



République Algérienne Démocratique 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



THÈSE

N° d'ordre:.....:
 N° Serie :..... :

Présentée par

Guettiche Abdelheq

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Génie civil

Option : Structure

Thème

**Évaluation de la Vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville
 – cas de la ville de Constantine**

Soutenue le : 24-05-2017

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr.....	Univ. de	Président
Mr MIMOUNE Mostefa	Univ. de	Rapporteur
Mr.....	Univ. de	Examineur
Mr.....	Univ. de	Examineur
Mr.....	Univ. de	Examineur
Mr.....	Univ. de	Examineur

Année Universitaire : 2016/2017

Sommaire

	Résumé	Abstract	
			1
Chapitre 1 : Introduction générale			2
Chapitre 2 : Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique			16
2.1. Introduction			16
2.2. Procédure d'analyse de la vulnérabilité sismique			16
2.3. Niveau d'analyse de la vulnérabilité sismique			19
2.3.1. Approches très globales (niveau 0)			19
2.3.2. Approches globales (Niveau 1)			19
2.3.3. Approches mécaniques (Niveau 2 et 3)			20
2.4. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle			20
2.4.1. L'échelle macrosismique EMS 98 (Méthode Probabiliste de Niveau 0)			21
2.4.2. La méthode Italienne GNDT			24
2.4.3. Méthode Risk-UE			27
2.4.4. FEMA 154			33
2.5. Méthode d'analyse Niveau 2			35
2.5.1. Le modèle HAZUS			36
2.6. Méthode ARL			38
2.6.1. Principe de la méthode Association Rule Learning (ARL)			39
2.7. Synthèse			41
Chapitre 3: Contexte de la ville de Constantine et inventaire typologique des bâtiments			43
3.1. Introduction			43
3.2. Contexte sismique			44
3.2.1. Les séismes du Nord de l'Algérie			44
3.2.2. Historique des séismes au Constantine			47
3.2.2.1 Le séisme de Constantine du 27 octobre 1985			49
3.3. Contexte géologique et géotechnique de la région de Constantine			51

3.4.	Lecture historique de la ville de Constantine	52
3.5.	Lecture urbanistique et architecturale du bâti à Constantine	54
3.5. 1.	Un tissu traditionnel	55
3.5. 2.	Le bâti colonial	56
3.5. 3.	Le bâti mixte	57
3.5. 4.	Le bâti Moderne	58
3.6.	Étapes de l'inventaire sismique	58
3.6.1.	Réalisation d'un inventaire	59
3.6.2.	Élaboration de la fiche d'enquête	59
3.6.3.	Numérisation des données	61
3.6.4.	Sources d'information de l'inventaire	62
3.7.	Description et identification des systèmes constructifs	64
3.7.1.	Définition des typologies du bâti existant	64
3.7.1.1.	Type 1 : Tissu urbain traditionnel : El Medina	65
3.7.1.2.	Type 2 : Tissu urbain colonial	66
3.7.1.3.	Type 3 : tissu urbain colonial	66
3.7.1.4.	Type 4 : Tissu urbain colonial	67
3.7.1.5.	Type 5 : habitats collectif	67
3.7.2.	Les planchers	68
3.7.2.1.	Planchers en Bois	68
3.7.2.2.	Planchers en voute	68
3.7.3.	Les fondations	69
3.8.	Répartitions des constructions selon l'échelle EMS 98	69
3.9.	Répartition géographique des bâtiments pris en compte dans l'inventaire	71
3.9.1.	Le rocher	74
3.9.2.	Site Coudiat-Aty	78
3.9.3.	Le site du 20 Aout 1955	78
3.9.4.	Site de la Cité Ciloc	81
3.9.5.	Le site Belle vue	83
3.10.	Synthèse	84
Chapitre 4 : Analyse de la vulnérabilité sismique par la méthode Risk-UE		75
4.1.	Introduction	75

4.2.	Méthodologie Risk-UE	75
	4.2.1. Généralités sur la méthodologie Risk-UE	75
	4.2.2. Évaluation de l'indice de vulnérabilité sismique	78
	4.2.3. Simulation et calculs d'endommagement	81
	4.2.4. Probabilité des dommages	83
4.3.	Synthèse	91
Chapitre 5: Analyse de la vulnérabilité sismique par la méthode ARL		92
5.1.	Introduction	92
5.2.	Étapes de la Méthode ARL	92
	5.2.1. La création de la banque de donnée	94
	5.2.2. La première phase : Apprentissage (Learning)	96
	5.2.3. La deuxième phase : application	99
5.3.	Évaluation des Dommages physiques	103
5.4.	Validation des résultats	105
	5.4.1. Évaluation de la vulnérabilité sismique par la méthode ARL	105
	5.4.2. Probabilité de dommage sismique	108
	5.4. 3. Scénario des dommages sismique	112
	5.4.4. Distribution spatiale des dommages	112
5.5.	Synthèse	115
Conclusion générale et perspectives		117
Références		120
Annexes		128

Liste des figures

- Figure. 1-1: Éléments constitutifs du risque sismique.
- Figure. 1-2: Conditions géologiques et topographiques locales pour le calcul des effets de site.
- Figure. 1-3: Carte de découpage administratif (Est Algérien).
- Figure. 2-1: Organigramme des différentes étapes d'évaluation d'un risque sismique.
- Figure. 2-2: Fonction de probabilité d'endommagement.
- Figure. 2-3: Organigramme de calcul suivi par Méthode GNDT II pour calcul l'indice de vulnérabilité et le dommage probable.
- Figure. 2-4: Équivalence des dommages entre l'échelle EMS 98 et la méthode GNDT.
- Figure. 2-5: Fonctions de vulnérabilité semi-empiriques.
- Figure. 2-6: Procédure de l'identification des bâtiments dangereux par la méthode FEMA 154 par un Diagnostic Visuel Rapide (RVS).
- Figure. 2-7 : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'un bâtiment
- Figure. 3-1 : Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 avec la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005
- Figure. 3-2 : Image satellite (Google Earth) of the Constantine area, Avec la localisation des failles actives et les sèismes historiques entre 1871 et 2011.
- Figure. 3-3: Photos des Trace en surface (Djebel Felten et Chettaba - Faille Ain Smara).
- Figure. 3-4 : Carte tectonique de l'atlas orientale de Tellien de l'Algérie.
- Figure. 3-5 : La ville de Constantine les étapes de croissance urbaine 1837-2000
- Figure. 3-6 : Carte topographique de la ville de Constantine
- Figure. 3-7 : bâti traditionnel à Constantine :(a) Types de maison à patio ;(b) Types de maison El Ali
- Figure. 3-8 : Exemple de l'architecture colonial existante à Constantine.
- Figure. 3-9: Exemple de l'architecture mixte existante à Constantine.
- Figure. 3-10: Planning de différentes étapes suivis pour réaliser l'inventaire sismique à Constantine.
- Figure. 3-11: Fiche d'enquêtes de la vulnérabilité sismique des constructions de la ville de Constantine.
- Figure. 3-12 : Photos sur la l'état dégradé des constructions à Constantine

Figure. 3-13 : Typologie constructive des murs porteurs dans le tissu traditionnel.

Figure. 3-14 : Typologie constructive en en maçonnerie avec murs porteurs en pierre.

Figure. 3-15 : Photos. Constructions en maçonnerie avec murs en briques pleines.

Figure. 3-16 : Photos Constructions mixte sur le site Coudiat-Aty

Figure. 3-17 : Photos. Constructions en béton armé :(a)plusieurs bloc, (b) seul bloc (Cité du 20 août).

Figure.3-18 : Plancher en bois à Constantine : a) plancher dans le tissu traditionnel ;b) plancher dans le tissu colonial

Figure. 3-19 : Coupe plancher :(a) type colonial à voûtain ;(b) type colonial simple.

Figure.3-20 : Distribution des constructions selon la classe de la vulnérabilité :(a)époque de construction ;(b)matériaux de construction ;(c) nombre de plancher ;(d)niveau de code parasismique.

Figure.3-21: photo aérienne présente les sites d'analyse, chaque histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existe dans chaque zone.

Figure. 3-22 : Images sur la vieille ville de Constantine "Rocher".

Figure 3-23 : (a) Localisation et les étapes de réhabilitation de la rue mellah Slimane, (b) Photos des opérations de revêtement du sol et la réhabilitation des constructions.

Figure 3-24 : Coupe topographique et Plan de masse du site d'investigation.

Figure 3-25 : Photos sur les typologies constructive site (Koudiat –Aty) et Belouizdad.

Figure. 3-26 : (a) Image satellite de la cité du 20 Août Constantine « Google map » ;(b) Plan d'urbanisme de la cité du 20 Août Constantine.

Figure. 3.-27 : Façades principales des bâtiments collectifs à la cité 20 Aout 1955.

Figure .3-28 : Photo et vue en globale sur la zone Ciloc.

Figure .3-29 : Coupe géologique de la région d'étude.

Figure. 3-30 : photos aériennes sur la zone Belle vue.

Figure. 4-1 : Classification des bâtiments à Constantine selon Risk-UE.

Figure. 4-2 : Image d'aperçu du logiciel utilisé dans l'enquête sur le terrain.

Figure. 4-3 : Histogrammes de la distribution de la vulnérabilité sismique : (a) Matériaux de construction ;(b) époque de construction ;(c) niveau du code parasismique ; (d) Hauteur de la construction.

Figure. 4-4 : Courbes de vulnérabilité pour différents types de bâtiment :a)selon la classe de vulnérabilité ;b) selon la typologie constructive.

Figure 4-5 : Distribution spatiale : (a) la vulnérabilité sismique ;(b) les dommages moyens pour l'intensité VII ;(c) les dommages moyens pour l'intensité VIII.

Figure. 4-6 : Courbes de vulnérabilité pour les cinq classes de vulnérabilité

Figure. 4-7 : Distribution des dommages sismique selon la classe de vulnérabilité pour un scénario sismique d'intensité VIII : (a) probabilité de dommage pour 6 niveaux de dommage (b) nombres de constructions endommagés pour trois niveau de dommages (légers, modérés, sévères).

Figure. 4-8 : La distribution des dommages par la Méthode Risk-UE : (a) Matériaux de construction ;(b) la hauteur ;(c) époque de construction ;(d) niveau de code parasismique.

Figure. 4-9 : La distribution des dommages par la Méthode Risk-UE selon : (a) trois classe de dommage (D0+D1, D2+D3, D4+D5) ;(b) 5 classes de dommage (D0, D1, D2, D3, D4, D5).

Figure. 4-10 : Méthode Risk-UE: (a) courbes de vulnérabilité pour différents types de construction en maçonnerie et en béton armé ;(b) courbes de fragilités pour différents type de construction.

Figure. 4-11 : Répartition spatiale des classes de dommages à Constantine pour trois scénario de dommage d'intensité (VII ;VIII,IX).

Figure. 4-12 : Répartition spatiale des dommages à Constantine pour un scénario de dommage d'intensité VIII (Séisme 1985).

Figure. 5-1 : Étapes du processus ARL.

Figure. 5-2 : Description des bâtiments étudiés selon quatre attributs : période de Construction, nombre d'étages, type de matériau et forme du toit.

Figure 5-3 :Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine pour plusieurs combinaisons: (a) la période de construction et le nombre d'étages; (b) la période de construction, le nombre d'étages et le matériau; (C) de la période de construction, le nombre d'étages et la forme du toit; (D) de la période de construction, le nombre d'étages, le matériau, et la forme du toit.

Figure. 5-4 : Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine avec la fusion des classes A et B, et pour deux combinaisons: (a) la période de construction, le nombre d'étages et la forme du toit; (b) de la période de construction, le nombre d'étages, le matériau, et la forme du toit.

Figure. 5-5 : Vue globale sur : (a) l'emplacement de la ville de Constantine (b) L'imagerie aérienne et vue d'ensemble de la zone d'étude à Constantine, Algérie.

Figure. 5-6 : Comparaison des résultats issus des deux méthodes (RISK-UE LM1 et ARL) en termes de classe de vulnérabilité EMS 98.

Figure. 5-7 : Répartition de vulnérabilité sismique des constructions dans les zones 1, 2 et 3 de Constantine, représentés par les classes de vulnérabilités obtenues par la méthode ARL et par les indices de vulnérabilité obtenus par la méthode Risk-UE.

Figure 5-8 : Probabilité de dépassement un niveau de dommage $P(D_k)$ pour des intensités entre V à XII calculées avec les méthodes :ARL0, ARL1, Risk-UE.

Figure. 5-9 : Probabilité de dépassement un niveau des dommages $P(D_k)$ pour une intensité VIII et classes de vulnérabilité de A à E.

Figure. 5-10 : Représentation de la distribution du nombre de constructions endommagés avec les trois méthodes et pour les intensités entre (V-X) selon l'échelle de dommage EMS 98.

Figure. 5-11 : Comparaison de la probabilité de dommages pour tous les constructions dans la zone d'étude obtenue en utilisant la méthode Risk-UE (ligne noire), la méthode ARL1 basé sur la méthode Risk-UE dans l'évaluation des dommages (ligne bleue discontinu), et la méthode ARL0 basée sur la matrice de probabilité des dommages issue de l'échelle macrosismique EMS 98 (ligne rouge). Les dommages sont regroupés en trois groupes de dommages.

Figure. 5-12 : Répartition spatiale des dommages à Constantine de façon statistique (sous zones) pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages : légers ($D_0 + D_1$), modérés ($D_2 + D_3$) et sévères ($D_4 + D_5$) et étant donnés en fonction de nombres de constructions.

Liste des Tableaux

- Tableau. 1-1 : Répartition de la population locale par groupe d'âge.
- Tableau. 2-1 : Les Méthodes d'estimation de la vulnérabilité des bâtiments.
- Tableau. 2-2 : Définition des degrés d'intensité selon l'échelle EMS 98.
- Tableau. 2-3 : Différenciation des structures en classe de vulnérabilité.
- Tableau. 2-4 : Distribution des dommages pour différentes classes de vulnérabilité et différentes intensité suivant l'échelle macrosismique européenne, EMS 98.
- Tableau. 2-5 : Classe de vulnérabilité, scores et pondérations des différents critères structuraux, d'après le GNDT .1993.
- Tableau. 2-6 : Typologie de l'échelle européenne macrosismique EMS 98.
- Tableau. 2-7 : Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie.
- Tableau. 2-8 : Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en béton armé.
- Tableau. 2-9 : L'équivalence entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS 98.
- Tableau. 2-10 : Typologie de bâtiments selon FEMA154.
- Tableau. 2-11 : États de dommage pour bâtiment de class W1 (HAZUS 2003).
- Tableau 3-1. Liste des séismes en Algérie entre 1900 et 2016
- Tableau. 3-2. Liste des séismes survenus à Constantine et ses environs (de 1758 à 2007).
- Tableau. 3-3. Distribution de l'intensité maximale sur la région de Constantine lors du séisme de 1985.
- Tableau 3-4. Les principales formations qui constituent le substratum de quelques quartiers de Constantine.
- Tableau. 3-5 : Les zones d'habitat urbain nouvelles de la ville de Constantine.
- Tableau. 3-6 : Distribution de la classe de vulnérabilité sismique par zone d'étude.
- Tableau. 3-7 : Répartition des constructions à Constantine selon les matériaux de construction.
- Tableau. 3-8 : Répartition des constructions à Constantine selon les l'époque de construction
- Tableau .3-9 : État de conservation du cadre bâti de la vieille ville
- Tableau. 4-1 : Distribution des constructions enquêtées selon la méthode Risk-UE.
- Tableau. 5-1 : Probabilité conditionnelle pour chaque classe de vulnérabilité en fonction des paramètres de constructions (période de construction, le

nombre d'étages) obtenus en utilisant la méthode ARL. (Note : / pas de données).

Tableau. 5-2 : Exemple d'une matrice de confusion obtenue avec la méthode ARL pour classer les constructions à Constantine en classes de vulnérabilité selon EMS 98 basé sur 3 attributs.

Tableau 5- 3 : Distribution des dommages pour différentes classes de vulnérabilité et différentes intensité suivant l'échelle macrosismique européenne, EMS 98.

Figure. 5-4 : Comparaison de la répartition des dégâts (en nombre de bâtiments et en pourcentage) obtenue par ARL et Risk-UE à Constantine pour l'intensité VIII.

Liste des annexes

- Annexe.2-1. Définition des degrés d'intensité selon l'échelle EMS 98.
- Annexe. 3-1. Croquis de la ville durant la période turque.
- Annexe. 3-2. Constantine à l'époque coloniale : (a) Plan de 1837 La ville au moment de la prise, (b) plan de la période entre 1837-1873 : Equipements militaires plan réalisé à partir du plan cadastral.
- Annexe. 3-3. Plan de Constantine en 1888.
- Annexe. 3-4. Plan de Constantine de 1916.
- Annexe. 3-5. Carte de Constantine de 1937.
- Annexe. 3-6. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction.
- Annexe. 3-7. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction.
- Annexe. 3-8. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction.
- Annexe. 4-1. Distribution des constructions en fonction de l'époque de construction :(a) matériaux de construction ;(b) classes de vulnérabilité.
- Annexe. 4-2. Courbes de dommage moyen, avec représentation des différentes valeurs probables du dommage (d_{-} , d_{moy} , d_{+}) et histogramme du dommage moyen selon la Méthode Risk-UE et l'intensité de calcul : VII, VIII, IX.
- Annexe. 4-3. Distribution spatiale, du dommage moyen μ_D estimé par la méthode Risk-UE.
- Annexe 4-4. Distribution spatiale du dommage pour un scénario sismique d'intensité VIII estimé par la méthode Risk-UE.
- Annexe. 5-1. Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine pour plusieurs combinaisons : (a) la période de construction (b) la forme du toit ; (C) le matériau (D) le nombre d'étages ;(e) le matériau, et la de la période de construction ;(f) la période de construction, le matériau, et la forme du toit.
- Annexe. 5-2. La différence de la distribution des dommages sismiques entre évalués par les méthodes ARL0, Risk-UE, et ARL1
- Annexe. 5-3. Comparaison entre la méthode Risk-UE et la méthode ARL1 selon les nombres des constructions étudiées :(a) la distribution des dommages moyen ;(b) la distribution des classes de dommages ;(c) la distribution de la probabilité des dommages.

- Annexe. 5-4. Répartition spatiale des dommages à Constantine pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5)
- Annexe. 5-5. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 1 "Rocher " pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).
- Annexe. 5-6. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 2 pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).
- Annexe. 5-7. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 3 pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).
- Annexe. 5-8. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 3 pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).

في هذا العمل، أجرينا تقييما لمضعف الزلزالي لمدينة قسنطينة (الجزائر) باستخدام طريقة كلاسيكية أوروبية Risk-UE (رابطة قاعدة التعلم، ARL).
 بناء علاقات بين سمات البناء (الهشاشة) (الهشاشة) لمقياس EMS 98. هذا النهج يسمح بتجنب المرحلة المكلفة عند تقييم الهشاشة الزلزالية، و التي تتطلب مسح ميدانية لجمع خصائص البناء اللازمة، والتي غالبا ما تثبط عمليات تقييم المخاطر الزلزالية في المناطق التي يكون فيها مستوى الخطر الزلزالي (proxy) بمقارنة مسنويات الهشاشة الزلزالية المقدره بطريقتنا البسيطة لتلك التي لوحظت على أرض الواقع باستعمال الطريقة الكلاسيكية Risk-UE. من أجل سيناريو زلزالي معين، النتائج المتحصل عليها تعط الكلاسيكية. يتم عرض هذه النتائج على شكل رسوم بيانية أو الجغرافية (GIS).
 في الأخير، هذه النتائج يمكن استخدامها من قبل العديد من صناع القرار مثل شركات التأمين التخطيط، والتنمية الحضرية، المسؤولين والمتخصصين والعاملين

كلمات مفتاحية: خطر زلزالي، هشاشة، سيناريو زلزالي، Risk-UE، قسنطينة (الجزائر).

Abstract:

In this work, we performed a seismic vulnerability assessment of the city of Constantine (Algeria) using A classic European macro-seismic method Risk-UE and innovative data mining-based methods (Association Rule Learning, ARL).

The ARL method consists in establishing relationships between building attributes (number of stories or building age) and the vulnerability classes of the European Macroseismic Scale, EMS 98. This approach avoids the costly process in the analysis of seismic vulnerability requires site surveys for collecting the necessary building characteristics, which often discourages the assessment of seismic risk initiatives in moderate seismic prone regions. We validate our learning (proxy) by comparing estimated vulnerability classes by our simple method to those actually observed on site by the classical method Risk-UE.

For a given seismic scenario, the results give the likely damage comparable to those obtained by the traditional method. These results are presented as histograms or risk maps using geographic information system (GIS).

Finally, these results can be used by many policymakers as insurers, planners and urban development, responsible for public safety and seismic specialists working on the codes of protection.

Keywords: seismic risk, vulnerability, damages, RISK-UE, seismic scenario, ARL, Constantine (Algeria).

Résumé:

Dans ce travail, nous avons effectué une évaluation de la vulnérabilité sismique de la ville de Constantine (Algérie) en utilisant une méthode macrosismique classique européenne Risk-UE et une méthode innovante s'appuyant sur le principe de la fouille de données (Association Règle d'apprentissage, ARL).

L'ARL méthode consiste à établir des relations entre les attributs de construction (nombre d'étages et l'âge du bâtiment) et les classes de vulnérabilité selon l'Échelle Macrosismique Européenne, EMS 98. Cette approche permet d'éviter le processus coûteux dans l'analyse de la vulnérabilité sismique qui nécessite à des enquêtes sur site pour collecter les caractéristiques de construction nécessaire, ce qui décourage souvent les opérations d'évaluation de risque sismique dans les régions où le niveau d'aléa sismique est modéré. Nous validons notre apprentissage (proxy) en comparant les classes de vulnérabilité estimées par notre méthode simple à celles observées réellement sur le terrain par la méthode classique Risk-UE.

Pour un scénario sismique donné, les résultats obtenus donnent des dommages probables comparables à ceux obtenus par la méthode classique. Ces résultats sont présentés sous forme d'histogrammes ou de cartes de risque en utilisant un système d'information géographique (SIG).

Finalement, ces résultats peuvent être exploitées par beaucoup de décideurs comme les assureurs, les responsables de la planification et du développement urbain, les responsables de la sécurité civile ou encore les spécialistes du parasismiques travaillant sur les normes de sécurité.

Mots-clés: risque sismique, vulnérabilité, dommages, scénario sismique, Risk-UE, ARL, Constantine(Algérie).

CHAPITRE 1 :

Introduction générale

1. Introduction

Partout dans le monde, on constate, ces dernières décennies, une augmentation sensible des pertes économiques et sociales à la suite de séismes. La réduction du risque sismique est devenue une priorité pour les politiques de gestion de crise. À travers le monde, différentes villes ont été analysés par la production de scénarios sismiques afin d'évaluer les dommages prévisibles (directs et indirects), occasionnés par un séisme de types Quito en Équateur (Chatelain et al, 1999), Katmandou au Népal (KVERMP, 1998), Istanbul en Turquie (Erdik et al, 2003) Catania en Italie (Faccioli et al, 1999) et de Nice en France (Bard et al, 2005).

(Benson et Twigg, 2004) affirment que pour 40 millions \$ investis dans des mesures de prévention dans le monde dans les années 1990, les pertes économiques ont été réduites de 280 millions \$. Ces statistiques soutiennent également le point de vue des spécialistes de l'urgence, qui sont de plus en plus insistante sur la nécessité d'investir dans la préparation, la prévention et d'atténuation des catastrophes, des mesures telles que celles soutenues par les scénarios sismique, pour réduire les pertes. En plus, les scénarios sismiques sont utiles pour étudier le meilleure cadre d'investissement pour le renforcement sismique des bâtiments qui peuvent être opérationnels surtout face aux longues périodes de retour des événements sismiques (Smyth et al, 2004).

L'Algérie n'échappe pas à cette situation, la majorité des vieilles villes algériennes se sont développées en ignorance totale des risques sismiques (ONS, 2015). Où la grande partie du parc immobilier a été construites avant l'application du premier Règlement Parasismique Algérien en 1981 (RPA 81). Depuis le séisme de Chlef en 1980, des pertes économiques directes ramenés à la valeur à la valeur de dollars américain en 2015 sont de l'ordre de 21 Milliards \$, 5160 morts et plus de 667000 sans-abris.

En fait, prédire des dommages dans les structures existantes est le paramètre clé pour anticiper les pertes économiques (directes et indirectes) et sociales. Par conséquent, avant de simuler et tester les pertes, les efforts doivent être concentrés sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes à des échelles urbaines ou régionales, tels que l'Algérie, où le parc immobilier dans les villes Algériennes peut être considérée comme vulnérable aux séismes, comme la démontré le séisme de Boumerdes en 2003 où de nombreux bâtiments en béton armé étaient fortement endommagés (Meslem et al, 2012).

Bien que la ville de Constantine est classée comme étant région à moyenne sismicité (zone IIa) d'après le Règlement Parasismique Algérien (RPA.2003), sa situation particulière ne fait qu'augmenter potentiellement le risque sismique résultant de plusieurs facteurs (la densité élevée de la population, la dégradation avancé des constructions, la vieillesse des constructions, les glissements de terrains...etc.). De par le passé, la ville a été secouée par plusieurs séismes. Le dernier grand séisme en 27 octobre 1985 à 25 km au Sud- East de Constantine dans le village d'El Aria, avec une magnitude Mw de 5,9 et une intensité de VIII selon EMS 98. En plus, le Centre de génie parasismique « CGS » a aussi achevé récemment des études de micro zonage sismique de Constantine, indiquant que près de 40% des constructions dans cette ville pourraient être classés très vulnérable après un éventuel séisme (Journal transactiondalgerie).

Dans ce travail de recherche, l'évaluation et la distribution de la vulnérabilité sismique de la ville de Constantine sera traitée à l'aide d'une méthode macrosismique (Risk-UE.LM1) développée pour travailler à grande échelle (échelle urbaine). Cette méthode sera basée sur la définition des typologies et utilisera diverses sources d'informations (photo-aériennes, vidéos, plans, base de données, inventaire...etc.).

Généralement, les méthodes macrosismiques se basent sur des enquêtes de terrain, dont leur coût de réalisation reste difficilement mobilisable pour les régions de faible à moyenne sismicité (Guéguen, 2007).

En 2011, dans le cadre d'une expertise réalisée par le CTC Constantine sur la ville de Skikda, des enquêtes ont été réalisées pour collecter les informations sur 2272 constructions. Selon les chiffres fournis par la direction d'urbanisme et de construction de Skikda, ce projet coûte 40 millions Dinars (17605 Dinars/construction).

Cette préoccupation, nous a conduits au développement d'une méthode sophistiquée plus évoluée et plus rapide (ARL), dont l'objectif était de diminuer les paramètres de vulnérabilité à évaluer, c'est la méthode Association Rule Learning. Elle consiste à estimer les dommages sismiques à partir de recherches d'observation visuelles de critères de bases. La simplicité des paramètres permet de s'assurer, à moindre coût, d'un taux faible de critères erronés.

La représentation des résultats se fera via un Système d'information Géographique, qui délivrera une base de données de la répartition du bâti suivant sa nature et son état vis-à-vis du séisme. Ce SIG permettra d'autre part la production des cartes de vulnérabilité, de dommage et de risque sismique. Les cartes du risque sismique produites par les études de vulnérabilité sont, à cet effet, un outil de prise de décision indispensable pour les autorités locales de Constantine en charge de l'établissement des priorités d'intervention, et des actions préventives pour réduire l'ampleur des dégâts.

1.2. Éléments d'une problématique :

L'arrivée de la réglementation parasismique et l'évolution dans les techniques de construction ne semble pas montrer une diminution des pertes économiques et humaines en cas d'un séisme. En effet, l'effondrement du bâti ancien constitue la plus grande cause de ces pertes.

Dans la vieille ville de Constantine, où le risque sismique est une réalité, le bâti existant est constitué en majeure partie de constructions en maçonnerie (pierre, brique ou adobe). Cette partie de la ville de Constantine forme un patrimoine de valeur socio-économique et culturelle importante. L'ancien bâti de Constantine est très dense, ce qui pourrait poser un problème en cas de nouveau séisme, d'autant plus que toutes les expertises effectuées sur ce bâti ont bien montré la dégradation et la faible résistance de ce dernier vis-à-vis du séisme ([Master plan, 2003](#) ; CTC,

2010). En conséquence, l'étude de la vulnérabilité sismique du bâti existant s'avère et constitue un élément essentiel pour diminuer les risques sismiques afin de réduire les pertes socio-économique dues aux séismes éventuels.

Depuis une trentaine d'année, des méthodes se sont développées dans des pays à forte sismicité tels que le Japon, les États-Unis et l'Italie.

Ces méthodes, basées sur le retour sismique permettent d'effectuer un diagnostic de vulnérabilité aux séismes à grande échelle afin adopter une stratégie de réhabilitation pertinente. Dans cette perspective, dans cette thèse nous proposons deux méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique dans la ville de Constantine :

- La première est une approche européenne classique basée sur des enquêtes sur site appelée : « Risk-UE niveau 1 ».
- et la deuxième est une méthode rapide et innovante s'appuyant sur le principe de la fouille de données appelée « Association Rule Learning ».

1.2.1. Risque sismique :

Le risque sismique est exprimé sur la base des termes classiques de l'équation (1), définies par l'Organisation des Nations Unies en 2002 (UN, 2002). Les éléments constitutifs du risque sont présentés schématiquement à la figure 1.1.

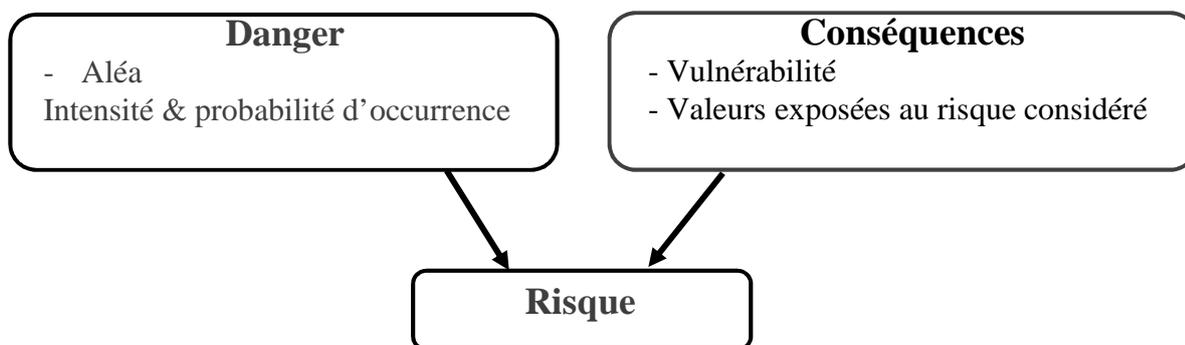


Figure 1.1. Éléments constitutifs du risque sismique.

Donc le risque sismique s'exprime comme la combinaison de l'aléa sismique, de la vulnérabilité des bâtiments et de la valeur exposée (ensemble des dégâts enregistrés d'ordre humain, économique et environnemental), selon la formule suivante :

$$\mathbf{Risque = aléa \times vulnérabilité \times Valeur} \quad (1)$$

Nous retiendrons plus particulièrement dans cette définition que le risque peut être exprimé de manière synthétique entre le lien qui existe entre les trois composants du risque sismique, l'aléa sismique (probabilité d'occurrence), la vulnérabilité au séisme (degré d'endommagement) et le niveau d'exposition aux aléas sismique (l'enjeu). La connaissance du risque sismique demeure, toutefois, l'élément indispensable à la protection des biens et des populations pour la mise en place de mesures de mitigation appropriées. Afin de comprendre le concept de risque sismique, il est nécessaire d'expliquer les concepts de l'aléa sismique et celui de la vulnérabilité sismique.

1.2.1.1. L'Aléa sismique :

Un aléa est une composante essentielle du risque, où l'estimation de l'aléa sismique constitue le premier pas pour apprécier et délimiter le risque sismique. Il se définit comme la probabilité d'occurrence d'un événement destructeur d'une intensité donnée par une échelle macrosismique, sur une période donnée. Il est important de noter ici que l'aléa sismique, peut être modifié localement sur des zones plus réduites où les conditions du sol ou de la topographie, sont particulièrement défavorables (effet de site), ce dernier a été observé lors des séismes de Caracas en 1967 (Pecker, 1984), et de Mexico en 1985 (Esteva, 1988). Pour cela l'aléa sismique est établi à deux niveaux : aléa régional et aléa local.

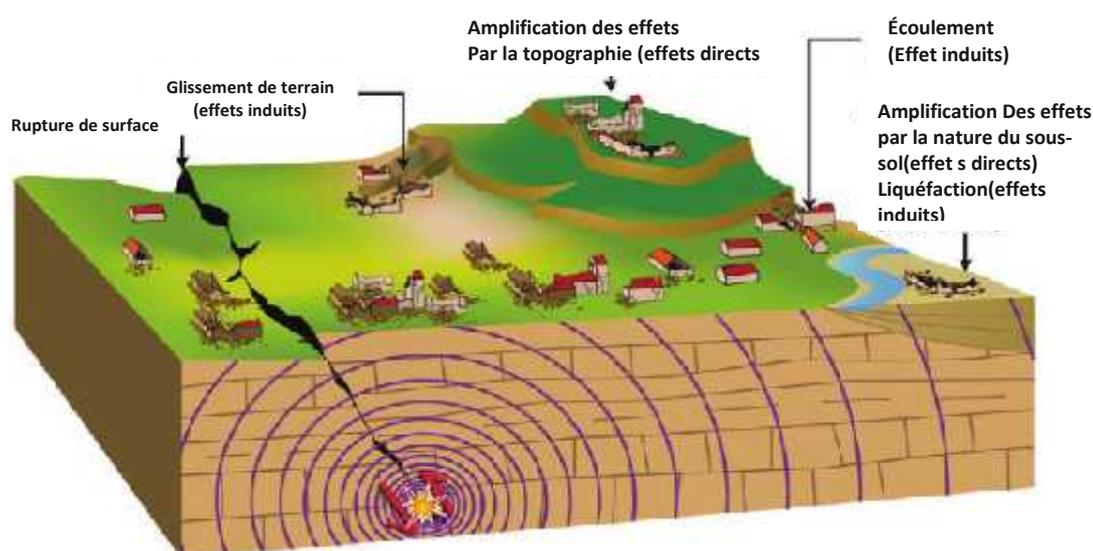


Figure 1.2. Conditions géologiques et topographiques locales pour le calcul des effets de site (BRGM, 2006).

En Algérie, le nord du pays est considéré comme une zone d'aléa sismique estimé modéré à fort. Selon le Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique « GRAAG », il se produit chaque mois environ une trentaine de micro secousses en général non ressenties par la population (GrAAG, 2001). En plus cette zone du pays présente un niveau d'enjeux élevée du fait que toutes grandes villes algériennes se situent avec une concentration de la majorité de la population, des activités économiques, et des infrastructures importantes.

Après le séisme destructeur de Boumerdes en 2003, le gouvernement Algérien a été lancé des études sur l'aléa sismique. En 2005 des études de micro-zonages et d'aléa sismiques ont été lancées dans plusieurs villes du nord d'Algérie (Alger 2006, Oran 2010, Constantine, Skikda 2015...etc.). Elles sont prises en charge par le Centre national de recherche en génie parasismique « CGS ».

1.2.1.2. Vulnérabilité :

Une autre approche pour réduire le risque sismique consiste à réduire la vulnérabilité sismique des bâtiments. Elle présente la qualité sismique des constructions et la possibilité d'une structure de souffrir des dégâts dans le cas où elle serait soumise à l'action d'un séisme. La vulnérabilité est propre à chaque bâtiment, et est indépendante de l'aléa sismique. Ceci signifie qu'un bâtiment peut être vulnérable et ne pas présenter de risque parce qu'il est situé dans une zone sans danger sismique. La vulnérabilité des bâtiments dépend des caractéristiques de dessin et construction, de la qualité des matériaux, de l'âge du bâtiment, de la hauteur, ...etc.

1.2.1.3. Valeur (Enjeu) :

La valeur exposée du système au risque considéré est de nature socioéconomique. Dans le cas du danger naturel sismique, la valeur exposée au risque comprend habituellement les montants assurés, bâtiments et bien, ainsi qu'une valeur estimée correspondant aux pertes humaines possibles. Les enjeux ont une importance majeure dans les zones à sismicité modérée car ils peuvent accroître sensiblement le niveau du risque. La ville de Constantine, par sa configuration territoriale et

urbanistique particulière, présente des enjeux économiques, politiques et sociaux très importants.

1.2.2. Éléments spécifiques au cas de l'étude :

1.2.2.1. Historique de l'étude de vulnérabilité en Algérie :

L'expérience sismique en Algérie montre bien la vulnérabilité élevée du bâti existant où un séisme d'intensité « moyenne » peut engendrer des dégâts importants. C'est seulement après le séisme du 21 Mai 2003 à Boumerdes (2003), et après observations et analyse des dégâts (post sismique) provoqué par ce séisme, qu'un pays comme l'Algérie s'est intéressé à l'étude de la vulnérabilité du bâti.

La plupart des études réalisées sur la vulnérabilité sismique des constructions algériennes basées sur des méthodes analytiques linéaires et non linéaire (Statique équivalente, Pushover). Récemment, et après les expertises et les opérations effectuées sur le bâti existants par le contrôle technique des constructions (CTC) et le Centre de Génie Parasismique (CGS) dans plusieurs ville (Alger, Oran, Constantine), une croissance de l'intérêt aux méthodes d'analyse de vulnérabilité à grande échelle a été remarquée.

Dans ce cadre, plusieurs projet de recherche sur le risque sismique et la vulnérabilité des constructions ont été réalisés sur les grandes vieilles villes Algériennes comme, Alger (Belazougui et al, 2004 ; boukri et Bensaïbi, 2007 ; Remki et Benouar, 2014 ; et Novelli et al , 2015) , Blida (Tadger et al, 2013); Oran (Refas el al 2009, Senouci et al, 2012) , Annaba (Athmani et al, 2014) et Constantine (Benmarce et al, 2012 ;Boukri et al, 2014).

1.2.2.2. Situation de la ville de Constantine (Enjeux) :

Constantine est considérée comme la capitale de l'Est algérien, elle occupe une position géographique centrale dans cette région, tant une ville charnière entre le Tell et les Hautes plaines. Cette Wilaya est limitée au Nord par la Wilaya de Skikda, à l'Ouest par la Wilaya de Mila, à l'Est par la Wilaya de Guelma et au Sud par la Wilaya de Oum Bouaghi et localisée par rapport aux coordonnées de la surface terrestre, par

longitude 7.35 Est et latitude 36.13 Nord, Constantine se situe à environ 437 km à l'Est de la capitale Alger (Fig. 1-3).



Figure. 1-3. Carte de découpage administratif (Est Algérien)

De par ses potentialités économiques et sociales, Constantine se place parmi les villes les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km² pour une population estimée à 1 216 868 habitants selon les statistique de la direction de santé et de la population de Constantine « [http : //www.dsp-constantine.dz](http://www.dsp-constantine.dz), dernier accès Octobre 2016 » en 2015, soit une densité de l'ordre de 408 Hab /Km², et un taux d'urbanisation qui a atteint plus de 94%. Ces données relèvent un entassement démographique au niveau urbain notamment au niveau de Constantine qui connaît un flux quotidien considérable des communes et wilayas avoisinantes.

La zone d'étude est une partie de la commune de Constantine. A l'instar de la population nationale, la population de cette commune est très jeune ; la population âgée de moins de 25 ans représente presque la moitié de la population recensée soit 46.75 %, et celle moins de 35 ans représente plus des deux tiers soit 64.08%, cette

valeur est inférieur à la moyenne enregistrée au niveau national, ainsi que le montre le tableau ci-dessous.

	< 25 ans (%)	< 35 ans (%)	60ans (%)
Moyenne nationale	46.35	65.31	8.33
Moyenne de wilaya	46.75	64.08	8.54

Tableau 1-1 : Répartition de la population locale par groupe d'âge (ONS ,2011).

Dans le cadre de cette thèse une partie historique de vieille de la ville de Constantine a été prise comme concernée par l'étude, elle est située en bordure du fleuve Rhumel. On peut l'appeler aussi Ville historique ou encore « le centre ancien », délimitée par les limites naturelles de rocher. Il y a plusieurs quartiers et faubourgs qui entourent le Vieux-Constantine ou alors qui en font partie. Ces secteurs sont identifiés par : Koudiat, les faubourgs de saint jean, Belle vue, Ciloc, cité Fadila Saadene, Cité Ben Boulaid et la Cité 20 aout.

La ville de Constantine abrite 60 % de la population de la wilaya, alors que sa superficie ne représente que 8 % (183 km²) de la surface totale de la wilaya. En comparaison avec la densité de population à l'échelle de la wilaya (362 hab /km²), la ville de Constantine est marquée par une grande concentration de la population (2 617 hab /km²).

1.3. Choix du site :

Le choix de la vieille ville de Constantine , qui s'étend sur une surface de 1637 ha et compte environ 100000 habitants, datant d'une période allant du XVII^{ème} au XXI^{ème} siècle, comme cas d'étude, n'est pas le fruit du hasard, bien au contraire, il s'appuie sur des considérations, objectives :

- Constantine, malgré une sismicité modérée, où une forte dégradation d'anciens bâtiments Construits avant l'application des normes parasismique et avec la volonté des autorités locales de sauvegarder et de conserver le patrimoine immobilier sur la vieille ville nous amènent à réfléchir sur les moyens et l'outil existants à mettre en place pour évaluer la vulnérabilité sismique du bâti.

- La partie enquêtée fait partie du centre de ville actuel de Constantine. Cette zone est un grand centre administratif, culturel, industriel, commercial, éducatif, sportif, services, et militaire. De ce fait, elle requière une attention particulière pour la protéger contre le phénomène sismique.
- A Constantine comme toutes les vieilles villes en Algérie, le bâti existant, construit sans la prise en compte du risque sismique, n'ayant souvent pas fait l'objet de contrôle d'exécution.
- Le quartier historique de la vieille ville abrite de nombreux monuments abandonnés tels que les monuments religieux (mosquées, zaouïas)
- Une préoccupation générée par son image dégradée.
- Les expertises et les opérations de réhabilitations effectuées sur ce bâti dans les dernières années : (Master plan en 2003, projet de réhabilitation de la rue Mellah Slimane(Bab el Djabia) et la place El Batha » en 2005, le projet PPSMVSS « Plan Permanent de sauvegarde et de mise en valeur du secteur sauvegardé » en 2008, le projet de Réhabilitation des anciens lycées en 2009 ...etc) pour la sauvegarde et la protection des sites historiques contre les aléas du temps ont montré la dégradation et la faible résistance de ce type de construction vis-à-vis d'un éventuel séisme.

1.4. Objectifs :

L'objectif principal de cette thèse était : 1) d'évaluer le risque sismique aux constructions de la ville de Constantine, et ultérieurement aux autres villes algériennes, et par l'intermédiaire, 2) proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique ce qui nous a permis d'estimer la qualité sismique des constructions à Constantine à moindre coût.

Pour atteindre cet objectif, d'autres objectifs intermédiaires indissociables ont été fixés :

- a. L'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle nécessite une réalisation d'enquêtes sur sites pour collecter les informations nécessaires qui serviront pour l'évaluation de la qualité sismique des constructions à Constantine.
- b. Proposer l'utilisation de méthodes existantes sophistiquées (Risk-UE) et développer des méthodes rapides et simples (ARL) pour évaluer la vulnérabilité

sismique du bâti courant à grande échelle. de façon à tenir compte des spécificités de la ville de Constantine et étendre son application à d'autres villes (le nord algérien).

c. La validation de la méthode développée ARL par la comparaison avec la méthode européenne sophistiqués Risk-UE. niveau 1.

d. L'identification des zones les plus sensibles à l'action sismique, ce qui permet une meilleure gestion de la crise par une meilleure planification des moyens de secours à mettre en place juste après un séisme

e. Classification des bâtiments les plus vulnérables pour une éventuelle réhabilitation et / ou renforcement tout en tenant compte des priorités.

f. Déterminer les bâtiments stratégiques qui pourront bénéficier d'une analyse plus fine de la vulnérabilité.

g. Assurer l'efficacité de la gestion d'une crise sismique dans la ville de Constantine par une meilleure préparation des acteurs concernés (services municipaux, services de wilaya, services de secours et des militaires) par la définition des taches.

1.5. Méthodologie :

Dans le cadre de cette étude, la première démarche d'analyse sera alors réalisée à l'aide des enquêtes sur site (méthode macrosismique) pour collecter les informations essentielles caractérisant le bâti de la ville de Constantine. De ce fait, une base de données sur la qualité sismique du site a été créée.

La deuxième démarche consiste à suivre une méthodologie simplifiée nécessitant un moindre coût par l'utilisation des paramètres de base de la construction pour évaluer les dommages lors d'un éventuel séisme (scénario sismique).

Pour d'atteindre les objectifs tracés pour cette recherche, plusieurs étapes ont été réalisées :

- À l'aide d'une recherche bibliographique une présentation de la sismicité régionale et la classe sismique de la ville de Constantine (aléa sismique).
- Revue des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique disponibles, afin de choisir la méthode la plus appropriée à la typologie constantinoise.
- Pendant la durée de réalisation de cette thèse plusieurs inspections et enquêtes sur site ont été faites pour obtenir les caractéristiques générales (paramètres

structuraux et non-structuraux) sur les constructions qui permettront d'attribuer un indice de vulnérabilité sismique pour chaque structure.

- La numérisation des données sur les constructions (bâtiments, maison individuelles,... etc.) et leur structuration dans un système d'information géographique, ce qui constitue une base de données relationnelles avec des aspects novateurs et important de cette recherche. Le système d'information facilite grandement la manipulation des données et le développement de représentations de la Ville de Constantine face aux risques sismique éventuels.
- Évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions par une méthode macrosismique Risk-UE qui consiste à calculer un indice de vulnérabilité "IV", qui sera un indicateur de l'état de la structure. Cet indice est fonction de la typologie constructive et d'autre facteurs structuraux et non structuraux
- Évaluation de l'ensemble des bâtiments de l'inventaire par une nouvelle méthode d'analyse simplifiée, en utilisant que les paramètres de base (Hauteur, Age, forme du toit et matériaux de construction) de la construction.
- Vérification de l'applicabilité et l'exactitude de la méthode proposée par la comparaison avec la méthode sophistiqué Risk-UE.
- La représentation de la distribution des résultats sur la zone d'étude se fera via un Système d'information Géographique (SIG), qui délivrera une base de données de la répartition du bâti suivant sa nature et son état vis-à-vis du séisme, et des cartes de vulnérabilité et des dommages.

Enfin, il est très important de noter que les résultats fournis dans ce travail ne concernent que la ville de Constantine elle-même, et pas les communes environnantes, qui subiraient également l'effet du séisme plus ou moins fortement selon la position de l'épicentre.

