novelli VI, D’Ayala D, Makhloufi N, Benouar D, Zekagh A (2015) A procedure for the identification of the seismic vulnerability at territorial scale. Application to the Casbah of Algiers. *Bull Earthquake Eng* 13:177–202. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9666-1>.
- [131] Novelli V (2017) Hybrid method for the seismic vulnerability assessment of historic masonry city centres. Doctor of Philosophy in Earthquake Engineering. University College London. United Kingdom.
- [132] Okazaki K (2000) Radius Initiative for IDNDR a Practical Approach to Reduce Urban Seismic Risk, in: Balassanian S, Cisternas A, Melkumyan M (Eds) *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 12 Springer, Dordrecht.
- [133] ONS (2020) Recensement général du logement et de la population, Office national des statistiques, Algérie.
- [134] OYO Corporation (2000) RADIUS Methodology, Report IDNDR.
- [135] Özkaynak H, Özbay AEÖ (2018) Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings located in esenler district of Istanbul. *AKU J. Sci. Eng.* 18, 015604 (285-294). <https://doi.org/10.5578/fmbd.66804>.
- [136] Peek-Asa C, Ramirez M R, Shoaf K, Seligson H, Kraus J F (2000) GIS mapping of earthquake-related deaths and hospital admissions from the 1994 Northridge, California, Earthquake. *Ann Epidemiol.* 2000 Jan;10(1):5-13. [https://doi.org/10.1016/s1047-2797\(99\)00058-7](https://doi.org/10.1016/s1047-2797(99)00058-7).
- [137] Peláez José A, M. Hamdache and Carlos López Casado (2005) Updating the Probabilistic Seismic Hazard Values of Northern Algeria with the 21 May 2003 M 6.8 Algiers Earthquake Included, *Pure appl. geophys.* 162 (2005) 2163–2177. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2708-5>.
- [138] Perrault M (2013) Évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [139] Petruccioli A (1993) Alger 1830-1930. Pour une lecture typologique des immeubles d’habitation, in *Algérie. Les signes de la permanence.* Rome : Centro Analisi Sociale Progetti, pp. 33-52.

- [140] PPSMVSS (2011) Manuel des typologies, vieille ville de Constantine phase III: Rédaction finale du PPSMVSS.
- [141] Remki M and Benouar D (2014) Damage Potential and Vulnerability Functions of Strategic buildings in the City of Algiers, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6):1726-1734. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0184-0>.
- [142] Riedel I, Guéguen P, Dunand F, Cottaz S (2014) Macroscale vulnerability assessment of cities using association rule learning, *Seismol Res Lett* 85(2):295–305. <https://doi.org/10.1785/0220130148>
- [143] Riedel I, Guéguen P, Dalla Mura M, Pathier E, Leduc T, Chanussot J (2015) Seismic vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions using association rule learning and support vector machine methods, *Nat Hazards* 76(2):1111–1141. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1538-0>.
- [144] Riedel I, Guéguen P (2015) Analyse de la vulnérabilité du bâti existant. Estimation et réduction des incertitudes dans l'estimation des dommages et des pertes pour un scénario sismique donné. Projet Fondation MAIF - Rapport final. Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [145] Ródenas JL, García-Ayllón S, Tomás A (2018) Estimation of the buildings seismic vulnerability: a methodological proposal for planning ante-earthquake scenarios in urban areas. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1208. <https://doi.org/10.3390/app8071208>.
- [146] Roussel J (1973) Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie (1716– 1970). Extrait du Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, t. 64, 3 et 4, 211–228.
- [147] Schumacher I, Strobl E (2011) Economic development and losses due to natural disasters: The role of hazard exposure. *Ecological Economics* 72: 97–105.
- [148] RPA81 (1981) Règles Parasismiques Algériennes/Algerian Earthquake Resistant Regulations. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme.
- [149] RPA03 (2003) Règles Parasismiques Algériennes/Algerian Earthquake Resistant Regulations RPA99/Version 2003, application since 2004. Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme.
- [150] Secanell R, Goula X, Susagna T, Fleta J, and Roca A (2004) Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating uncertainties. *Journal of Seismology* 8 (1):24–40. <https://doi.org/10.1023/B:JOSE.0000009516.91044.51>.
- [151] Seismocare (1998) 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. European project Environment and Climate, 1994–1998, ENV4-CT97–0588.
- [152] Senouci A (2006) Apport de l'étude de la vulnérabilité au séisme dans la requalification des tissus urbains Etude de cas : Une partie de la ville d'Oran. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [153] Senouci A, Bard PY, Farsi MN, Beck E, Cartier S (2012) Robustness and uncertainties of seismic damage estimates at urban scale: a methodological comparison on the example of the city of Oran (Algeria). *Bull Earthquake Eng* (2013) 11:1191–1215. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9406-3>.
- [154] Senouci A, Bard PY, Beck E, Farsi MN, Cartier S (2018) Mapping seismic vulnerability at urban scale: Discussion on relevant cartography representations and smoothing for urban planning purposes on the