1.6. Structure de la thèse :

Afin de répondre aux objectifs présentés précédemment, le manuscrit est divisé en quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale avec des perspectives.

➤ Le chapitre 1 est consacré à une introduction générale qui consiste à définir le cadre générale de l'étude, les objectifs visés et les méthodologies suivies avec la définition de certaines notions de base du risque sismique, qui permettent une meilleure compréhension de la thématique abordée dans cette recherche.

➤ Le chapitre 2 est consacré à une revue des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle qui proviennent principalement des pays à forte séismicité (Italie, et États Unis). Cette partie permettra d'identifier, pour chacune des méthodes utilisées, leurs principes généraux (facteurs de vulnérabilité pris en compte, validation scientifique, et types de bâtiments concernés) et leur niveau de complexité, dans le but de déterminer la méthode la plus convenable à la typologie des villes Algérienne et plus particulièrement à la ville de Constantine.

➤ Dans le chapitre 3, on présente l'état des connaissances sur le contexte du périmètre d'étude à travers ses différents aspects : sismique (l'aléa sismique), géologique, géotechnique, et urbain. L'inventaire réalisé pour la ville de Constantine et la caractérisation globale des constructions de cette région ont été aussi présentés. Les informations indispensables à l'estimation des indices de vulnérabilité sismique telle que : les techniques de Construction, la géométrie des constructions et les caractéristiques des matériaux sont également présentées. On termine ce chapitre par la présentation des typologies du bâti existant et la distribution des constructions dans la ville de Constantine.

➤ Le chapitre 4 est consacré aux résultats de l'analyse de la vulnérabilité sismique des constructions selon la méthode macrosismique européenne (Risk-UE.LM1) où près de 2252 constructions de la ville ont été recensées et analysés. On présente aussi les résultats, les niveaux de vulnérabilité ainsi que les dommages calculés selon les différents scénarios sismiques.

Cette évaluation a permis de faire ressortir les déficiences sismiques de chaque typologie de construction avec son classement et d'identifier les secteurs de la ville susceptible de subir le plus de dommages en cas de séismes probables pour la région de Constantine.

Un logiciel SIG a été utilisé pour cartographier et afficher la distribution de la vulnérabilité et l'étendue des dommages sismiques probables. À travers cette étude des codes de calcul sous le logiciel Matlab ont été développées pour faciliter l'application de la méthode et accélérer les phases de calcul.

- Dans le chapitre 5, on présente une d'évaluation du risque sismique dans la ville de Constantine par une méthode innovante capable d'estimer les dommages provoqués par un séisme, à partir d'informations facilement accessibles. Dans ce chapitre, on propose une méthode basée sur datamining (Association Rule Learning, ARL) pour développer un proxy de vulnérabilité sismique pour la ville de Constantine, en utilisant les caractéristiques de base de la construction. À la fin de ce chapitre, les résultats obtenus, pour les classes de vulnérabilité et les dommages estimés, sont comparés à ceux de la méthode macrosismique Risk-UE.
- Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale qui fait une synthèse sur les différents résultats obtenus, avant d'esquisser des perspectives à envisager pour la poursuite de cette recherche..

Chapitre 2 :

Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique

2.1. Introduction :

Une estimation de la vulnérabilité sismique des constructions de la ville de Constantine passe obligatoirement par le choix d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Dans ce chapitre, on présente les méthodes d'évaluation, de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine, appliquées aux bâtis existants dont l'objet est de déterminer la plus adéquate pour le cas de la ville de Constantine. On présente ensuite les différents outils servant à quantifier la vulnérabilité : les courbes de fragilité et de capacité, les fonctions de vulnérabilité, les matrices de probabilité de dommages.

2.1. Procédure d'analyse de la vulnérabilité sismique :

Dans la littérature, plusieurs méthodes d'analyse de la vulnérabilité (soit à l'échelle d'une construction ou à grande échelle) sont développées à travers le monde, qui se distinguent les unes des autres par leur niveau de détail et leur degré de précision. (Guéguen, 2013). Elles dépendent donc de l'échelle du pays, de la Wilaya, de la commune, du nombre de bâtiments à analyser ainsi que du budget et du temps consacré pour la réalisation de l'étude. (Tableau 2-1).

	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				

Tableau. 2-1. Les Méthodes d'estimation de la vulnérabilité des bâtiments (Combescur et al ,2005).

Pour les études à grande échelle (ville, Wilaya), l'approche à retenir est généralement statistique car la connaissance du bâti existant est souvent partielle. Les indicateurs de vulnérabilité sont reliés de façon statistique aux dommages, grâce à un indice (ou score) de vulnérabilité « IV ». À l'échelle de la structure, les études sont plus souvent déterministes (analytique) et font appel à la modélisation.

Naturellement, les premières méthodes macrosismiques évaluant la vulnérabilité sismique à grande échelle ont été développées dans les pays à fort aléa sismique qui ont subi des dommages sismiques importants. C'est pourquoi, durant ces trente dernières années, les chercheurs dans ces pays ont conjugué leurs efforts pour développer des méthodologies d'évaluation du risque sismique. Tableau.2-2.

Pays	Méthode d'évaluation
États-Unis	ATC-13, 1985 ; ATC21, 1988 ; FEMA, 1997 ; Hazus, 1999
Japon	Shiga, 1977 ; Otani, 2000
Turquie	Ergunay and Gulkan, 1991, et Hassan et Sozen, 1997
Italie	Benedetti and Petrini, 1984 ; GNDT, 1986,2000 ; Seismocare, 1998 ; Faccioli et al, 1999; Dolce et al,2003
France	Guéguen et al ,2007

Tableau. 2-2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle à travers le monde.

Deux projets internationaux ont fonctionné selon une grande échelle : le RADIUS (Sagewa et al, 2000 ; Villacías et Cardona, 2000) et le projet européen de Risk-UE 2003 (Faccioli et Pessina, 2003). Les méthodes empiriques d'évaluation de la vulnérabilité suivent à peu près un cheminement identique dans l'évaluation du risque sismique :

- Définition d'une typologie.
- Collecte des informations structurales et non structurales caractérisant les bâtiments.
- Application d'une fonction d'endommagement.
- Représentation de la distribution des dommages par des cartes de dommages.

Cette évaluation permet l'estimation des dommages occasionnés par un séisme de scénario, établir une échelle de dommage, définir une typologie structurale et sa distribution dans la ville, calculer un indice de vulnérabilité et estimer un dommage pour un niveau d'agression.

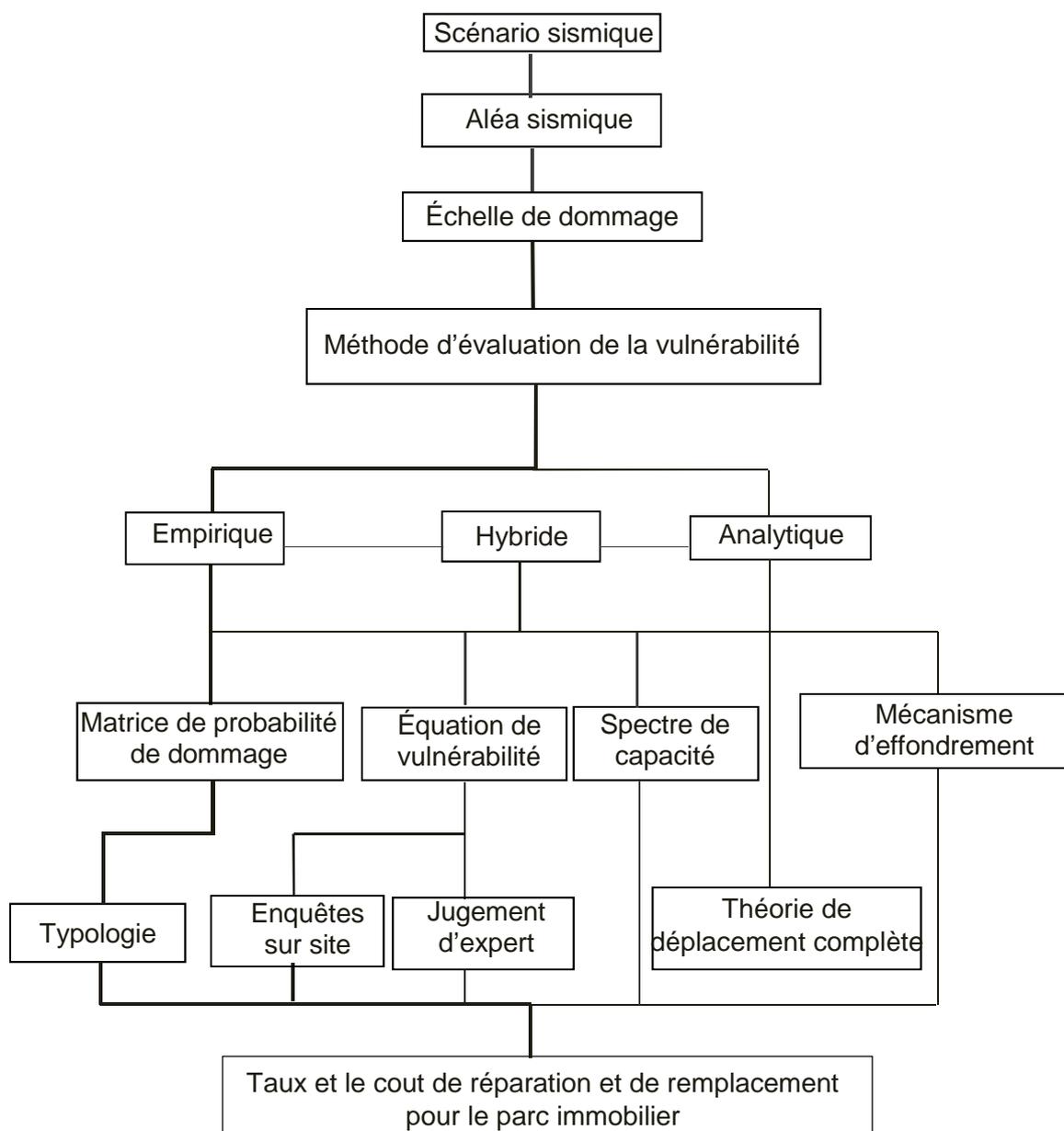


Figure. 2-1 : Organigramme des différentes étapes d'évaluation d'un risque sismique (Calvi et al, 2006).

En général, les méthodes empiriques peuvent être utilisées pour estimer de façon approchée les dommages engendrés par un séisme.

2.3. Niveau d'analyse de la vulnérabilité sismique :

Selon le coût de l'analyse, degré de précision et la qualité de l'évaluation, on distingue plusieurs niveaux d'investigation : depuis des évaluations très sommaires jusqu'à des évaluations plus détaillées. Dans la littérature (Guéguen, 2013), trois niveaux d'analyse de la vulnérabilité sont habituellement proposés :

- Méthodes empiriques appelées également méthodes statistiques, basées sur les retours d'expériences de séismes passés.
- Les modèles macrosismiques établies sur la base d'observations post-sismiques, qui utilisent les jugements d'experts pour l'identification visuelle de critères structuraux ou non structuraux au sens large. Enfin un indice de vulnérabilité « I_V » est calculé, qui sera un indicateur de l'état de la structure.
- Les modèles mécaniques (analytique) qui représentent la réponse structurale par la courbe de capacité et représentative d'un système inélastique. Ce type d'approches n'est pertinent que si l'on dispose d'une connaissance précise de l'aléa sous la forme d'un spectre de réponse. (Auclair et al, 2007)

2.3.1. Approches très globales (niveau 0) :

À ce niveau des échelles de dommages utilisent des approches statistiques de dommages tels que l'échelle macrosismique EMS 98 en fonction des différentes typologies de de constructions. Elles utilisent des matrices de probabilité de dommages (DPM) issues directement du retour d'expérience et des estimations de dommages après plusieurs séismes. (Grünthal, 2001). Ces méthodes s'appliquent bien à des évaluations pour un nombre important de bâtiments sur une zone donnée. Elles sont sommaires mais permettent néanmoins une première évaluation rapide et moins coûteuse.

2.3.2. Approches globales (niveau 1) :

À ce niveau, les bâtiments ne sont pas analysés individuellement mais de façon statistique. Il existe de nombreuses méthodes pour étudier la vulnérabilité d'un système urbain (Hazus, RiskUE, Vulneralp, GNDT ...), basées sur l'identification visuelle de critères structuraux, ensuite des fiches de relevés sont utilisées pour

repérer ces différents critères et/ou classer les bâtiments dans l'une des typologies prédéfinies. (Guéguen, 2013).

Elles suivent un cheminement identique : établir une échelle de dommage, classer les bâtiments dans des typologies prédéfinies, calculer un indice de vulnérabilité, et estimer un dommage probable pour un niveau d'agression sismique.

Afin de passer d'une évaluation discrète (niveau 0) à une évaluation continue par des corrélations établies entre le dommage moyen et le niveau de la sollicitation sismique. La sollicitation s'exprime en fonction de l'intensité sismique ou parfois en fonction d'un niveau d'accélération maximale du sol (PGA) comme le cas de la méthode italienne GNDT 1993 et la méthode américaine HAZUS 99.

2.3.3. Approches mécaniques (Niveau 2 et 3) :

Ce type d'analyse basé sur la modélisation numérique de la construction de façon individuelle, mais avec des approches déterministes nécessitant la connaissance précise de la structure comme : les caractéristiques des matériaux, les plans de la construction, l'étude micro zonage de site...etc.

Ces méthodes utilisent parfois des courbes de capacité du bâtiment reliant les forces aux déplacements comme le cas de la méthode Américaine HAZUS 2003. Des exemples d'utilisation des méthodes de calculs non linéaires du type Push-Over sont donnés par Kircher et al, (1997).

Dans la partie suivante, les méthodes d'analyse à grande échelle sont présentées en détail, afin d'identifier pour chaque méthode ses avantages, ses limites et ses incertitudes de façon à avoir une vision claire des résultats produits par chacune.

2.4. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle (Macrosismique) :

Les méthodes de vulnérabilité à grande échelle diffèrent par leur complexité, leur coût, leur précision. Ces méthodes utilisent les statistiques sur les dommages observés lors de séismes passés pour construire des matrices de probabilité, et par la suite des fonctions de vulnérabilité pour chaque typologie constructive. Dans cette

section nous présentons quelques approches afin de choisir la méthode la plus convenable à la typologie de la ville de Constantine.

2.4.1. L'Échelle macrosismique EMS 98 (Méthode de Niveau 0) :

L'échelle Macrosismique Européenne EMS 98 (Grünthal, 2001) est une méthode probabiliste définit une échelle d'intensité pour les séismes prenant en compte la vulnérabilité du bâti. Dans cette échelle, l'intensité d'un séisme est considérée comme une classification de la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans une zone limitée. En douze degrés d'intensité différents allant de secousse imperceptible jusqu'à catastrophe généralisée. Depuis les années 2000, l'EMS 98 est considérée comme un standard en Europe pour les études d'évaluation du risque ou de la vulnérabilité sismique, c'est la première échelle parmi les échelles existantes (MSK, MMI,...etc.) qui introduit les notions de typologies et la conception parasismique des structures, dans l'analyse de vulnérabilité sismique. (Annexe 2-1).

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 — Gamme de probabilité - - - Gamme la moins Probable, cas exceptionnel

Tableau. 2-3 : Différenciation des structures en classe de vulnérabilité. (Grünthal et al, 2001)

Comme indique le tableau 2-3 cette échelle présente l'avantage de classer 15 types de structures dont 7 de maçonnerie et 6 de béton armé basée sur le matériau de construction, et le niveau de conception parasismique aux classes de vulnérabilité la plus probable allant de A (la plus vulnérable) à F (la plus résistante).

Cette méthodologie suppose, que des bâtiments appartenant à une même typologie de construction, auront tendance à avoir une réponse similaire face au séisme. Il suffit alors d'avoir des réponses globales définies par typologie de construction.

En effet, le comportement sismique d'un bâtiment dépend notablement des techniques et des matériaux employés pour sa construction. Un bâtiment en maçonnerie est, a priori, 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...

L'EMS 98 est donc considérée comme une analyse très globale qui introduit les notions de conception des structures, en distinguant le degré de conception parasismique (sans, moyen, bon) pour les structures en béton, des systèmes de renforcement employés pour les structures en maçonnerie. L'EMS 98 propose une corrélation entre l'intensité sismique et l'endommagement des bâtiments.

Elle utilise pour ce faire des indications du type « few » (un peu), « Many » (beaucoup) et « Most » (la plupart), où le dommage sismique est considéré comme une variable continue variant de 0% (pas de dommage) à 100% (ruine) . Ce qui permet de construire des matrices de probabilité de dommages voir figure 2-2.

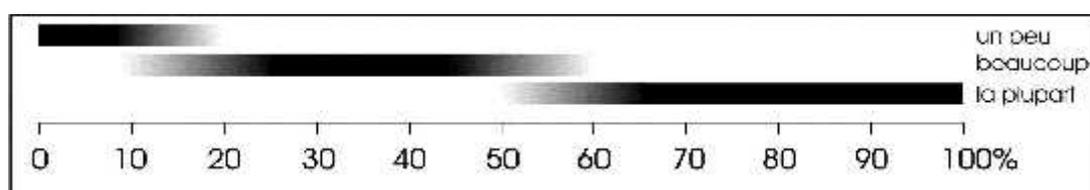


Figure 2-2. Fonction de probabilité d'endommagement d'après (Grünthal, 2001).

L'échelle EMS 98 définit aussi 5 degrés de dommages qui respectent une échelle de D1 (faibles dommages) à D5 (destruction totale). Pour chacune des classes de vulnérabilité, les dommages (D1 à D5) sont exprimés en fonction des niveaux d'intensité (V à XII), et définie par les termes "Peu", "Beaucoup" et "la plupart",

traduit en valeurs numériques 5%, 35% et 80%, respectivement (Lagomarsino et Giovinazzi 2006 ; Bernardini et al, 2010) comme montré en tableau2-4.

Classe A						Classe B					
I	D1	D2	D3	D4	D5	I	D1	D2	D3	D4	D5
V	quelques					V	quelques				
VI	beaucoup	quelques				VI	beaucoup	quelques			
VII			beaucoup	quelques		VII		beaucoup	quelques		
VIII				beaucoup	quelques	VIII			beaucoup	quelques	
IX					beaucoup	IX				beaucoup	quelques
X					la plupart	X					beaucoup
XI						XI					la plupart
XII						XII					

Classe C						Classe D					
I	D1	D2	D3	D4	D5	I	D1	D2	D3	D4	D5
V						V					
VI	quelques					VI					
VII		quelques				VII	quelques				
VIII		beaucoup	quelques			VIII		quelques			
IX			beaucoup	quelques		IX		beaucoup	quelques		
X				beaucoup	quelques	X			beaucoup	quelques	
XI					beaucoup	XI				beaucoup	quelques
XII					la plupart	XII					la plupart

Classe E						Classe F					
I	D1	D2	D3	D4	D5	I	D1	D2	D3	D4	D5
V						V					
VI						VI					
VII						VII					
VIII						VIII					
IX		quelques				IX					
X		beaucoup	quelques			X		quelques			
XI			beaucoup	quelques		XI		beaucoup	quelques		
XII						XII					

Tableau. 2-4 : Distribution des dommages pour différentes classes de vulnérabilité et différentes intensité suivant l'échelle macrosismique européenne, EMS 98 (Grünthal, 2001).

La matrice de probabilité définit la probabilité d'occurrence de chaque niveau de dommage pour chaque intensité sismique. La probabilité de dommages dans chaque niveau de dommage "P(Di)" est alors calculée avec l'Équation (2.1) :

$$P(D_i) = \frac{N(D_i)}{n} \quad (2.1)$$

N (Di) est les nombres de bâtiments dans la classe de dommage D et "n" le nombre total de bâtiments du type étudié. On constate que cette méthode est certes très sommaire mais, son avantage est la rapidité dans l'identification de la vulnérabilité des zones, ainsi pour l'estimation des dommages.

2.4.2. La méthode Italienne GNDT :

La méthode GNDT a été développée dès 1984 (Benedetti et Petrini, 1984) par le Groupe national de Défense contre les séismes. Cette méthode s'applique à deux typologies, les bâtiments en maçonnerie et les bâtiments en béton armé ; où la qualité sismique des constructions est représentée par un indice de vulnérabilité I_V . En 1994, après la collection d'une importante base de données sur les constructions italienne, un deuxième niveau de la méthode a été développée « niveau II ».

- Le niveau I : consiste à identifier les différentes typologies de construction, et rechercher des informations générales facilement collectés sur les constructions : l'usage de la construction, ses dimensions, son usage et son état de conservation, sa géométrie et ses matériaux de construction...etc. Ce niveau d'analyse est indispensable pour préparer les données servant à l'évaluation des dommages.
- Le niveau 2 : est basée sur l'approche statistique, caractérise de façon plus précise la structure grâce aux 11 paramètres du Tableau. 2-5. Ce deuxième niveau d'analyse permet également de tracer des courbes de vulnérabilité en fonction des modes de rupture probables. La méthode définit quatre classes de vulnérabilité A, B, C et D :
 - La classe A : représente les bâtisses réalisées selon le code parasismique et donc offrant une bonne résistance aux séismes.
 - Les classes B et C : sont des classes intermédiaires et représente une moyenne résistance aux séismes.
 - La classe D : représente les constructions ayant un mauvais comportement vis-à-vis des séismes.

Pour évaluer la vulnérabilité sismique par la méthode GNDT niveau II, une valeur numérique a été attribuée pour chaque construction « indice de vulnérabilité ». La vulnérabilité totale de la structure s'exprime alors comme la somme pondérée des 11 paramètres, ramené à 100.

Paramètres	Classes				Facteurs de pondération "w "
	A	B	C	D	
1. type et organisation du système résistant	0	5	20	45	1.00
2. qualité de système résistant	0	5	25	45	0.25
3. Résistance au cisaillement	0	5	25	45	1.50
4. Localisation de la structure et fondation	0	5	25	45	0.75
5. Plancher	0	5	15	45	Var
6 Irrégularité en plan	0	5	25	45	0.5
7. Irrégularité en élévation	0	5	25	45	Var
8. Distance entre murs	0	5	25	45	0.25
9. Toiture	0	15	25	45	var
10. Éléments non structuraux	0	0	25	45	0.25
11. État de conservation	0	5	25	45	1.00

Tableau. 2-5 : Classe de vulnérabilité, scores et pondérations des différents critères structuraux, d'après le (GNDT .1993).

Le coefficient de pondération « Wi» présente l'importance de chaque paramètre, et sa contribution dans la vulnérabilité sismique de la construction, (Équation 2. 3).

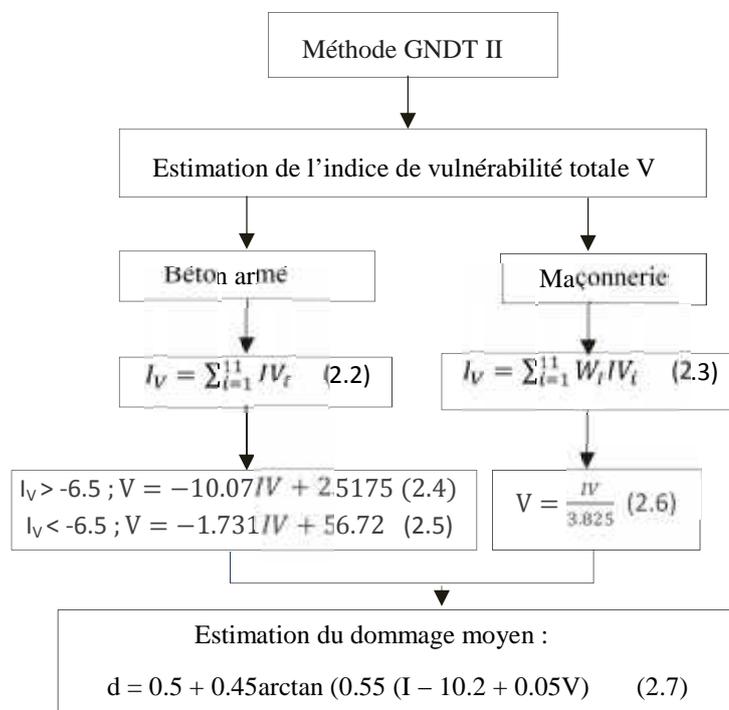


Figure. 2-3 : Organigramme de calcul suivi par Méthode GNDT II pour calcul l'indice de vulnérabilité et le dommage probable.

Ensuite, le dommage moyen « d » est calculé en fonction de l'agression sismique présentée par l'intensité sismique « I », et l'indice de vulnérabilité total « V » selon la fonction (2.7) développée lors des observations réelles sur les dommages après différents séismes italiens.

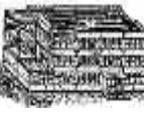
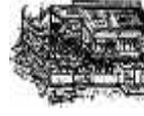
Echelle EMS98	1	2	3	4	5
Maçonnerie					
Béton armé					
dommage moyen	Nul à léger [0.0 – 0.2[	Modéré [0.2 – 0.4[	Important [0.4 – 0.6[	Très important [0.6 – 0.8[	Destruction [0.8 – 1.0[

Figure .2-4 : Équivalence des dommages entre l'échelle EMS 98 et la méthode GNDT (Guéguen et Taliervo, 2007)

La méthode GNDT est une méthode très détaillée (profitée en retour sismique en Italie) donc fondée sur des données connues et fiables. Elle a d'ailleurs donné naissance à d'autres méthodes cherchant à s'appuyer sur les mêmes données de départ comme la méthode Vulneralp en France (Guéguen et al, 2007).

Parmi les inconvénients de cette méthode, le taux de précision élevée des paramètres structurels à vérifier comme : les informations sur les fondations, sur la résistance au cisaillement des murs en maçonnerie, et les données géotechniques qui sont rarement disponibles.

Donc cette méthode on a besoin des enquêtes approfondies sur les caractéristiques structurelles et non structurelles, sur les constructions par des experts, ou ingénieurs spécialisés ; puisque la fiabilité des résultats de cette méthode est basée sur la fiabilité des informations collectées.

2.4.3. Méthode Risk-UE :

La méthodologie 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) (Spence et Lebrun, 2006).

L'étude a débuté en janvier 2001, et s'est étalée sur une période de trois ans. Elle a été pilotée par plusieurs universités et laboratoires de recherche, et a abouti à une méthodologie d'analyse du risque sismique des constructions en Europe.

Pour objectif de traiter la vulnérabilité sismique par la création des scénarios de risques sismique. Elle comporte deux niveaux d'analyse : le premier niveau nommée LM1 est une méthode macrosismique basée sur des retours d'expérience post-sismique. Le deuxième niveau nommée LM2 est une méthode analytique qui est basée sur une analyse mécanique du comportement d'une structure face à une agression sismique sous forme d'un spectre d'accélération.

Dans le présent travail on s'intéressera au premier niveau, qui se base sur les corrélations statistiques entre l'intensité macrosismique et le dommage apparent, décrit en termes de degré de dommage. La méthode classe les bâtiments selon une typologie propre à la méthode, dans l'optique de produire une typologie commune de structure plus détaillée que celle de l'EMS 98.

Le principe des méthodes Risk-UE consiste à calculer un indice "IV" qui varie généralement entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable), et qui sera un indicateur de l'état de la structure.

Elle donne un indice de vulnérabilité pour chaque type de bâtiment, en se basant sur plusieurs paramètres comme : les matériaux de constructions, le nombre, l'état des constructions...etc., afin d'attribués un indices de vulnérabilité de base à chaque classe de la typologie (Milutinovic et Trenda fi Loski, 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	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M2	Adobe	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	0.953	1.02
M3.3	Planchers : poutrelles métalliques et maçonnerie	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
M3.4	Planchers en béton armé	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
M5	Maçonnerie globalement renforcée	0.3	0.49	0.694	0.953	1.02
RC1	Structures poteaux-poutres en béton armé	-0.02	0.047	0.442	0.8	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 (portiques -murs)	-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	0.7
RC6	Structures préfabriquées en béton armé	0.3	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	0.7
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

Tableau. 2-6. Typologie de l'échelle européenne macrosismique EMS 98

Cet indice correspondant à une Valeur moyenne de la vulnérabilité 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 maximal IV^{\max} de la vulnérabilité tel qu'indiqué par le Tableau 2-6. Si la valeur de l'indice de vulnérabilité d'un bâtiment dépasse 1.02 l'indice final IV sera ramené à la valeur IV^{\max} . Les facteurs modificatives sont ensuite appliqués à IV^* , pour tenir compte de

la hauteur, les irrégularités, la position,...etc. L'indice final de vulnérabilité "IV" selon Risk-UE (Milutinovic et al, 2003) est donné par l'expression suivante :

$$IV = IV^* + \Delta V_m + \Delta V_R \quad (2.8)$$

Où les variables sont définies par : IV^* : indice de typologie, V_m : Facteur représentant l'influence de paramètres autre que la typologie sur le comportement et la réponse du bâti aux sollicitations sismiques. Voir les tableaux 2-7 et 2-8.

Facteurs de vulnérabilité	Paramètres	Valeurs de V_m
État d'entretien	Bon	-0.04
	Mauvais	+0.04
Nombre d'étages	Construction peu élevée (1 ou 2)	-0.02
	Moyennement élevée (3, 4 ou 5)	+0.02
	Élevée (6 étages ou plus)	+0.06
Système structural	Épaisseur des murs	-0.04 à + 0.04
	Distance entre les murs	
	Connexion entre les murs (tirants, cornières d'assemblage)	
	Connections entre éléments horizontaux et verticaux (diaphragmes)	
Étage souple	Transparence, démolition	+0.04
Irrégularité en plan		+0.04
Irrégularité en élévation		+0.02
Éléments résistants		+0.04
Toiture	Poids de la toiture + poussée sur les murs +Connections de la toiture	+0.04
Interventions de confortement		-0.08 à 0.08
Éléments asismiques	Barbacanes, contreforts, arcs	Pas d'indication
Interaction entre bâtiments : position dans l'îlot	Au centre	-0.04
	En coin	+0.04
	En tête d'îlot	+0.06
Interaction entre bâtiments élévation	Planchers décalés	+0.02
	Bâtiments de hauteurs différentes	-0.04 à + 0.04
Fondations	Fondations à des niveaux différents	+0.04
Morphologie du sol	Pente	+0.02
	Escarpement	+0.04

Tableau .2-7 : Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie.

La méthode Risk-UE niveau 1, comme présenté dans le (work package 4, 2011) donne des valeurs de V_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 traités.

V_R : facteur de vulnérabilité régionale, peut être introduit pour prendre en considération le caractère particulier de certains types de bâtiments à l'échelle régionale. Ce facteur modifie l'indice de vulnérabilité " IV" sur la base d'un avis d'expert. Celui-ci peut être basé sur un constat de la vulnérabilité déjà observée dans la région, suite à des séismes (facteur rarement retenu).

Facteurs de vulnérabilité		Niveau de la réglementation		
		Pas de code ou niveau bas	Niveau moyen	niveau Haut
Niveau de code		+0.16	0	-0.16
Mauvais entretien		+0.04	+0.02	0
Nombre d'étages	Faible (1 ou 2)	-0.04	-0.04	-0.04
	Moyen (3, 4, ou 5)	0	0	0
	Élevé (6 ou plus)	+0.08	+0.06	+0.04
Irrégularité en plan	Forme	+0.04	+0.02	0
	Torsion	+0.02	+0.01	0
Irrégularité en élévation		+0.04	+0.02	0
Poteaux courts		+0.02	+0.01	0
Fenêtre arquée (bow window)		+0.04	+0.02	0
Joint parasismique insuffisant		+0.04	+0.04	+0.04
Fondations	Semelles filantes	-0.04	0	0
	Semelles filantes avec longrines	0	0	0
	Semelles isolées	+0.04	0	0
Morphologie du sol	Pente	+0.04	0.02	0.02
	Escarpement	+0.04	+0.04	+0.04

Tablea.2-8 : Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en béton armé

À partir des indices de vulnérabilité calculés précédemment, il est possible de dresser des cartes de dommages. À partir de l'indice de vulnérabilité (IV), il est possible d'estimer les dommages en fonction de dommage moyen (μ_D) qui représente la

moyenne des dommages pour des bâtiments de même indice de vulnérabilité soumis à une intensité donnée selon la relation suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I+625I^V-13.1}{Q} \right) \right] \quad (2.9)$$

Avec :

I : représente l'effet de l'aléa sismique décrit en termes de l'intensité macrosismique selon l'échelle macrosismique européenne EMS 98. ; Q : un coefficient de ductilité équivalente du bâtiment, Pour les bâtiments résidentiels, il prend une valeur de 2,3.

Le dommage moyen μ_D varie entre 0 (pas dommage) et 5 (destruction) suivant l'échelle de dommages de 6 niveaux D_k donné 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 2-9.

Niveau de dommage	Dommage moyen	Description du dommage
D0, D1	0-0.5	Pas de dommages à légers (Aucuns dégâts structuraux Dégâts non structuraux légers)
D2	0.5-1.5	dommages moyens (Dégâts structuraux légers Dégâts non structuraux modérés)
D3	1.5-2.5	dommages sévères (Dégâts structuraux modérés Dégâts non structuraux importants)
D4	2.5-3.5	dommages très sévères (Destruction partielle)
D5	3.5-5	Destruction (Dégâts structuraux très importants)

Tableau. 2-9 : L'équivalente entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS 98.

En fonction de l'intensité sismique, l'indice de vulnérabilité permet de définir une courbe de vulnérabilité du bâtiment. Elle présente la relation entre la moyenne des dommages et l'intensité de l'aléa.

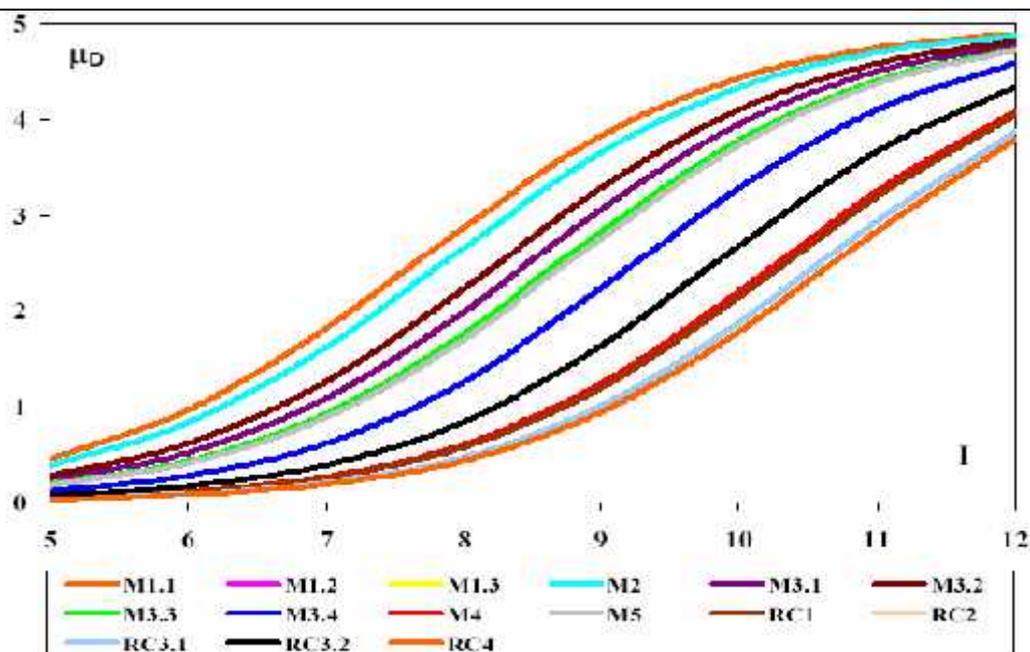


Figure. 2-5 : Fonctions de vulnérabilité semi-empiriques (Auclair, et al 2007).

La figure 2.5 présente une Courbes de vulnérabilité donnant le dommage sismique moyen μ_D pour plusieurs typologies exprimée en termes d'intensité macrosismique EMS 98 et de l'indice de vulnérabilité IV caractérisant la qualité sismique du bâti.

La méthode Risk-UE utilise une distribution binomiale de dommage (Milutinovic, 2003, Lagomarsino and Giovinazzi, 2006) pour calculer la répartition des probabilités des dommages P_k pour chaque classe de dommage D_k ($K=0$ à 5) pour un certain dommage moyen « μ_D » selon l'équation (2.5) donnée comme suit :

$$P(D_k) = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \quad (2.10)$$

Où: indique l'opérateur factoriel.

Finalement, les principales remarques qu'on peut tiré concernant le programme Risk-UE sont :

- Le dommage moyen estimé résulte d'un processus d'inversion de la méthode d'enquête macrosismique EMS 98, selon laquelle est consigné l'essentiel du retour d'expérience européen.
- La méthode Risk-UE qui définit une typologie plus détaillée que l'EMS98.
- La méthode Risk-UE est ainsi moins sensible que GNDT au contexte local, en plus cette méthode V_f qui permet de réduire l'intervalle d'incertitudes. (BRGM, 2008)

2.4.4. FEMA 154 :

La première édition de cette méthodologie américaine, FEMA-154 date de 1988, elle a connu des mises à jour dont la dernière en 2002. Le rapport FEMA 154 (FEMA, 2002) décrit la procédure de diagnostic visuel rapide (RVS) pour l'évaluation de la vulnérabilité. Elle utilise des matrices de probabilité de dommage propres aux typologies constructives américaine issues de retours post-sismiques. Cette méthode évalue les dommages sismiques de façon statistique. La dernière version de la méthode a été produite en Mars .2002. (BSSC, 2002a, 2000b).

Cette méthode présente l'avantage de classer 15 types de structures courantes aux États-Unis (deux en bois, cinq en acier, cinq en béton armé, et trois en maçonnerie) selon la sismicité de la région. Ou Trois degré de sismicités sont considérées : une sismicité forte, modéré, et faible.

Typologie	Description
W1	Ossature bois légère, habitation ou commerce, surface inférieure à 5000 sqf (465 m ²)
W2	Ossature bois, surface supérieure à 465 m ²
S1	Ossatures métalliques en portique
S2	Ossatures métalliques avec triangulation
S3	Ossatures légères en acier
S4	Ossatures métalliques avec murs en béton armé coulés en place
S5	Ossatures métalliques avec remplissage maçonnerie non armée
C1	Portiques en béton armé
C2	Murs porteurs en béton armé
C3	Structures poteaux-poutres avec remplissage maçonnerie non armée
PC1	Construction de type "tilt-up" en béton armé
PC2	Structures préfabriquées en béton armé
RM1	Maçonnerie armée avec diaphragmes flexibles (planchers et toiture)
RM2	Maçonnerie armée avec diaphragmes rigides
URM	Murs porteurs en maçonnerie non armée

Tableau 2-10 : Typologie de bâtiments selon (FEMA154,2002)

Cette méthode donne en fonction des caractéristiques constructives du bâtiment (hauteur, irrégularité en plan et en élévation, le niveau de conception parasismique, le type de sol) une note finale S :

$$S = -\log_{10}(\text{probabilité d'effondrement}) \quad (2.11)$$

Le score final varie théoriquement entre 0 et 7, en dessous du 2 la construction est considérée dangereuse et en dessus du 2 les constructions sont considérées sûres. Pour calculer la note finale S , la méthode propose un formulaire d'enquête permettant de la calculer rapidement sur site.

L'intérêt de cette méthode est sa simplicité qui peut être rapidement mis en œuvre pour identifier les bâtiments qui sont exposés au risque sismique. Elle ne nécessite pas de compétences élevées en calcul parasismique des structures et le diagnostic se base essentiellement sur l'examen visuel du bâtiment.

Cette méthode a été initialement conçue pour l'usage aux États Unis, où la typologie des constructions américaines est constituée essentiellement de bois, et d'acier, est assez différente de celle de l'Algérie.

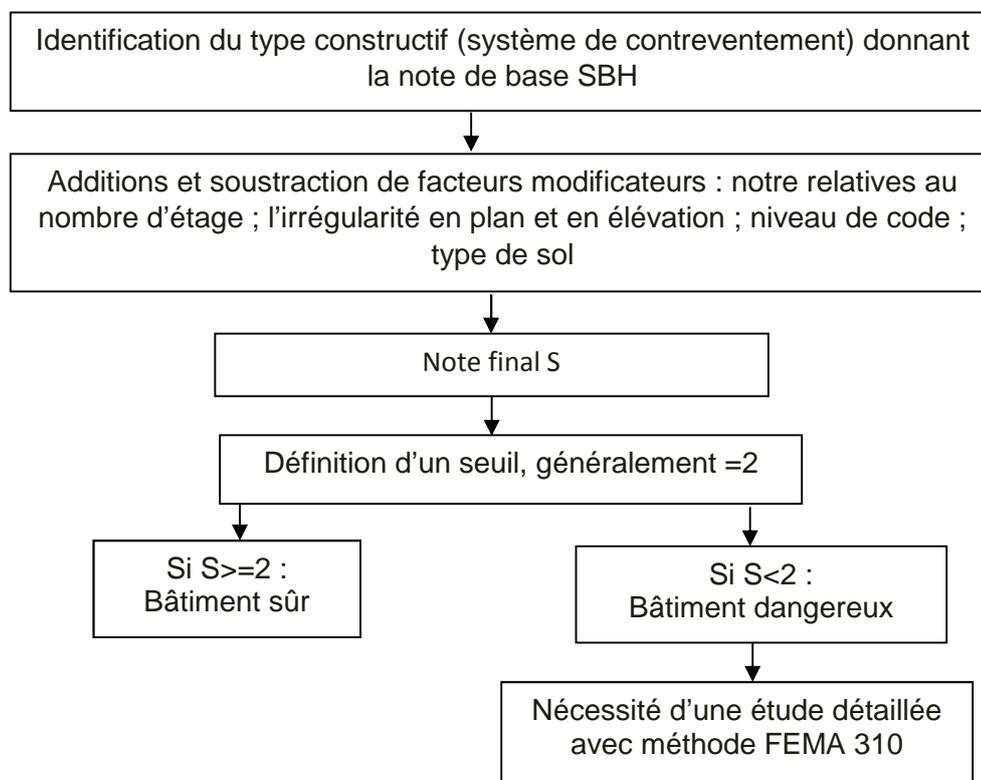


Figure. 2-6 : Procédure de l'identification des bâtiments dangereux par la méthode FEMA 154 par un Diagnostic Visuel Rapide (RVS). (SENOUCI. 2012).

Une autre remarque importante concernant les constructions de grande hauteur qui n'est pas considéré comme facteur pénalisant ce qui n'est pas le cas dans les méthodes européenne (GNDT et Risk-UE) et même dans le règlement parasismique Algérien qui considère ce paramètre comme facteur aggravant.

Les méthodes macrosismiques, quoique largement utilisées, présentent de sérieux inconvénients :

- Premièrement, elles s'appuient sur l'expérience acquise dans les pays à forte sismicité (USA, Italie, Grèce, ...etc.).
- Deuxièmement, certains phénomènes, qui peuvent être prépondérants (les effets de site, leur influence sur le contenu fréquentiel du mouvement sismique et la mise en résonance de certaines structures, etc.), sont mal pris en compte par le paramètre qualifiant, dans ces méthodes, l'agression sismique (généralement le PGA ou l'intensité macrosismique).

C'est pourquoi des études plus détaillées dite « de niveau 2 », sont exploitées et développés pour travailler à l'échelle de la structure.

2.5. Méthode d'analyse Niveau 2 :

Cette évaluation consiste à caractériser complètement la construction, en analysant son comportement avec précision par le biais d'une courbe « force – déplacement » appelée courbe de capacité. Ce qui nécessite des informations détaillées sur la structure (matériaux de construction, système structurale, conception ...), des moyens de simulations considérables (méthodes numériques, analytiques, non linéaires...) et donc des ressources humaines compétentes en dynamique des structures.

Dans la plupart des cas, ces méthodes sont applicables pour les bâtiments stratégiques (Remki et Benouar, 2014), mais pas à grande échelle. Dans la modélisation du dommage, l'agression sismique est traduite sous forme de spectre de réponse (demande sismique) et le comportement de la structure sous forme d'une courbe de capacité.

2.5.1. Le modèle HAZUS :

Aux États-Unis, depuis 1992 le NIBS (National Institute of Building Sciences) a développé une méthodologie d'estimation des pertes humaines et économiques provoquées par un séisme, une tempête ou des inondations pour la FEMA (Federal Emergency Management Agency) appelée : HAZUS (Hazus 99, 1999). Cette méthodologie d'évaluation de perte de séisme est une collection complexe de composants qui fonctionnent ensemble pour estimer les dommages sismique.

En 1997, une première version de la méthodologie HAZUS a été réalisée pour l'évaluation du risque sismique, l'approche a été revue en 1999. Depuis 2004, elle fait l'objet de développements concernant de deux d'autres risques naturels : les inondations et les ouragans. Actuellement, la méthodologie est commercialisée sous forme d'un logiciel informatique (HAZUS-MH) utilisant ArcGIS comme système d'information géographique. Il existe plusieurs versions d'HAZUS, la dernière est la version HAZUS-MH3.1.

Trois niveaux d'analyse peuvent être réalisés avec HAZUS, en fonction du niveau de complexité de l'étude. Ainsi, un premier niveau d'analyse, basé sur les données contenues par défaut, fournit des résultats bruts. Un deuxième niveau d'analyse est basé sur des données fournies par l'utilisateur, car des informations complémentaires sont requises. Enfin, un troisième niveau d'analyse avancée est défini à partir de données complémentaires relatives aux inventaires, aux paramètres techniques des constructions ainsi qu'aux coûts économiques. Pour faire la collection des données la méthode HAZUS est basée sur le Manuel FEMA 154.

HAZUS -MH présente six étapes d'analyses : l'inventaire des enjeux, l'analyse de l'aléa, l'estimation de dommages et indirects directs, l'estimation des pertes économiques directes et indirectes, et quatre types d'enjeux : le bâti courant, les constructions spéciales, les infrastructures de transport et les réseaux d'eau, d'énergie et de communication. Pour le bâti courant, il définit 38 typologies, des constructions sur la base de leur système structural et de leur hauteur.

L'échelle de dommage utilisée par le HAZUS comporte 5 niveaux de dommage : 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. Par exemple les niveaux de dommage pour les bâtiments de classe W1 sont décrits dans le tableau 2-11

Niveau de dommage		Description
	Léger	Occurrence de petites fissures dans les plâtres, localisées aux coins des portes et fenêtres et à l'intersection plafond-mur, de petites fissures dans les cheminées en maçonnerie et les placages sur maçonneries. De petites fissures sont supposées être visibles avec une largeur maximale inférieure à 1/8 de pouce (les fissures supérieures à 1/8 de pouce sont considérées comme des "grandes" fissures).
	Modéré	Occurrence de grandes fissures dans les plâtres, au coin des ouvertures comme les portes et fenêtres ; apparition de petites fissures diagonales dans les murs de cisaillement ; larges fissures dans les cheminées de briques ; renversement de hautes cheminées en maçonnerie.
	Sévère	De grosses fissures diagonales dans les murs de cisaillement ou de grandes fissures aux joints des panneaux de contreplaqué ; mouvements latéraux permanents d'étages et du toit ; renversement de la plupart des cheminées de briques ; fissures dans les fondations ; rupture des seuils en bois et/ou de glissement de l'ouvrage sur ses fondations.
	Très sévère	La structure peut subir de grands déplacements latéraux permanents, ou être en situation d'effondrement en raison de la défaillance des parois porteuses ou de la rupture du système de contreventement ; certaines structures peuvent glisser et s'effondrer à côté de leurs fondations ; fissures importantes dans les fondations. En moyenne, trois pourcent de la superficie totale des bâtiments avec des dommages très sévères est effondré.

Tableau. 2-11. États de dommage pour bâtiment de class W1 (HAZUS 2003)

Ce logiciel se base sur des modèles analytiques basées sur l'utilisation de courbes de capacité pour estimer l'endommagement consécutif à un séisme qui est composé de quatre étapes : la définition de la courbe de capacité ; le choix de l'action sismique, l'obtention du point de demande ; la détermination des courbes de fragilités. Les courbes de fragilité définissent la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommages, structurel ou non structurel, pour une valeur donnée de l'intensité d'aléa, ou chaque point de cette courbe est associé à un niveau d'endommagement, la Figure 2.6 représente schématiquement ces courbes.

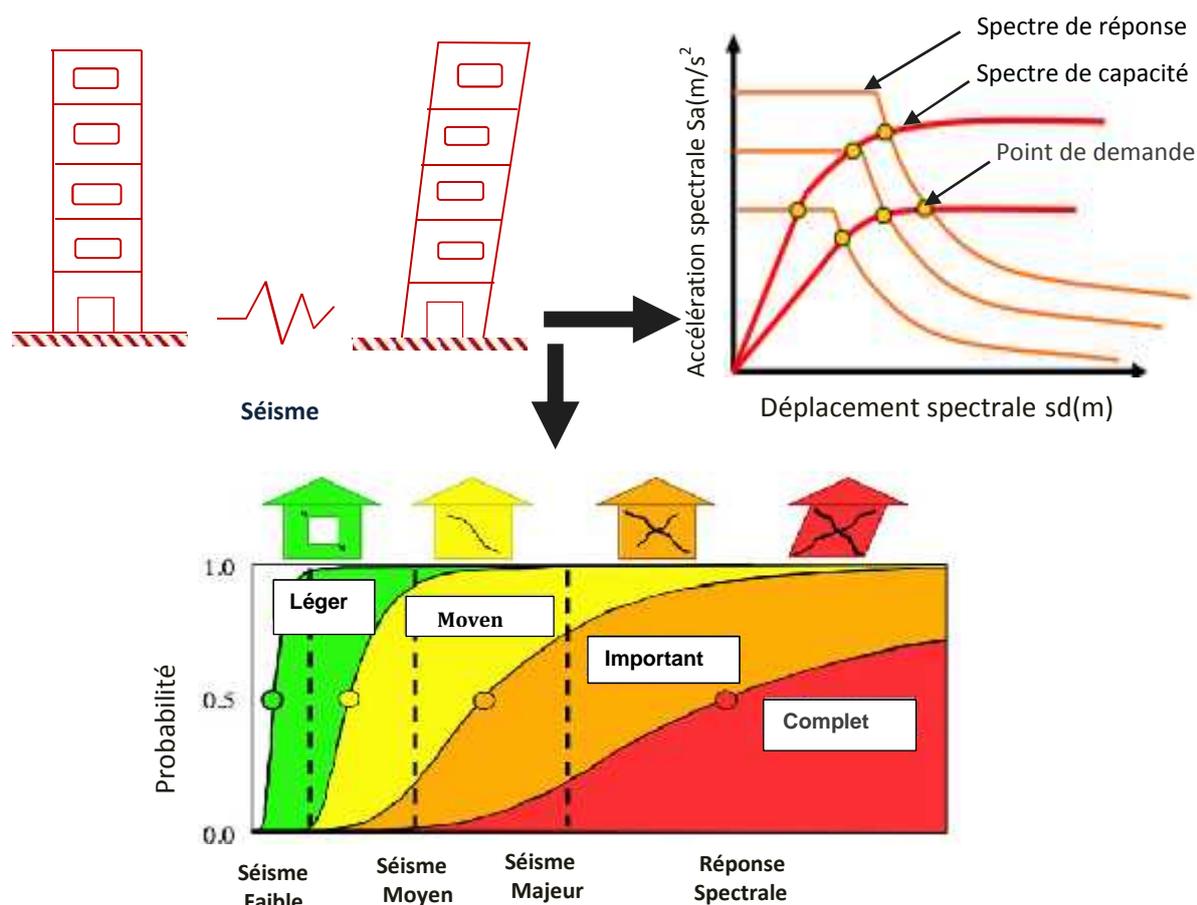


Figure 2.7 : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'un bâtiment

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 que probabiliste, ou bien par scénario de séisme réalisé indépendamment de HAZUS.

Dans le cas du programme HAZUS, ces courbes ont été mises au point à partir d'extrapolations des données liées aux dommages observés, sur avis d'experts ainsi que sur des tests en laboratoire (ATC 1985).

2.6. Méthode ARL :

Récemment, de nombreuses méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments à grande échelle ont été adaptées, afin de réduire et limiter les enquêtes sur sites. Soit par la création de nouvelles méthodes basées sur des enquêtes visuelles et rapides sur site telle que la méthode VULNERALP (Guéguen et al, 2007 ; Riedel et al.2014), soit par un traitement des images satellites, et photographies aériennes

(télédétection) pour contribuer à l'évaluation de nombreux composants du risque sismique (Mueller et al 2006 ; Geiß et al.2014 ; Riedel et al.2015).

Nous présentons dans cette partie une méthode inspirée du domaine de fouille de données "data mining" appelée le concept de règles d'association (association Rule Learning). Un procédé d'exploration de données permettant d'extrapoler des stockées dans de très importantes bases de données. Pour faire simple : avec la règle d'association, il est possible, à partir de données sur deux ou plusieurs paramètres, d'obtenir des informations sur un paramètre précis.

Cette technique permet d'analyser et d'interpréter des données volumineuses, et de Rechercher en intelligence artificielle, sur des informations cachées, dans une ou plusieurs bases de données afin de dégager des tendances, de proposer des hypothèses, et l'extraction de connaissances.

2.6.1. Principe de la méthode Association Rule Learning (ARL) :

Le concept de règle d'association a été popularisé, en particulier, par un article d' (Agrawal et al, 1993). Il s'agit d'une tâche courante dans de nombreux projets de data mining et notamment, dans l'une de ses applications particulières, le texte mining. Ces techniques sont largement utilisés et avec succès dans de nombreux domaines , ou une grandes quantités de donnée comme le marketing, commerce de détail, statistiques financières, et dans de nombreux domaines de recherche, y compris les mathématiques, et la gestion des risques.

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.

Cette méthode a été utilisée dans le domaine d'évaluation de la vulnérabilité sismique en première fois par (Reidel ,2014 et al). Ils ont mis au point un modèle statistique innovant pour la ville de Grenoble en France permettant d'estimer les dommages matériels que pourrait provoquer un séisme. Ce modèle constitue une perspective intéressante pour l'étude de vulnérabilité aux séismes

Dans cette thèse, on propose d'utiliser la méthode Association Rule Learning « ARL » pour développer un modèle de vulnérabilité sismique pour la ville de Constantine en utilisant les caractéristiques de base des constructions existantes à Constantine, avec une classification EMS 98 de la vulnérabilité.

Nous utilisons quatre paramètres facilement collectées sur les constructions de Constantine : l'époque de construction, le nombre d'étages, la forme du toit, et les matériaux de construction.

Dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité sismique, elle consiste à établir des corrélations en utilisant des algorithmes mathématiques (si / puis déclarations) entre les attributs de base qui sont facilement disponibles (X = nombre d'étage, la forme du toit, l'année de construction et matériaux de construction) et les classes de vulnérabilité sismique ($Y = A, B, C, D, E, F$).

Une règle d'association est une application sous forme $X \rightarrow Y_i$, où X (antécédent) et Y_i (conséquence) sont des ensembles d'item disjoints. Chaque relation entre X et Y_i peut être représenté au format binaire $[0,1]$: connaître attributs d'une construction X , la probabilité d'appartenir à la classe Y_i est exprimée par l'équation ci-dessous

$$P(Y_i|X) = \frac{P(Y_i \cap X)}{P(X)} \quad (2.11)$$

Les méthodes empiriques ont confirmé que la classe de vulnérabilité dépend à des caractéristiques structurelles élémentaires, donc X et Y ne sont pas totalement indépendants. Ou en pratique, $P(Y_i | X)$ peut être calculée comme suit :

$$P(Y_i|X) = \frac{N_{Y_i X}}{N_X} \quad (2.12)$$

Où :

N_X : est le nombre total des constructions avec attribut X

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

Une limitation de la méthode ARL est que par la recherche d'un nombre considérable d'associations possibles, il y a un risque important que les résultats incluront des incohérences, en raison de fausses associations.

Pour cela nous avons utilisé deux phases appliquées à une base de données assez grande (2252 constructions) afin de tester et assurer la qualité du proxy de vulnérabilité à Constantine.

- La première est une phase d'apprentissage, un proxy (Règle) de vulnérabilité a été 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

2.7. Synthèse :

Après une revue de littérature, il ressort que deux familles d'approches ont été retenues dans l'analyse de la vulnérabilité du bâti existant :

- Les méthodes empiriques d'analyse de vulnérabilité qui sont fondées sur le retour d'expérience et les caractéristiques structurales des bâtiments.
- Les méthodes analytiques sont basées sur le comportement des structures obtenu par modélisation numérique et essais à échelle réduite.

La connaissance du comportement d'une structure ancienne est souvent impossible par manque d'informations disponibles sur la conception et la qualité des matériaux de construction employés. C'est pourquoi, la plupart des méthodes de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine se réfèrent aux propriétés de base qui contrôlent le comportement des bâtiments, telles que : les matériaux, l'époque de construction, la géométrie, la hauteur, le niveau de conception parasismique, les conditions de sols, type de fondation ...etc.

Au total, les méthodes macrosismiques ont surtout l'avantage d'être peu coûteuses. À ce jour, ce sont les seules méthodes réellement opérationnelles et économiquement viables pour estimer les dommages affectant un très grand nombre de bâtiments en cas de séisme.

Le choix d'une méthode d'analyse de la vulnérabilité sismique à grande échelle pour être applicable et convenable à la typologie locale, il faut qu'elle réponde à certaines exigences :

- La typologie décrite dans la méthode soit cohérente avec le bâti existant.

- Les critères structuraux à renseigner soient compatibles avec les moyens mis en œuvre.
- Le type de méthode choisie dépend donc des objectifs à atteindre et des données et moyens disponibles.

Dans une région à sismicité modérée, où généralement les données post-sismiques concernant les dommages dus aux séismes sont inexistantes ou insuffisantes et les moyens disponibles pour une analyse de vulnérabilité du bâti sont assez faible. (Cas de Constantine), il convient de choisir la méthode (d'un pays à forte sismicité) la plus adaptée à la typologie locale, et ont une validité scientifique élevée.

En raison des similitudes des traditions constructives entre les deux rives de la méditerranée, la méthode européenne Risk-UE a été appliquée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions de la ville de Constantine.

CHAPITRE 3 :

Contexte de la ville de Constantine et inventaire typologique
des bâtiments

3.1. Introduction :

Pour mieux comprendre le risque sismique dans la ville de Constantine, ce chapitre présenté deux éléments nécessaires à l'évaluation de sa vulnérabilité sismique. Le premier élément introduit une connaissance sur l'aléa sismique, par la représentation des activités sismiques du Nord Algérien et plus précisément à Constantine, les sources sismiques dans cette région (les failles actives), le contexte géologique et géotechnique de la zone d'étude. Pour cela une recherche dans la littérature a été faite.

Le deuxième élément concerne les éléments exposés au risque sismique (enjeux), pour cela une représentation du contexte urbain, les spécificités de la ville et les données disponibles pour l'étude de la vulnérabilité sismique à l'échelle de la ville de Constantine.

Les données proviennent de sources diverses : soit à partir d'enquêtes sur site, basées principalement sur l'observation visuelle créé dans le cadre de la présente recherche qui comprend un ensemble spécifique du vieux bâti de Constantine, soit à partir des bases de donnée déjà existes réalisées par organismes spécialisés tels que le CTC, et la DUC de Constantine.

Tout d'abord, Avant de présenter les étapes de l'inventaire sismique dans la section 3-6, incluant la représentation des sources d'information utilisées, la numérisation de la base de donnée, par la structuration des données dans des fiches d'enquêtes, et après dans un système d'information géographique ce qui facilite grandement la manipulation des données, une lecture urbanistique et architecturale du bâti à Constantine a été présentée dans la section 3-5. Ensuite les typologies du bâti existant, et la distribution des constructions dans la ville de Constantine sont présentées aux sections 3-7 et 3-8 et 3-9. Des exemples sur les typologies

constructives existantes, et les caractéristiques des constructions avec leurs répartitions sur des zones géographiques bien définis.

3.2. Contexte sismique :

Le Contexte sismique introduit ici, par la présentation des aspects sismiques, géologiques et géotechniques de la ville de Constantine, dans le but d'introduire le niveau d'aléa sismique et la définition des séismes de référence, pour les scénarios de risque à établir. Pour faire une présentation de l'aléa sismique, trois critères doivent être pris en considération :

- la distribution de la sismicité et son historique.
- la définition des zones de sources sismique (faille).
- La géologie de la région.

3.2.1 Les Séismes du Nord de l'Algérie :

La connaissance de l'histoire des séismes, qui ont secoué une région, est importante dans le processus d'établissement de critères d'analyse de la vulnérabilité comme la réponse des structures et l'intensité des secousses. L'activité sismique du Nord Algérien, où se concentre 89% de la population Algérienne selon l'office nationale des statistiques est continue puisqu'elle se produit tout le long de l'année. (GRRAG.2001).

Le tableau 3-1 montre que l'Algérie a connu de nombreux séismes destructeurs, dont certains ont causé de grandes catastrophes, telles que celui qui a frappé la région d'El Chlef par deux fois, Orléanville en 1954 et El Asnam en 1980, Mascara en 1994, Ain-Temouchent 1999, et récemment Boumerdes 2003.

Les séismes Algériens sont d'autre part superficiels ne dépassant pas en profondeur les 15 km, ce qui les rend plus perceptibles par la population et donc plus dangereux.

Dans cette région, frontière entre les plaques Africaine et Eurasiatique, la déformation tectonique est l'expression de la convergence actuelle de ces deux plaques et se traduit par la fermeture progressive des bassins néogènes et par la poursuite de l'édification de la chaîne. (Yelles et al, 2006). Ces dernières décennies, plusieurs catalogues sont publiés sur l'histoire sismique du nord algérien, (Rothé,

1950 ; Benhallou et al, 1971 ; Roussel, 1973 ; Ambraseys et Vogt, 1988 ; Mokrane et al, 1994 ; Benouar, 1994, Boudiaf, 1996).

Séisme	Date	M	I	D4+D5	Sans abris	Morts	Bléssés	Pertes économique 2015\$
Constantine	04.08.1908	5.25	8	/	/	12		1,716,927
The Aumale	24.06.1910	6.6	8	/	/	81	/	24,129,270
Bordj Abou hassan Mac-Mahon	25.08.1922	5.4	8	50	/	4	/	/
	16.03.1924	5.35	8	/	/	4	/	/
Inkerman chlef	24.08.1928	5.4	8	100	/	4	/	272,202
Carnot	07.09.1934	5.1	7	100	/	0	11	/
Guelma	10.02.1937	5.2	8	/	28	2	16	3,170,176
Mansoura	16.04.1943	5.3	8	250	900	9	11	/
Mont Hodna	12.02.1946	5.55	8	1,000	7,500	277	118	60,773,589
Constantine	06.08.1947	5	8	50	/	3	8	26,571,412
Kheratta	17.02.1949	4.75	7	50	350	2	16	18,334,846
Chlef	09.09.1954	6.7	10	20,000	60,000	1,243	5,000	52,866,245
Bou Medfaa	07.11.1959	5.3	8	100	500	0	2	5,457,943
M'sila Melouza	21.02.1960	5	8	600	4,900	47	129	8,778,887
M'sila	01.01.1965	5.45	8	3,145	25,000	5	25	15,048,698
Bordj Bou Areridj	24.11.1973	5.1	7	2,000	14,922	4	43	/
Chlef beni rached	10.10.1980	7.1	10	60,000	400,000	2,633	8,369	14,957,383,495
Constantine	27.10.1985	5.8	8	/	/	10	300	2,202,760
Dj.Chenoua	29.10.1989	5.7	8	8,000	50,000	35	700	9,557,137
Mascara	18.08.1994	5.9	7	2,806	10,000	172	295	204,711,039
Ain-Temouchent	22.12.1999	5.6	7	2,708	25,000	26	174	160,534,203
Beni-Ouutilane	10.11.2000	5.7	7	3,000	/	2	50	33,033,728
Boumerdes	21.05.2003	6.8	10	30,000	18,2000	2,278	11,450	6,440,679,348
Laalam	20.03.2006	5.2	7	40	/	4	4,996,638	/
Mihoub	28.05.2016	5.3	-	62	500	/	29	26,779,482.84

I : intensité M : Magnitude D4+D5 : effondrement partiel ou total

Tableau 3-1. Liste des séismes en Algérie entre 1900 et 2016 Sources (Benouar, 1994 ; NGDC, 2016 ; Ayadi et al ,2012 ; 2015)

Plus récemment, des révisions de l'historique sismique du nord algérien a été faite par (Yelles Chauche et al, 2002 ; Harbi et al. 2004, 2006,2010).

Ces catalogues montrent que la sismicité est concentrée dans la région nord du pays c'est à dire dans la bande comprise entre la région littorale et la région de la flexure sud atlasique, et des frontières marocaines jusqu'aux frontières tunisiennes. Figure. 3-2

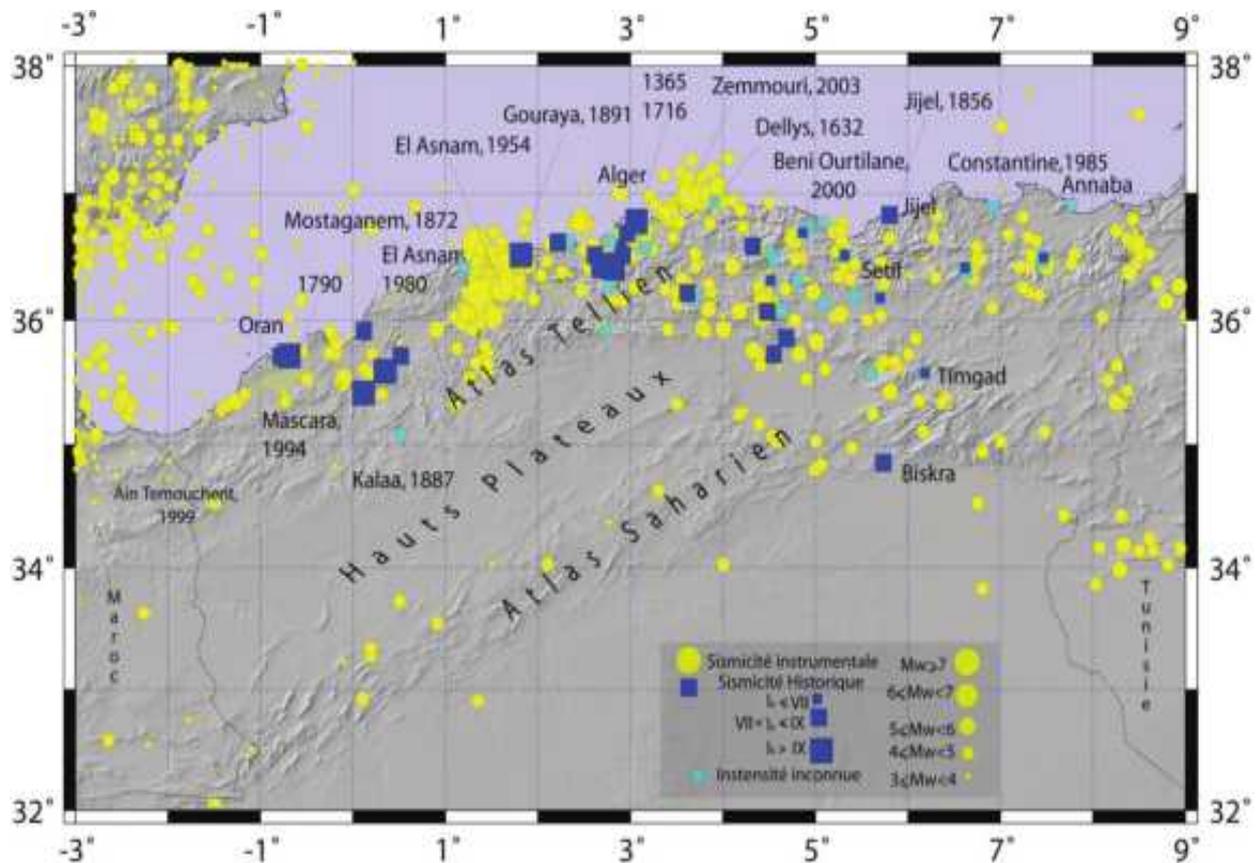


Figure 3-1 : Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) avec la sismicité instrumentale du Nord de l'Algérie de 1900 à 2005 (ISC, 1994)

Depuis, d'autres études plus détaillées sur l'aléa sismique ont été réalisées à Chlef (CTC, 1985) à Alger, à Mascara en 1996 (CGS, 2013), et à Constantine (CGS, 2004). En outre, plusieurs autres études ont été réalisées par des chercheurs algériens et étrangers (Benouar, 1996 ; Heddar et al, 2012 ; Hamdache et al, 2012).

En 2005, une mise à jour de la carte de l'aléa sismique pour la région Nord réalisé par (Pelaez et al, 2005), a montré les probabilités de dépassement de 10% de l'accélération du sol pour une période de 50 ans, qui correspond à une période de retour de 475 années. Pour cela, des études de micro zonage ont été lancées en 2005 par le centre de génie parasismique (CGS), dans les villes d'Oran, Alger et Constantine dans le but d'établir un plan de développement de ces villes.

3.2.2. Historique des séismes au Constantine :

La région de Constantine appartient au Nord de l'Algérie, qui est connu historiquement comme une zone sismique très active. L'histoire nous rappelle que cette ville a subi plusieurs séismes au fil du temps, (Tableau 3-2). La profondeur des foyers des séismes variait entre 33 et 55 km.

Date	I	M	Localisation	Dommages
1758	/	/	/	pertes en vie humaines et destruction des biens
27-04-1838	/	/	/	/
10-10-1856	III	2.8	36.56°N, 6.17°E	/
11-01 -1860	IV	3.2	36.36°N, 6.62°E	/
17 -10-1865	III	2.8	36.36°N, 6.62°E	/
07-04- 1871	IV	3.2	36.36°N, 6.62°E	/
19-09- 1894	V	3.7	36.40°N, 6.60°E	Chute de plusieurs meubles
04 -08-1908	VIII	5.2	36.40°N, 6.60°E	Destructions des vieilles bâtisses ; 5 morts et 12 personnes blessées
06-08- 1947	VIII-IX	5.3	36.30°N, 6.67°E	3 morts et beaucoup de blessés ; endommagement d'un nombre important de structure
20-12-1983	V	4.7	36.45°N, 6.60°E	/
27-10-1985	VIII - IX	6	36.46°N, 6.87°E	5 morts et 300 blessés ; Plusieurs vieilles constructions endommagées
17-10-1993	III - IV	4	36.39°N, 6.49°E	/
03-06-2000	III - IV	4.1	36.56°N, 6.57°E	/
26-04-2006	-	4.2	36.35°N, 6.43°E	/
30-11-2007	-	3.6	36.34°N,6.49°E	ressentie par les populations d'Ain karma

Tableau 3-2. Liste des séismes survenus à Constantine et ses environs (de 1758 à 2007).

Les trois événements sismiques historiques les plus significatifs qui se sont produits à Constantine en 1908, 1947 et 1985, font apparaître une période de retour (intervalle de récurrence) de séismes d'environ 39 années. (Bounif et al, 1987).

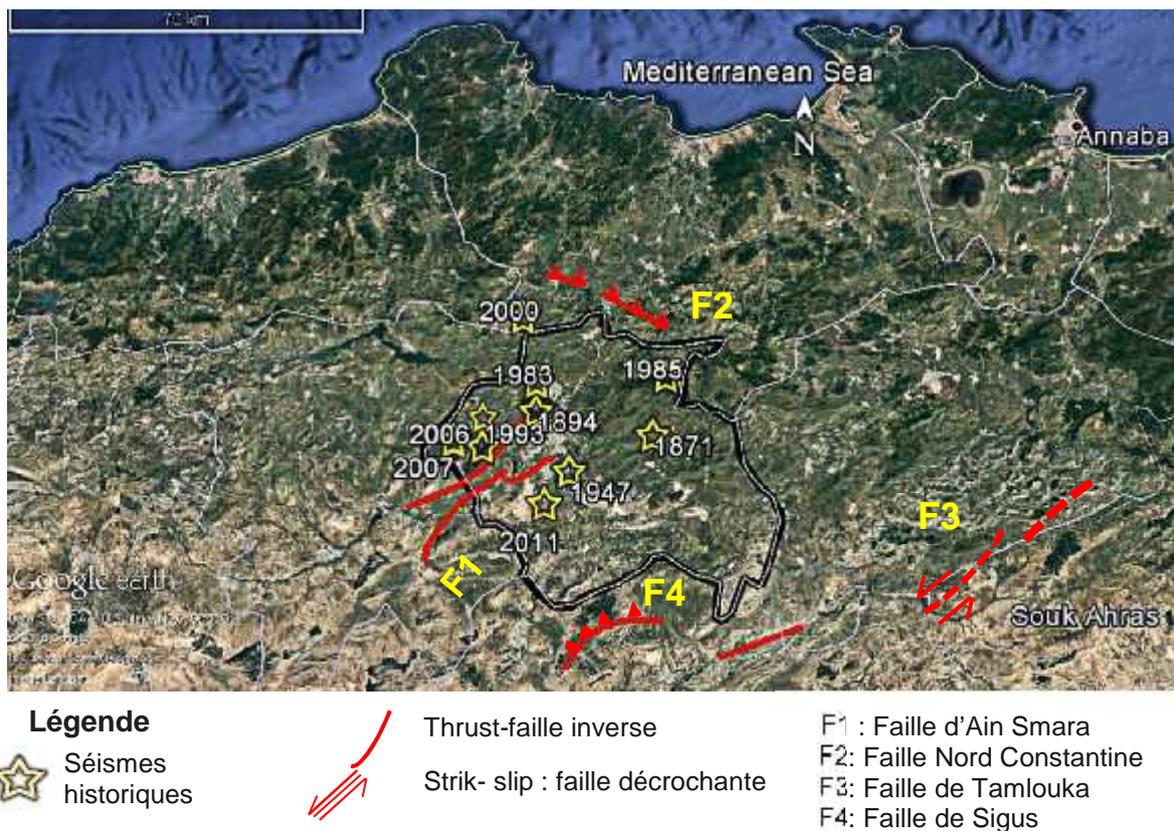


Figure.3-2 : Image satellite (Google Earth) sur la Wilaya de Constantine, avec la localisation des failles actives et les séismes historiques. Sources failles actives (Vila.1977, Harbi .1999), la location des séismes entre 1871 et 2011 (YELLES et al. 2002, Harbi et al. 2003).

Cette carte représente la distribution des séismes de la période entre 1871 et 2011, les épicentres (macrosismiques, et instrumentaux) et les failles sismiques actives dans la région.

Il est clair que les séismes se produisent en Nord Algérien bien correspondre à la localisation des structures géologiques actives. Puisque les séismes destructeurs se produisent sur des failles actives qui peuvent être identifiées en surface.

Les premières constatations, concernant l'activité sismique de la région de Constantine, nous amènent aux conclusions suivantes :

- L'étude de ces séismes a permis de préciser leurs caractéristiques. C'est ainsi, que nous pouvons affirmer que les séismes qui se produisent dans cette région sont en général faibles à modérés atteignant parfois la magnitude 6.0 sur l'échelle de Richter mais avec une activité sismique importante. Le siècle dernier Constantine et ses environs proches ont connus 4 forts séismes.

- L'existence de trois failles actives ou potentiellement actives : la faille de Temlouka, la faille de Sigus et la faille d'Ain Smara

Cette dernière, est la principale source des séismes qui ont touché l'agglomération de Constantine et ces environs particulièrement les trois séismes les plus destructeurs de 1908, de 1947 et celui de 1985. La faille d'Ain Smara, constitue la première menace en terme sismique pour la ville de Constantine et ses environs. (Bounif et al. 1987).

La cuvette dans laquelle se situe la ville d'Ain Smara, est comprise entre deux montagnes, le djebel chettaba à l'Ouest et djebel Felten à l'Est, les deux constitués de calcaires massifs et dolomites du Crétacé moyen et supérieur (voir Figure. 3-4). Les deux montagnes sus-citées sont traversées par une faille de quelques kilomètres de direction NE-SW. (Bouhaded et al ,2003).



Figure .3-3 : Photos des Trace en surface (Djebel Felten et Chettaba - Faille Ain Smara)

3.2.2.1. Le séisme de Constantine du 27 octobre 1985 :

Le 27 octobre 1985 à 16 h 34 min 56 s (UTC), la ville de Constantine a été secouée par un séisme de magnitude ($M_s = 6.0$), dont l'intensité maximale a été évaluée à VIII (échelle MSK) se produisant à une profondeur de 10 Km dans la région entre El Aria et Beni Yakoub sur un rayon de 8 km. (Voir Figure. 3-3).

Ce séisme est considéré comme le séisme le plus important dans l'Est Algérien, depuis le début de la séismologie instrumentale. (Ousadou et al, 2013). Où le choc

principal a été enregistré par 474 stations sismologiques internationales comme il a été enregistré par le centre sismologique international (ISC). Le choc a été ressenti à 120 km de rayon à l'Est d'El Kala, à l'Ouest de Sétif, au Sud de Batna et au Nord de Skikda (Bouhaded et al ,2003). Ce séisme a été engendré par l'activité de la faille d'Ain Smara, avec 1500 répliques qui ont été enregistrées après trois semaines (Deschamp et al, 1991 ; Bounif et Dorbath, 1998).

Les plus importants dégâts ont été enregistrés dans les régions d'El-Aria, Beni Yakoub, et Kef-Tassenga aux nord du village d'EL Khroub avec 10 morts et plus de 300 blessées essentiellement dans les régions d'El Aria, dans la région de Ain Abid à 14Km au Sud Est d'El Aria, plusieurs maisons ont été sérieusement touchées des fissures. (Benouar, 1994)

À Souika, au centre-ville de Constantine, la majorité des constructions ont été sérieusement touchées, surtout les vieilles constructions en particulier. Des dégâts de moindre importance ont été observés entre Ain Fakroun, Skikda, Chelghoum Laid et Guelma.

Région	Intensité (MSK)
El Aria- Beni yakoub	VIII
Constantine, El Khroub, El Meridj	VII
Ibn Ziad ,Hamma Bouziane,Ain Elabid, El Harrouch ,Azzaba	VI
Skikda ,Mila,Chelghoum Laid,Ain Fakroun ,Guelma	V
Chekfa, Djamila, El Eulma, Oum el Bouaghi, Sedrata	IV
Souk Ahras, Batna, El Taraf, Sétif, Jijel	III

Tableau.3-3. Distribution de l'intensité maximale sur la région de Constantine lors du séisme de 1985. (Bouhaded et al ,2003).

Sur le plan géologique les traces de surface n'ont été observées que sur quelques Kilomètres (4.5 Km), la distribution des répliques permet l'évaluation plus précise de la partie active de la faille (36 Km) qui peut être associée à la partie Nord de la faille d'Ain Smara et qui peut être divisée en trois segments de même longueur.

3.3. Contexte géologique de la région de Constantine :

La ville de Constantine dont l'altitude varie entre 500 et 800 m est située dans les hautes plaines orientales de l'Atlas tellien. A connu une histoire géologique extrêmement complexe.

Cette complexité, et les mouvements gravitaires dans cette région se posent depuis quelques temps (Glissements terrain : Bellevue, Saint Jean (Belouizdad), Cité Ciloc ...etc), et commence à devenir des freins au développement économique et urbain espéré. (Benabbas, et al 2008).

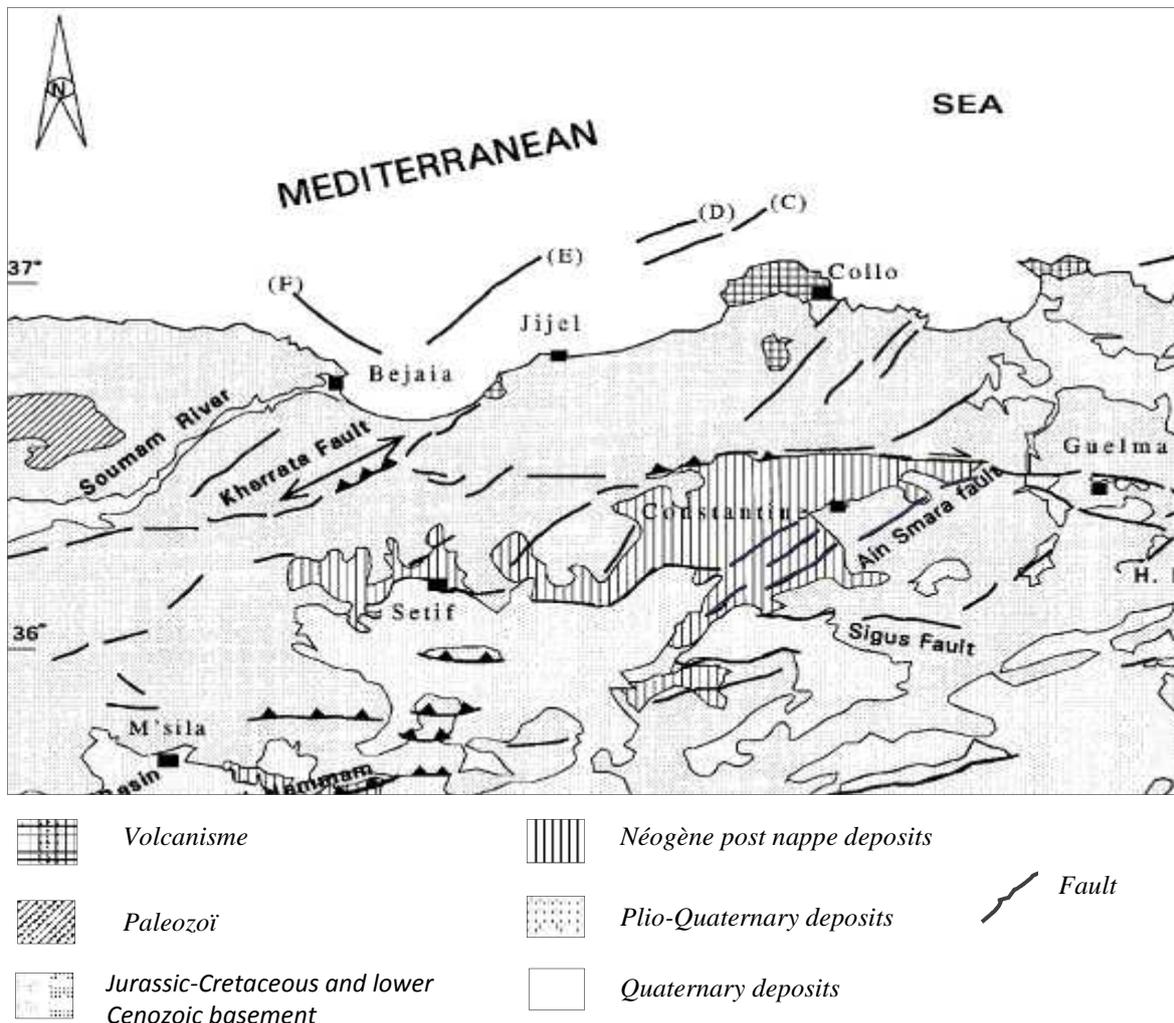


Figure.3-4 : Carte tectonique de l'Atlas orientale de Tellien de l'Algérie (Meghraoui, 1988)

Le site de l'agglomération constantinoise comprend globalement une masse rocheuse, les nappes de charriage et les formations néogènes.

D'après les sondages carottés, effectués dans ce site par le (L.T.P/Est,1989), les terrains de la ville de Constantine sont classés selon l'Unités topographies : Plateaux

: calcaire, conglomérats, sable, argile, travertin et Collines : formations alternées ou à dominance marne, argile, sable, flysch, calcaire-sableux.

Quartiers	Formations
Casbah, Larbi Ben Mhidi, Suika	Calcaire massif
Belle vue, Ben chergui, Améziane	Conglomérats
Bentellis, Roumanie	Marnes telliennes schisteuses à boules jaunes
Belouizdad, Aouinet El Foul	Remblais
Boussouf, Les Palmiers (Mazia)	Marnes gypseuses

Tableau 3-3. Les principales formations qui constituent le substratum de quelques quartiers de Constantine.

Donc, les conglomérats et les argiles grises à verdâtres du Miocène, sont les formations les plus répandue dans la partie Ouest de la ville, la zone la plus affectée par les glissements de terrain.

3.4. Lecture historique de la ville de Constantine :

Pour comprendre un présent très complexe, il nous faut impérativement revenir au passé pour voir comment l'histoire a façonné le système urbain et architectural de Constantine (MOSBAH,2008). Nous allons donner une brève chronologie, pour faire ressortir les événements historiques qui furent à l'origine de l'évolution urbaine de la ville de Constantine. Dans ce qui suit est retracé les grandes époques ayant caractérisées l'évolution de la ville.

Historiquement, Constantine l'une des plus anciennes cités du monde (2 500 ans), est une ville importante dans l'histoire méditerranéenne. Anciennement Cirta, capitale de la Numidie (300 av. J.-C). Depuis 313 elle fut prise par les romains, elle a été rebâtie par l'empereur romain Constantin qui lui a donné son nom. L'arrivée de la civilisation musulmane au VII^e siècle donna à la ville une autre dimension, ou elle deviendra la capitale du beylik de Constantine au XVI^e siècle. Au moment de la prise de la ville par les français en 1837, la ville comptait environ 1700 maisons.

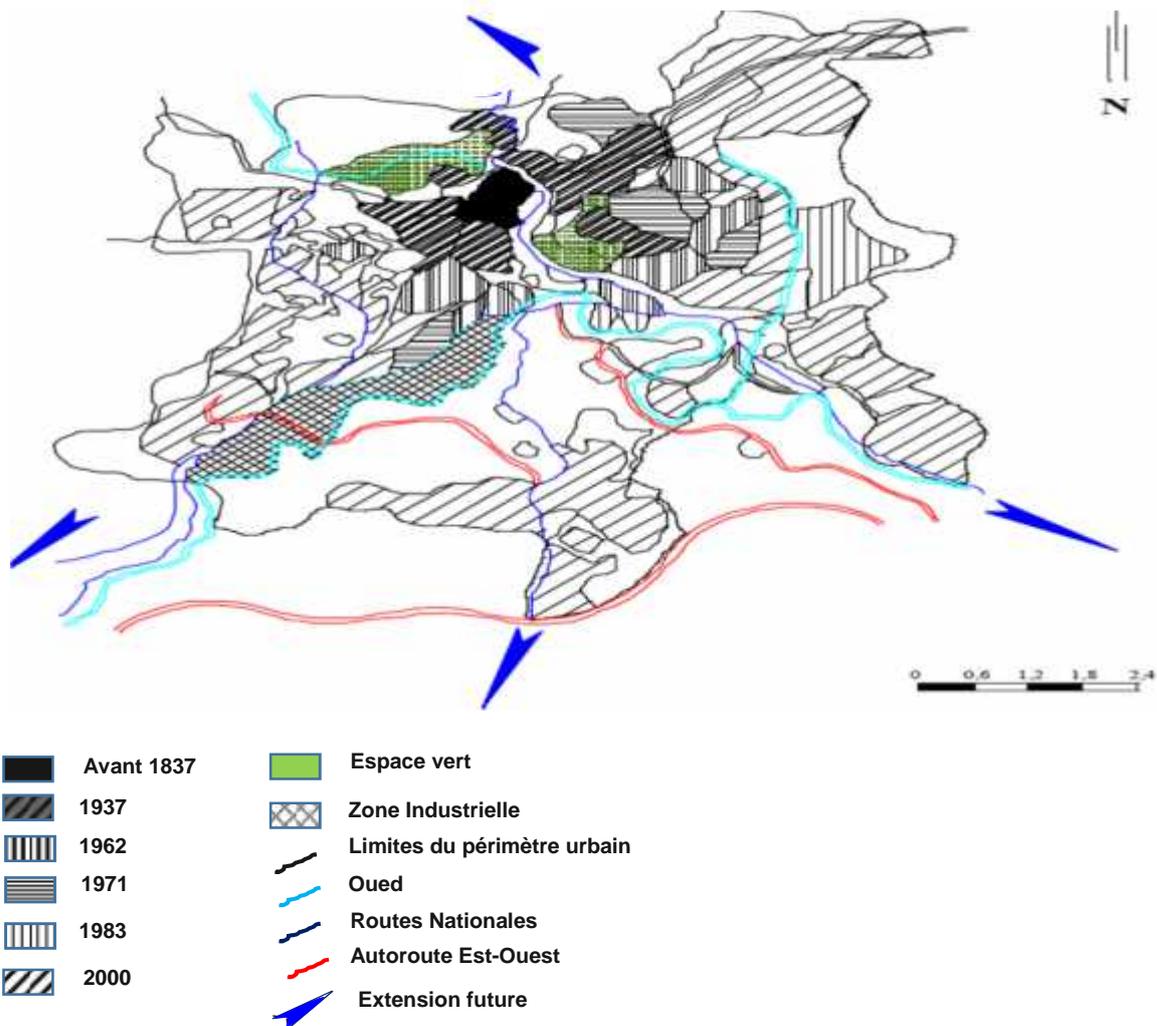


Figure. 3-5 : La ville de Constantine les étapes de croissance urbaine 1837-2000 Source : (URBACO, 2001).

La dernière est la civilisation occidentale représentée par la colonisation française et dont l'impact est toujours, très marquant ou la ville demeura capitale de l'Est algérien, durant la colonisation française (1837-1962). Par exemple en 1850, la ville de Constantine comptait près de 5000 habitants, ce nombre va passer en 1860 à 10 000 habitants.

En cette période, plusieurs monuments de la ville sont inaugurés comme : le théâtre en 1883, la mairie en 1902, le pont Sidi Rached et le pont suspendu (1912), l'hôtel des postes (actuellement la grande poste) (1917), le Palais de justice (1919)...etc. Après l'indépendance du pays, Constantine conserva son statut de capitale de l'Est algérien. Au vu de sa situation géographique privilégiée, son poids administratif, économique, scientifique et culturel.

Chaque portion d'espace correspond à un type d'habitat comme :

- Habitat traditionnel dispersé dans l'espace construits selon le mode d'habitat islamique (Souika, casbah, Rahbat Essouf, Rassif).
- Habitat régulier d'origine coloniale sur le rocher et à proximité du Rocher (Coudiat, Saint- Jean (belouizdad), Belle vue, Rue Aouati Mostefa, Rue Didouche Morad (Rue de France), les grands monuments de centre-ville).
- Les ensembles des bâtiments de type d'habitats collectifs, construits après l'indépendance sur les sites d'extension relativement récents comme : la cité du 20 Août (réalisé dans le cadre du 1er plan quadriennal 1970-1974), la cité du 5 Juillet et la cité Boudjenana (820 logements réalisés entre 1975-1986) et la cité Boussouf créée en 1982 (4483 logements dont 3536 collectifs). Il s'agit d'une croissance planifiée sous forme de programmes de logements en zones d'habitat urbain nouvelles « Z.H.U.N » et lotissements.

D'un côté, les statistiques publiées par l'office national des statistiques évaluent le taux d'occupation des logements dans la commune de Constantine à 5.7 personnes/logement en 2008. La succession des diverses civilisations sur la vieille ville de Constantine a donné naissance, sur le plan urbain et architectural, à quatre typologies (PPSMVSS, 2011).

3.5. 1. Un tissu traditionnel :

Cette typologie concentrée principalement dans la partie basse du rocher. Une bonne partie des constructions traditionnelles est construite selon des techniques traditionnelles en pierre, en pierre et brique ou en pierre, brique et toub (parpaing en Arabe), elle est regroupée en îlots dont les dimensions sont conditionnées par les contraintes du relief du site. Sur Constantine on distingue deux types de maison traditionnelle :

- Maison à patio ou à cour : une maison qui occupe un grand parcellaire, riche en éléments décoratifs. Maison de 2 à 3 étages .
- Maison El Ali : c'est une maison individuelle a deux étages généralement ,elle est occupée au rez-de-chaussée par des commerces ou d'autres équipements .