- Oran case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 115: 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.034>.
- [155] Serpelloni E, Vannucci G, Pondrelli S, Argnani A, Casula G, Anzidei M, Baldi P, Gasperini P (2007) Kinematics of the Western Africa–Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International* 169 (3): 1180–1200.
- [156] Shakya M, Varum H, Vicente R, Costa A (2014) Seismic vulnerability and loss assessment of the Nepalese Pagoda temples. *Bull Earthquake Eng* 13(7): 2197–2223. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9699-5>.
- [157] Soltane M.A, Guettiche A, Mimoune M (2018) Etude Comparative De La Vulnérabilité Sismique Des Constructions En Maçonnerie Avant Et Apres Réhabilitation – Cas De La Ville De Skikda. Proceedings of the 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, pp 94-99. ISBN 978-9931-9481-0-0, VUREST2018, USTHB, Algiers, Algeria.
- [158] Soltane M.A, Guettiche A, Mimoune M (2022) Earthquake-induced impact scenario assessment for the historical center of Skikda, Algeria. *Bull Earthquake Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01437-5>.
- [159] Spence R, Brun BL (2006) Preface. *Bull Earthq Eng* 4(4):319–321.
- [160] Tadjera K, Bensaibib M (2014) Earthquake scenarios of Blida city. 1st International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM). <https://doi.org/10.1109/ICT-DM.2014.6918581>
- [161] Tadjera K, Bensaibib M (2017) Earthquake risk assessment of Blida (Algeria) using GIS. *Energy Procedia* 139 (2017) 645–65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.266>
- [162] Tamima U, Chouinard L (2016) Development of evacuation models for moderate seismic zones: A case study of Montreal. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 6: 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.02.003>.
- [163] Tantala MW, Nordensonb GJP, Deodatisc G, Jacob K (2007) Earthquake loss estimation for the New York City Metropolitan Region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28:812-835. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.012>.
- [164] TERRASOL (2007) Etudes des glissements de terrains de la ville de Skikda - Synthèse des missions a et b : diagnostic de l'ensemble des zones de glissements - évaluation de l'impact - étude globale de l'aléa.
- [165] Tyagunov S, Grünthal G, Wahlström R, Stempniewski L, Zschau J (2006) Seismic risk mapping for Germany. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:573–586. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-573-2006>.
- [166] Vacareanu R, Lungu D, Aldea A, Arion C (2004) WP7: Seismic Risk Scenarios Handbook. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014.
- [167] Verrhiest G (2008) Guide des Méthodes de Diagnostics de la Résistance des Bâtiments aux Séismes, Comparaison de Méthodes Qualitatives d'Evaluation de la Vulnérabilité des Constructions aux Séismes. Plan séisme - action 2.4.7, CETE Méditerranée, 2008.
- [168] Vicente R.S, Mendes Da Silva J.A.R, Varum H (2005) Seismic vulnerability assessment of buildings in the old city centre of Coimbra. International Conference 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake.

- [169] Villa J.M (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse d'état, Paris VI.
- [170] VULNERALP (2004) Projet d'évaluation de la vulnérabilité sismique à Grenoble. <http://www.lgit.obs-ujfgrenoble.fr/~pagueg/VULNERALP>.
- [171] Wang Y, Goettel K.A (2007) Enhanced Rapid Visual Screening (E-RVS) Method for Prioritization of Seismic Retrofits in Oregon. Oregon Department of Geology and Mineral Industries Special Paper 39. Portland, Oregon, USA.
- [172] Whitman R.V, Reed J.W, Hong S.T (1974) Earthquake damage probability matrices. Proceedings of the fifth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 2531, Rome.
- [173] Work package 4 (2011) Development of a new methodological framework for an integrated multi-scale Vulnerability assessment. ENSURE PROJECT Contract n°212045.
- [174] World Bank. GDP per capita (current US\$) – Algeria. Last Modified July 02, 2020. Accessed August 12, 2020, <http://www.tradingeconomics.com/algeria/gdp-per-capita> U.S.
- [175] Yelles-Chaouche A.K, Deramchi A, Ferkoul A, Aoulaiche K (2002) Les séismes en Algérie de 1992 à 2001. C.R.A.AG Publication, Alger 216 pp.
- [176] Yelles-Chaouche A.K, Boudiaf A, Djellit H, Bracene R (2006) La tectonique active de la région nord-Algérienne. C. R. Geoscience 338 (2006) 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.002>.
- [177] Youance S (2010) Une évaluation de la vulnérabilité sismique des églises du Québec. École de Technologie Supérieure Université du Québec.
- [178] Zheng H, Guo L, Liu J, Zheng T, Deng Z (2019) Evaluating seismic risk in small and medium-sized cities with the modified vulnerability index method, a case study in Jiangyou City, China. Bull Earthquake Eng. 18:1303–1319. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00757-3>.