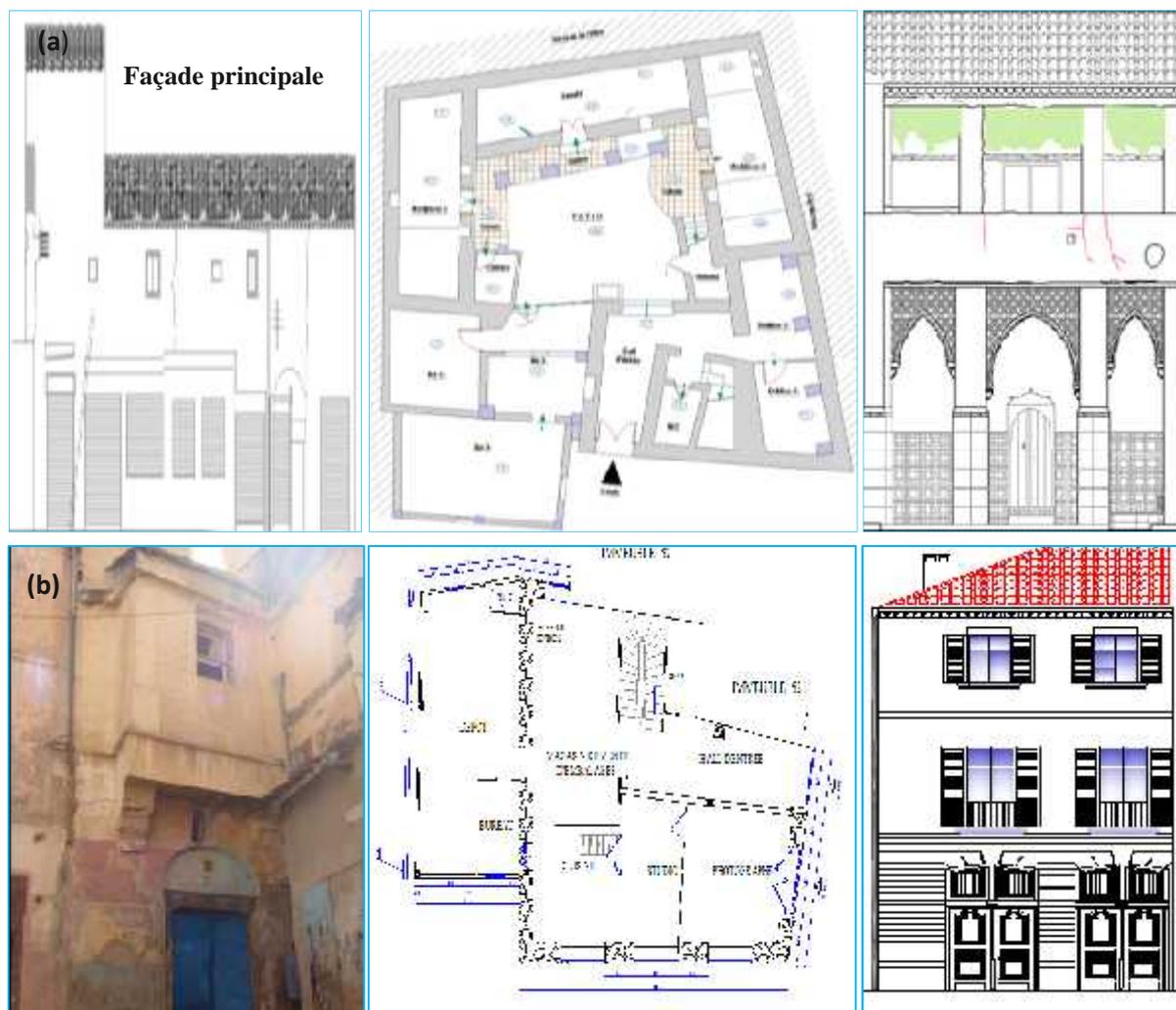


Figure. 3-7 : bâti traditionnel à Constantine :(a) Types de maison à patio ;(b) Types de maison El Ali PPSMVSS, 2011

3.5. 2. Le bâti colonial :

L'architecture coloniale connu pour sa régularité avec des formes carrées ou trapézoïdale concentré principalement le long des percées assurant un alignement parfait sur la voie. Ils sont généralement conçus avec des hauteurs moyennes (3 à 5 planchers), et ont un à trois appartements par paliers.

Elles sont construites en maçonneries en pierre non chaînée et avec des planchers en voûtains de briques et poutrelles métalliques (IPN). Les façades dans le bâti coloniale caractérisées par les grandes ouvertures donnant directement sur la rue comme les grandes portes, les grandes fenêtres, et les balcons,...etc. (PPSMVSS, 2011).



Figure. 3-8 : Exemple de l'architecture coloniale existante à Constantine « Ilot colonial dans la partie haute du rocher » (BET Mezaache, 2010).

3.5. 3. Le bâti mixte :

Ce tissu hybride est généralement inscrit dans des ilots qui regroupent aussi bien la typologie traditionnelle que coloniale, il est de même procédés de constructions et les mêmes matériaux que ceux utilisés dans le bâti colonial. À l'intérieur les planchers du corps qui donne sur la rue alignée sont des planchers à voutains.



Figure. 3-9 : Exemple de l'architecture mixte existante à Constantine (BET.Oudaddi, 2010).

3.5. 4. Le bâti Moderne :

Ces constructions sont réalisées pour la plus part des cas avec des murs porteurs en béton armé. Le tableau ci-dessous donne la situation géographique de chaque cité.

Les ZHUN	Cité Bousouf	Cité 5 juillet	Cité 20 Aout 1955
Situation/la ville de Constantine	Sud-ouest	Ouest	Ouest
Date de création	1982	1975	1974-1975
Nombre de logements	4483	820	1038

Tableau 3-5 : Les zones d'habitat urbain nouvelles de la ville de Constantine.

3.6. Étapes de l'inventaire sismique :

Dans l'étude de la vulnérabilité sismique à grande échelle il est impératif de considérer une approche globale et ne pas analyser séparément chaque bâtiment. C'est pour cela qu'il est nécessaire de faire un inventaire, simple et statistique du comportement des bâtiments. L'organigramme suivant résume les outils de recherche utilisés et les étapes effectuées pour réaliser cet inventaire. Fig. 3-11.

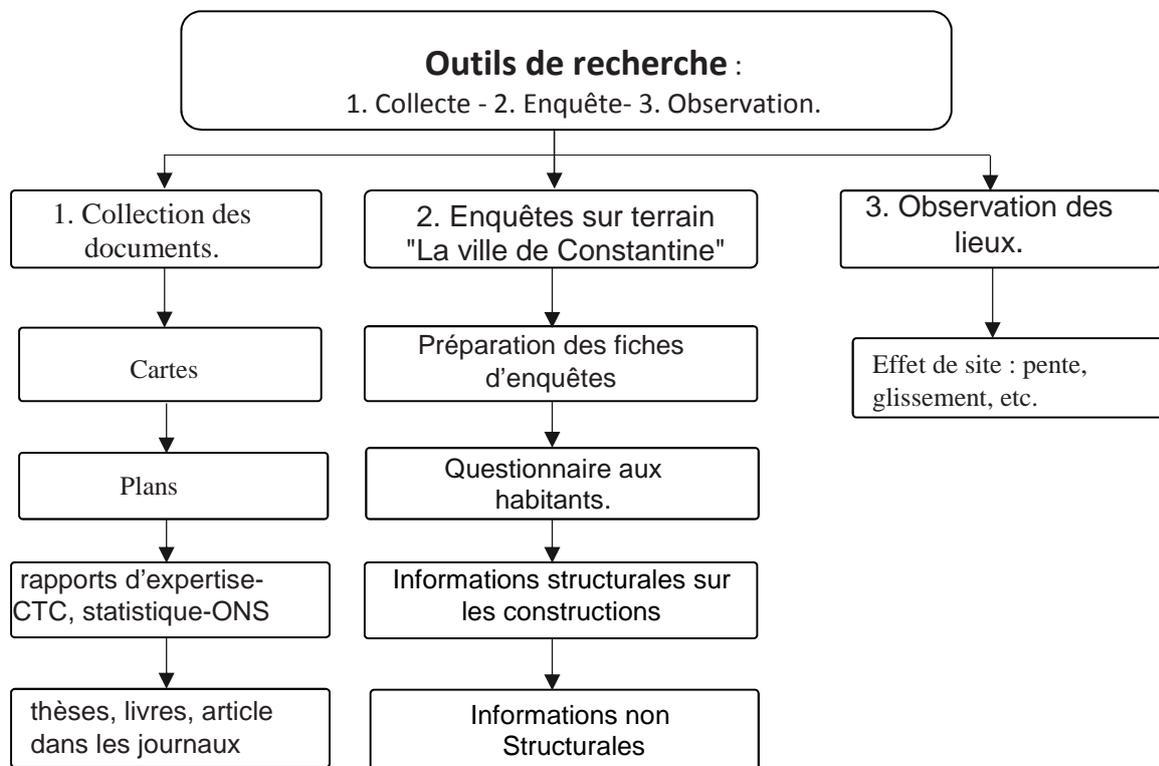


Figure. 3-10 : planning des différentes étapes suivies pour réaliser l'inventaire sismique dans la ville de Constantine.

3.6.1. Réalisation d'un inventaire :

Pour évaluer correctement le risque sismique à Constantine, on doit procéder à des enquêtes sur le terrain de manière à définir les types de construction en se basant sur la typologie définie dans l'échelle EMS 98 (Grünthal, 2001). D'autres caractéristiques structurelles et non structurelles sont considérées par ces enquêtes comme l'état de conservation du cadre bâti ancien.

Le travail de terrain réalisé, qui était d'ailleurs la tâche qui a pris le plus de temps dans cette étude et qui s'est étalée sur trois ans, a permis de préciser les caractéristiques des différents types de bâtiments situés dans la zone d'étude.

Le maximum d'information sur les caractéristiques structurales et non structurelles de chaque construction suivant la méthodologie européenne Risk-UE LM1 est recherché car la méthode traite les informations bâtiment par bâtiment. On a suivi un ordre logique pour faire les enquêtes nécessaires à cette étude, en passant de la « région (zone) » au « quartier » puis à la « rue ».

3.6.2. Élaboration de la fiche d'enquête :

Dans l'étape de l'inventaire sismique, un effort considérable a été consacré à la collection des informations, les statistiques, et les cartes pour la création d'une banque de données.

Des dizaines de sorties sur le terrain ont été effectuées nécessitant un travail de préparation très rigoureux. Dans ce cadre, des fiches d'enquêtes simplifiées ont été spécialement créées pour le relevé des caractéristiques structurelles et non structurelles de différentes constructions.

L'élaboration d'une bonne fiche d'enquête permet non seulement l'organisation des informations collectées, qui peuvent avoir une influence sur la réponse sismique des bâtiments, mais facilite aussi le calcul de l'indice de vulnérabilité sismique. La fiche d'enquête regroupe l'ensemble des paramètres de nature structurale ou non structurale, elle comprend les indications principales suivantes :

- a) données générales (adresse, âge, date,...etc.),
- b) Caractéristiques géométriques,
- c) Conditions générales des constructions (état d'entretien, réhabilitation ou renforcement, conditions du sol),

3.6.3. Numérisation des données :

L'étude urbanistique et architecturale détaillée du site de l'étude été suivie d'un travail de relevé important qui consiste en la numérisation des données obtenues, grâce aux fiches d'enquêtes, et leur insertion dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Ce système est très performant pour l'organisation et la gestion des données de différentes nature, mais aussi un outil essentiel pour la gestion urbanistique et la gestion des affectations à l'usage des sols coordonnée avec l'interrogation des informations disponibles. Ce système permet aussi une meilleure prise en charge des informations, mais encore une évaluation presque en temps réel, et permet la rectification des données et leurs mises à jour. Il devient donc un support indispensable et déterminant dans les interventions de la réhabilitation urbaine d'une région géographique précise surtout dans notre cas où la vieille ville subit des changements et des dégradations du bâti en sont continus. (Figure.3-13)



Figure. 3-12 : Photos sur la l'état dégradé des constructions à Constantine

3.6.4. Sources d'information de l'inventaire :

Cette partie du travail nécessite une préparation des bases de données, adaptée à une bonne estimation de la vulnérabilité sismique des constructions dans la ville de Constantine, et exigerait des efforts considérables en termes d'utilisation, d'interprétation et recouplement entre les différentes sources de données.

Dans ce domaine, une source différente peut constituer un facteur négatif sur la qualité des données. La plupart du temps, les informations sur le vieux bâtis sont limitées ou se limitent à des descriptions générales telles : nombres d'étage, la géométrie, l'année de construction, la forme de toiture...etc.

Afin de définir les classes de vulnérabilité de bâtiments de la zone d'étude avec un certain degré de fiabilité, il faut faire très attention à la qualité des informations et des statistiques sur les constructions, en choisissant les sources les plus fiables et importantes.

Pour cela, on se premièrement sur notre propre inspection avec de nombreuses visites sur le site. Durant trois ans, plus de 2252 constructions dans les trois zones de la ville de Constantine ont été enquêtés :

Zone 1 : vieille ville(Rocher).

zone2 : Coudiat et Belle vue.

Zone 3 : la cité 20 Août 1955, la cité Ben Boulaid et la cité Fadila saadene)

En Deuxième lieu, on utilise les rapports officiels délivrés par les organismes d'expertises et de contrôle soit locaux ou nationaux : CTC de constantine, CGS, Direction de l'urbanisme et de la construction ,et L'URBACO .En plus de cela, plusieurs directions ont été contacté : la Direction de l'urbanisme et de la construction (DUC) ,et la direction de l'éducation nationale, afin d'obtenir les statistiques officielles et des fois pour obtenir les plans d'ensemble des bâtiments situés dans la zone d'étude.

Un nombre important de sources complémentaires, où plusieurs documents ont été consultées et comparées (thèse, rapports d'expertise, livres, article dans les journaux, sites internet,...etc).

D'autres plans et informations sont obtenu après plusieurs contacts avec les anciens occupants des bâtiments et/ou maisons.

Les principales sources sont décrites ci-dessous :

- Pour la création de la base de données, on s'est basé sur le rapport d'expertise réalisé, en 2009, par l'organisme de contrôle technique des constructions (CTC) pour le compte de la Direction de l'Urbanisme et de la Construction (DUC). L'avantage de cette expertise du CTC est d'avoir obtenu les informations qui ne peuvent pas être accessibles par les enquêtes visuelles de l'extérieur tel que l'état de conservation, présence d'interventions de confortement, la toiture, types de fondation...etc. Certaines informations nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité sismique manquantes dans la base de données CTC telles que "planchers décalés de bâtiments mitoyens" ; "hauteur différente d'un bâtiment par rapport à son mitoyen" ; "niveau transparent" ; et "joint parasismique " ont été facilement relevés par notre enquête.
- Un autre rapport a été réalisé, en 2004, par des experts italiens (Master plan) sur la médina de Constantine, dans lequel six zones ont fait l'objet d'expertise : El djézarines, Mellah Slimane, Rahbat Essouf et le palais du Bey (**Master Plan, 2003**). Ce rapport compte 24653 habitants, et 1425 constructions sur 47 hectares. 25% de l'ensemble en bon état (356), 57% en mauvais état, (812) et 18% en ruines (257). Autrement dit plus des deux tiers du cadre bâti du vieux rocher nécessite des opérations de restauration, de réhabilitation et de rénovation.
- D'autres rapports ont été consultés comme l'étude de glissement réalisé en 2004 par une entreprise française, spécialisée dans l'étude des sols et sous-sols « SIMECSOL » (**Bouhadedet al ,2003**), qui a fourni un rapport d'expertise avec des explications bien définies sur l'aléa sismique, et l'expertise réalisé par un bureau d'étude "BET Jennie KRIBECHE" dans le cadre d'un Plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés (PPSMVSS). Cette étude édicte les mesures particulières de protection, notamment celle relative aux biens culturels immobiliers situés dans le secteur sauvegardé.

- La direction de l'éducation nationale de Constantine a été visitée aussi à plusieurs reprises pour recueillir les informations statistiques concernant les écoles de la ville Constantine comme : le nombre d'élèves, le nombre d'enseignants et toutes les interventions et / ou modifications qui ont été éventuellement apportées.
- Pendant la réalisation de ce travail plusieurs sites qui traitent de l'histoire et la vie actuelle de la ville de constantine ont été consultés. Parmi ces sites web celui de: constantine-hier-aujourd'hui un site web créé pas les anciens habitants de constantine (les peids noirs), qui regorge d'informations et divers témoignages.

3.7. Description et identification des systèmes constructifs :

A partir d'une analyse de l'évolution urbaine de la ville de Constantine, trois période peuvent être identifiées, dans l'ordre chronologique, sont :

- La première période constituée de la ville historique « Medina construite avant 1837 » avec un tissu urbain islamique irrégulier sous forme des îlots, avec des rues étroite.
- La deuxième période coloniale avec des concepts occidentaux entre 1837-1962.
- La troisième période postcoloniale avec un développement des zones d'habitat planifié (cité ZHUN après 1962), comme celui de la cité du 20 août 1955 et la cité 5 juillet, la cité Fadila saadane et la cité Benboulaid.

Pour les besoins de cette étude, les quartiers de la cité 20 août 1955, de la cité Fadila saadane, de la cité de Belle vue, la cité du Ciloc, la cité du Coudiat, et Belouizdad (Saint-Jean) en plus d'une partie de la vieille ville seront considérés. Sur l'ensemble de ces quartiers, on peut identifier deux grandes familles selon la nature des matériaux de constructions utilisés : la maçonnerie et le béton armé.

3.7.1. Définition des typologies du bâti existant :

Dans l'analyse de vulnérabilité à l'échelle d'une ville, la première étape est de répartir les constructions dans une typologie pertinente, selon l'étendue de cette zone et

donc l'homogénéité du bâti. En général, les éléments qui permettent de différencier entre les différentes typologies constructives sont les matériaux de constructions, les systèmes porteurs, le type de planchers et l'époque de construction. À l'échelle de la ville de Constantine, on peut définir cinq typologies constructives :

3.7.1.1. **Type 1** : Tissu urbain traditionnel : El Medina :

Constructions en maçonnerie construits avec des murs porteurs en brique de terre (toub) liée par un mortier de chaux, son épaisseur variant de 30 à 70 cm à la base et diminue d'épaisseur au fur et à mesure qu'il monte en hauteur.

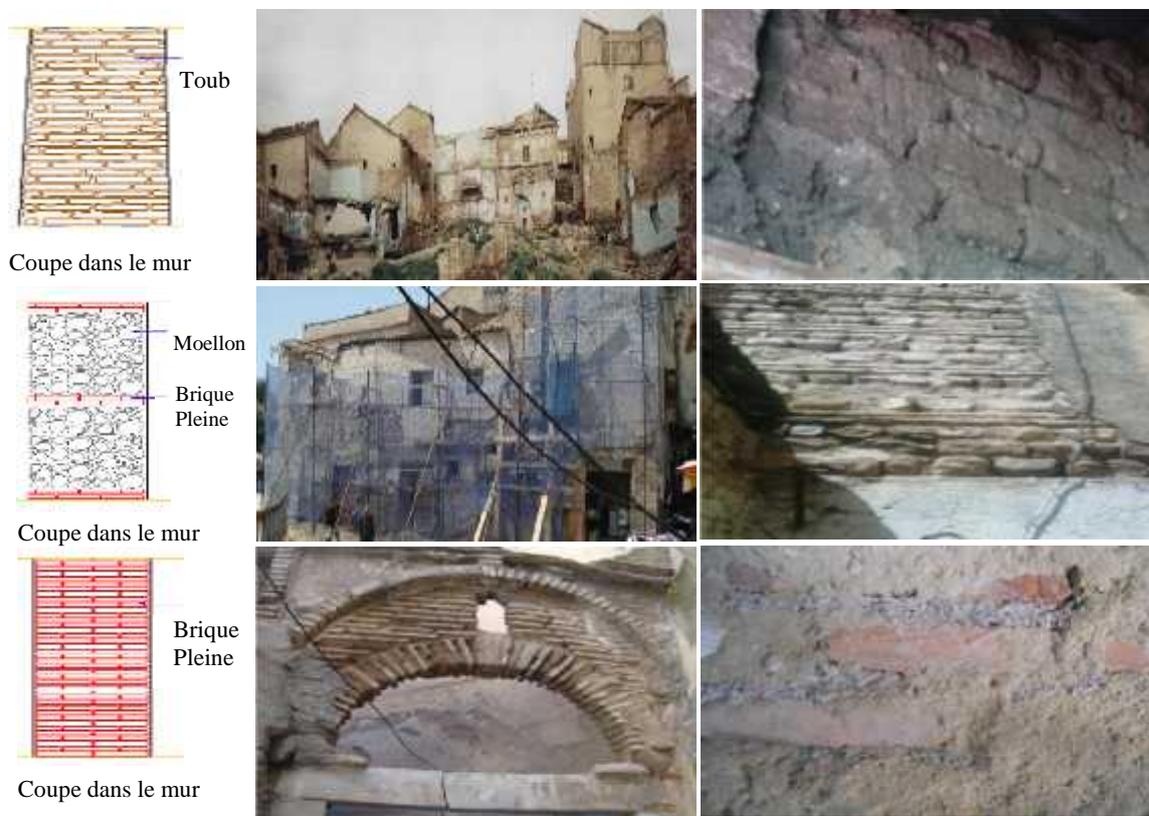


Figure.3-13 : Typologie constructive des murs porteurs dans le tissu traditionnel (PPSMVSS, 2011).

Les dimensions de la brique de terre sont : 5-10-20cm jusqu'à 25cm. PPSMVSS. Les structures horizontales de la maison traditionnelle constantinoise sont généralement constituées de planchers en bois de cyprès, très répandu dans la région. On peut observer cette typologie à la partie basse du rocher. (Figure 3-18).

3.7.1.2. Type 2 : Tissu urbain colonial :

Ce sont des bâtiments avec des murs porteurs en pierre construits à l'époque coloniale avec des épaisseurs variant verticalement de 50 cm à 25 cm.

Les matériaux utilisés sont des pierres de roche calcaire et tufière, et éléments de brique car présents en grande quantité dans les environs de la ville , tout comme les matériaux de récupération constitués par des blocs carrés en pierre calcaire de grandes dimensions (50x65x60 cm environ) d'origine romaine, disposés à la base du mur pour former les pierre d'angle au niveau du rez-de-chaussée. (PPSMVSS, 2011).



Figure. 3-14 : Typologie constructive en en maçonnerie avec murs porteurs en pierre.

3.7.1.3. Type 3 : tissu urbain colonial

Constructions en maçonnerie avec des systèmes porteur est composé de murs en briques pleines liées avec un mortier de chaux parfois de terre. Les planchers sont en dalle pleine et les terrasses sont accessibles, le nombre de niveaux varie entre 4 et 5. On peut observer cette typologie au niveau de Boulevard Rabah Bitat. Figure. 3-15



Figure. 3-15 : Photos Constructions en maçonnerie avec murs en briques pleines.

3.7.1.4. Type 4 : Tissu urbain colonial

Constructions mixte, des portiques en béton armé avec des murs porteurs en pierre de taille. Ce sont des bâtiments administratifs construits entre 1921 et 1962 qu'on retrouve sur la zone El-Coudiat. Trois types de planchers sont identifiés, des planchers en voûtains, en corps creux et en béton armé.



Figure. 3-16: Photos Constructions mixte sur le site Coudiat-Aty

3.7.1.5. Type 5 : habitats collectif

L'apparition du logement de grande masse à Constantine (habitats collectif) exige l'utilisation du béton armé comme matériau de construction soit en portique, soit en mur porteur préfabriqué. Ils sont composés de bâtiments dont la hauteur varie entre 5 et 13 niveaux. On distingue deux catégories, des bâtiments composés d'un seul bloc (cité du 20 aout 1955, cité Ben Boulaid) et des bâtiments composés de plusieurs blocs (Ciloc). Ces bâtiments sont réalisés en murs en béton armé parfois en poteaux poutres ; ils sont implantés à la périphérie du centre-ville.

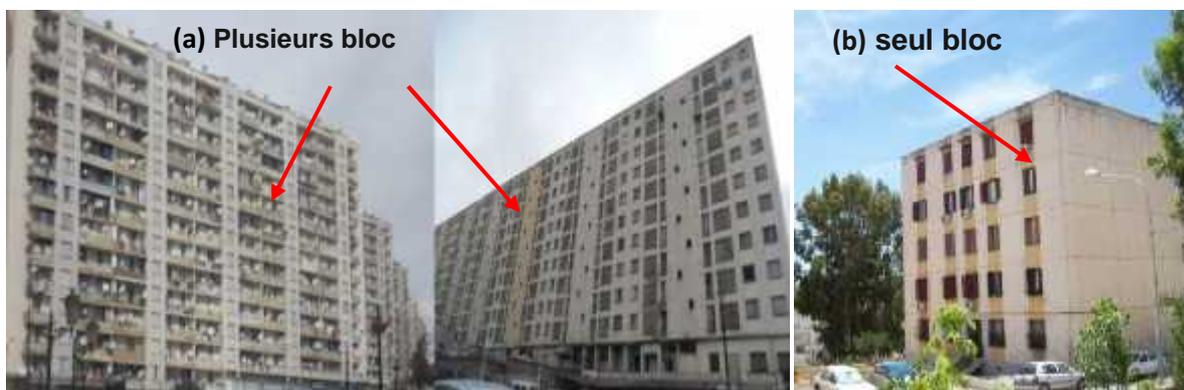


Figure. 3-17 : Photos. Constructions en béton armé : (a) plusieurs bloc (Ciloc), (b) un seul bloc (Cité du 20 août)

3-7-2. Les planchers :

3.7.2.1. Planchers en Bois :

Se trouvant dans les constructions datant d'avant 1837 « traditionnelle », avec de bois en cyprès et dans certaines constructions coloniales datant entre 1837 et 1920. Ils sont composés des poutres principales, et secondaires en bois sur lesquelles se pose directement la sous couche constituée de nattes de roseaux liées entre elles par des cordes dans le cas des bâtis traditionnelles. et puis un lit de matériaux peu cohérent puis le pavage. (PPSMVSS, 2011)

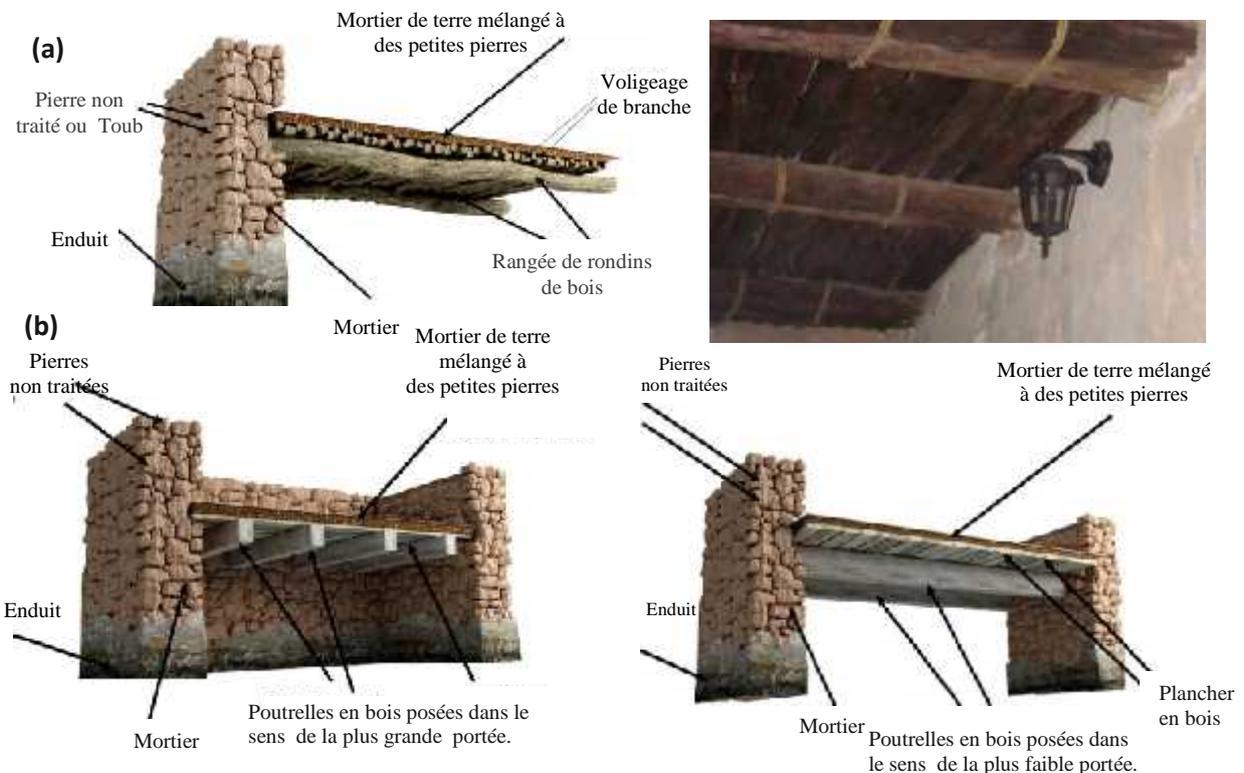


Figure. 3-18 : Plancher en bois à Constantine : (a) Plancher dans le tissu traditionnel ; (b) Plancher dans le tissu colonial. (Maaraf, 2012).

3.7.2.2. Planchers en voute :

Se trouve dans les constructions coloniales, ils sont constitués principalement d'IPN métalliques de 14 cm de hauteur et de 6 cm de largeur et disposés à une distance entre axe égale à 60cm (PPSMVSS, 2011). Le plancher est construit en brique pleine soit en

disposition voutain ou bien dans une ligne horizontale et puis une chape de compression en mortier et une revêtement en carrelage comme indique la figure 3-19. (PPSMVSS ,2011).

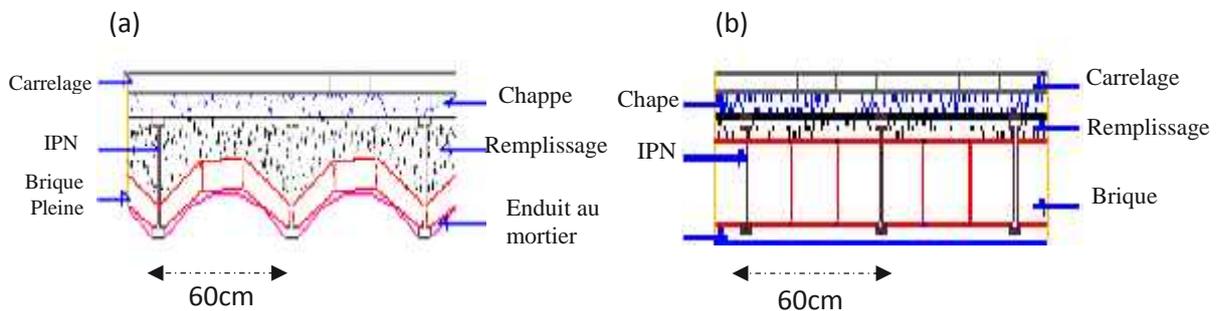


Figure. 3-19 : Coupe plancher :(a) type colonial à voûtain ;(b) type colonial simple (PPSMVSS ,2011)

3.7.3. Les fondations :

Les fondations des constructions en maçonnerie, sont constituées en général de pierre relativement dure et de grande dimension, avec un liant à haut dosage de chaux servant d'assises aux murs porteurs. Ces fondations ont une profondeur variant de 0.60 m à de 2 m selon au niveau de bon sol. (PPSMVSS, 2011).

En général deux types de fondations sont couramment utilisés pour les constructions en maçonnerie :

- Semelles filantes.
- Semelles isolées (rares) elles correspondent aux opérations de renforcement des constructions.

Pour les constructions en béton armé, généralement des semelles isolés ou filantes sont utilisées, sauf dans certaines constructions avec des hauteurs élevées où les fondations sont réalisées avec des semelles sur pieux, (cas des bâtiments de la cité Ciloc). Pour la cité 20 Août, et la cité Benboulaid les fondations sont en semelles filantes.

3.8. Répartitions des constructions selon l'échelle EMS 98 :

Une autre manière pour présenter les résultats de l'inventaire sismique des constructions dans la ville de Constantine est l'échelle macrosismique européenne EMS 98 (Grünthal, 2001).

Nous avons affecté une classe de vulnérabilité aux différents types de bâtis enquêtés, en tenant compte des différents types de matériaux existants (Maçonnerie, béton armé et acier), l'état de construction, et le niveau de la conception parasismique et le nombre de planchers. Le Tableau 3-5 montre la répartition des bâtiments dans les six classes de vulnérabilité selon cette échelle.

Classe de Vulnérabilité	Zone : 1	Zone : 2	Zone : 3	Nombre des constructions	% des constructions
Classe A	812	138	0	950	42.18%
Classe B	332	502	15	849	37.70%
Classe C	23	279	36	338	15.01%
Classe D	2	30	0	32	1.42%
Classe E	16	67	0	83	3.69%

Tableau. 3-6 : Distribution de la classe de vulnérabilité sismique par zone d'étude.

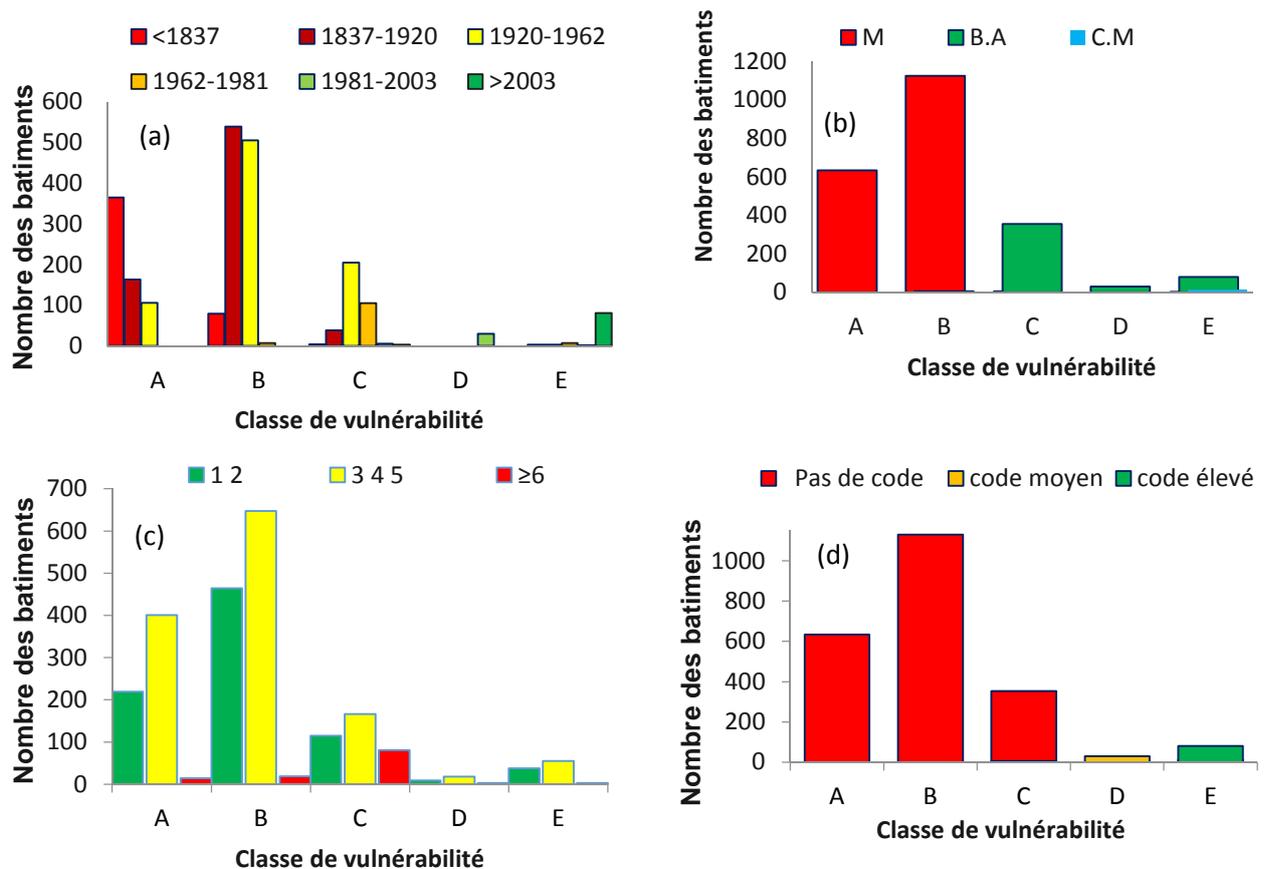


Figure.3-20 :Distribution des constructions selon la classe de la vulnérabilité :(a)époque de construction ;(b) matériaux de construction ;(c)nombre de planchers ;(d) niveau de code parasismique.

La lecture de cette figure permet d'avancer les commentaires suivants :

- Les constructions les plus vulnérables (classe A et B) se situent dans les vieux quartiers de la ville comme (zone 01) et certaines partie de la zone 2 (Bellevue).
- Ces deux zones se caractérisent par une vulnérabilité élevée, plus de 96% des constructions analysées sont classées dans les classes A et B.
- Les bâtiments ont une classe de vulnérabilité moyenne se situent dans la zone 2 où se trouve les bâtiments collectifs construits entre 1930 et 1962 et dans la zone 3 où l'on trouve les bâtiments d'habitats collectifs construits après 1962 (1970-1975)
- Seulement 5% des constructions analysées sont classées dans des classes moins vulnérables (D, et E). Elle sont concentrées dans les zones 2 l'on trouve les constructions en béton armé relativement récentes construites après 1962.

3.9. Répartition géographique des bâtiments pris en compte dans l'inventaire :

Il est intéressant de noter que la ville de Constantine, comme toutes les villes Algérienne, est composée d'un certain nombre de sites et quartiers ayant chacun ses caractéristiques et son histoire. Pour les objectifs de l'étude et afin de mieux présenter notre travail, la zone d'étude a été laissée telle quelle ou bien divisée en sous zones à des fins d'homogénéité, qui tiennent compte soit de l'historique soit de type d'urbanisation. L'analyse effectuée se chiffre comme suit :

- Dans la zone 1, environ 63% des bâtiments ont été analysés, soit 1185 bâtiments /1887 bâtiments existants sur cette zone.
- Dans la Zone 2, environ 83% des bâtiments ont été analysés, soit 1016 bâtiments /1221 bâtiments existants sur cette zone.
- Dans la zone 3, des bâtiments ont été analysés, soit 51 bâtiments /123 bâtiments existants.
- Selon la nature des matériaux de construction : les bâtiments en maçonnerie non armée représentent 94% de l'ensemble des bâtiments de la zone 1 (construits avant 1920),

- 64% de l'ensemble des bâtiments de la zone 2 sont en béton armé (construits entre 1920 et 1962)
- Pour la zone 3 la totalité des constructions sont en béton armé (construits après 1962).

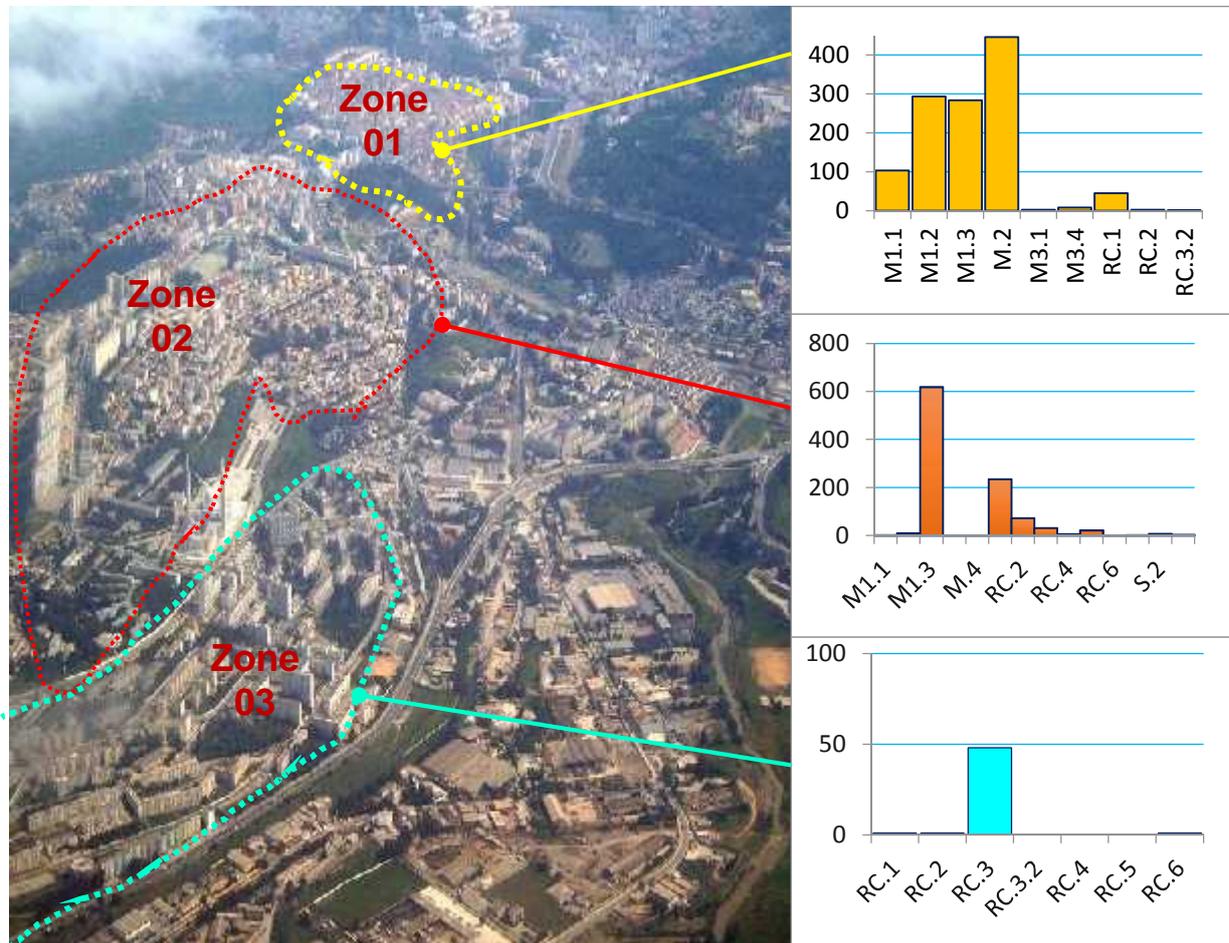


Figure. 3-21 : photo aérienne présente les sites d'analyse. Chaque histogramme présente le nombre total de la typologie constructive existe dans chaque zone.

Donc dans cette étude nous focalisons nos efforts sur la partie ancienne de la ville (avant l'indépendance, le Rocher, Coudiat, Belle vue...etc), et avec certain partie datant de l'époque après l'indépendance tels que : cité... 20 Aout 1955, Ben Boulaid, et Fadila saadene (voir les plans d'évolution urbaine de Constantine en annexe). En plus, il est important de noter que le niveau de la conception parasismique et les pratiques de réalisation (matériaux, outils) l'époque lié à l'époque de construction. À l'échelle de la ville de Constantine, trois types de matériaux correspondant à quatre périodes de construction ont été identifié :

- Période des Otman Avant 1837 :

Des constructions en maçonnerie avec des murs porteurs soit en Adobe, brique de terre cuite, ou en pierre avec des toitures en bois (partie basse de la vieille ville Souika).

- Période coloniale 1 : entre 1837-1920 :

En général connue par des constructions en maçonnerie avec des murs porteur en pierre et des toitures en voutain, ou en bois.

- Période coloniale 2 :1920-1962 :

A connue l'apparition des bâtiments en béton armé soit en système portique ou en mur porteur en béton armé (ex : cité Ciloc).

- Période après l'indépendance >1962 :

Une nouvelle technique de construction a été utilisée dans cette époque par des entreprises Algérienne qui utilisent des Panneaux préfabriqués en béton armé pour construire des logements de type collectifs (20 Aout 1955).

Zone	Total des constructions	Constructions enquêté	% Bâti enquêté	Bâti maçonnerie	Bâti B.A	Bâti C.M
Zone1	1887	1185	62.80%	1116 (94.18%)	66(5.57%)	3(0.25%)
Zone2	1221	1016	83.21%	653(64.27%)	354(34.83)	9(0.9%)
Zone3	123	51	41.46%	0(0%)	49(96.08%)	2(3.92%)
Total	3231	2252	69.70%	1769(78.55%)	469	14

Tableau. 3-7 : Répartition des constructions à Constantine selon les matériaux de construction

La majorité des bâtiments ont été construit en maçonnerie (78.55 %), tandis que la période de construction la plus représentée est avant 1962 (89.57%), suivie de la période après l'indépendance 1962 – 1999 (10.43%). Compte tenu de la répartition des constructions selon la période de construction de manière très détaillés, on peut voir que presque 95% des bâtiments ont été construits avant le premier code parasismique Algérien en 1981 (RPA 81).

Zone	Avant 1837	1837-1920	1920-1962	1962-1981	1981-2003	>2003	Total
Zone1	448	700	20	0	0	17	1185
Zone2	0	44	805	64	36	67	1016
Zone3	0	0	0	49	2	0	51
Total	448	744	825	113	38	84	2252

Tableau. 3-8 : répartition des constructions à Constantine selon les l'époque de construction

Sur la zone d'étude Cinq unités urbaines homogènes ont été définis .Elles ont été choisies suivant leur époque de construction ou leur fonction (centre historique, quartiers résidentielles, commerciale, etc...). Chaque secteur présente une époque différente donc un système constructif différent dont les principaux repères historiques et architecturaux peuvent être présentés de façon synthétique comme ci-dessous :

3-9-1. Le rocher :

La ville sur le rocher est une ville unique ; elle est une des villes des plus anciennes sur terre (plus de 2500 an), son site exceptionnel sur une masse rocheuse, prend la forme d'un prisme à la base trapézoïdale, d'un périmètre de 3Km.

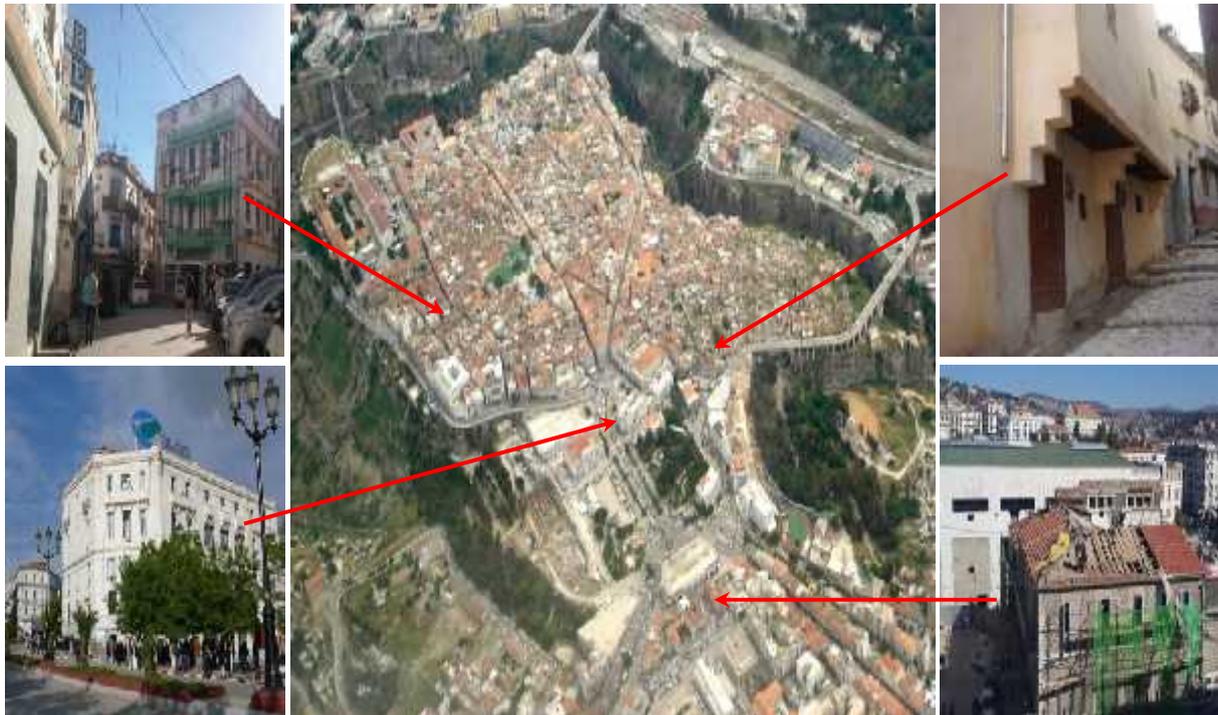


Figure. 3-22 : Images sur la vieille ville de Constantine "Rocher"

Elle s'étend sur un plateau qui s'abaisse en pente plus ou moins régulière vers le Sud-Est dans les parties les plus hautes, la pente est de 5%, elle attend dans les parties centrales 10% à 15% au milieu et plus de 25% au Sud-Est.

La vieille ville de Constantine est reconnu pour sa concentration de bâtiments anciens (la majorité de la maçonnerie non renforcée). Par exemple, la figure. 3-.22 est une vue aérienne sur le rocher bordée de bâtiments de diverses époques, soit de droite à gauche : la plus vieille ville (ville Otman avant 1837), la ville coloniale (1837-1920).

- Etat physique des constructions :

L'observation majeure que l'on peut faire s'agissant de la ville sur le Rocher c'est l'état de dégradation des tissus, surtout les tissus traditionnels qui construits avant 1837 (la Medina). L'évaluation de l'état du bâti à Constantine a consisté la présence des fissures dans les éléments porteurs, dans les planchers, et dans les éléments non porteurs comme les murs de remplissage, les balcons ...etc.

Globalement, bon nombre d'habitations se sont effondré, surtout dans la partie basse de rocher. Pour appuyer ces observations, nous nous baserons dans l'évaluation de l'état de conservation du cadre bâti de cette zone sur les résultats publiés en 2009 par l'étude du plan de sauvegarde et de mise en valeur (PPSMVSS, 2011).

Les résultats obtenus se résumant dans le tableau suivant :

Bon état	État moyen	État dégradé	Nombre des constructions totales enquêtées
218	369	598	1185

Tableau .3-9 : État de conservation du cadre bâti de la vieille ville

En somme, sur les 1185 constructions enquêtées, 598, soit près de 50.46%, sont en état dégradées, 31.14% (369 constructions) sont considérées en état moyen, et seulement 18.40% (218 constructions) sont considérés en bon état.

Il faut noter que cette zone de Constantine a bénéficié de beaucoup d'études en vue de la réhabiliter, parmi ces projets on peut citer :

- Le projet de l'URBACO 1984 :

Est une étude détaillée concernant la vieille ville de Constantine réalisée par le Centre d'Études et de Réalisations en Urbanisme de Constantine « URBACO ». Le projet est resté sur papier, car la faisabilité de ce dernier était impossible vue les difficultés de financement dans cette période. (PPSMVSS, 2011).

- Le projet du master plan en 2003 :

Est un projet réalisé par les italiens et géré par le ministère de l'habitat et de l'urbanisme, pour la rénovation de la vieille ville de Constantine. Dans ce travail, une partie du projet, a été consacrée pour établir des relevés architecturaux du patrimoine historique, avec des fiches techniques très détaillées enfin un cahier de charges à considérer pour requalifier le vieux bâti. (PPSMVSS, 2011).

- Le projet de réhabilitation de la rue Mellah Slimane et la place El Batha » 2005 :

Projet a été lancé après convention signée entre la direction d'urbanisme et des constructions « D.U.C » de Constantine, et l'université des frères Mentouri. Pour cette étude, la rue Mellah Slimane a été divisée en trois tronçons :

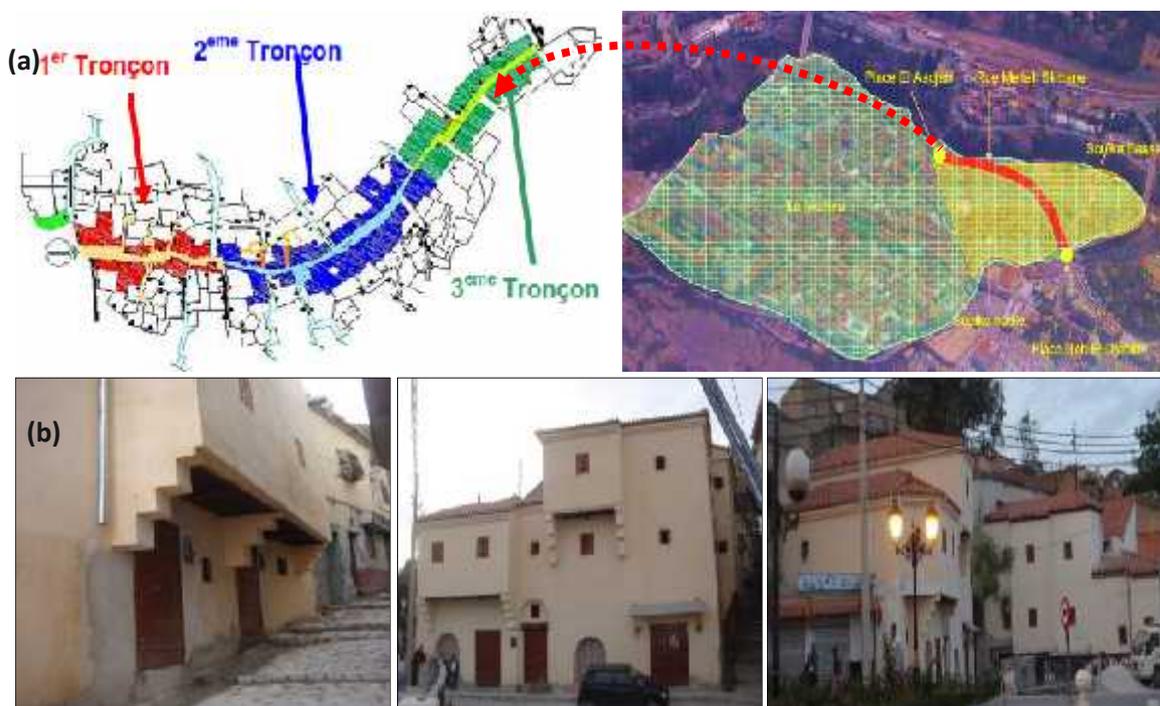


Figure 3-23 : (a) Localisation et les étapes de réhabilitation de la rue mellah Slimane ;(b) Photos des opérations de revêtement du sol et la réhabilitation des constructions (Laboratoire villes et santé, 2006).

Le premier est limité par la place Bab el Djabia et le croisement des deux rues transversales à Mellah Slimane : la rue Abdallah bey et la rue Kerouaz, le deuxième est compris entre la rue Abdallah Bey et la rue Sidi Nemdil, et le troisième, entre la rue Sidi Nemdil et la place Aouati Mohamed Tahar et le quartier d'El Batha. (PPSMVSS, 2011).

En générale ce projet consiste : 1) une opération de rénovation des réseaux V.R.D et A.E.P ; 2) une opération de réhabilitation des façades urbaines ;3) un renouvellement du revêtement du sol.

- Le projet PPSMVSS « Plan Permanent de sauvegarde et de mise en valeur du secteur sauvegardé en 2008:

Le projet PPSMVSS de la médina de Constantine, est entrepris par le ministère de la culture en matière de la restauration et la réhabilitation de la vieille ville de Constantine située sur le rocher, dont la première phase a été entamée en 2008, est passé par trois étapes :

La première étape consiste dans l'élaboration du diagnostic et des mesures d'urgence,La deuxième étape est l'étude historique et typologique. La dernière étape est la rédaction finale du PPSMVSS.

- Le projet de Réhabilitation des anciens lycées:

En 2009 , une opération de réhabilitation des anciens lycées à Constantine a été lancée, celle-ci, qui s'inscrit dans le cadre de la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Algérie, s'est limitée en ce qui concerne la ville du Vieux Rocher, à six lycées: Redha Houhou (ex-D'Aumale), Hihhi El Mekki (ex-Franco-Musulman), El Houria (ex-Lavran), Les Sœurs Saâdane (ex-Chanzy), Tarek Ibn Ziad (ex-Les Pères-Blancs) et enfin le technicum Tewfik Khaznadar (ex-De garçons).Selon les statistiques délivrés par la direction d'éducation nationale , un montant global de 657 millions de dinars a été alloué pour la réfection de ces établissements pour être réévalué à 983 millions de dinars répartis selon l'importance des travaux sur ces établissements.

Par exemple, Le lycée El Houria, dont la réhabilitation a été estimée, -à lui seul-, à 300 millions de dinars,et 164 millions de dinars pour la rénovation le lycée Redha

Houhou. Concernant les autres lycées, à savoir Hihi El Mekki, Tarek Ibn Ziad, Tewfik Khaznadar, et les Sœurs Saâdane, ils ont bénéficié respectivement de 88 millions, 180 millions, 160 millions, et 80 millions de dinars. Les travaux sont essentiellement axés sur l'étanchéité, la chaufferie, l'assainissement extérieur et les canalisations.

En prévision de la manifestation "Constantine capitale de la culture arabe 2015, d'autres opérations et chantiers concernés par les réhabilitations sont pilotés en coordination par les services de l'Office de Promotion et de Gestion Immobilière (OPGI) et la Direction du Logement et des Equipements Publics (DLEP). Se situent au niveau des rues : du 19 juin, rue Didouche Mourad, Larbi Ben M'hidi, Aouati Mostapha, l'avenue Abane Ramdane, Kedour Boumedous et Belouizdad (ex saint Jean).

3-9-2. Site Coudiat-Aty :

Le plateau du Coudiat (Coudiat-Aty) en majorité réservé aux établissements administratifs et scolaires couvre environ six hectares, d'une altitude moyenne de 630m. Le bâti du « Coudiat » consiste à des immeubles à destination mixte (habitat, commerce et administration) de hauteur variant de 8 à 25 mètres, construits entre 1920 et 1930 .Figure. 3-24.

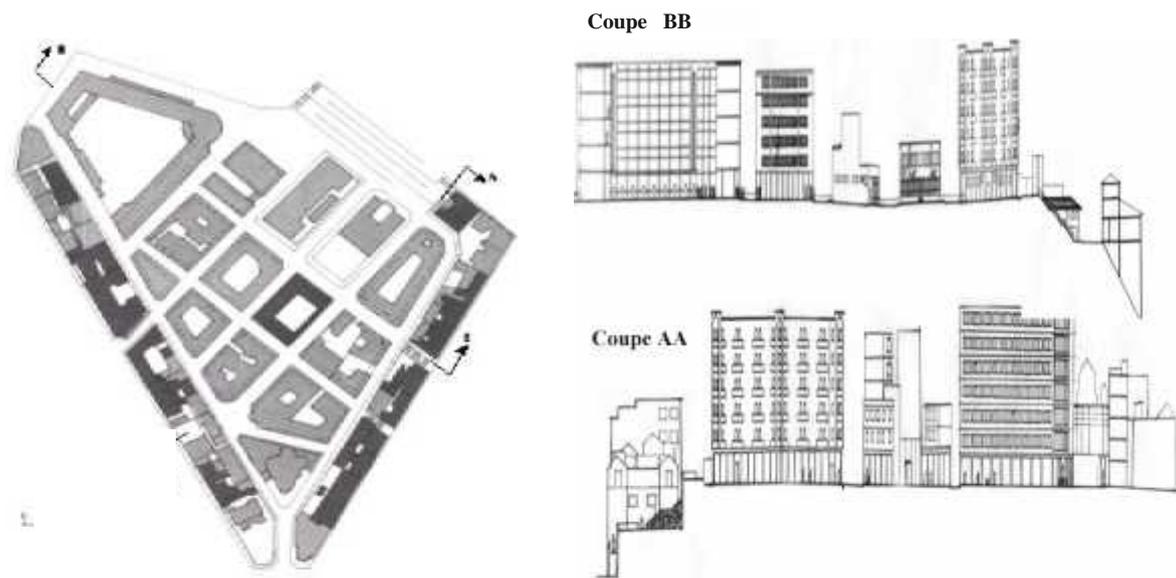


Figure 3-24 : Coupe topographique et Plan de masse du site d'investigation.

En général, ces constructions se caractérisent par la nature des matériaux de construction des murs de façades qui sont la pierre de taille, et le moellon, avec des planchers en béton armé.



Figure 3-25 : Photos sur les typologies constructive site du Coudiat (Koudiat –Aty) et Belouizdad.

Les constructions, affichent une vieille allure extérieure, quelques murs fissurés (Figure3-25), des ascenseurs à l'arrêt.

L'enquête que nous avons menée, sur 154 constructions, montre que 54% des constructions sont jugées en bon état (83 constructions), 11.68% jugées en état moyen et 34.41% jugées en mauvais état.

3.9.3. Le site du 20 Aout 1955 :

La cité du 20 Août 1955, est un site urbain à la périphérie du Rocher, au Sud-Ouest du plateau du Belle vue à 3 Km du centre-ville. L'ensemble du quartier est construit sur un terrain de 15 ha avec une densité de 69 logements/ha. La construction de cette cité a été confiée à l'EX société « SONATIBA », qui fût chargée du projet de la réalisation entre les années 1970 et 1975, avec un total de 1038 logements.

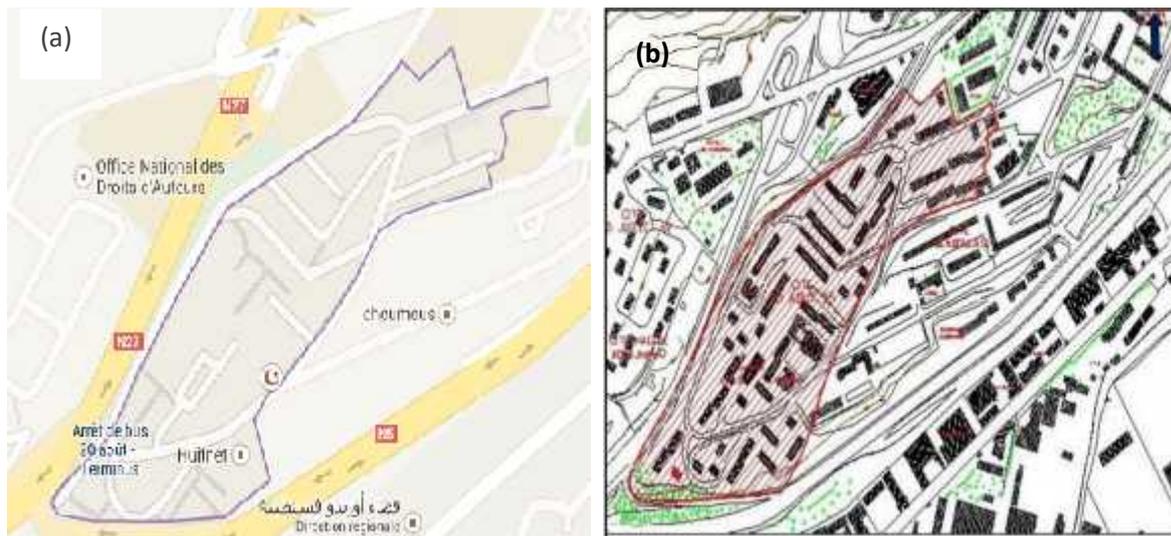


Figure. 3-26 : (a) Image satellitaire de la cité du 20 Août Constantine « Google Map » ;(b) Plan d'urbanisme de la cité du 20 Août Constantine. (DUC.2003).

La hauteur des bâtiments est de quatre étages (R+4) pour la majorité, 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).

Les bâtiments ont été construits par des techniques de construction apparues entre les années 1950 et 1960 et se sont généralisées dans les années 1970 un peu partout en Algérie. Le rapport plein -vide de la façade principale est de 16% avec des dimensions moyennes des fenêtres.



Figure. 3.-27 : Façades principales des bâtiments collectifs à la cité 20 Aout 1955.

La technique consistait à l'assemblage de panneaux préfabriqués en béton armé de 25 cm d'épaisseur (composé d'un voile extérieur 10 cm, voile intérieur 15 cm, et polystyrène de 3cm), avec des fondations en semelles filantes d'épaisseur 20 cm, avec des dalles palières et demi- palières en éléments préfabriqués d'épaisseur 14 cm. En général, 96% des bâtiments de cette zone sont en bon état.

3.9.4. Site de la cité Ciloc :

Le site « Ciloc », a été choisi pour son importance (nombre d'habitation), des risques éventuels (glissement terrain), et leur période de construction. C'est un quartier qui fait partie de la zone d'étude N°2, et qui concerne un ensemble de bâtiments en béton armé (R+12, R+10), construits en 1958 dans le cadre du plan de Constantine, chaque immeuble comprend 120 logements, soit 600 à 700 personnes par bâtiment. Ces bâtiments occupent la bordure occidentale du plateau de Bellevue avec une pente relativement élevée (10 % à 15%).

Les bâtiments sont fondés sur des pieux de 14 m, avec des planchers en dalle pleine (Figure .3-28). Ces bâtiments ont été numérisés dans une base de données qui comporte leurs fiches d'enquêtes technique. (Guettiche et Mimoune, 2014).



Figure .3-28 .Photo et vue en globale sur la zone Ciloc.

D'après les observations effectuées sur site et la synthèse des coupes de sondages carottés, réalisé à proximité du bâtiment « B004 » par le laboratoire des travaux public de l'Est « LTP E », dans le cadre d'une étude de glissement terrain dans le site Ciloc en 1989 (LTPE, 1989), les résultats sont comme suit :

- Des remblais de nature argilo graveleux de 2 à 6 m d'épaisseur.
- Des colluvions argileuses graveleuses avec épaisseurs de quelques mètres.
- Sables fins et graviers.
- Sables grésifiés avec des épaisseurs environs de 60 m.
- Miocène représenté par des argiles rouges à verdâtre.
- La présence d'eau à quelque mètre de profondeur, est entretenue par les rejets constants d'eaux usées «fuites du réseau d'assainissement ».

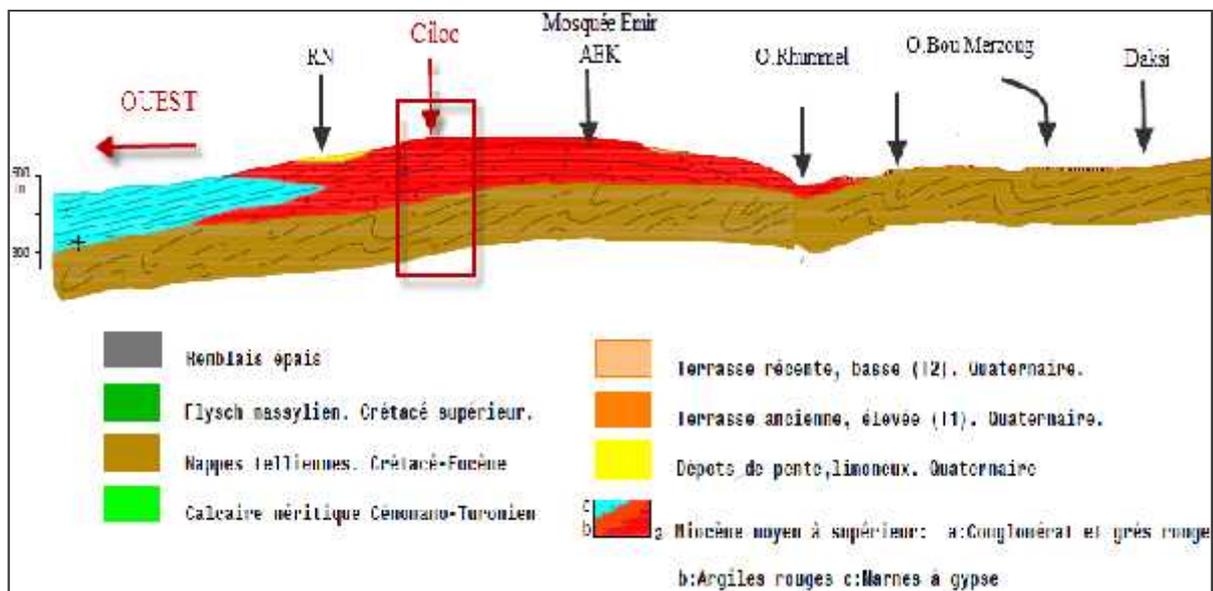


Figure .3-29 : Coupe géologique de la région d'étude. (Bougdal, 2004).

Les études réalisées sur le site Ciloc (Benaissa et al ,1989 1999 ; Pincet et al, 2005) montre une instabilité très importante et très active, sous l'immeuble B004 où se trouve un talus ne garantissant pas sa stabilité dans le cas d'un séisme.

Les abords des immeubles du côté Ouest sont dans un état environnemental préoccupant (nombreux dépôts de déchets, écoulements d'eaux usées...etc.) et souffrent d'un entretien insuffisant.

3.9.5. Le site Belle vue :

Cette zone se situe sur les vastes plateaux de Belle vue sur une superficie de 385 ha, on trouve des maisons individuelles (villas anciennes à un ou deux niveaux construites en maçonnerie non armé et non chiné), et quelques bâtiments collectifs. (DUC, 2003). La majorité des constructions de la zone de Belle vue a été construites entre 1931 à 1962, une zone qui est connue par ses quartiers à caractère résidentiel avec la population de la cité Ciloc la zone 2 (Bellevue +Ciloc) compte 56918 habitants (11.88% de la population de la commune de Constantine) et une densité brute de population entre 700 à 2.000 hab./ha . (ONS, 2000).



Figure .3.30. Photos aériennes sur la zone Belle vue

Après la consultation d'un rapport d'expertise sur les glissements de terrain réalisé en 2003 par l'entreprise française" EEG – SIMECSOL" qui a fourni des explications bien définies sur les conditions de sol à travers la ville de Constantine (Bouhaded,2003), et les sondages carottés, effectués dans ce site par le L.T.P/Est, on trouve que le secteur de Bellevue est composé de couches de conglomérats hétérogènes d'âge moi-Pliocène, se composait principalement d'argile avec alternances de sable, de graviers.

Selon (Paulsen, 1998) la teneur en eau souterraine est plus de 20%, avec des niveaux de saturation atteint, par endroits, 80 à 100%. Ils estiment que la profondeur de la surface de glissement de 15 m et la vitesse de glissement est de l'ordre de 1 cm / an.

Durant la période entre 2010 et 2013 des enquêtes sur le site Belle vue ont été réalisés, ce qui nous a permis de constater que le parc immobilier dans cette zone est affecté par une dégradation sévère en raison de glissement de terrain.

L'expertise a porté sur 867 constructions à fonctions diverses, dont nous pouvons présenter le bilan suivant :

- Le nombre des constructions enquêtées est 867 ce qui représente 95% du total des constructions existantes sur Belle vue.
- Les bâtiments évalués dans l'inventaire sur le site Belle vue sont principalement résidentiel (81%), avec seulement 6% des bâtiments publics et administratifs. nous pouvons aussi trouver des bâtiments de multiples usages (commercial / résidentiel).
- 78.78%(683 constructions) des constructions de cette partie sont jugées en bon état avec 21.22%(184 constructions) jugées en mauvais état.
- En raison de l'importance de la classification des typologies de bâti existant on peut conclure que la typologie dominante est la maçonnerie à 63.2%, soit 548 constructions. La deuxième typologie est constituée du béton armé avec 36% soit 312 constructions, et seulement 0.8% soit 7 avec des structures en acier.
- Les constructions individuelles de type résidentielles sont en semelles filantes en gros béton pour les murs en maçonnerie et en semelles filantes en gros bétons pour les structures en béton armé.
- Une grande partie des maisons de deux ou à trois niveaux avec toitures en tuile, ont des planchers constitués de voûtains construits en brique pleines reposant sur des profilés métalliques (IPN). Le revêtement en carrelage de dimensions 20/20 cm y compris Chape de compression en mortier.
- A noter que l'urbanisation de cette partie de la ville de Constantine a commencé aux environs de 1930 avant l'apparition du premier règlement parasismique Algérien (RPA.81), les constructions enquêtées sur cette zone constitue 88.63%.

3.10. Synthèse :

Ce chapitre a présenté l'aléa sismique de nord algérien et de la ville de Constantine pour mieux comprendre le risque sismique dans cette région .pour cela une recherche dans la littérature a été faite (historique sismique, les failles actives, la géologie de la ville ...).

L'analyse combinée de la carte sismo-tectonique qui englobe des données de la sismicité historique et les données de la géologie permet de constater que les séismes dans la région de Constantine ne sont pas répartis de façon aléatoire. Nous remarquons aussi, que la majorité des travaux sont focalisé sur l'aléa sismique régional (Nord ou nord East algérien), sauf quelque publication sur le séisme de Constantine 1985 qui sont déjà cités, et l'ouvrage réalisé par l'entreprise française " EEG – SIMECSOL" qui a fourni un rapport d'expertise avec des explications bien définies sur l'aléa sismique, dans le cadre d'une étude réalisé sur le glissement de terrain à travers la ville de Constantine.

La répartition des constructions enquêtées illustrée ci-dessus, selon l'année de construction et le nombre d'étages, a été établis à l'aide d'une base de données contient tous les informations nécessaire à l'évaluation de la vulnérabilité sismique par une méthode macrosismique « Risk-UE » .

Au total, 78% des bâtiments enquêtés étaient des maçonneries non renforcées, 21% de béton armé et seulement% d'acier. La base de données contient 2252 bâtiments :

- 448 construit avant 1837, composé principalement de bâtiments en maçonnerie non renforcés en adobe et en Moellons
- 744 construit entre 1837 à 1920, correspondant à la maçonnerie non renforcée et aux bâtiments en béton armé
- 819 construit entre 1921 et 1962, correspondant à la généralisation du béton dans les bâtiments mais sans application de mesures de code sismique ;
- 119 construit entre 1963 à 1981.
- 38 entre 1982 et 2003.
- 84 après 2003.

La plupart des constructions des trois dernières périodes sont des bâtiments en béton armé. Les deux premières périodes Correspondent aux époques ottomane et française, représentant environ 50% des bâtiments

Presque tous les bâtiments (95%) ont été construits avant la publication du premier règlement parasismique Sismique algérien en 1981 (RPA81, 1981), , 2% des bâtiments ont été construits entre 1981 et la date de publication de la dernière version du

Sismique algérien de 2003 (RPA03, 2003), considérés comme des bâtiments ont un niveau de conception parasismique moyen, et seulement 4% de la construction ont été construits

Après 2003, considérés comme des constructions de haute conception parasismique (high-code). De plus, l'étude Contient environ 120 immeubles de grande hauteur (6 étages), qui ne représentent que 5% de la base de donnée, 845 (38%) de faible hauteur (1 à 2 étages) et 1287 (57%) de hauteur et de moyenne (3 à 5 étages).

CHAPITRE 4 :

Analyse de la vulnérabilité sismique par la méthode Risk-UE

4.1. Introduction :

Dans le chapitre 4, on présente les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions à l'échelle urbaine pour déterminer les dommages éventuels et la probabilité de dommage calculé selon différents scénarios sismiques, leur distribution spatiale et leurs incertitudes.

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants, exige d'une méthodologie crédible et fiable. Par conséquent, une bonne évaluation a besoin d'une méthode capable d'analyser un grand nombre de bâtiments en se basant sur l'essentiel des paramètres structuraux et non structuraux des constructions.

Pour les études à grande échelle (ville, région), l'approche retenue est généralement statistique car la connaissance du bâti existant est souvent partielle.

Dans ce travail, nous on se base sur la méthode européenne Risk-UE.LM1 pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions de la ville de Constantine. Cette méthode empirique, est considérée comme une méthode de référence dans la présente étude pour l'estimation des dommages et des pertes.

4.2. répartition des bâtiments selon la typologie Risk-UE:

Les informations collectées ont été traitées de manière à extraire l'information nécessaire à l'évaluation de la vulnérabilité sismique par la méthode Risk-UE.

Les données nécessaires à la méthode RISK-UE LM1 sont en général disponibles à l'exception certaine détail sur la toiture (poids de la toiture, poussée sur les murs).

En conséquence la typologie des bâtiments de la ville de Constantine sont dérivée de la typologie de la méthode Risk-UE.

Le tableau 5-1 donne pour chaque typologie constructive et en fonction du nombre des constructions la répartition des constructions enquêtées, sur une partie de la ville de Constantine dans les différentes classes de vulnérabilité.

Typologies EMS98	Description selon RiskUE	Nb	%	Total
Maçonnerie non renforcée	M1.1 – Moellons	105	4.66%	78.60
	M1.2 – Pierres appareillées	304	13.50%	
	M1.3 – Pierres de taille	903	40.10%	
	M 2 – Adobe	446	19.80%	
	M3.1 – Planchers bois	2	0.09%	
	M3.4 – Planchers en béton armé	9	0.40%	
Maçonnerie renforcée	M4 – Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	1	0.04%	
Béton Armé	RC1 – Structures poteaux-poutres en béton armé	281	12.48%	20.78
	RC2 – Murs porteurs en béton armé	76	3.37%	
	RC3.1–Murs de remplissage en maçonnerie, structure régulière	80	3.55%	
	RC3.2 – Structures poteaux-poutres irrégulières	1	0.04%	
	RC4 – Structures mixtes en béton armé (portiques et murs)	6	0.27%	
	RC5 – Murs préfabriqués en béton armé (tilt-up walls)	22	0.98%	
	RC6 – Structures préfabriquées en béton armé	2	0.09%	
Construction Métallique	S.1 – Ossatures métalliques en portique	2	0.09%	0.62
	S.2 – Ossatures métalliques avec triangulation	8	0.36%	
	S.3– Portiques + remplissage en maçonnerie non armée	4	0.18%	
Total		2252	100	100

Tableau. 4-1 : Distribution des constructions enquêtées selon la méthode Risk-UE

Le tableau 4-1 présente la distribution des 2252 constructions enquêtées selon la typologie des constructions cité dans la méthode Risk-UE :

- la majorité des constructions analysées sont en maçonnerie non renforcée et non chaînée tel que : M1.2 ; M1.3 ; et M2, constituant 78.60% de la totalité des constructions.
- Le système poteau poutre (RC1) est la typologie dominante pour les constructions en béton armé.



Figure. 4-1 : Classification des bâtiments à Constantine selon Risk-UE

Le classement des constructions par la méthode Risk-UE selon la typologie, est basé essentiellement sur le type de plancher et le type de système porteur.

La vulnérabilité d'un bâtiment est évaluée en fonction de sa typologie, mais aussi en fonction d'autres facteurs aggravants (hauteur, irrégularités de formes, position par rapport aux autres bâtiments, etc...) pouvant être pris en compte sous la forme de coefficients partiels modulant l'indice de vulnérabilité associé à la typologie. Donc la méthode Risk-UE nous a permis de déterminer l'indice de vulnérabilité pour chaque construction à travers les critères structuraux et non structuraux évalués à partir du diagnostic visuel.

4.3. Évaluation de l'indice de vulnérabilité sismique :

L'indice de vulnérabilité est un paramètre continu qui quantifie la disposition d'un bâtiment (ou d'un groupe de bâtiments) d'être endommagés par un séisme ; en d'autres termes, l'indice de vulnérabilité est un score en pourcentage qui peut être attribué à un bâtiment au moyen d'informations disponibles sur la typologie et d'autres caractéristiques structurelles et non structurelles. Ce pourcentage varie de 0 à 100% présente la valeur de la construction en danger, qui est effectivement perdu après un événement d'une intensité donnée.

Selon la méthode Risk-UE niveau 1, la vulnérabilité totale est la somme pondérée des 16 paramètres utilisés dans la formulation (2-8) de l'indice de vulnérabilité sismique présentée dans le chapitre 2. Ces paramètres sont divisés en 3 classes :

- 1) typologie constructive
- 2) facteurs aggravant V_m représentant l'influence des caractéristiques constructives autre que la typologie sur le comportement et la réponse du bâti aux sollicitations sismiques,
- (3) le facteur V_R qui présente la vulnérabilité régionale.

Les valeurs des facteurs aggravants pris en compte sont présentées dans le chapitre 2 : le Tableau 2-7 pour le bâti en maçonnerie et le Tableau 2-8 pour les structures en béton armé.

Pour organiser notre travail, un programme de calcul sous Delphi a été développé. L'idée est de disposer d'un outil de calcul permettant la représentation des résultats (l'indice de vulnérabilité , le dommage moyen) par l'intégration les

différents paramètres issus de l'enquête de vulnérabilité sismique du bâti à Constantine suivant plusieurs niveaux d'évaluation (Figure 4-2).

Des codes Matlab sont aussi générés pour accélérer l'analyse du risque sismique en couplant l'effet de l'aléa représenté par l'intensité macrosismique et la répartition de la vulnérabilité sismique des constructions.

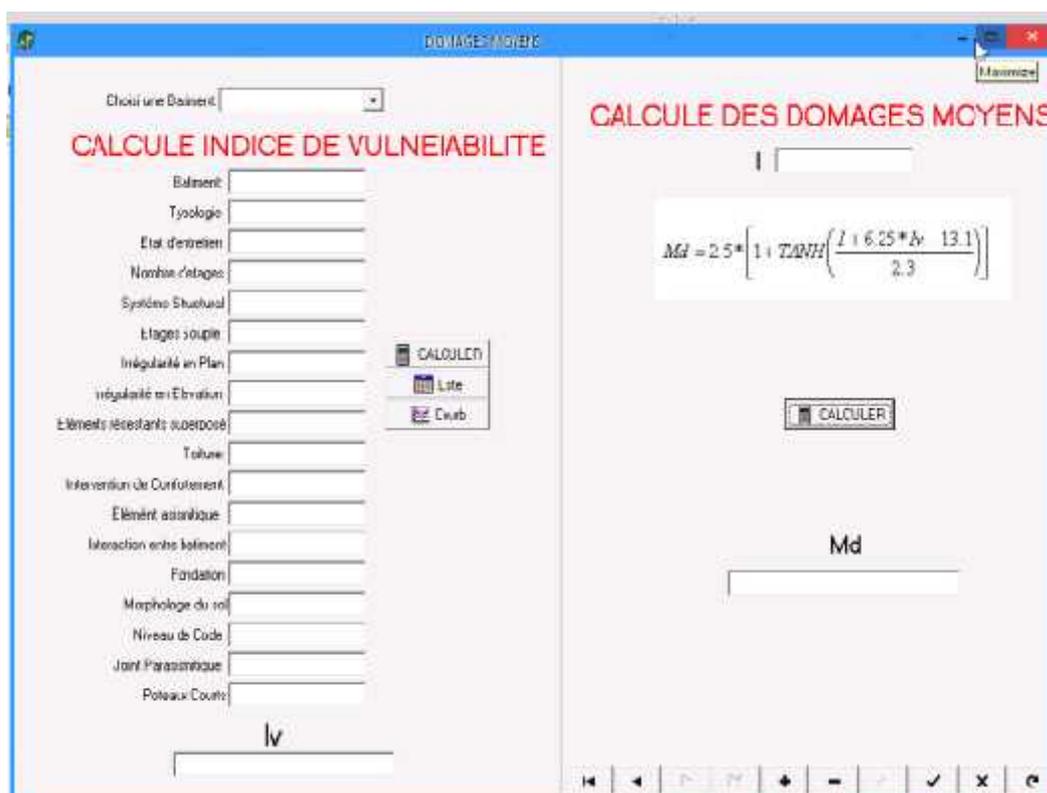


Figure 4-2 : Image d'aperçu du logiciel utilisé dans l'enquête sur le terrain

Après l'examen des constructions, un indice de vulnérabilité sera attribué à chaque construction et une fiche récapitulative pour chaque établissement aura des informations générales sur l'établissement et les éléments propres à chaque bâtiment.

Un premier aperçu sur la distribution de l'indice de vulnérabilité estimés par la méthode Risk-UE a été donné suivant : le matériau de construction (maçonnerie, béton armé et acier), l'époque de construction (six époque de construction) , le niveau du code parasismique (pas de code ,code moyen et code élevé), et la hauteur de la construction (peu élevé, moyennement élevé et élevé) tel qu'il indique la Figure 4.3.

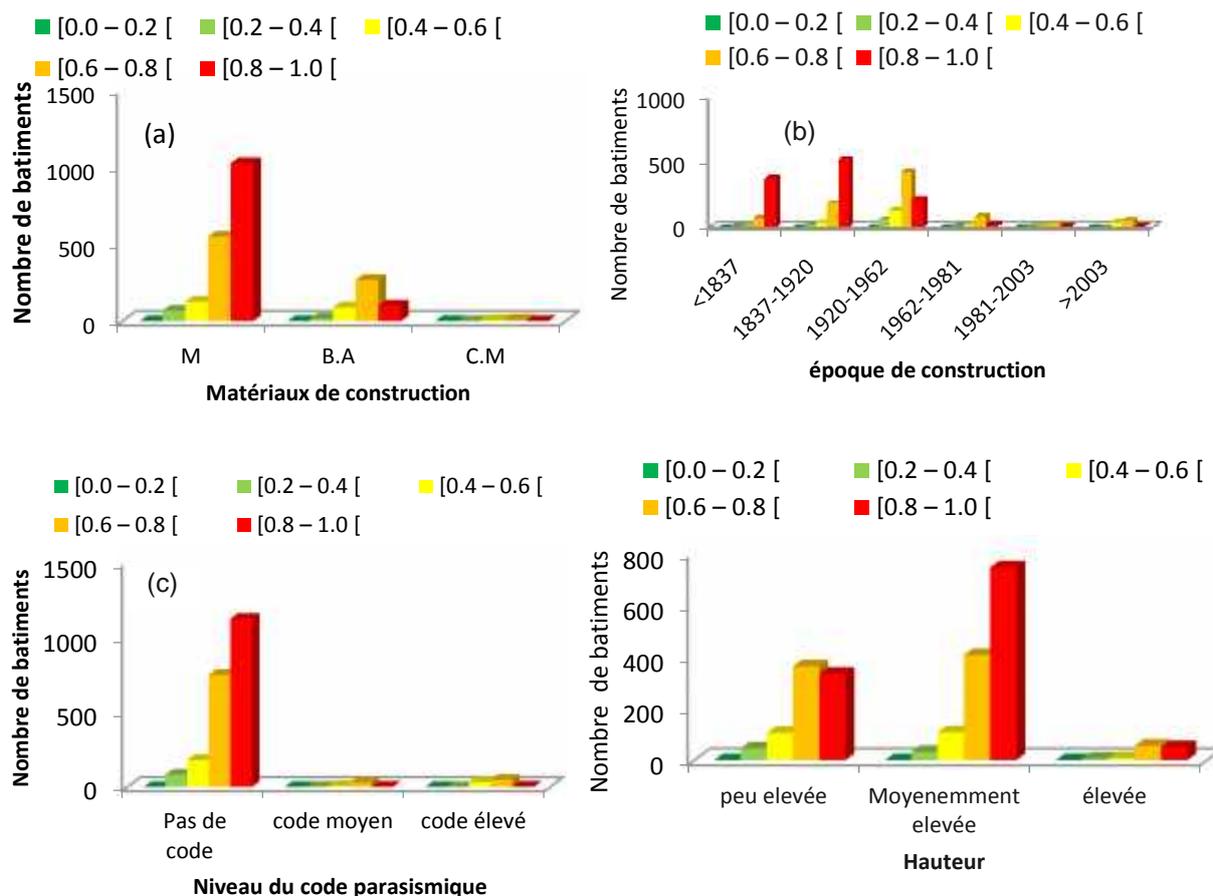


Figure .4-3 : Histogrammes de la distribution de la vulnérabilité sismique : (a) Matériaux de construction ;(b) époque de construction ;(c) niveau du code parasismique ; (d) Hauteur de la construction.

Nous constatons l'importance de ces quatre paramètres sur la valeur finale de la vulnérabilité sismique des constructions, ou les constructions construites avant l'application de la réglementation parasismique algérienne RPA81 en 1981 et construits avec des constructions en maçonnerie et avec de hauteur plus de 8 étages sont les plus vulnérables. Plus de 52 % des constructions construites avant l'application de la réglementation parasismique présente une vulnérabilité entre 0.8 et 1 (vulnérable très élevée) et plus de 88% présente une vulnérabilité élevée (0.6 à 1).

Les matériaux de construction et la hauteur des constructions ont aussi une influence remarquable sur la vulnérabilité des constructions à Constantine ou plus de 88% des constructions plus de 6 étages ayant un indice de vulnérabilité varie entre 0.6 à 1. En plus 58% des constructions en maçonnerie caractérisées par un indice de

vulnérabilité entre 0.8 et 1. Par contre 22% seulement des constructions en béton armé présente une vulnérabilité dans cette intervalle.

4.2.3. Simulation et calculs d'endommagement :

Le calcul de l'indice de vulnérabilité d'une construction nous a permis de voir une idée sur leur qualité de résistance sismique, mais à lui seul il n'est pas suffisant pour caractériser un bâtiment d'un point de vue sismique. En effet, il nous servira pour le calcul du niveau de dommage pour un scénario sismique donné.

En effet, le calcul de l'endommagement sur la base des différents séismes de scénario, sont ensuite effectuées à l'aide de la méthodologie européenne Risk-UE qui tient compte l'effet de la vulnérabilité des constructions à l'aide d'une formule semi-empirique. Une analyse statistique des dommages a notion de dommage moyen (μ_D) est introduite comme une fonction de l'intensité macrosismique (I) et défini par deux paramètres : l'indice de vulnérabilité (IV) et la ductilité équivalente du bâtiment (Q) selon l'expression analytique 2-9 présentée de le chapitre 2.

Dans cette étude la valeur de l'indice de ductilité Q est fixée à une valeur de Q = 2,3. Cette valeur est dérivée de l'échelle macrosismique EMS 98. À partir des résultats obtenus par la formule 4.5, il est possible de développer des courbes de vulnérabilité pour les différentes intensités sismiques

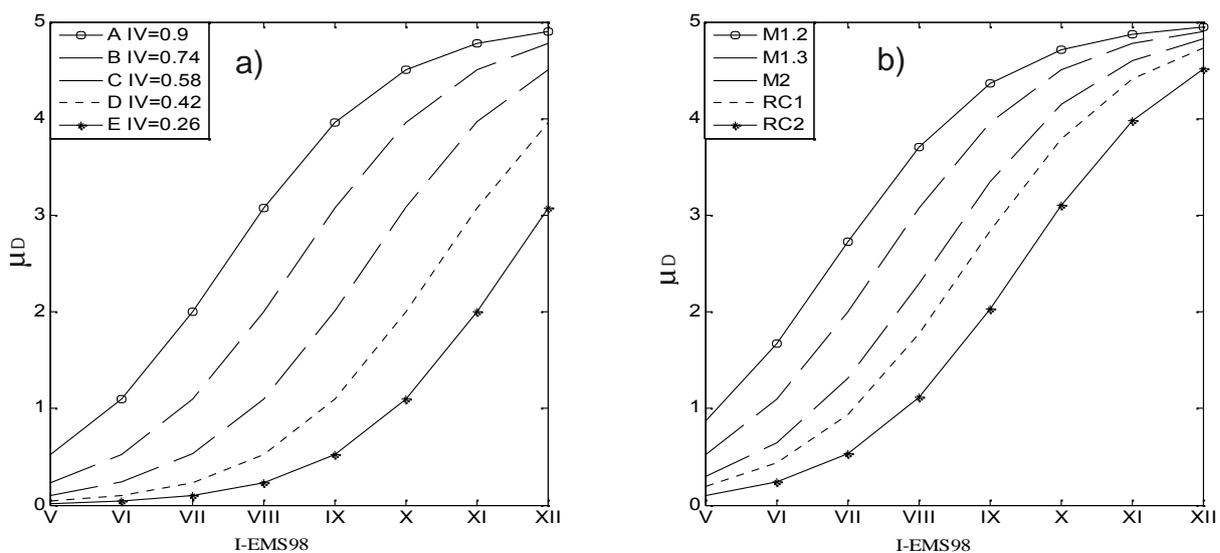


Figure .4-4. Courbes de vulnérabilité pour différents types de bâtiment :a)selon la classe de vulnérabilité ;b) selon la typologie constructive.

Par exemple pour la typologie RC1 qui présente le système constructive portique en béton armé, le dommage moyen attendu vaut $\mu_D=1.774$ quand l'intensité macrosismique vaut 8 selon l'échelle EMS 98.

Toute étude de vulnérabilité doit pouvoir repérer la répartition spatiale des différentes typologies de constructions. Dans ce travail un logiciel SIG (ArcGIS 9.3.1) est utilisé pour représenter la distribution spatiale des constructions, leurs caractéristiques et leurs dommages.

L'outil SIG a été indispensable pour la cartographie de la variation spatiale de la vulnérabilité exprimée soit en termes d'indices de vulnérabilité ou de dommages moyens (Figure 4-5).

Le but de traitement par le système SIG a été l'identification de zones caractérisées par un niveau de dommage donné, il a été possible de distinguer les zones de dommage homogène et ainsi il a permis d'identifier les zones urbaines prioritaires.

Pour la représentation des résultats, la zone d'étude a été divisée à des sous zones homogènes en prend en considération l'évolution urbaine de la ville de Constantine. L'évaluation de la vulnérabilité sismique fait à l'échelle de la construction ou chaque construction caractérisée par un indice de vulnérabilité et de dommage moyen. La distribution des résultats sont présentés par des cartes dans l'annexe 4.3

Les représentations des résultats à l'échelle de la construction a ou à l'échelle du district de recensement ont été écartées car, dans le premier cas, les résultats manquent de représentativité statistique, et dans le deuxième cas, le district de recensement ne correspond pas à une entité urbaine identifiable.

La Figure 4-5 présente les résultats sous forme graphique de l'évaluation des indices de vulnérabilités (IV), selon la méthode Risk-UE ce qui nous a fourni un premier ordre d'idée sur les zones urbaines les plus vulnérables à Constantine.

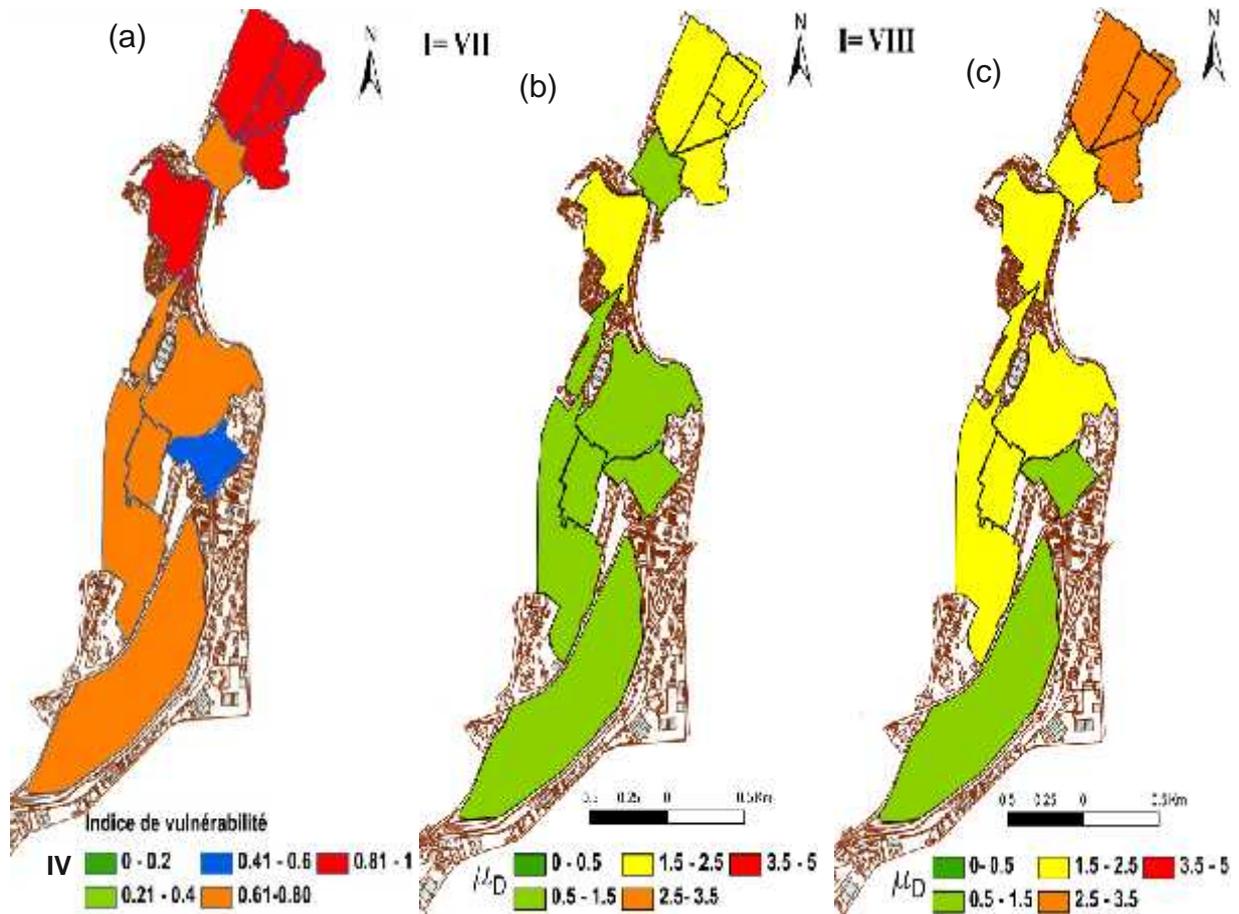


Figure 4-5 : Distribution spatiale : (a) la vulnérabilité sismique ;(b) les dommages moyens pour l'intensité VII ;(C) les dommages moyens pour l'intensité VIII.

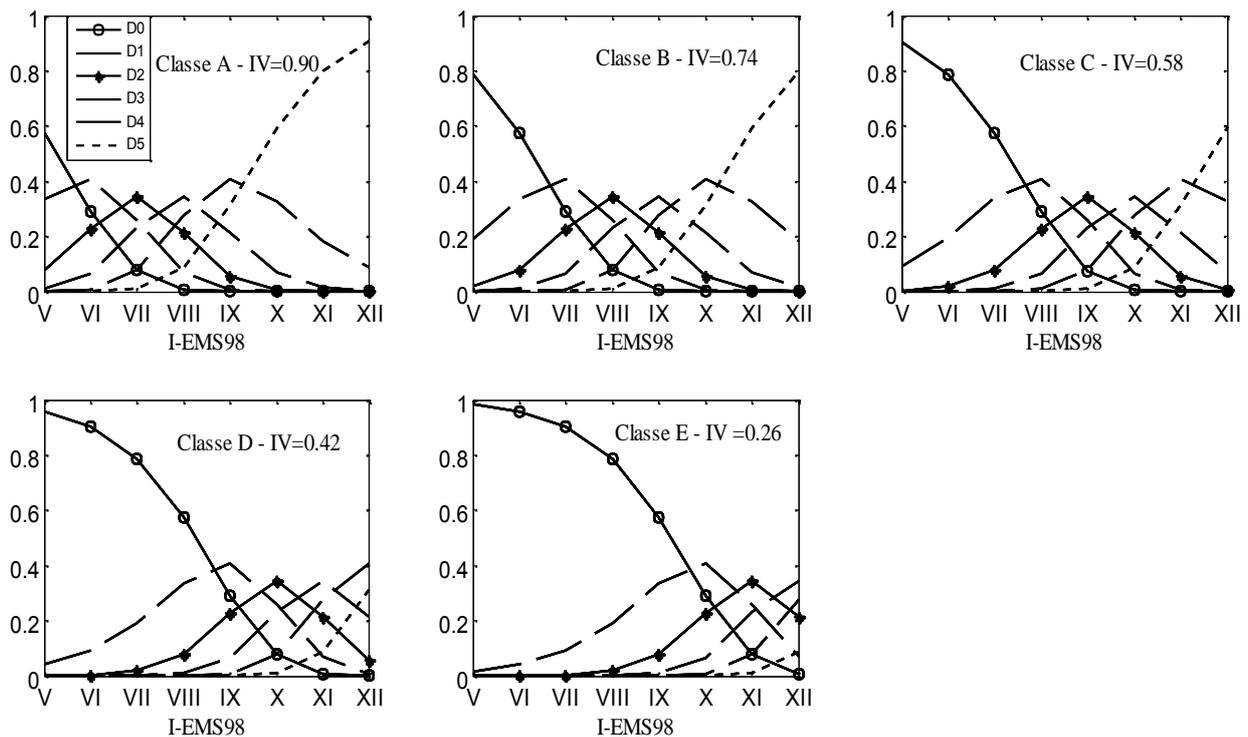
Comme on pouvait se l'attendre, la comparaison de ces différentes zones montre que la plus forte vulnérabilité sismique du bâti de Constantine est concentrée dans le centre-ville (le Rocher). Le centre-ville comprend donc le plus grand nombre de bâtiments (> 52%) et ceux ayant la plus grande vulnérabilité. Ceci implique que la majorité des dommages sera dans le centre-ville comme indique la figure 4.5.C (Scénario d'intensité VIII).

4.2.4. Probabilité des dommages :

La distribution binomiale proposée dans est ensuite utilisé pour donner la probabilité $P(D_k)$ d'avoir chaque degré de dommages D_k (k [0, 5]) pour la valeur du dommage moyen μ_D déterminé selon l'équation (2.10).

À partir des indices de vulnérabilité calculés précédemment, il est possible de dresser des courbes de vulnérabilité pour différentes intensités de séisme.

La figure 4-6 représente les courbes de vulnérabilité pour les cinq classes de Vulnérabilité existe dans cette étude. Les courbes de vulnérabilité sont basées sur les indications de l'EMS 98. Il y est indiqué par exemple que pour un séisme



d'intensité VIII,

Figure. 4-6 : Courbes de vulnérabilité pour les cinq classes de vulnérabilité

Beaucoup de bâtiments de la classe de vulnérabilité A subiront des dommages de degré 5 » ou « que beaucoup de bâtiments de la classe de vulnérabilité D subiront des dommages de degré 2 et quelque uns de degré 3 ». Ces indications ont été interprétées quantitativement afin de développer les courbes de vulnérabilité pour chacune des six classes de vulnérabilité.

Les graphes de la Figure 4-6 présentent la distribution des dommages calculées sur la base du dommage moyen μ_D .

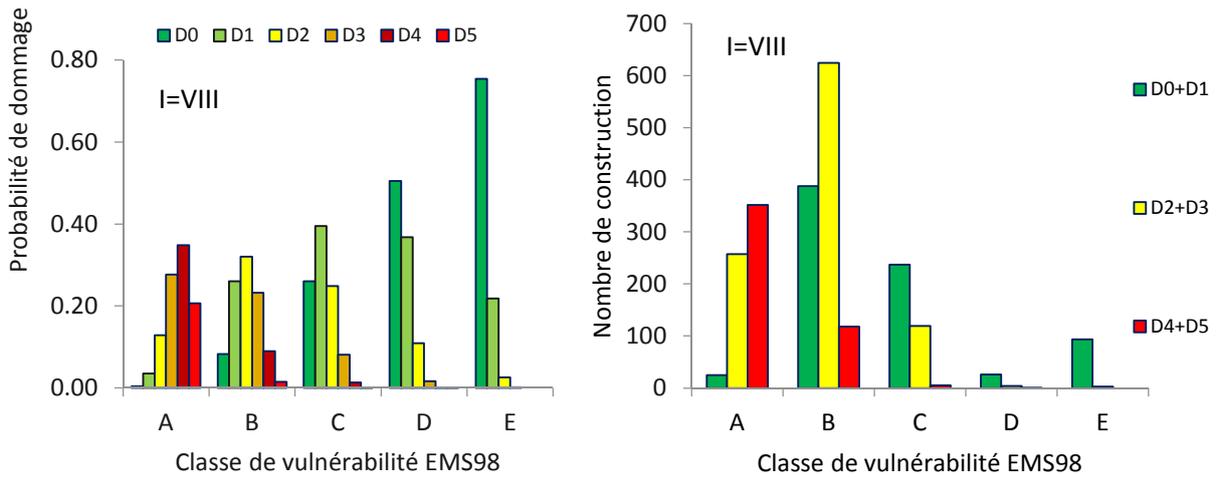


Figure. 4-7 : Distribution des dommages sismique selon la classe de vulnérabilité pour un scénario sismique d'intensité VIII : (a) probabilité de dommage pour 6 niveaux de dommage (b) nombres de constructions endommagés pour trois niveau de dommages (légers, modérés, sévères).

La classe A comprend les structures les plus vulnérables comme les bâtiments en maçonnerie traditionnelle et la classe E, les structures les moins vulnérables comme par exemple la plupart des constructions en béton armé construites après 2003. Chaque classe de vulnérabilité peut être caractérisée par une probabilité de dommage.

À titre d'exemple, la figure 4-7 donne la probabilité de dommages probables pour une intensité VIII pour les classes de vulnérabilité A à E. par exemple, pour un séisme d'une intensité VIII et pour une classe de vulnérabilité E, il est supposé qu'aucun construction ne subisse de dégâts de degré 4 et 5 (D4+D5), 0.1% des bâtiments subiront des dommages de degré 3, 2% de degré 2, 21.85% de degré 2, et 75.43% de degré 0 ne subiront aucun dommage. Nous constatons aussi que les classes de vulnérabilité D et E ne subiront que des dommages légers, par contre les constructions de classe B et C subiront des dommages légers à modérés, et modérés à sévères pour les constructions de classe A.

Les histogrammes dans la figure 4-8 donnent une lecture détaillée de la distribution statistique du dommage par matériaux de construction, hauteur de la construction, l'époque de construction, et le niveau de la conception parasismique pour un scénario sismique d'intensité 8.

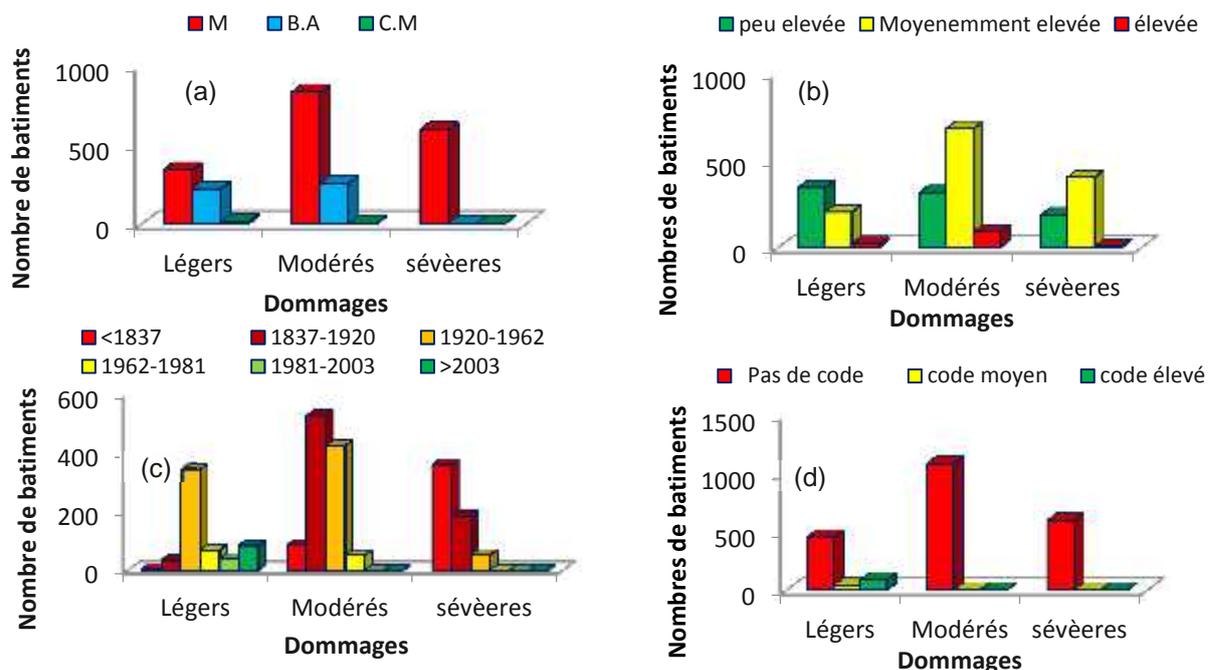


Figure. 4-8 : La distribution des dommages par la Méthode Risk-UE selon : (a) Matériaux de construction ;(b) la hauteur ;(c) époque de construction ;(d) niveau de code parasismique

Les histogrammes montrant l'influence des paramètres de base sur la distribution des dommages. Lorsque nous analysons la distribution des bâtiments selon les matériaux de Construction, et l'époque de construction, nous constatons une dominance des dommages modérés à sévères pour les bâtiments en maçonnerie datant de l'époque coloniale (avant 1962).

Pour l'époque après 1962 est caractérisée plus par des constructions en béton armé. Une nette distinction a été observée entre les constructions en béton armé construit après 1981 par rapport au reste, en termes de distribution des dommages.

Les mêmes résultats sont observés pour la distribution des dommages sismique selon le niveau de conception parasismique, cela peut être justifié par le concept suivi par la méthode Risk-UE qui tient compte du type constructif et de l'époque de construction pour prendre en compte l'évolution des dispositions parasismiques. Lorsque nous analysons la répartition des dommages, selon la hauteur des bâtiments (Fig.4-8.b), nous constatons une légère différence dans la répartition des dégâts par rapport aux autres paramètres ou l'influence de la hauteur n'apparaît que légèrement sur la distribution des niveaux de dommages. Cela est dû que la plupart

des constructions de plus de 6 niveaux sont construites en béton armé (65%) après 1962.

On constate aussi que les catégories les plus vulnérables, sont principalement les constructions en maçonnerie, sont constituées en grande. Ce sont ces catégories qui ont le plus de risque de subir des dommages de degrés 4 ou 5 et donc le plus grande risque de s'effondrer. La figure 4-9 montre une prédiction d'ensemble des dommages pour le bâti d'une partie de la ville de Constantine, pour différents scénarios sismiques

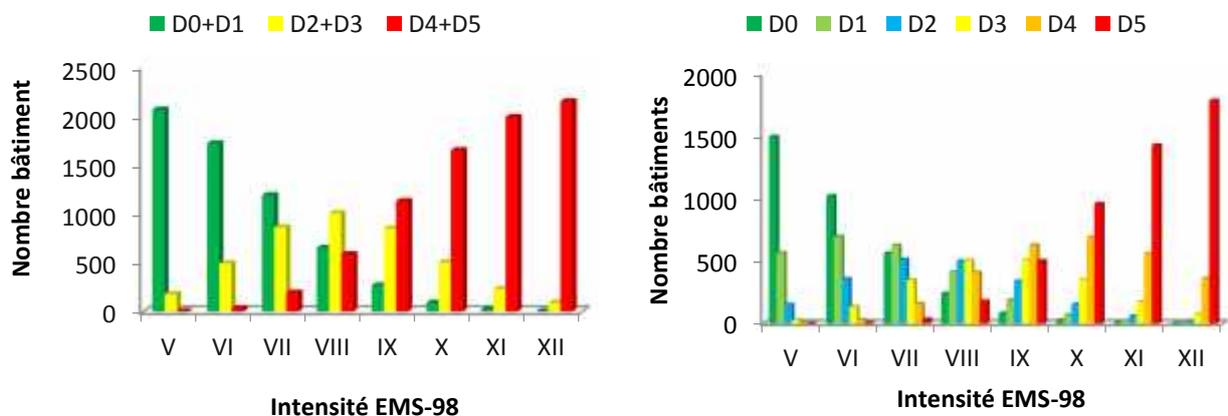


Figure. 4-9 : La distribution des dommages par la Méthode Risk-UE selon l'intensité sismique : (a) trois classe de dommage (D0+D1, D2+D3, D4+D5) ;(b) 5 classes de dommage (D0, D1, D2, D3, D4, D5).

L'analyse de la figure 4-9 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) ou bien en cinq degrés de dommages. L'impact de l'intensité sismique sur les dommages est assez remarquable .par exemple, dans le cas des séismes d'intensité forte (X, XI, XII), on peut s'attendre à ce que :

- 73% ,88%, et 95 % des constructions analysées subissent des dommages sévères (degrés 4 et 5), ce qui est habituellement considéré comme la perte totale du bâtiment.
- Environ 22%, 10%, et 0.04% des constructions analysées subissent des dommages modérés (degrés 2 et 3) Inferieure à 0.05% des constructions ne subissent que de légers dommages dans toute opération pour réduire le risque

sismique, la première étape consiste à protéger les bâtiments stratégiques existants contre les effets néfastes des futurs séismes.

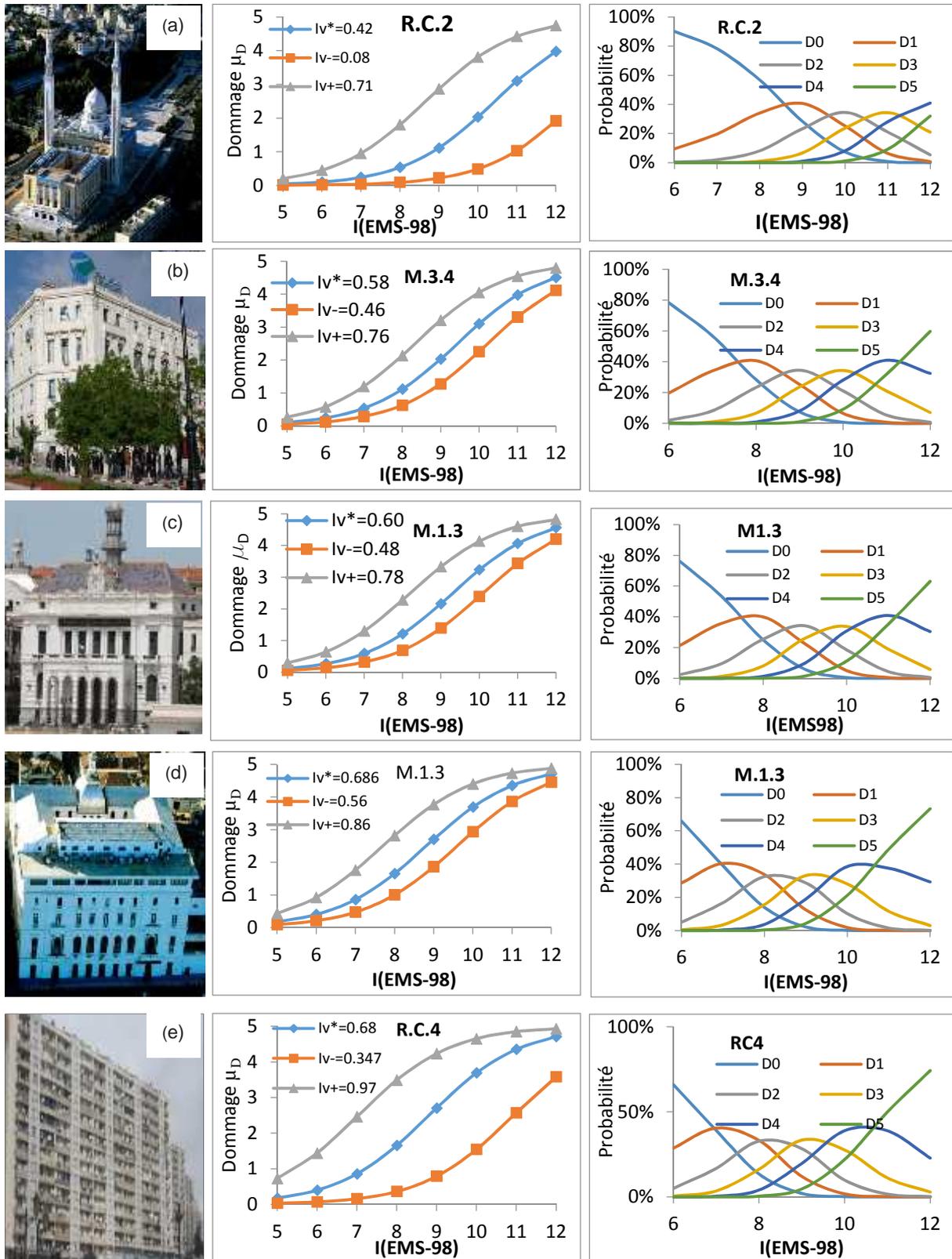


Figure. 4-10 : Méthode Risk-UE: (a) courbes de vulnérabilité pour différents types de construction en maçonnerie et en béton armé ;(b) courbes de fragilités pour différents type de construction.

La figure. 4-10 présente une évaluation des dommages sismique pour différents intensités avec la valeur la plus probable de l'indice de vulnérabilité (IV^*), et ses valeurs limites de la gamme plausible (IV^- , IV^+) pour quelques constructions stratégique ou d'importance vitale dans la gestion du risque sismique.

Cette figure présente les dommages probable pour la mosquée Elamir Abdelkader. Ce bâtiment est vraiment très impressionnant tant par ses dimensions et capacité (12000 personnes), que par la beauté de son architecture.

Les Figure b,c,d présentent respectivement la grande poste ,l'hôtel de ville ,et la préfecture (Wilaya) .ces trois bâtiments ont une importance vitale dans la gestion de crise . ou la préfecture et l'hôtel de ville accueillie la cellule de gestion de crise, et la poste assure les communications.

La dernière figure (Fig.4-10.e) présente un bâtiment collectif en 12 étages construits en 1958 au site Ciloc, comprend 120 logements, soit 600 à 700 personnes. Celle-ci a été choisie donc pour leur importance (nombre d'habitation), et la présence des risques prévisibles comme le glissement terrain.

Une fois la vulnérabilité et la probabilité de dommages sont calculées sur tout le territoire, il est possible de dessiner des cartes de dommage à l'aide d'un outil SIG pour but de distinguer les zones les plus endommagées en cas d'un séisme. Trois scénarios sismiques sont présentés ($I=VII$, $VIII$, IX) pour étudier les différentes situations sismiques probables pour la ville de Constantine. Figure.4.11.

Les dommages ont été étudiés selon leur distribution statistique, ce qui nous a permis une lecture de la variation urbaine du dommage à l'échelle du périmètre d'étude. La division de la zone d'étude à des sous zones homogène et l'utilisation de la représentation graphique du dommage par un dégradé de couleur habituellement utilisés par les organisme de contrôle algériennes (CTC,CGS) pour caractérisé les dommages sismique Facilite grandement la lecture de ces cartes .

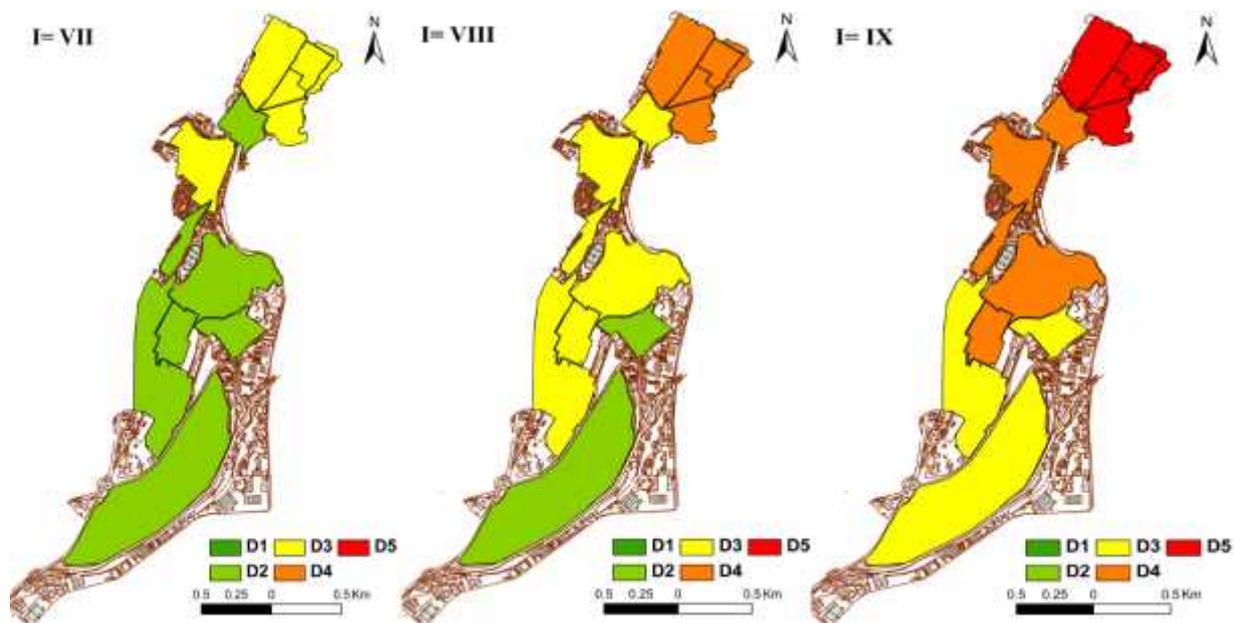


Figure. 4-11 : Répartition spatiale des classes de dommages à Constantine pour trois scénario de dommage d'intensité (VII ;VIII,IX).

En plus, parmi les principales objectives de cette section est d'estimer les dommages en termes de nombre de bâtiments subissant un certain niveau de degré de dommages .Fig.4-12.

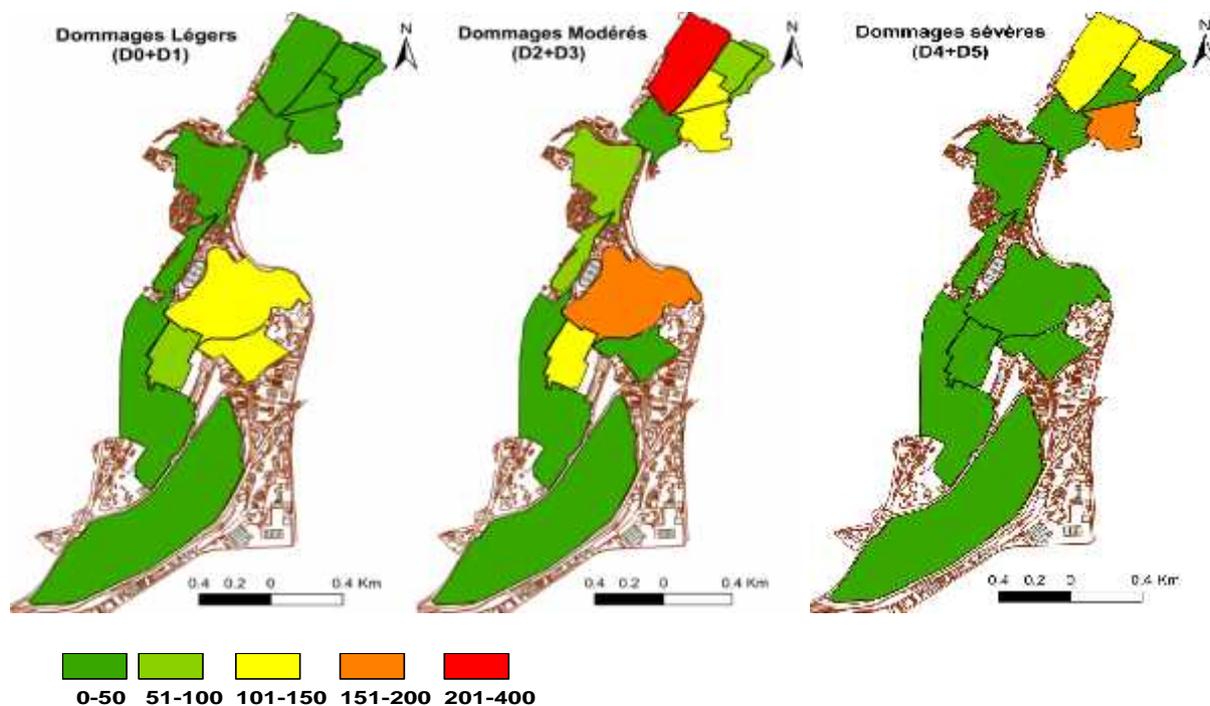


Figure. 4-12 : Répartition spatiale des dommages à Constantine pour un scénario de dommage d'intensité VIII (Séisme 1985).

. L'analyse de la figure 4-11 nous a permis d'estimer pour une intensité équivalente au séisme de 1985 quels seront les dommages aux constructions. Par exemple on peut s'attendre à ce que :

- Environ 29% (654) des constructions ne subissent que de légers dégâts ou pas de dommages (D0+D1)
- Environ 46% (1035) des constructions subissent des dégâts modérés (D3+D4), ce type de dégâts est considéré réparable.
- Environ 25%(563) des constructions subissent des dégâts sévères à complète (Degrés 4 et 5), ce qui est habituellement considéré comme des constructions à démolir.

Les figures 4-11 et 4-12 montrent que les dommages sismiques peuvent fortement varier d'une zone à l'autre :

- la partie la plus ancienne de la ville où se concentrent les constructions en maçonnerie présente la majorité des constructions gravement endommagées.
- On peut remarquer aussi que les zones où concentrent les constructions en béton armé ne subissent que peu des dommages sévères, Cette constatation permet de dire que les constructions en béton armé à Constantine présentent une certaine résistance parasismique ou la majorité se trouvent principalement dans les classes de vulnérabilité C et D.

4.3. Synthèse :

Dans ce chapitre nous avons mis en place une méthode européenne sophistiquée « Risk-UE » afin de générer des cartes de risque sismique à une partie de la ville de Constantine. Plusieurs scénarios de dommages ont été réalisés dans le cadre de cette thèse par cette méthode. Ce qui nous a permis d'identifier les constructions les plus vulnérables et de prévoir les dommages physiques attendus.

Dès que l'on souhaite analyser le risque sismique à Constantine par la méthode Risk-UE, nous sommes confrontés à plusieurs difficultés pour collecter les informations nécessaires

La méthode Risk-UE de niveau 1 demande une typologie plus précise du bâti, ou celle-ci tient compte non seulement des spécificités architecturales et constructives locales mais aussi des éléments structuraux qui peuvent influencer le comportement du

bâtiment face à une action sismique et qui peuvent être observés par inspection visuelle uniquement.

Pour surmonter le manque de données du bâtiment à une ville à sismicité modérée comme Constantine , où les moyens de diagnostic sont par conséquent limités, mais néanmoins concernés par des séismes historiques destructeurs, nous proposons dans le chapitre suivant une méthode innovante (ARL) utilise le principe de la fouille de données « datamining » qui s'appuyant sur quelques paramètres déjà disponibles ou facilement collectés

CHAPITRE 5 :

Analyse de la vulnérabilité sismique par la méthode ARL

5-1. Introduction :

En l'état actuel, le diagnostic du vieux bâti à l'échelle d'une agglomération par les méthodes macrosismiques (EX : la méthode Risk-UE) est impératif. Il est important de souligner que ces méthodes nécessitent des informations sur les bâtiments (structure, taille, matériaux de construction,...etc.) dont l'accès implique des ressources conséquentes (nécessite à des enquêtes très détaillées). En plus est une tâche qui s'étale dans le temps en raison des couts de données dont l'accès implique des ressources conséquentes, et des exigences de traitement (nécessite à des enquêtes très détaillées), parce que si l'on augmente le nombre de bâtiments par l'élargissement de la zone à évaluer, les ressources et la quantité d'informations requises sont également augmenté.

Nous proposons dans ce chapitre un modèle permettant d'évaluer et de comprendre le niveau de danger sismique dans la ville de Constantine, et d'émettre des prévisions de dommage à l'aide de quatre informations de base facilement accessibles mais fiables, plus un indicateur de vulnérabilité. Ces informations sont plus facilement disponibles au niveau d'une ville que l'information habituellement exigée par les méthodes traditionnelles (macrosismique).

Finalement, nous comparons ces résultats aux résultats obtenus par la méthode macrosismique Risk-UE. Les deux estimations sont sensiblement proches, mais l'estimation par la méthode ARL a exigé nettement moins de ressources que pour Risk-UE.

5.2. Étapes de la Méthode ARL :

La première étape dans cette approche (la phase d'apprentissage) met l'accent sur l'identification des relations (proxy) entre l'information sur les constructions

disponible s'extrait à partir de l'enquête (les quatre paramètres de base) et la classe de vulnérabilité selon EMS 98 pour chaque bâtiment dans la zone d'étude.

Dans cette phase seulement 30% de notre base de données est utilisée (données de formation). La deuxième phase, est une application de la relation trouvée dans la phase de l'apprentissage (Learning phase) qui utilise le reste de la base de données (70%). Les principales étapes de cette méthode proposée pour évaluer la vulnérabilité sismique des constructions sont présentées dans la figure 5.1.

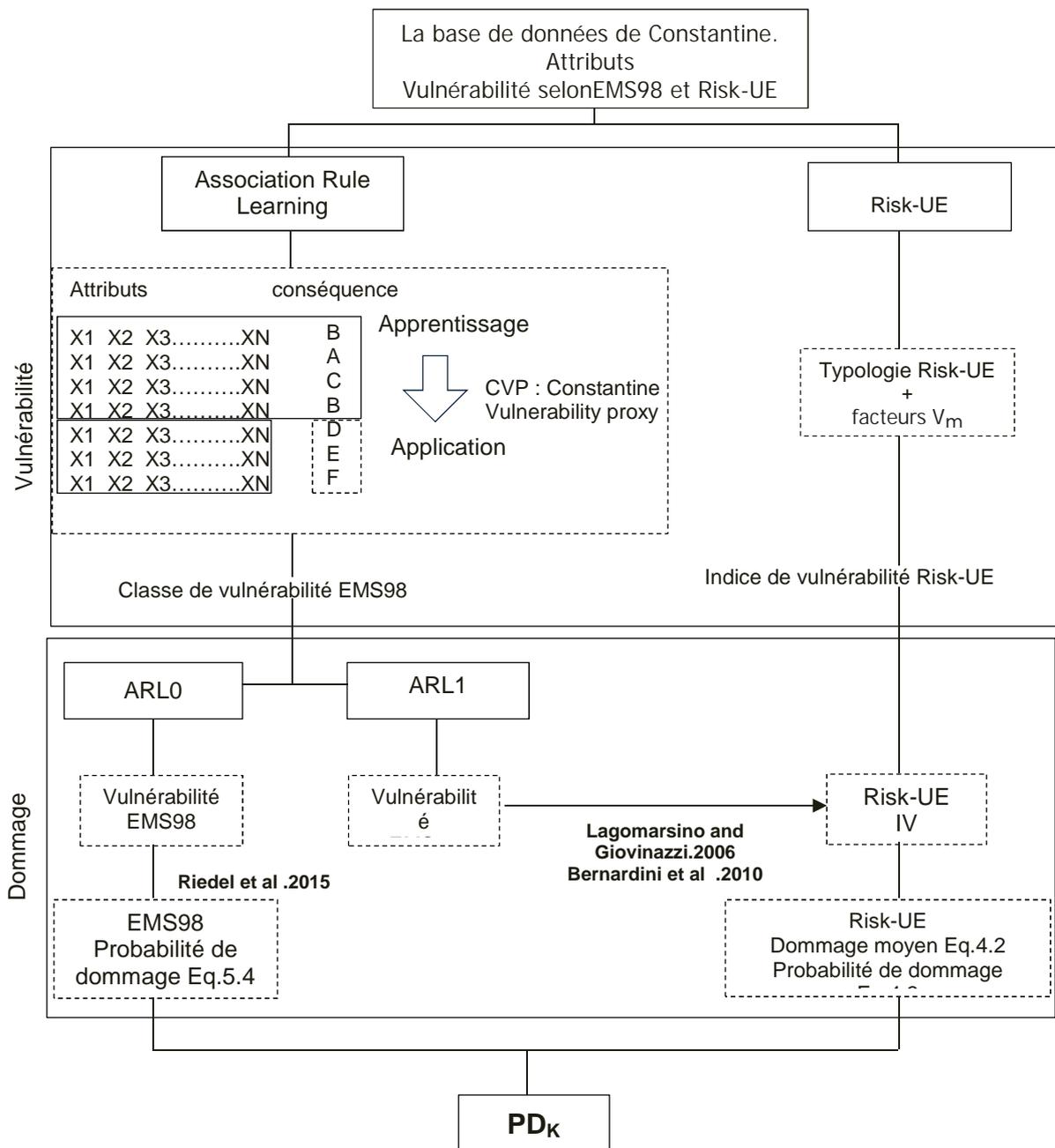


Figure.5.1. Étapes du processus ARL. (Guettiche et al ,2017)

La taille de l'échantillon influe fortement sur les tests de significativité statistique. Donc Pour identifier le proxy aussi bien que possible, trois règles ont été créées et respectées :

- 1) les classes de vulnérabilité selon EMS98 ne sont pas disponibles dans les données testées.
- 2) la base de données de formation n'est pas incluse dans les données de test.
- 3) la partie de la base de données (70%) a été testée et générée plusieurs fois aléatoirement.

5.2.1. La création de la base de données :

La méthode ARL consiste à définir la relation la plus performante entre les attributs (paramètres de base) et les classes de vulnérabilité. Pour cela, nous avons créé une base de données de taille importante avec une description générale de la base de données représentée sur la Figure. 5-2.

Sur cette base de données, les bâtiments sont regroupés selon quatre attributs :

- (1) Époque de construction divisée selon l'histoire urbaine de la ville et l'évolution du règlement parasismique Algérien.
- (2) Le nombre d'étages, défini en fonction de l'intervalle donné dans la méthode RISK-UE, c'est-à-dire, de faible hauteur (1-2), moyenne hauteur (3-5) et de grande hauteur 6.
- (3) Le type de matériau trouvé dans la zone étudiée, c'est-à-dire, Béton armé (RC), maçonnerie non renforcée et acier.
- (4) la forme du toit (en pente ou plat).

Ces quatre attributs ont été choisis pour accélérer l'estimation de la vulnérabilité sismique, et réduire les incertitudes pour nos résultats à l'échelle urbaine. Les données recueillies comprennent une multitude d'informations décrivant la typologie du bâtiment et l'état des éléments résistants de la construction. La figure 5-2 représente une répartition de ces quatre paramètres sur les constructions enquêtées.

- Au total, 78% des bâtiments étudiés étaient en maçonnerie non renforcés, 21% de béton armé et seulement 1% d'acier. La base de données en finale contient 2252 bâtiments :
- 448 construits avant 1837, composé principalement de bâtiments en maçonnerie non renforcés en adobe et en Pierres appareillées.
- 744 construits entre 1837 et 1920, correspondant à la maçonnerie non renforcée et aux bâtiments en béton armé.
- 819 entre 1921 et 1962, correspondant à la généralisation de l'utilisation de béton armé comme matériaux de construction sans application de mesures de code parasismique.
- 119 constructions construites entre 1963 et 1981.
- 38 constructions construites entre 1982 et 2003.
- 84 constructions construites après 2003. construits selon les nouveaux règlements parasismiques (RPA2003)

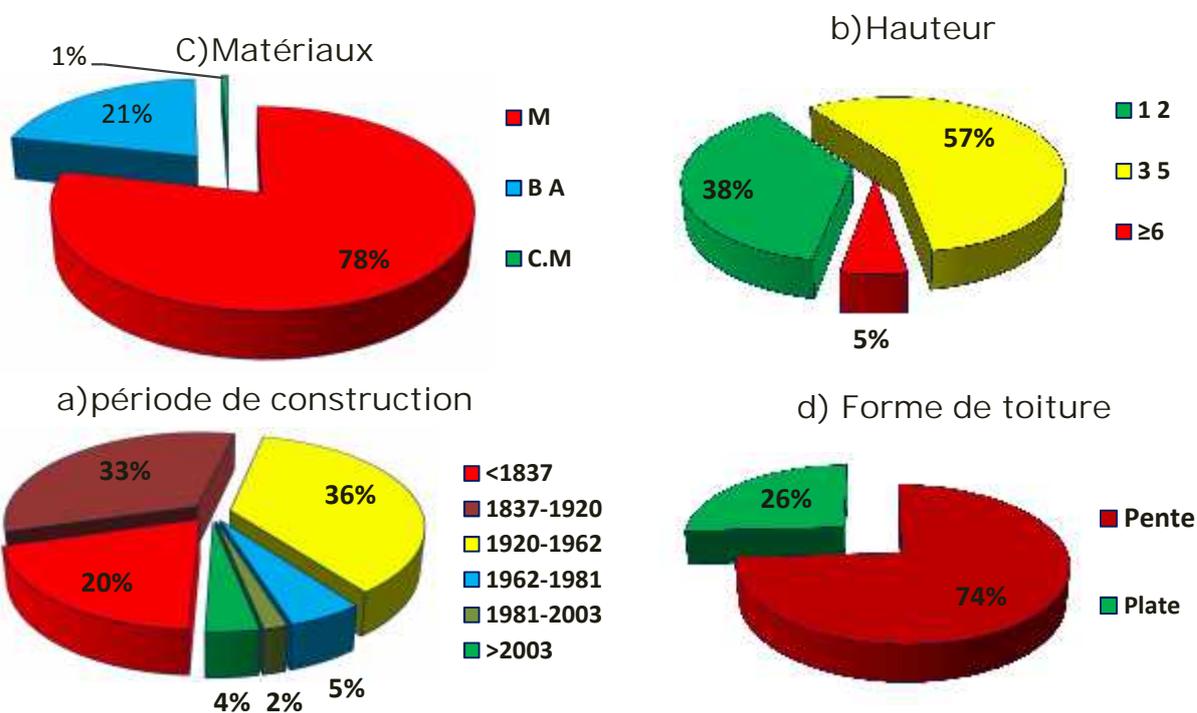


Figure. 5-2 : Description des bâtiments étudiés selon quatre attributs : période de Construction, nombre d'étages, type de matériau et forme du toit.

La plupart des constructions des trois dernières périodes sont des bâtiments en béton armé. Les deux premiers Correspondent aux époques ottomane et française, représentant environ 50% des bâtiments étudiés ici.

Presque tous les bâtiments (94%) ont été construits avant le premier code parasismique algérien en 1981, 2% ont été conçus entre 1981 et la publication du dernier code parasismique algérien en 2003, ces bâtiments sont considérés comme des constructions avec un niveau de conception parasismique moyen selon la méthode Risk-UE (code modéré), et seulement 4% des constructions étudiées Construit après 2003, considéré comme de haute conception parasismique.

Selon RPA03, la vulnérabilité de la construction augmente avec l'augmentation du nombre d'étage. Dans la zone d'étude, 2130 (95%) des bâtiments sont inférieur à six étages (faible à moyen hauteur). Les constructions de grande hauteur sont limitées dans la zone d'étude (Environ 120 immeubles), qui ne représente que 5% du bâtiment étudiés.

La forme du toit est indispensable pour définir Une relation la plus performante entre les attributs et la classe de vulnérabilité. La valeur réelle de ce paramètre :

- 1) Que l'on peut obtenir sans enquête par des techniques de télédétection (images satellites ou aérienne).
- 2) La forme du toit est indirectement liée au matériau de construction ce qui nous facilite la détections des erreurs dans la définition de la typologie constructive de la construction.

5.2.2. La première phase : Apprentissage (Learning) :

Une fois que la base de données est prête, une phase d'apprentissage est appliquée sur un échantillon de la base de données. En outre, La précision de la classification est sensible à la taille de l'échantillon choisi.

En conséquence, après plusieurs échantillons testés, une d'échantillon d'apprentissage représentant 30% de la base des données totale a été choisi.

Ensuite, nous avons sélectionné 2500 échantillons de façon aléatoire, chacune représentant 30% de l'ensemble de la base de données.

Dans cette phase, plusieurs combinaisons ont ensuite été testées considérant un ou plusieurs des attributs de base (la période de construction, le nombre d'étages, matériaux, et la forme du toit). Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 5-3 :

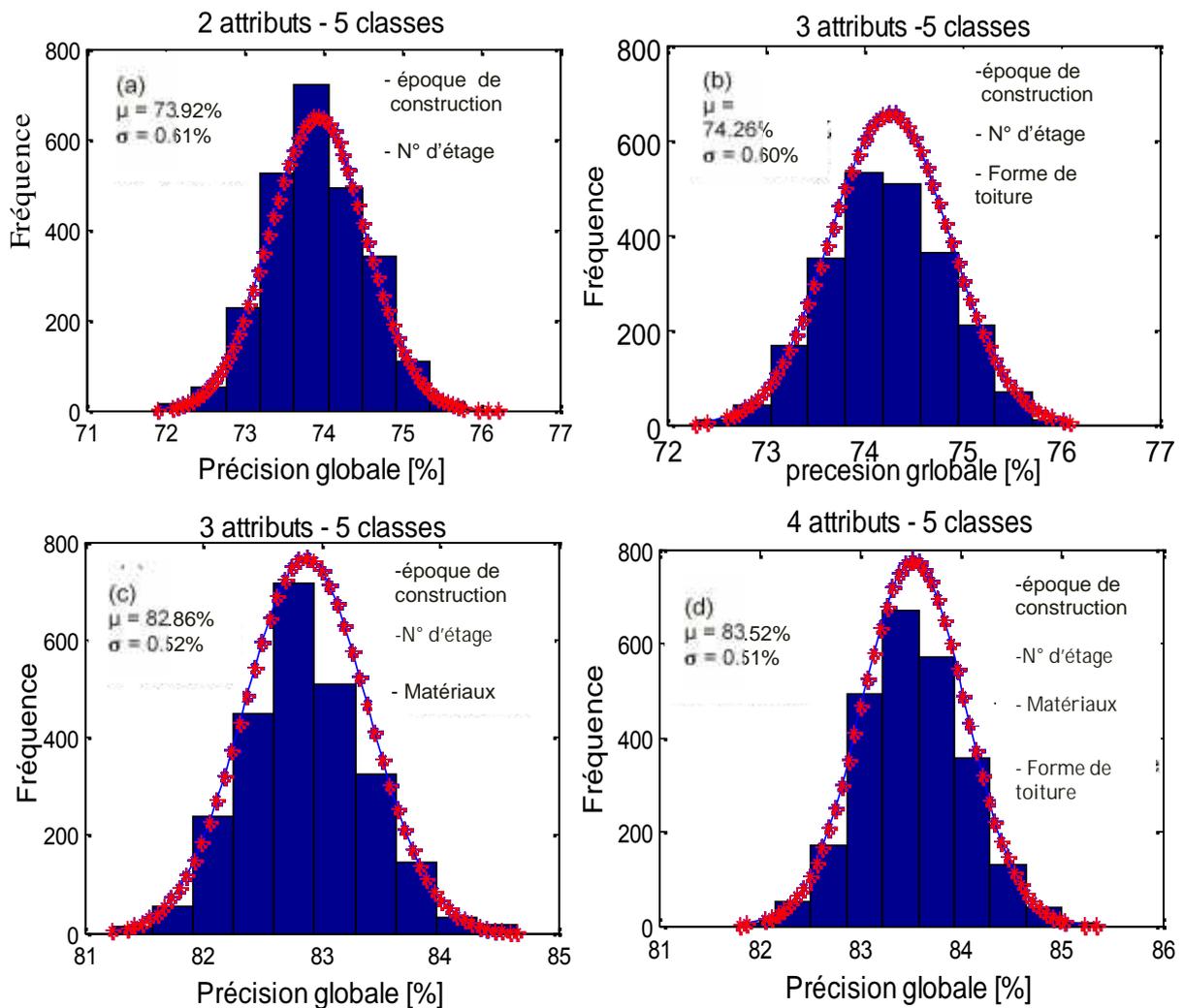


Figure. 5-3 : Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine pour plusieurs combinaisons: (a) la période de construction et le nombre d'étages; (b) la période de construction, le nombre d'étages et le matériau; (C) de la période de construction, le nombre d'étages et la forme du toit; (D) de la période de construction, le nombre d'étages, le matériau, et la forme du toit.

Dans cette recherche, cinq classes de vulnérabilité ont été trouvée sur la zone d'étude, qui ont été prédéfini par une étude détaillée basé sur l'échelle

macroismique Européenne EMS 98, de A à F avec de la plus vulnérable à la plus résistante.

La figure 5-3 résume les précisions des résultats obtenus en utilisant un proxy de vulnérabilité obtenu par la méthode ARL, ou la précision globale est le pourcentage des classes de vulnérabilité correctement classées. Tout d'abord, pour tous les cas, la variabilité de la distribution de précision est inférieure à 1 % ($\sigma \leq 0,61\%$).

En plus, les résultats obtenus sont considéré acceptables avec une moyenne de précision supérieure à 73%, en utilisant seulement deux paramètres (la période de construction et le nombre des étages). Ce résultat a prouvé le poids de ces deux paramètres dans l'analyse de la vulnérabilité sismique.

Avec l'ajout d'un troisième paramètre (la forme de toiture), la précision des constructions correctement classé a été légèrement augmentée à 74,22% suggérant une corrélation de cet attribut avec les autres. L'avantage primordial de ce dernier paramètre c'est qu'on peut toujours l'obtenir sans enquête par des techniques de télédétection.

La précision des résultats atteint la valeur 83% lorsqu'on ajoute le matériau de construction. Cet attribut est considéré comme un paramètre clé, ayant un poids important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique. Cependant, la période de construction et les matériaux de constructions sont deux attributs dépendants (par exemple, 98% des bâtiments construits avant 1920 étaient des constructions en maçonnerie, et après 1962 étaient 100% en béton armé), En déduire que cette avantage de ce paramètre en termes d'exactitude est plutôt limité. Cela est certainement l'attribut le plus difficile à évaluer avec précision

Cependant, la précision globale dépend : des informations sur la construction, la variabilité et la taille de l'échantillon. Dans tous les cas, l'effet de la variabilité de l'échantillon sur nos résultats (moyenne de précision) est très faible, bien que nous sommes générés aléatoirement 2500 fois l'échantillon choisi.

		P(A)	P(B)	P(C)	P(D)	P(E)
<1837]	- [1-3[étage	0.827	0.173	0	0	0
<1837]	- [3-5[étage	0.833	0.167	0	0	0
<1837]	-] 6[étage	/	/	/	/	/
1837-1920]	- [1-3[étage	0.158	0.710	0.053	0	0.079
1837-1920]	- [3-5[étage	0.238	0.720	0.042	0	0
1837-1920]	-] 6[étage	0.200	0.400	0.400	0	0
1920-1962]	- [1-3[étage	0.098	0.727	0.168	0	0.007
1920-1962]	- [3-5[étage	0.103	0.603	0.294	0	0
1920-1962]	-] 6[étage	0.158	0.052	0.790	0	0
1962-1981]	- [1-3[étage	0	0.181	0.455	0	0.364
1962-1981]	- [3-5[étage	0	0	1.000	0	0
1962-1981]	-] 6[étage	0	0	1.000	0	0
1981-2003]	- [1-3[étage	0	0	0	1.000	0
1981-2003]	- [3-5[étage	0	0	0.250	0.667	0.083
1981-2003]	-] 6[étage	0	0	0	1.000	0
>2003[	- [1-3[étage	0	0	0	0	1.000
>2003[	- [3-5[étage	0	0	0.050	0	0.950
>2003[	- ] 6[étage	0	0	0	0	1.000

Tableau. 5-1 : Probabilité conditionnelle pour chaque classe de vulnérabilité en fonction des paramètres de constructions (période de construction, le nombre d'étages) obtenus en utilisant la méthode ARL. (Note : / pas de données).

5.2.3. La deuxième phase : application :

Après la phase d'apprentissage (Learning phase), le proxy de vulnérabilité (CVP) a été testé pour le reste de la base des données (70%). Le tableau 5-1 montre les valeurs conditionnelles de classification dans les classes de vulnérabilité EMS 98 (la probabilité d'être en (A, B, C, D, ou E) avec les 18 combinaisons possibles, pour les deux paramètres (période de construction, le nombre d'étage).

Par exemple, une construction choisie aléatoirement construit avant 1837 et une hauteur inférieure à 2 étages, elle a une probabilité d'être dans la classe A de 82,7%

et dans la catégorie B de 17,3%. Ce Proxy est ensuite appliqué sur le reste de la base de données.

Les bâtiments ont ensuite été regroupés en sous-catégories ou, dans notre cas, en unités géographiques. La vulnérabilité au sein de chaque unité a ensuite été exprimée comme la probabilité d'être dans la classe j, comme suit :

$$P_j(Y) = \sum_{i=1}^n \frac{N_{ji}P(Y|X_i)}{N} \quad (5.1)$$

Avec :

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

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

$P(Y | X_i)$: la valeur de proxy dans le tableau. 5.2

N : le nombre total des constructions.

n : nombre des combinaisons possibles.

		Vulnérabilité estimée (classification ARL)					
EMS-98 CLASSE		A	B	C	D	E	Exactitude
vulnérabilité (réelle)	A	261	191	6	0	0	56.99%
	B	49	706	10	1	1	92.05%
	C	3	130	121	1	2	47.08%
	D	0	0	1	22	0	95.65%
	E	0	7	2	2	60	84.51%
	Exactitude	83.39%	68.28%	86.43%	84.62%	95.24%	74.24%

Tableau. 5-2 : Exemple d'une matrice de confusion obtenue avec la méthode ARL pour classer les constructions à Constantine en classes de vulnérabilité selon EMS 98 basé sur 3 attributs.

Le tableau 5.2 montre un exemple d'une matrice de confusion qui compare la vulnérabilité « estimée » avec la vulnérabilité « réelle » des constructions obtenus par les enquêtes sur site pour trois attributs (période de construction, le nombre d'étages, la forme du toit), et cinq classes de vulnérabilité. Les valeurs en diagonale sont les constructions qui ont été attribuées correctement.

Dans cet exemple, le pourcentage des constructions correctement classées dans leur classe de vulnérabilité réelle est de 74,24%. La Précision est plus faible pour les classes A et B : ou 261 constructions de classe A ont été correctement classés, mais 191 et 6 constructions ont été mal classés en B et C respectivement. En plus 706 bâtiments de classe B ont été correctement classés, mais 49 et 10 ont été mal classés en A et C, respectivement.

Comme observé sur terrain , la distinction entre les constructions ont des classes de vulnérabilité A et B est difficile en raison de la vulnérabilité équivalente associée aux différents types de constructions, selon EMS 98. La plupart des bâtiments de classe A sont en fait mal classés en B et nous pouvons améliorer la précision de la classification par la fusion de ces deux classes.(Figure5-4)

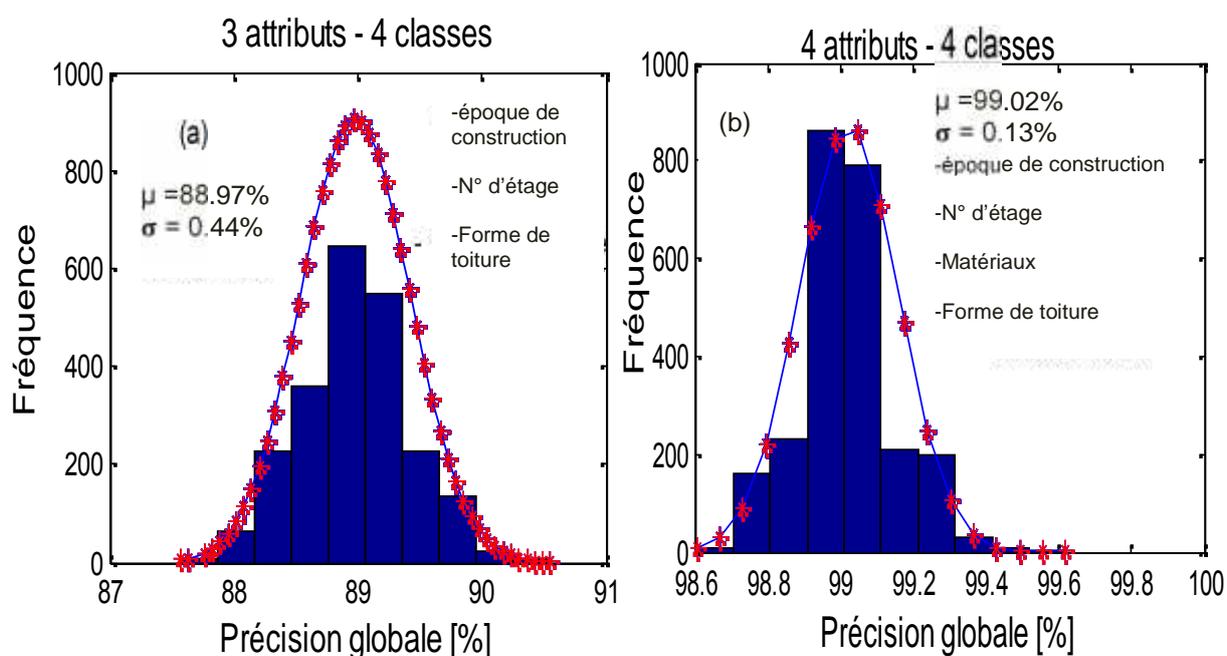


Figure. 5-4 : Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine avec la fusion des classes A et B, et pour deux combinaisons : (a) la période de construction, le nombre d'étages et la forme du toit ; (b) de la période de construction, le nombre d'étages, le matériau, et la forme du toit.

La Figure 5- 4 montre la précision globale de la classification compte tenu de quatre classes (après la fusion des classes A et B). Considérant 3 attributs (période de construction, le nombre d'étages, et la forme du toit), la précision augmente de 74.26% à 88.97%.

Si on ajoute les matériaux de construction, la précision atteint une valeur maximale (99%), avec une très légère variation ($\epsilon = 0,13\%$).

Ensuite, Les résultats extraits des matrices de confusion a été géolocalisés par l'intégration (distribution de classe EMS 98) dans un système d'information géographique (SIG) pour produire des cartes de vulnérabilité.

La zone d'étude a été divisée à trois grandes zones (zone 1 : centre-ville "Rocher", zone 2 : Belle Vue et Koudiat –Aty ; zone 3 : la cité 20 Août et Ben Boulaid, pour faire ce découpage on est pris en considération l'évolution urbaine de la ville. Voir la figure 5-5.

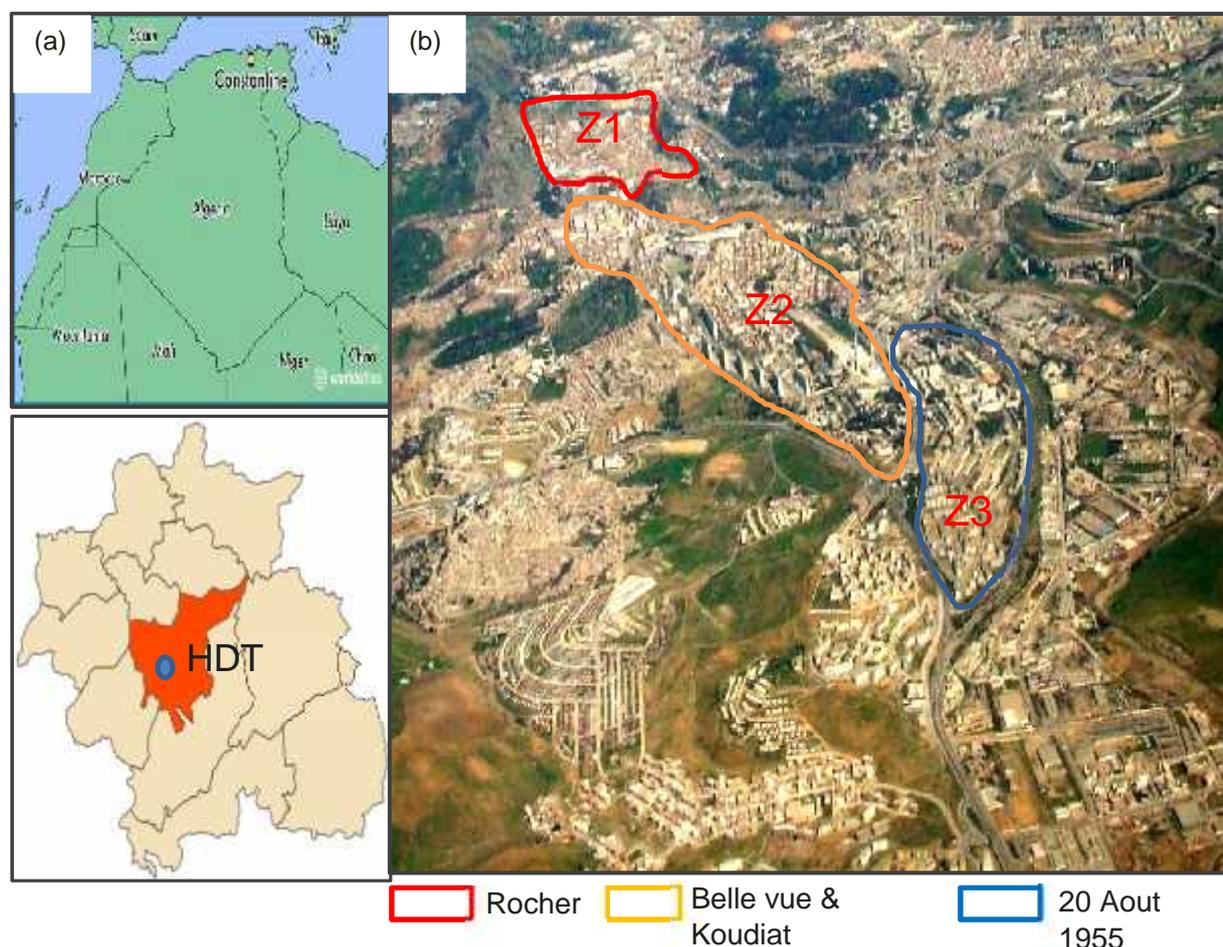


Figure. 5-5 : Vue globale sur : (a) l'emplacement de la ville de Constantine (b) L'imagerie aérienne et vue d'ensemble de la zone d'étude à Constantine, Algérie.

5.3. Évaluation des Dommages physiques :

L'Évaluation des dommages physiques, potentiels selon différents degrés, est obtenue en se basant sur deux niveaux d'analyse de la méthode ARL (ARL0 et ARL1) :

- La première approche nommée ARL0 (niveau 0) est une approche probabiliste utilisant des matrices de probabilité de dommages issues directement du retour d'expérience et des estimations de dommages après plusieurs séismes. Le concept de base est le suivant : « il est possible de prévoir, pour une intensité donnée, la distribution probable des dommages des constructions. ».

La probabilité dommages pour une intensité donnée $P_{EMS98}(D_k)$ est la calculé par l'équation :

$$P_{IEMS98}(D_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=A}^{i=E} N_i P(D_k | i, I_{EMS98}) \quad (5.4)$$

Ou :

N : Le nombre total des constructions

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

$P(D_k | i, I_{EMS98})$: la probabilité de dommages de degré D_k pour une classe de vulnérabilité i et intensité donnée en EMS 98 « $I, EMS 98$ » donnée aux tableau. 5-3

- La deuxième approche nommée ARL1 (niveau 1) est une approche qui se base sur le modèle de dommage de la méthode européenne Risk-UE (voir L'équation 4.2). L'approche ARL1 utilise des courbes de vulnérabilité se distinguant des précédentes (ARL0) en donnant le dommage moyen « μ_D » en fonction du niveau d'agression sismique « intensité »

A		Damage grade					
		D0	D1	D2	D3	D4	D5
EMS98 Intensité	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
	VII	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05	0.00
	VIII	0.00	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05
	IX	0.00	0.00	0.05	0.25	0.35	0.35
	X	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.80
	XI	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	

B		Damage grade					
		D0	D1	D2	D3	D4	D5
EMS08 Intensité	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
	VII	0.25	0.35	0.35	0.05	0.00	0.00
	VIII	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05	0.00
	IX	0.00	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05
	X	0.00	0.00	0.05	0.20	0.40	0.35
	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	

C		Damage grade					
		D0	D1	D2	D3	D4	D5
EMS98 Intensité	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	0.60	0.35	0.05	0.00	0.00	0.00
	VI	0.25	0.35	0.35	0.05	0.00	0.00
	IX	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05	0.00
	X	0.00	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05
	XI	0.00	0.00	0.00	0.10	0.55	0.35
XI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.95	

D		Damage grade					
		D0	D1	D2	D3	D4	D5
EMS98 Intensité	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
	VI	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
	IX	0.25	0.35	0.35	0.05	0.00	0.00
	X	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05	0.00
	XI	0.00	0.05	0.20	0.35	0.35	0.05
XI	0.00	0.00	0.05	0.05	0.10	0.80	

E		Damage grade					
		D0	D1	D2	D3	D4	D5
EMS98 Intensité	V	1.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
	VI	1.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
	VII	1.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
	VIII	0.95	0.05	0.00	0.000	0.00	0.00
	IX	0.60	0.35	0.05	0.000	0.00	0.00
	X	0.25	0.35	0.35	0.050	0.00	0.00
	XI	0.05	0.20	0.35	0.350	0.05	0.00
	XII	0.00	0.00	0.05	0.050	0.20	0.70

Tableau 5- 3 : Distribution des dommages pour différentes classes de vulnérabilité et différentes intensité suivant l'échelle macrosismique européenne, EMS 98.

Enfin, nous avons comparé les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité obtenus par les méthodes ARL0 et ARL1 avec les valeurs moyennes de la vulnérabilité obtenues par la méthode Risk-UE.

Après avoir attribué des classes de vulnérabilité et des indices de vulnérabilité pour les constructions à Constantine, des dommages ont été calculé suivant les deux méthodes (ARL0, AR1).

5.4. Validation des résultats :

Pour l'appréciation de la robustesse des résultats, les résultats obtenus par la méthode ARL ont été comparés avec les résultats obtenus par la méthode sophistiqué européenne Risk-UE –LM1 présentées dans le chapitre précédent.

5.4.1 Évaluation de la vulnérabilité sismique par la méthode ARL :

La vulnérabilité d'un bâtiment dans la méthode Risk-UE-LM1 est évaluée en fonction de sa typologie et ses facteurs aggravants (hauteur, irrégularités en plan et en élévation, interaction entre bâtiments, État d'entretien...et.), pour but de quantifier la vulnérabilité par un indice de vulnérabilité IV. Pour la méthode ARL la vulnérabilité des constructions a été évaluée par les classes de vulnérabilités. La distribution des classes de vulnérabilité des constructions sur la ville de Constantine par la méthode Risk-UE-LM1 et la méthode ARL a été présenté sur la figure 5-6.

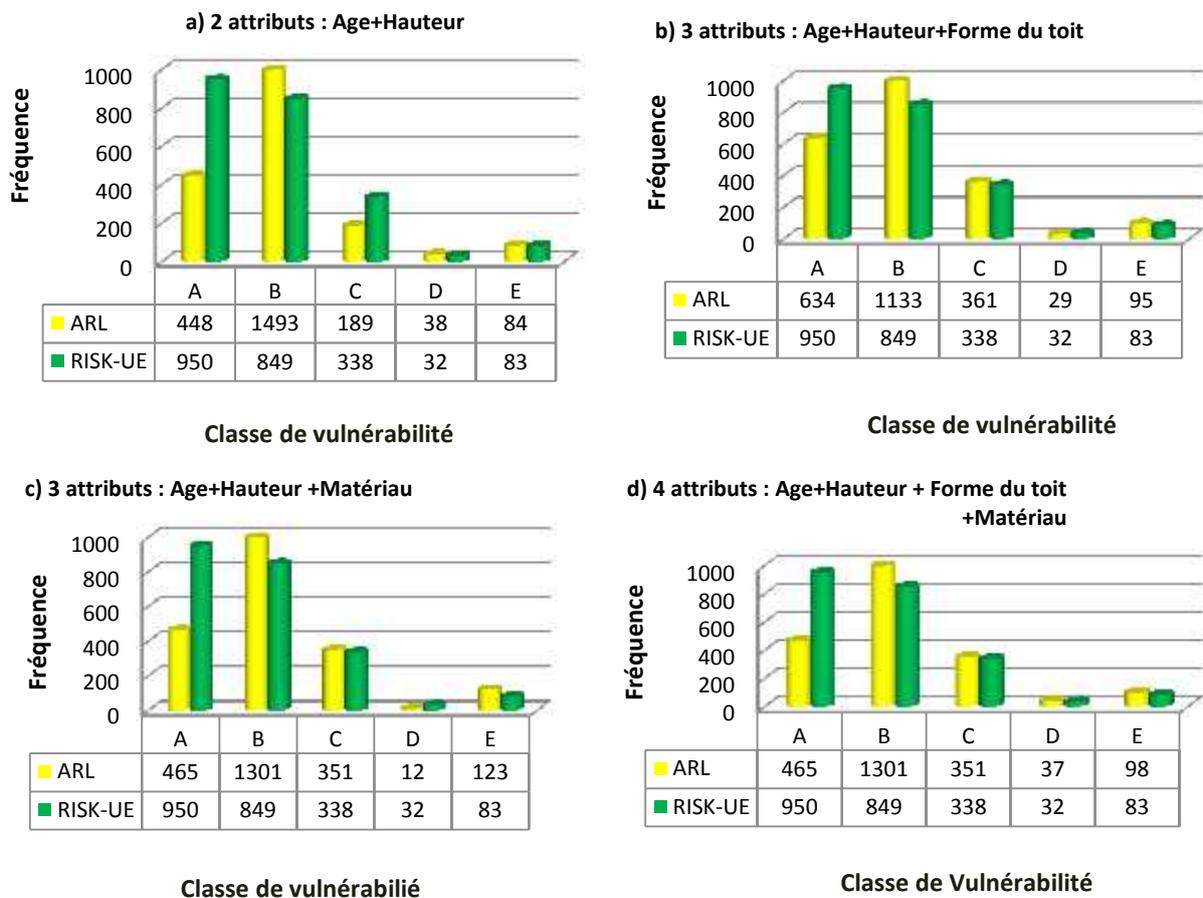


Figure. 5-6 : Comparaison des résultats des deux méthodes (RISK-UE LM1 et ARL) en termes de classe de vulnérabilité EMS 98.

La figure 5-6 présente la distribution des constructions à Constantine en fonction de la classe de vulnérabilité selon les deux méthodes Risk-UE et ARL. Une différence remarquable entre les deux méthodes dans la distribution des classes A et B.

Une légère différence entre les deux méthodes pour la distribution des classes de vulnérabilité C and D. il est important de noter que la différence entre les deux méthodes diminue avec l'augmentation le nombre des paramètres. Ces résultats obtenus par la matrice de confusion tableau. 5-3.

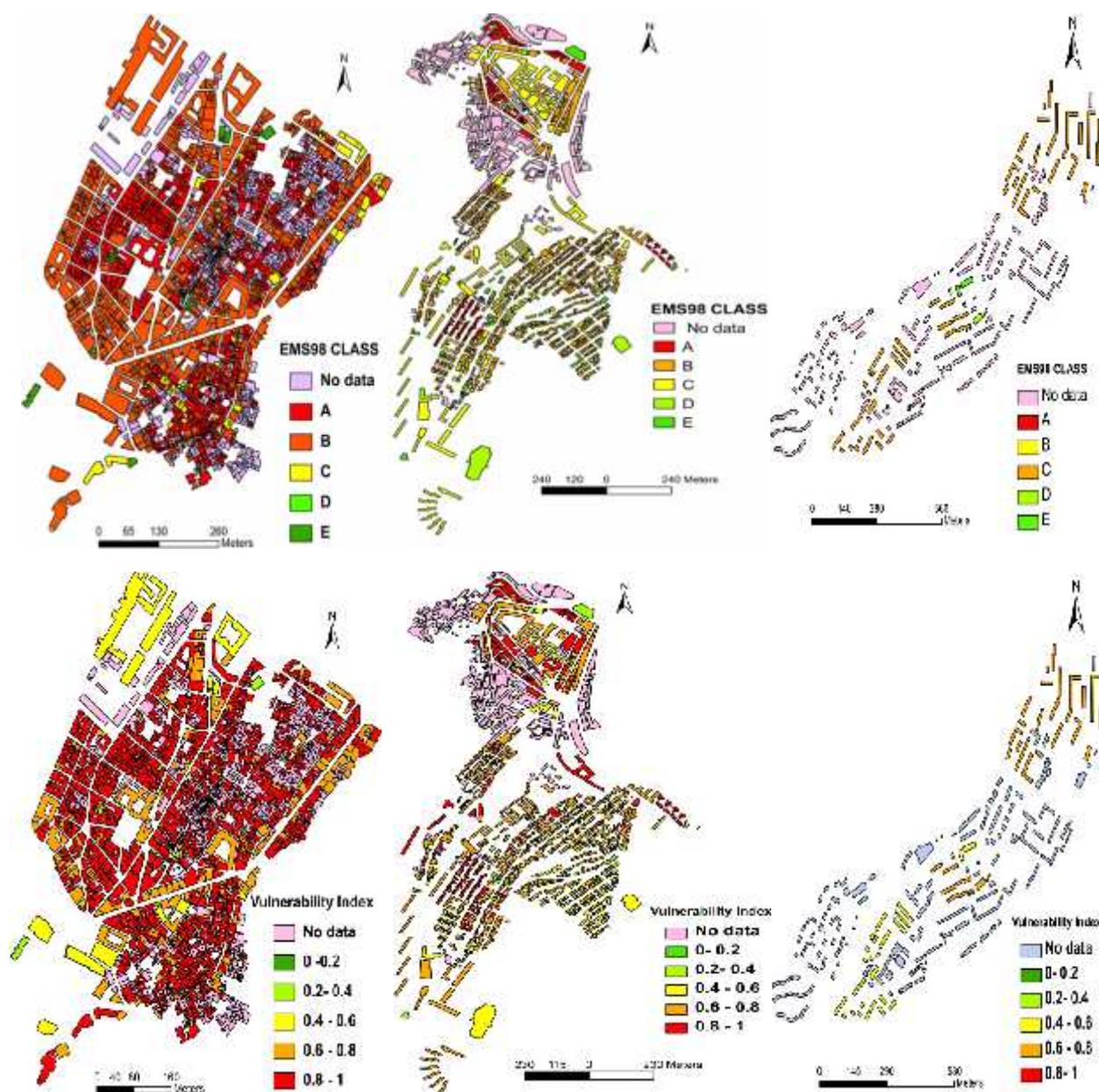


Figure.5-7 : Répartition de vulnérabilité sismique des constructions dans les zones 1, 2 et 3 de Constantine, représentés par les classes de vulnérabilités obtenues par la méthode ARL et par les indices de vulnérabilité obtenus par la méthode Risk-UE.

Figure 5-7 représente la répartition des classes de vulnérabilité à Constantine en utilisant le proxy obtenu par la méthode ARL considérant deux attribues (Période de construction, nombre d'étage) et la distribution de l'indice de vulnérabilité sismique calculée par la méthode Risk-UE.

Cependant, dans les deux cas, la représentation graphique montre clairement que les zones urbaines critiques (vulnérabilité élevée) se sont les zones où concentre les constructions en maçonnerie construits avant 1962.

Selon Risk-UE, Près de 80% des constructions ont un indice de vulnérabilité "IV" supérieur à 0,70, ce qui équivaut à des classes de vulnérabilité A et B. En comparaison, 78% des constructions sont dans des classes A et B selon la méthode « ARL », ce qui confirme l'efficacité de cette méthode pour évaluer la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine.

Nous observons que la zone 1, ce qui correspond au centre historique de la ville de Constantine(le Rocher), est le plus vulnérable, avec des classes A et B. Cette zone a été construite avant 1837 et partiellement entre 1837 et 1920, avec 94% des constructions en maçonnerie. Le reste a été construit avant le premier code sismique algérien en 1981 (RPA, 1981).

Dans la zone 2, qui construit entre 1920 et 1962, le proxy ARL classe la majorité des constructions de la partie nord de la zone (Coudia-Aty) en classes A et B, et un mélange de toutes les classes pour la zone sud (Bellevue). Ceci est la zone la plus hétérogène, au sein de laquelle toutes les périodes de construction sont représentées.

La partie moderne de la ville correspond à la zone 3, urbanisée principalement entre 1962 à 1981, composée uniquement de bâtiments en béton armé et caractérisée par les classes les moins vulnérables (C et D).

Sur la base de la corrélation entre les indices de Risk-UE et les classes EMS 98, la distribution de vulnérabilité est à peu près similaire, avec une légère différence dans la répartition géographique. Une comparaison construction par construction pourrait être menée, mais afin d'être compatible avec l'approche statistique nécessaire pour évaluer la vulnérabilité à l'échelle globale, la comparaison sera basée sur la

probabilité de dépassement d'un certain niveau de dommages dans une unité géographique.

5.4.2. Probabilité de dommage sismique :

La probabilité « $P(D_k)$ » de dépassement un niveau de dommages « D_k » a été calculé selon trois approches différentes : la méthode Risk-UE (Eq.4-3), ARLO et ARL1. Pour cette comparaison, seule l'intensité sismique est considérée Sans tenir compte éventuellement des effets supplémentaires tels que les effets du site, la non-linéarité du sol ou les glissements de terrain qui pourraient modifier le risque sismique.

Afin de vérifier la pertinence des méthodes ARL en termes de prédiction des dommages, nous avons calculé l'erreur total absolu « » pour les dommages prédits « $P(D_k)$ » compte tenu de toutes les degrés de dommages « k » et pour plusieurs scénarios sismique (V ,VI,...,XII) .les résultats des trois méthodes sont représentés sur la figure 5-8:

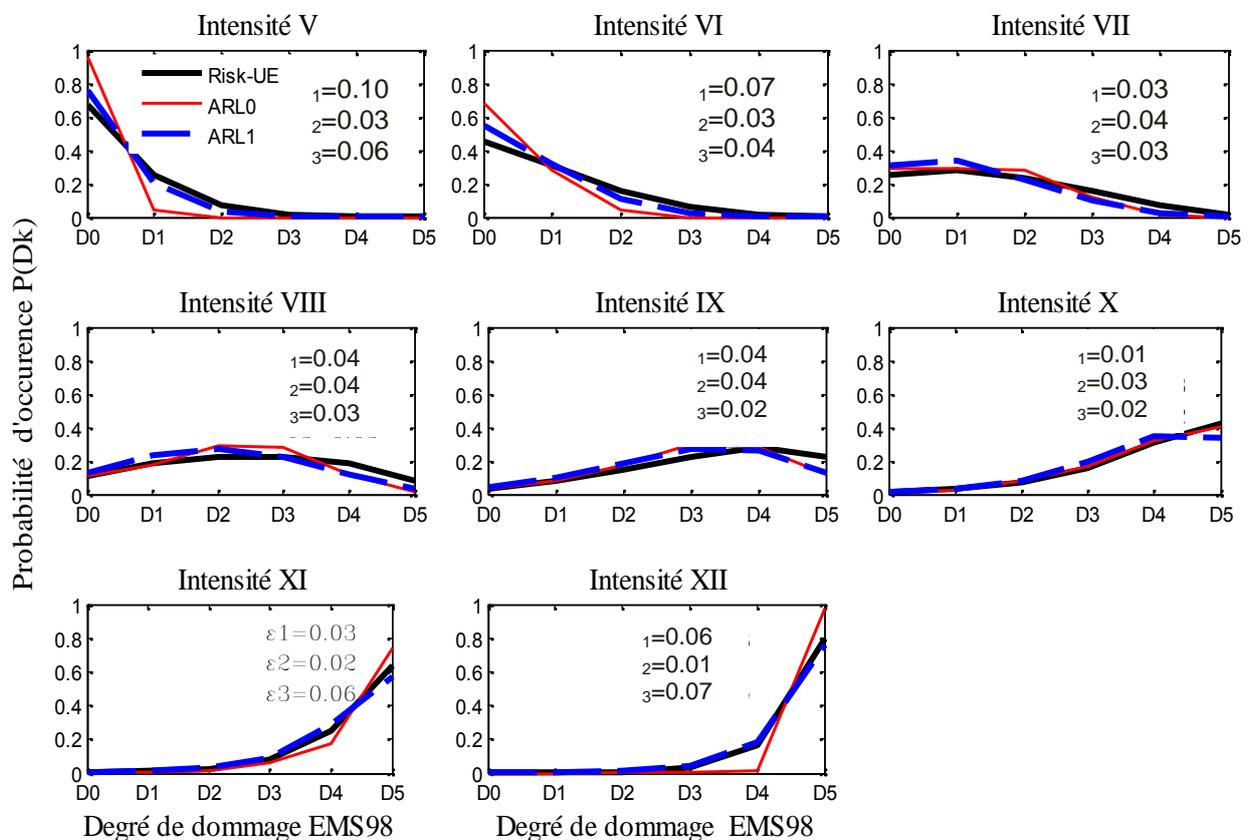


Figure 5-8 : Probabilité de dépassement un niveau de dommage $P(D_k)$ pour des intensités entre V à XII calculées avec les méthodes : ARLO, ARL1 Risk-UE.

ϵ_1 : l'erreur entre Risk-UE et ARLO ; ϵ_2 : l'erreur entre ARL1 et Risk-UE ; ϵ_3 : l'erreur entre ARLO et ARL1.

Dans l'ensemble, nous avons trouvé $\epsilon_2 < \epsilon_1 < \epsilon_3$. Les différences entre Risk-UE et ARL1 (ϵ_2) sont principalement dues à la différence entre les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique ; les différences entre ARLO et ARL1 (ϵ_3) sont dues au modèle de calcul des dommages avec la même vulnérabilité ; et les différences entre Risk-UE et ARLO (ϵ_1) sont la combinaison les deux raisons précédents.

Nous constatons que pour toutes les intensités (Fig.5-8), l'erreur absolue est très faible, avec les plus grandes valeurs des deux intensités extrêmes égales à 0,10, 0,07, 0,03 et 0,06 pour ϵ_1 , 0,06, 0,04, 0,06 et 0,07 pour ϵ_3 pour des intensités de V, VI et XI et XII, respectivement. La plus petite erreur correspond à ϵ_2 , qui présente la différence entre la méthode Risk-UE et la méthode ARL qui utilise deux approches différentes dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique. Cela confirme que pour la prédiction des dommages, l'évaluation de la vulnérabilité sismique en utilisant la méthode ARL fournit la même magnitude des dommages que Risk-UE, avec des différences $< \epsilon_2$ à 0,04.

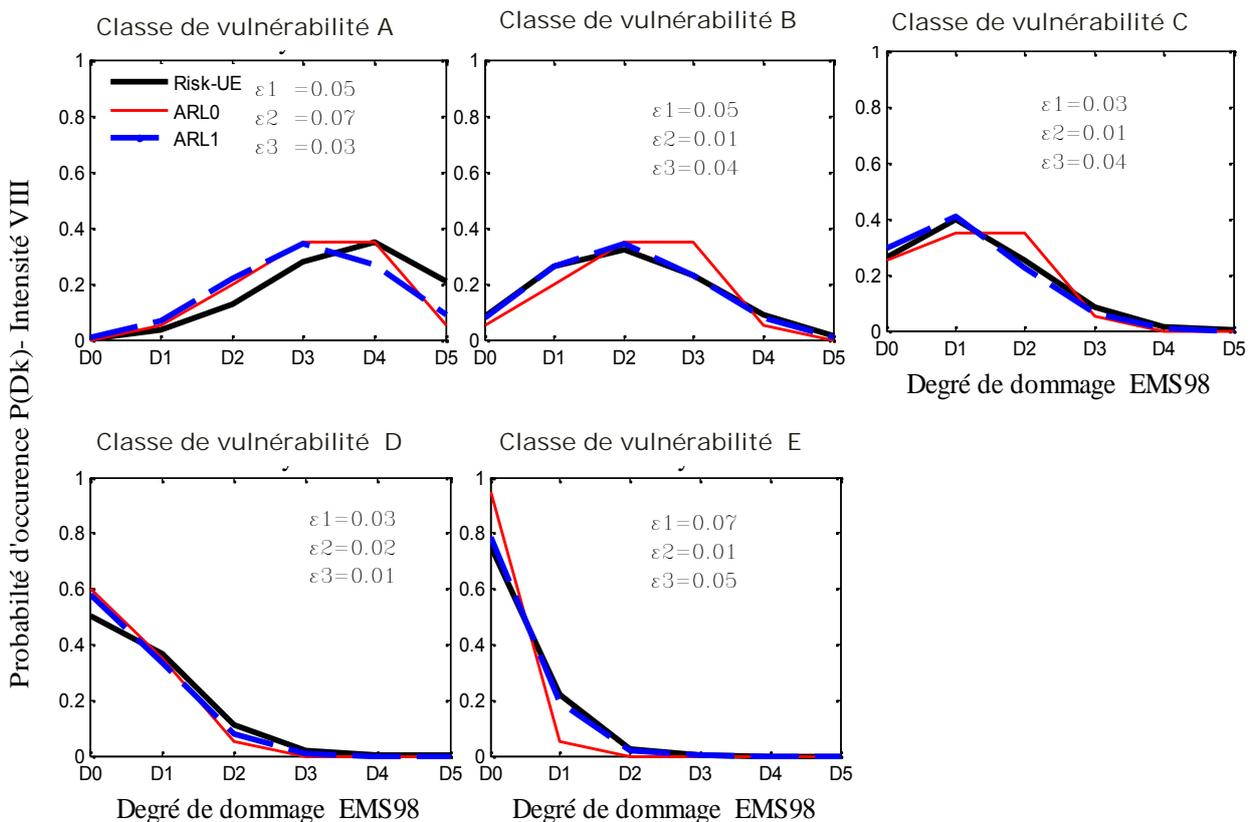


Figure. 5-9 : Probabilité de dépassement un niveau de dommage $P(D_k)$ pour une intensité VIII et classes de vulnérabilité de A à E.

Pour une intensité VIII (Fig. 5-9), les plus grandes erreurs ont été observées pour les classes de vulnérabilité A et E, avec des valeurs égales à 0,07 et 0,05 pour α_1 et α_3 . α_2 souvent donne les valeurs les plus faibles (les classes B, C, D et E) et reste très faible, sauf pour la classe A.

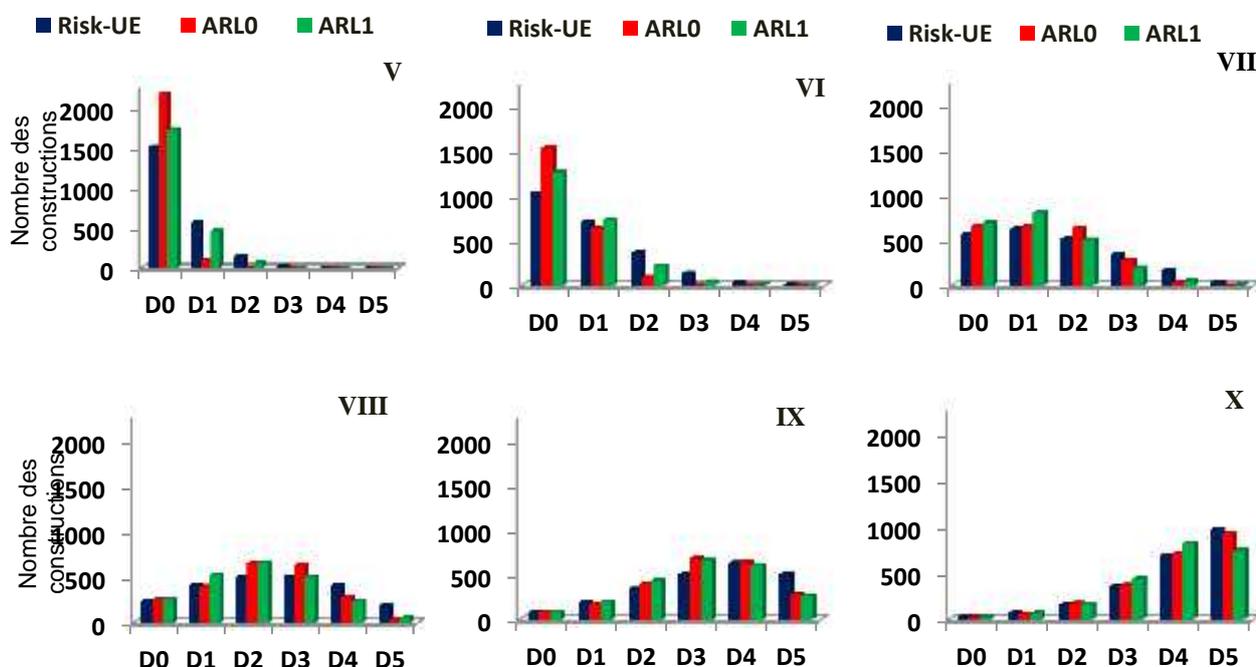


Figure. 5-10 : Représentation de la distribution du nombre de constructions endommagés avec les trois méthodes et pour les intensités entre (V-X) selon l'échelle de dommage EMS 98.

La figure 5-10 présente la distribution des dommages en fonction du nombre des constructions pour différents intensités sismiques, Un examen détaillé fait indiquer un certain accord sur le nombre de bâtiments endommagés entre les trois approches utilisées, en particulier pour les hautes intensités (VIII, IX, X).

Les probabilités de dommage $P(D_k)$ sont donc comparables, quelles que soient les méthodes utilisées pour les dommages et à l'évaluation de la vulnérabilité sismique. Cela confirme que, avec deux paramètres seulement, les dommages prédits sont fiables, même si la vulnérabilité peut être légèrement variable.

Cette remarque est importante car à l'échelle de la ville, cela signifie que pour un inventaire individuel (construction par construction) n'est pas nécessaire de recueillir toutes les informations nécessaires pour évaluer la vulnérabilité sismique comme dans le cas de la méthode Risk-UE. Une alternative consiste à utiliser les données existantes, par exemple, des bases de données nationales préexistantes ou bien les

paramètres recueillis par télédétection comme la forme du toit et le nombre d'étages.

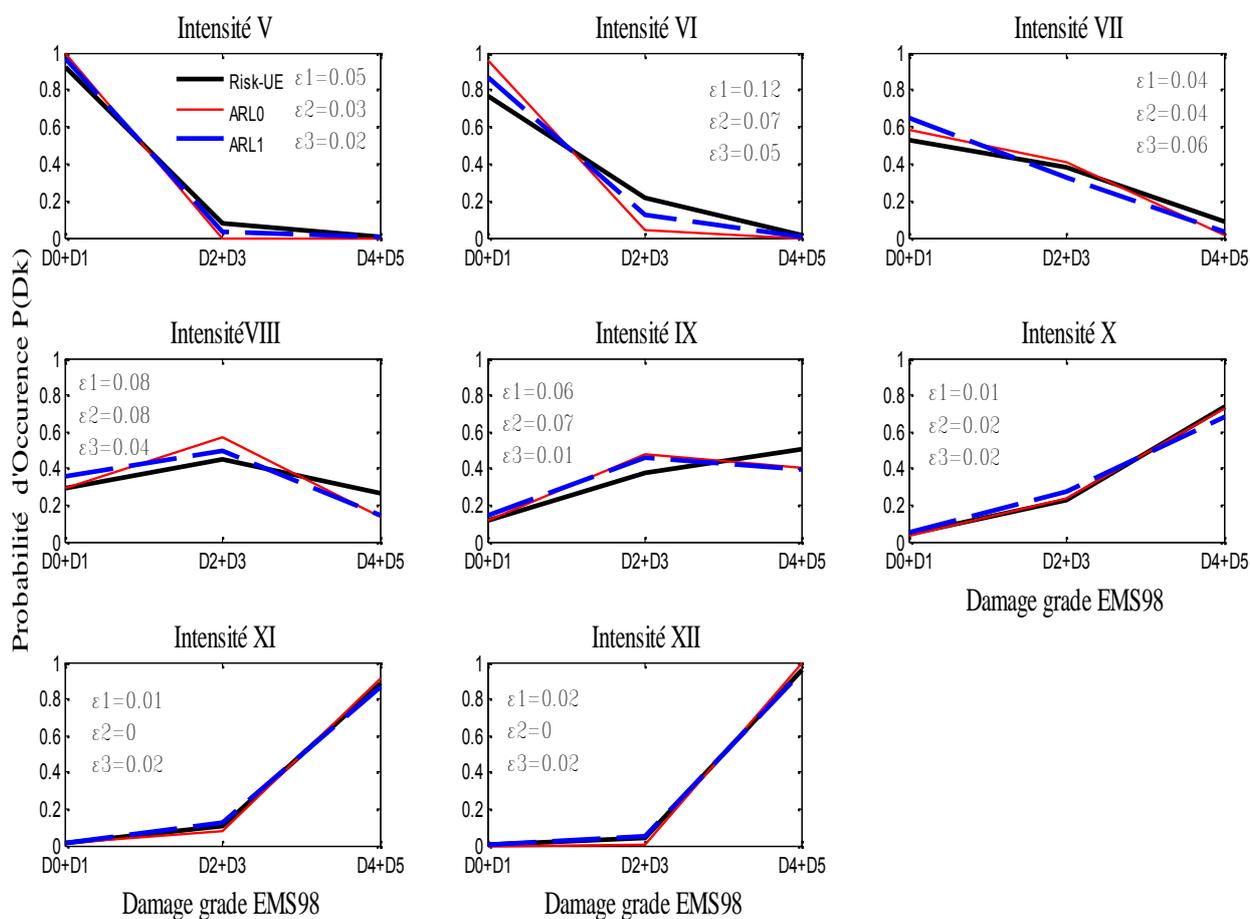


Figure. 5-11 : Comparaison de la probabilité de dommages pour tous les constructions dans la zone d'étude obtenue en utilisant la méthode Risk-UE (ligne noire), la méthode ARL1 basé sur la méthode Risk-UE dans l'évaluation des dommages (ligne bleue discontinu), et la méthode ARLO basée sur la matrice de probabilité des dommages issue de l'échelle macrosismique EM98 (ligne rouge). Les dommages sont regroupés en trois groupes de dommages

La figure 5-11 illustre les résultats de la comparaison entre les trois méthodes, dans cette comparaison, nous avons regroupé les dommages en trois classes, (légers (D0+D1), modérés (D2 + D3), et sévères (D4 + D5)). Cette regroupement pour but d'être similaire à la démarche de classification suivi par l'Organisme national de contrôle technique des constructions « C.T.C » après chaque séisme destructeur en Algérie sous forme de couleur : vert, orange et rouge pour signifier : bon état (pas de risque, pas d'intervention nécessaire), présence de pathologies (nécessité de réparation et d'interventions), Construction à risque (nécessité d'une intervention lourde ou de démolition). Dans ce cas, il est clair que une bonne agrément existe

entre la méthode ARL et la méthode Risk-UE particulièrement pour les intensités élevées ($> IX$). Cela peut expliquer que, pour les intensités élevées (tous les constructions en maçonnerie seront endommagés de sorte que la différence entre les deux méthodes dans la répartition des classes de vulnérabilité A et B disparaîtra.

5.4.3. Scénario des dommages sismique :

Cette partie a pour objectif de mettre en place la méthode définie dans les parties précédentes afin de générer des cartes de dommages. Il présente l'intérêt de l'utilisation des SIG pour la gestion des données relatives au risque.

Les systèmes d'information géographique (SIG) intègrent des données de différente nature pour aider à la planification et à la gestion d'une région géographique précise. Les données sont présentées sous forme de «couches» qu'il est possible de superposer. Comme le zonage des aléas sismiques et la prise de décision nécessitent la superposition de plusieurs types d'informations, les SIG deviennent des outils essentiels d'aide à la décision.

Outre le stockage de cette information, les SIG permettent une analyse approfondie des données, en croisant les données issues de l'aléa sismique avec celles issues de l'analyse de la vulnérabilité. Le logiciel utilisé pour la construction de notre SIG est le : ARC GIS 9.3.1. C'est un Système d'Information Géographique à l'origine Bureautique développé par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute).

5.4.4. Distribution spatiale des dommages :

La distribution spatiale de dommages revêt un important intérêt parce qu'elle offre la possibilité de distinguer des zones de dommage homogène et ainsi elle a permis d'identifier les zones urbaines prioritaires. Les représentations des résultats à l'échelle de la construction a ou à l'échelle du district de recensement ont été écartées car, dans le premier cas, les résultats manquent de représentativité statistique, et dans le deuxième cas, le district de recensement ne correspond pas à une entité urbaine identifiable.

Pour rendre compte de la distribution spatiale des dommages, la zone d'étude a divisé a sous zones homogène. Dans cette digitalisation, le bâti existant dans une

sous zone est considéré comme une unité bâti homogène qui est représenté par un polygone et qui aura les attributs de son identifiant dans la base de données.

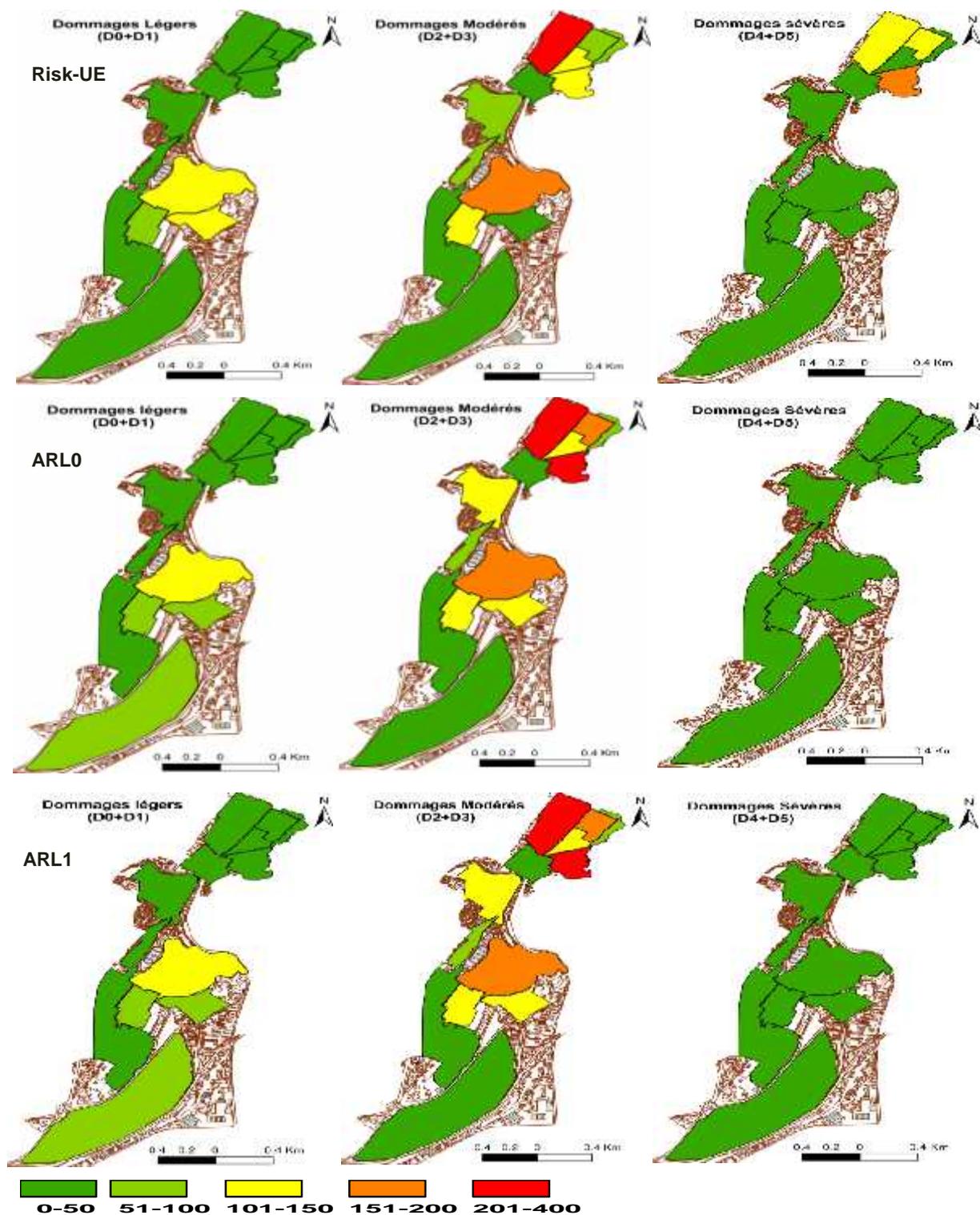


Figure. 5-12 : Répartition spatiale des dommages à Constantine de façon statistique (sous zones) pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5) et étant donnés en fonction de nombres de constructions.

La figure 5-12 représentent les probabilités d'occurrence des dommages au sein de chaque secteur, pour un des scénarios sismiques (I = VIII), en termes de nombre, de constructions ayant subi des dommages de degrés : légers, modérée et sévère.

Ce scénario correspond au dernier séisme majeur qui a frappé la région en 1985 (I = VIII) relocalisé à 30 km de la ville.

Les trois zones sont divisées en sous-zones, définies comme étant homogène en termes d'urbanisation (période de constructions et typologie). Nous avons observé des résultats similaires pour les trois approches.

Les résultats de ce scénario pour la zone 1 (la partie la plus ancienne de la ville) indiquent des dégâts modérés à graves selon la méthode de Risk-UE et des dégâts modérés pour les deux méthodes ARLO et ARL1. Ceci est principalement dû à la mauvaise qualité des constructions dans cette zone, ou 94% des constructions sont classés en A et B. la zone 1 (le Rocher) étant principalement composée des constructions en maçonnerie (95% du parc immobilier) avec une densité urbaine remarquable (un important pôle d'activité commerciales et résidentiels). Zone 2 et 3 peuvent souffrir des dommages légère à modérée. en raison que certain constructions en maçonnerie situées dans la zone 2 présentes certaine résistance sismique à cause des travaux de réparations ,réhabilitation effectué soit par l'état ou bien par les occupants de ces constructions un autre facteur influe sur les résultats de dommages dans ces deux zone est la présence des constructions en béton armé avec des murs porteurs construits entre 1920 et 1980 surtout dans la zone 3 (20 aout 1955) .

	D0+D1		D2+D3		D4+D5	
Risk-UE	655	29.1%	1008	44.8%	589	26.2%
ARLO	654	29.0%	1288	57.2%	310	13.8%
ARL1	791	35%	1172	52.0%	289	13.0%

Tableau. 5-4. Comparaison de la répartition des dégâts (en nombre de bâtiments et en pourcentage) obtenue par ARL et Risk-UE à Constantine pour l'intensité VIII.

Pour un séisme comparable au séisme de 1985 (I = VIII), le tableau. 5-4 donne les résultats d'une comparaison entre le niveau de dommage obtenu par les trois méthodes.

Le niveau de dommage calculé par Risk-UE montre que près de 29% des constructions présentes dans la zone étudiée serait en bon état ou légèrement endommagé (D0 + D1), alors qu'environ 45% des bâtiments subiraient des dégâts modérés (D2 + D3), et plus de 26% des constructions subissant des dégâts Sévères (D4 + D5).

Des résultats similaires sont obtenus lors de l'utilisation de la méthode ARL ou 29% des constructions auront des dommages légers ,57% des dommages modérés et seulement 14% présentent des dommages sévères. Cette légère différence peut être justifiée par les difficultés rencontrées parfois pour distinguer les classes de vulnérabilité A et B.

Néanmoins, termes de prédiction de l'endommagement de la gestion du risque sismique et d'anticipation, les deux résultats sont très similaires et permettent la représentation du risque sismique nécessaire pour mettre en œuvre une politique de gestion du risque sismique.

Cette représentation graphique des dommages sismique probable nous a permis d'identifier les secteurs de la ville qui pourraient subir le plus de dommages en cas de séismes de scénarios probables pour la région de Constantine (retour du séisme de Constantine en 1985).

En générale les résultats des deux méthodes sont très similaires et permettent la représentation du risque sismique. Cette information permette peut évidemment être particulièrement utile dans le cadre du développement d'une politique de prévention du risque sismique à l'échelle de la ville de Constantine.

5.5. Synthèse :

Un des plus grands défis dans l'analyse de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville est comment rattraper le manque ou la mauvaise qualité des informations concernant les caractéristiques de constructions, ce qui est certainement l'étape la plus coûteuse de toute analyse du risque sismique.

Pour surmonter ce problème, une nouvelle approche a été testée pour la ville de Constantine, basé sur la méthode datamining ARL :

- L'une des caractéristiques les plus importantes de cette méthode est qu'elle extrait des relations « cachées » entre les différentes caractéristiques des constructions et la vulnérabilité sismique. Un proxy de vulnérabilité est alors dérivée d'attribuer la classe de vulnérabilité pour toutes les combinaisons possibles entre les caractéristiques des constructions. Le proxy a été dérivé au cours d'une phase d'apprentissage (Learning phase) et ensuite appliqué sur le reste de la base de données des constructions de Constantine.
- En outre, la précision de la méthode ARL a été évaluée en comparaison avec la méthode de Risk-UE, cette dernière nécessite un grand nombre d'informations sur les caractéristiques de construction.
- La comparaison des résultats montre que les deux méthodes donnent des résultats similaires. Cela donne à penser que la méthode ARL a été appliquée avec succès pour les données de Constantine. Nous avons observé que, compte tenu du même modèle d'évaluation de dommages, l'évaluation de la vulnérabilité par ARL fournit la même estimation des dommages que Risk-UE, même si seulement deux ou trois attributs sont utilisés.
- Nous avons confirmé que l'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de l'approche de datamining fournit une estimation pertinente de dommages sismiques à un coût bien inférieur à celui des méthodes classiques, telles la méthode européenne.
- Dans ce chapitre, nous avons montré la possibilité d'utiliser des méthodes d'analyses simplifiées, en utilisant que les paramètres de base (hauteur, âge, forme du toit) de la construction pour représenter et analyser le risque sismique à l'échelle urbaine.

Conclusion et perspectives :

Depuis une vingtaine d'année, des méthodes sommaires se sont développées dans des pays à forte sismicité tels que le Japon, les Etats Unis, et l'Italie. Ces méthodes basées sur le retour sismique et nécessitent une analyse approfondie de la zone concernée pour collecter les données nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle. Cela reste cependant techniquement possible à l'échelle de quelques bâtiments, via des études particulières, avec souvent des coûts non négligeables, et c'est certainement l'étape la plus coûteuse de toute analyse de risque sismique.

Pour cela, dans cette thèse nous utilisons deux méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique de la ville de Constantine : la première est une approche européenne classique Risk-UE niveau1 basée sur des enquêtes sur site, et la deuxième est une méthode rapide et innovante « Association Rule Learning » s'appuyant sur le principe de la fouille de données.

La méthode ARL consiste à établir des relations entre les attributs de construction (hauteur, âge du bâtiment) et les classes de vulnérabilité de l'Échelle Macro-sismique Européenne, EMS98.

Cette approche évite le coûteux processus d'établissement des enquêtes sur terrain pour collecter les paramètres structuraux et non structuraux du bâtiment, ce qui décourage souvent les efforts et les opérations d'évaluation de risque sismique.

La Comparaison des résultats obtenus par la méthode Risk-UE et ARL a montré que les deux approches fournissent des résultats similaires rapprochés. Les différences n'ayant qu'un faible impact sur la probabilité de dépassement du niveau de dommage calculé par EMS98 ou Risk-UE pour la ville de Constantine. Les résultats de cette étude suggèrent que le proxy de vulnérabilité basé sur l'ARL est efficace et facilement applicable dans le cas d'un manque d'informations concernant les caractéristiques structurelles du parc immobilier.

Les résultats obtenus dépendent largement du scénario considéré et de la méthode employée. Dans ce manuscrit, un scénario de séisme équivalent au séisme de Constantine de 1985 a été réalisé. Pour l'intensité VIII, le nombre total de bâtiments ayant subi des dégâts importants à forts (D4 et D5) se situe entre 195(8.66%) pour une intensité sismique (I = VII) et 1 654 (73.45%) pour une intensité (I = X)

La cartographie des résultats obtenus montrent clairement la répartition de la vulnérabilité et les dommages sismique sur la zone d'étude, avec notamment une vulnérabilité plus importante sur la zone 1, qui correspond au centre historique de la ville de Constantine (Le Rocher).

Cette étude nous a permis de tirer des enseignements riches en informations fortes intéressantes concernant le bâti de la ville de Constantine où une base de données, première du genre, pour la vieille ville a été créée, ce qui conduira certainement à des indicateurs de décision pour cette ville.

Le besoin de deux paramètres seulement élimine l'une des principales difficultés liées à toute étude de vulnérabilité sismique à grande échelle. L'intérêt des résultats obtenus et la faisabilité de la méthodologie utilisée méritent de répéter l'expérience sur d'autres villes algériennes en profitant de la similarité entre ces villes.

L'objectif est d'étendre les résultats (proxy) obtenus sur d'autres villes Algériennes ayant la même morphologie et la même typologie du cadre bâti tels que la ville de Skikda, par exemple.

Finalement Il convient de signaler que le risque sismique à Constantine-ville, même de faible amplitude, ne peut être négligé compte tenu de la valeur des éléments exposés et des enjeux de cette zone de forte activité économique et de service. En plus, l'expérience nous a montré que l'effet des séismes dans cette région peut constituer un facteur d'accélération des glissements de terrains (Machane et al, 2008)

Cependant, il est nécessaire de définir des indicateurs de performance pertinents pour les décideurs afin d'anticiper la réponse à court terme en cas d'urgence, ce qui conduira à une atténuation des risques sismiques

Parmi les perspectives, une étude s'impose pour prévoir l'impact des séismes sur l'environnement social, économique, politique et culturel par la compilation des facteurs et enjeux de la ville étudiée. En conséquence, nous poursuivrons le travail sur l'évaluation des conséquences économiques (en termes d'unité monétaires) et humaines (blessés, morts, sans-abris) du séisme sur cette ville et d'autres villes soit en Algérie ou en bassin Méditerranéen. Pour cela, la mise au point d'un modèle simple et rapide, capable d'estimer les pertes (humaines et matériels) constitue la prochaine étape de notre recherche .

Références

- [1] 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.
- [2] Ambraseys, N., Vogt, J. 1988. Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers, Eur. Earthq. Eng. 3 16–29.
- [3] ATC 13. 1987. Earthquake damage evaluation data for California, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [4] ATC 21. 1988. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards : a handbook. Technical report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [5] Athmani, A. E., Gouasmia, A., Ferreira, T. M., Vicente, R. 2014. A. Khemis Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey, Bull Earthquake Eng DOI 10.1007/s10518-014-9717-7. Ayadi, A., Ousadou-Ayadi, F., Bourouis, S., Benhallou, H. 2012. Seismotectonics and seismic quietness of the Oranie region (Western Algeria): the Mascara earthquake of August 18th 1994, Mw= 5.7, Ms= 6.0, Journal of Seismology 6:1 13-23. Doi: 10.1023/A:1014276727136
- [6] Auclair, S., Fabriol, H., Guézo, B., Roussillon, P., Verrhiest, G. 2007. Rédaction du guide PPRN « sismiques » consacré à l'identification des enjeux et de leur vulnérabilité ainsi qu'à la, CETE Méditerranée – n° Gala 2335201, BRGM/RP-55932-FR, Rapport final
- [7] Ayadi, A., Bezzeghoud, M. 2015. Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum observed intensity map (MOI2014), Seimol. Res. Let. 86:1 (2015) 1-9. Doi: 10.1785/0220140075.
- [8] Bard, P.-Y., Duval, A.-M., Bertrand, E., Vassiliadès, J.-F., Vidal, S., Thibault, C., Guyet, B., Mèneroud, J.-P., Guéguen, P., Foin, P., Dunand, F., Bonnefoy-Claudet, S. and Vettor, G. 2005. Le risque Sismique à Nice : apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles. Rapport final GEMGEP, 52 pages.
- [9] Belazougui, M., Farsi, M.N, Remas A, Bensaïbi M., Mezazigh, B. 2004. seismic risk assessment of current buildings of Algiers city .13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6.
- [10] Benabbas, C., Zeghdoud, O., Boumedous, S. 2008. Boumedous Particularités morpho-géologiques, néotectonique et instabilité des terrains en Algérie Orientale (Cas du Constantinois) Revista de géomorfologie – vol 10, pp. 23-29.
- [11] Benaïssa, A., Bellouche, M.A. 1999. Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie), Bull. Eng. Env. 57 :301-310.

- [12] Benaïssa, A., Cordary, D., Giraud, A. 1989. Les mouvements de terrain dans la zone urbaine de Constantine (Algérie), Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°40, Paris.
- [13] Benedetti, D., Petrini, V. 1984. on seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure, L'Industria delle Costruzioni 18:66–78.
- [14] Benmarce, A., Himeur, M., Bouaoud, M., Guenfoud, M. 2012. Risque et vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville exemple de la ville de Constantine, Sciences & Technologie B – N°3u6, pp 15.
- [15] Benhallou, H., Ferrer, A., Roussel, J. 1971. Catalogue des séismes Algériens de 1951 à 1970, IMPGA, Publication no. 3.
- [16] 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.
- [17] Benouar, D. 1996. Seismic Hazard Evaluation at Algiers Using Benouar's Earthquake Catalogue Natural Hazards 13: 119–131.
- [18] Benson, C., and Twigg, J. 2004. Measuring Mitigation: Methodologies for assessing natural hazard risks and the net benefits of mitigation – A scoping study, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies / the Provention Consortium, 153 pages.
- [19] 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.
- [20] Boudiaf, A. 1996. Étude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie, thèse, université Montpellier-2, 273 p.
- [21] Bougdal R., Panet M., Bentabet A. 2004. ARCADIS-SIMECSOL, Etude des glissements de la ville de Constantine, documents N° :01/13001/GEO/PG/02B
- [22] Bouhaded, Y., Jaouami, Y., Bentabet, A., Pecker, A., et al. 2003. Etude des glissements terrain à travers la ville de Constantine « étude de l'aléa sismique », Rapport final, CGS et SIMEC SOL.
- [23] Boukri, M., Bensaïbi, M. 2007. Indice de vulnérabilité des bâtiments en Maçonnerie de la ville d'Alger, 7ème colloque nationale école centrale Paris.
- [24] Boukri, M., Farsi, M. N., Mebarki, A., Belazougui, M., Amellal, O., Mezazigh, B. 2014. Seismic risk and damage prediction: case of the buildings in Constantine city (Algeria), Bull Earthquake Eng 12:2683–2704 DOI 10.1007/s10518-014-9594-0.
- [25] Bounif, M.A., Dorbath, C. 1998. Three dimensional velocity structure and relocated aftershocks for the 1985 Constantine, Algeria (Ms05.9) earthquake, Annali di Geofisica 41 (1):93–104.
- [26] Bounif, M.A., Haessler, H., Meghraoui, M. 1987. The Constantine (northeast Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study, Earth Planet. Sci. Lett. 85, 451–460.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Bureau des etudes techniques, Mezaache, A. 2010. Etude de« Réhabilitation de l'immeuble n°54. Rue Mellah Slimane ». Souika. Constantine.
- [30] Bureau des etudes techniques, OUDADDI, S.2010 .projet de réhabilitation d e la rue Mellah Slimane, Maison n° 5 rue Mellah Slimane
- [31] Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., and Crowley, H. 2006. Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies over 30 years, ISET Journal of Earthquake Technology, 43(3), 75-104.
- [32] CGS Centre de Génie Parasismique .2004.Rapport final: Etude de l'aléa sismique de la région de Constantine.
- [33] CGS. Centre de Génie Parasismique. 2013. Recueil synthétique des activités scientifiques et techniques 2008-2013, (Loi de programmation de la Recherche 2008-2013).
- [34] Chatelain, J. L., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernandez, J., Yamada, T.1999.Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador, GeoJournal, 49(2), 185-196.
- [35] Combescure, D., Gueguen, P., et Lebrun, B. 2005. Vulnérabilité sismique du bâti existant Approche d'ensemble. Document de travail. Grenoble: Groupe AFPS. P10.
- [36] CTC (WCC).1985. Étude de l'aléa sismique et microzonage de neuf sites urbains de la région d'Ech Cheliff, vol. 1.
- [37] Deschamps, A., Bezzeghoud, M., Bounif, A. 1991. Seismological study of the Constantine (Algeria) earthquake (27 October 1985), Publication IGN, Série Monographia, no. 8, pp 163–173.
- [38] Dolce, M., Masi, A., Marino, M., and Vona, M. 2003 .Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects, Bulletin of Earthquake Engineering, 1:115–140.
- [39] DUC, Direction de l'Urbanisme et de la Construction wilaya de Constantine. 2003. Plan Directeur d'architecture et d'Urbanisme de la Ville de Constantine « PDAU ».
- [40] Erdik, M., Aydinoglu, N., Fahjan, Y., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Siyahi, B., and Yuzugullu, O. 2003. Earthquake risk assessment for Istanbul metropolitan area, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2(1), 1-23.
- [41] Ergunay, O., Gulkan, P., 1991. Seismic Risk Reduction and Disaster Management: National report of Turkey, Workshop on Seismic Risk Reduction and Disaster Management, Roma, Italy.
- [42] Esteva, L., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985. Consequences, lessons, and impact on research and practice. Earth. Spect. 4 (1988) p. 413-426.

- [43] Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G.M., and Borzi, B.1999. A study on damage scenarios for residential buildings in Catania City, *Journal of Seismology*, 3:327–343
- [44] Faccioli, E., Pessina, V.2003. WP2-Basis of a handbook of earthquake ground motions scenarios, Risk-UE project WP-2 report.
- [45] FEMA 178.1997. NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings, Federal Emergency Management Agency
- [46] FEMA 154. 2002. Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook (FEMA), Federal Emergency Management Agency, Washington D.C
- [47] Geiß, C., Taubenböck, H., Tyagunov, S., Tisch, A., Post, J., Lakes, T.2014. Assessment of seismic building vulnerability from space, *Earthq Spectra* 30(4):1553–1583.
- [48] GNDT.1986 .Instruzioni per la Compilazione de lla Sceda di Relivamento Esposizione e Vulnerabilità Sismica Degli Edifici. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Regione Emilia Romagna y Regione Toscana, Italy, in Italia
- [49] GNDT.1993. Rischio sismico di edifice pubblici, parte I: aspetti metodologici. Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai terremoti, Roma, Italy.
- [50] GNDT. 2000. The Catania project: earthquake damage scenarios for a high risk area in the Mediterranean, Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa Dai terremoti, Roma, Italy.
- [51] GRRAG.2001. La lettre du CRAAG, Numéro 4, Septembre - Octobre 2001.
- BRGM, 2008. Scénario départemental de risque sismique Méthodologie et processus de réalisation, Annexes 1 à 21, BRGM/RP-55415-Fr.
- [52] Grünthal, G. 2001.EMS98 L'Echelle Macrosismique Européenne 1998- Edition française, Centre Européen de Géodynamique et de séismologie, Luxembourg.
- [53] Guéguen, P., Michel, C., and 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.
- [54] Guéguen, P., Taliercio, G. 2007. Gestion du patrimoine bâti et risque sismique: automatisé de calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments, Pôle Grenoblois Risques Naturels.P15.
- [55] Guéguen, P. 2013. Vulnérabilité sismique des constructions, ISBN : 978-2-7462-3814-5, Lavoisier, paris.
- [56] Guettiche, A., Guéguen, P., Mimoune, M., 2017. Seismic vulnerability assessment using association rule learning: application to the city of Constantine, Algeria, *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-016-2739-5.
- [57] Guettiche, A., Mimoune, M. 2014. Analysis of seismic vulnerability - Case of buildings of high seismic hazard, *Advanced Materials Research Trans Tech Publications*, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.416 ,Vols. 875-877 pp 416-422).

- [58] Hamdache, M., Pelaez, J.A., Talbi, A., Mobarki, M., Lopez Casado, C. 2012. Ground-Motion Hazard Values for Northern Algeria Pure and Applied Geophysics, 169, 711–723.
- [59] Hassan, A. F., and Sozen, M. A. 1997. Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, ACI Struct. J. 94, 31 – 39.
- [60] 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 Boumediene, Algérie.
- [61] Harbi, A., Maouche, S., Ayadi, A. 1999. Neotectonics and associate seismicity in the Eastern Tellian Atlas of Algeria, Journal of Seismology 3: 95–104.
- [62] 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.
- [63] Harbi, A., Maouche, S., Benhallou, H. 2003. Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria Part II: 20th century seismicity and seismotectonics analysis, Journal of Seismology 7: 221–234.
- [64] Harbi, A., Peresan, A., F. Panza, G. 2010. Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. Nat Hazards, 54: 725–747, DOI: 10.1007/s11069-009-9497-6
- [65] HAZUS 99. 1999. Earthquake Loss Estimation Methodology, developed by the Federal Emergency Management Agency with the National Institute of Building Sciences.
- [66] Heddar, A., Authemayou, C., Djellit, H., Yelles, A.K., Déverchère, J., Gharbi, S., Van Vliet Lanoe, B., Boudiaf, A. 2012. Preliminary results of a paleoseismological analysis along the Sahel fault (Algeria): New evidence for historical seismic events, Quaternary International xxx 1-14.
- [67] ISC Bulletin .1994. International Seismological Centre, ISC Catalogue, 1964–1994. CD-ROM, ISC ed., Berkshire, U.K.
- [68] Kircher, C., Nassar, A., Kustu, O., and Holmes, W. 1997. Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation, Earthquake Spectra, 13, 4, November.
- [69] KVERMP. 1998. The Kathmandu Valley Earthquake Management Action Plan. <http://geohaz.org/downloads/publications/KathmanduValleyEQRiskMgtActionPlan.pdf>.
- [70] Laboratoire villes et santé. 2006. Etude de Réhabilitation de la rue mellah Slimane. VRD et ravalement de façade.
- [71] Lagomarsino, S., and Giovinazzi, S. 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 4: 415–443.
- [72] LTP/E, 1989. Glissement de terrain, immeubles CILOC, Constantine, Etude de Confortement, Note de Calcul.

- [73] Maaraf, Z. 2012. Evaluation De La Vulnérabilité Sismique des Deux Casbahs de « Tigidit Et Derb- Tobbana », Mémoire de Magister, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie.
- [74] Machane, D., Bouhadad, Y., Cheikhounis, G., Chatelain, J.-L., Oubaiche, E. H., Abbes, K., Guillier, B., Bensalem, R. 2008. Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria, *Nat Hazards* 45:295–308, DOI 10.1007/s11069-007-9167-5
- [75] Master plan. 2004. Éléments pour la requalification de la médina de Constantine (projet guide) ». Université Roma III, Italie & Direction de l'Urbanisme et de la Construction (DUC). Wilaya de Constantine.
- [76] Meghraoui, M. 1988. Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie: Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique, thèse d'État, université Paris-11, 356 p.
- [77] Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Kibboua, A., and Mehani, Y. 2012. The effects of building characteristics and site conditions on the damage distribution in Boumerdès after the 2003 Algeria Earthquake, *Earthquake Spectra*, 28(1), 185-216.
- [78] Milutinovic, Z. V., and Trendafiloski, G. S. 2003. Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings, 110 pages.
- [79] Mokrane, A., Aït Messaoud, A., Sebaï, A., Menia, N., Ayadi, A., Bezzeghoud, M. 1994. Earthquakes in Algeria from 1365 to 1992, Algiers: CRAAG Report.
- [80] Mosbah, Z. 2008. Urbanisme Colonial du XIXème et XXème Siècle de la Ville de Constantine : Confrontation de deux systèmes de représentation, mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine.
- [81] Mueller, M., Segl, K., Heiden, U., and Kaufmann, H. 2006. Potential of high-resolution satellite data in the context of vulnerability of buildings, *Natural Hazards*, 38(1-2), 247-258.
- [82] National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS). Significant Earthquake Database. NOAA. <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1>, 2016 (last access: July 2016) doi:10.7289/V5TD9V7K.
- [83] Novelli, V. I., 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, DOI 10.1007/s10518-014-9666-1
- [84] Office National des Statistiques (ONS). 2000. "Résultats du 4ème Recensement Général de la Population et de l'Habitat 1998". Exhaustif . Algérie.
- [85] ONS. 2011. Armature urbaine (RGPH 2008): Les principaux résultats de l'exploitation exhaustive, Alger, Office National des Statistiques, 213 p. (ISBN 978-9961-792-74-2).

- [86] Otani, S. 2000. Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan earthquake engineering and engineering seismology volume 2, PP. 47-56.
- [87] Ousadou, F., Dorbath, L., Dorbath, C., Bounif, M. A., and Benhallou, H. 2013. The Constantine (Algeria) seismic sequence of 27 October 1985: a new rupture model from aftershock relocation, focal mechanisms, and stress tensors, *Journal of seismology*, 17(2), 207-222.
- [88] Paulsen, S. 1998. Glissements de terrain dans la ville de Constantine, rapport final, mission des experts.
- [89] Pecker, A. 1984. Dynamique des sols. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [90] Pelaez, J A., Hamdache, M., Lopez Casado, C. 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 2163–2177.
- [91] Pincent, B., Panet, M., Bentabet, A. 2005. Étude des glissements de terrain de la ville de Constantine, étude de confortement zone C « site de Ciloc », dossier d'avant projet détaillé, N°01/13001/DC1/NT/01A
- [92] Plan de Constantine, <http://www.constantine-hier-aujourd'hui.fr>
- [93] PPSMVSS. 2011. Manuel des typologies, vieille ville de Constantine phase III: redaction finale du PPSMVSS.
- [94]. Refas, S., Bensafi, M., Benslafa-Kazi Aoual, F., Mouli, M. 2009. Contribution a l'amélioration de la gestion du risque sismique en algerie (region oranaise), SBEIDCO – 1 st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14.
- [95] Remki, M., and Benouar D., 2014. Damage Potential and Vulnerability Functions of Strategic buildings in the City of Algiers, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1726-1734. DOI 10.1007/s12205-014-0184-0.
- [96] 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
- [97] 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. doi:10.1007/s11069-014-1538-0
- [98] Rothé, J. P. 1950. Les seismes de Kherrata et la seismicité de l'Algerie. Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, 4ème série. Géophysique, no. 3, 40 pp.
- [99] RPA03. 2003. Règles Parasismiques Algériennes RPA99/Version2003, application depuis 2004, Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme.
- [100] RPA81. 1981. Règles Parasismiques Algériennes Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme.

- [101] 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.
- [102] Sagewa, S., Kaneko, F., Komaru, Y., and Sun, J. 2000. Simplified Earthquake Damage Estimation Tool for Earthquake Prone City, Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation (6ICSZ), November 12 -15, Palm Springs, USA.
- [103] 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, Research report, Projet Européen Environment and Climate.
- [104] Senouci, A., Bard P-Y., Farsi, M.N., Beck, E. 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 DOI 10.1007/s10518-012-9406-3.
- [105] Shiga, T. 1977. Earthquake Damage and the amount of Walls in Reinforced Concrete Buildings, Proceedings of the 6 th World Conference on Earthquake Engineering, India, 2467– 2472.
- [106] Smyth, A W., Altay, G., Deodatis, G., Erdik, M., Franco, G., Gulkan, P., and Yuzugullu, O. 2004. Probabilistic benefit-cost analysis for earthquake damage mitigation: Evaluating measures for apartment houses in Turkey, Earthquake Spectra, 20(1), 171-203.
- [107] Spence, R., Lebrun, B. 2006. Earthquake scenarios for European cities: the risk-UE project. Bull. Earthq. Eng., 4, special issue.
- [108] Tadjer, K., Bensaïbi M., and Chaid, A. 2013. Vulnerability Assessment of Blida City, International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering Vol:7 No:6.
- [109] Transactiondalgerie, Réhabilitation du vieux bâti : Diagnostic de plus de 300.000 logements, <http://www.transactiondalgerie.com/index.php/actualite/361-rehabilitation-du-vieux-bati-diagnostic-de-plus-de-300-000-logements>. (Dernier accès: Mars 2016).
- [110] UN, 2002. Living with Risk a global review of disaster reduction initiatives, International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genève, Suisse.
- [111] URBACO : Centre d'Études et de Réalisations en Urbanisme de Constantine, 2001.
- [112] Vila, JM. 1977. Carte géologique de Constantine à 1/200 000, Serv Géologique Natl Algerien.
- [113] Villacías, C., and Cardona, C. 2000. RADIUS-Managing Earthquake Risk in Developing Countries, Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation (6ICSZ), November 12 – 15, Palm Springs, USA.
- [114] Yelles-Chaouche, A k., Boudiaf, A., Djellit, H., Bracene, R. 2006 . La tectonique active de la région nord-algérienne, Comptes Rendus Geosciences 338(1):126-139

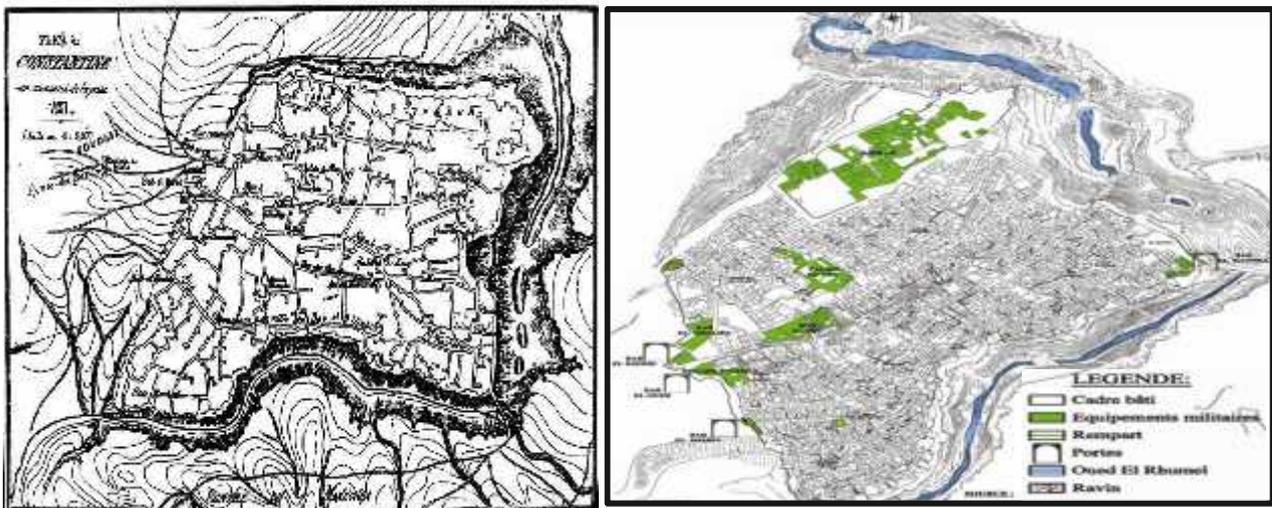
- [115] Yelles Chaouche, A K., Deramchi, A., Ferkoul, A., Aoulaiche, K. 2002. Les seismes en Algérie 1992 to 2001. Alger : Rapport CRAAG.
- [116] Work package 4. 2011. Development of a new methodological framework for an integrated multi-scale Vulnerability assessment, ENSURE PROJECT Contract n° 212045.

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

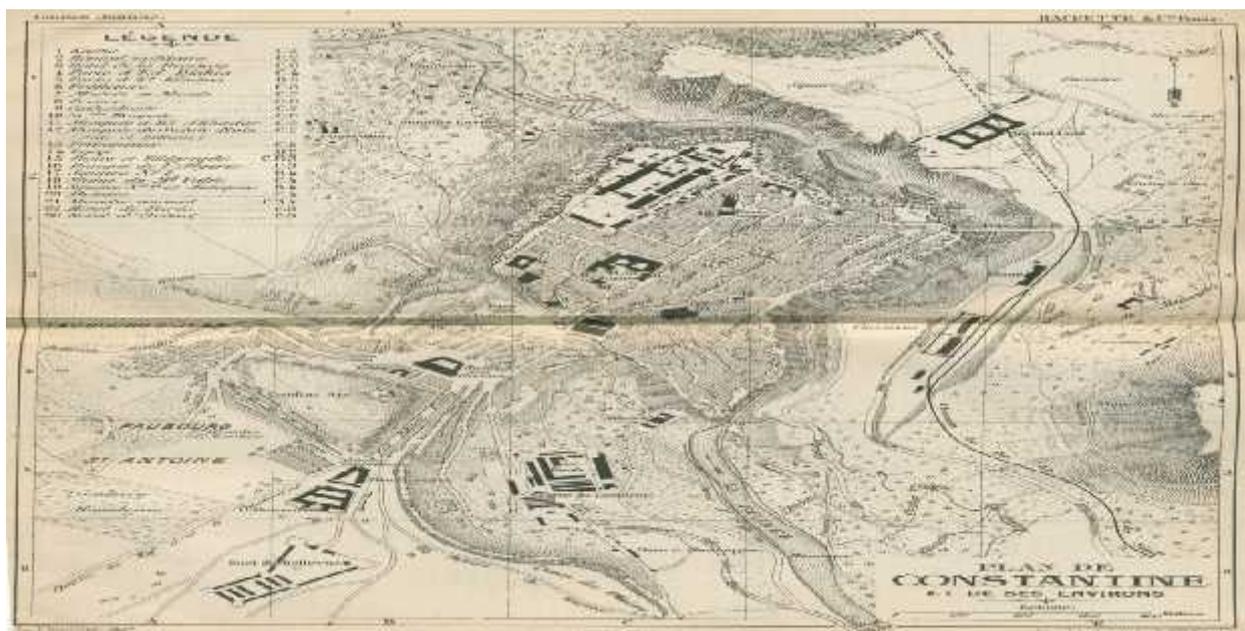
Annexe.2-1. Définition des degrés d'intensité selon l'échelle EMS 98



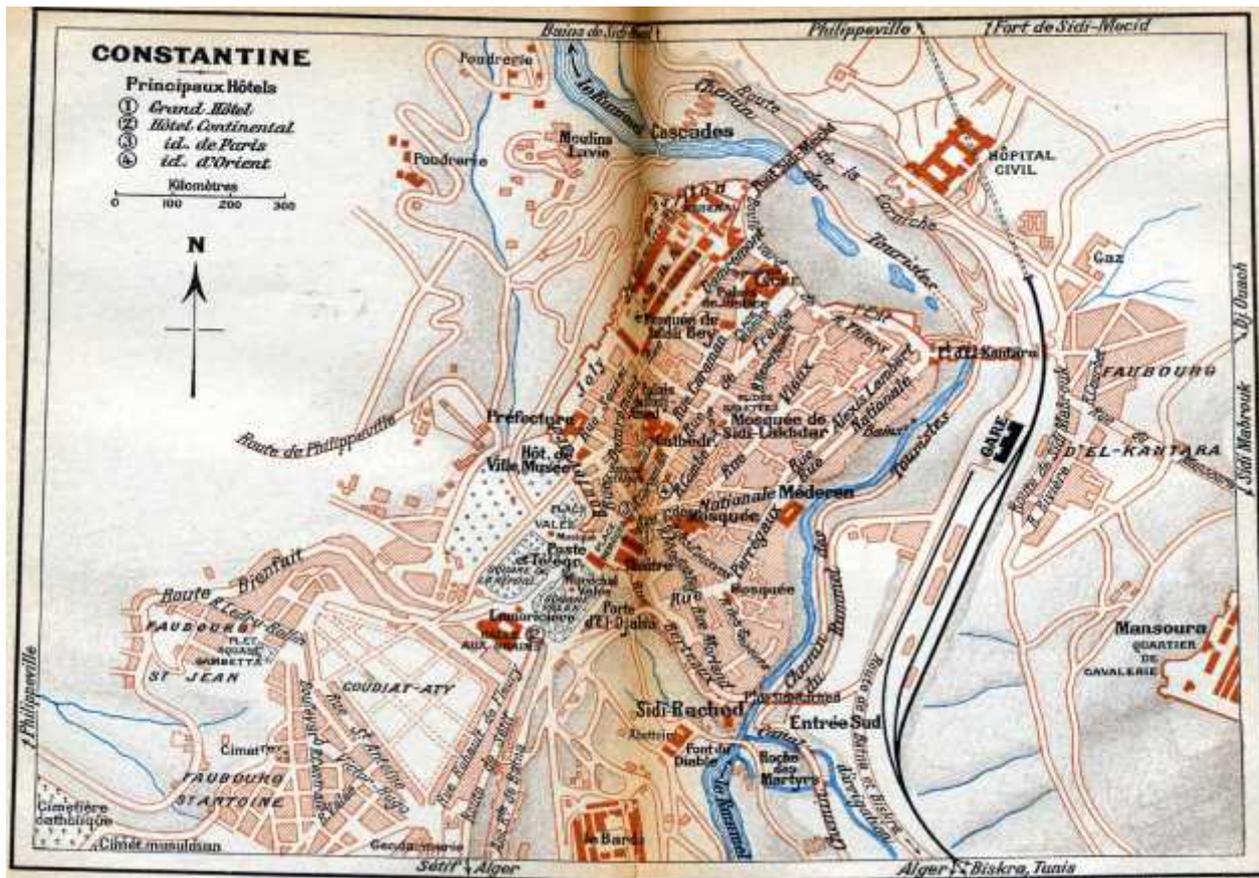
Annexe.3-1. Croquis de la ville durant la période turque. [86]



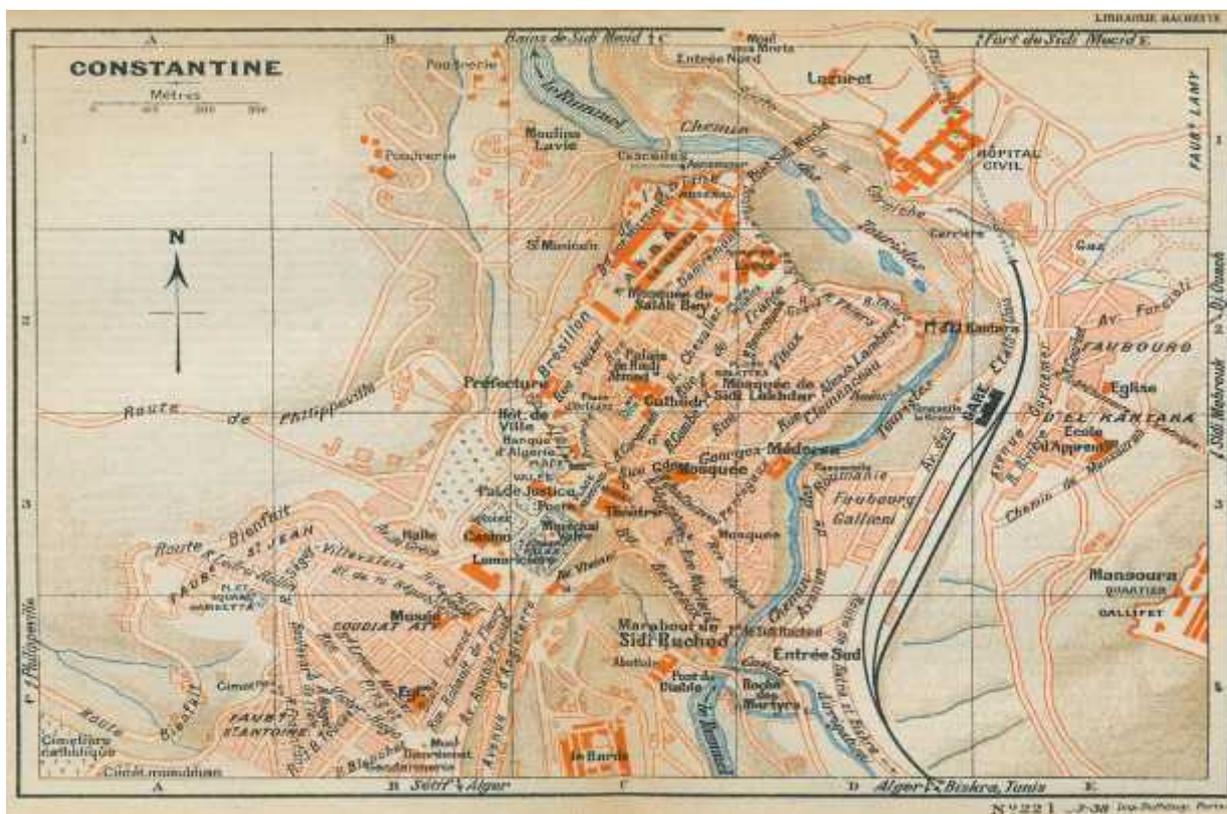
Annexe.3-2. Constantine à l'époque coloniale : (a) Plan de 1837 La ville au moment de la prise ,(b) plan de la période entre 1837-1873 : Equipements militaires plan réalisé à partir du plan cadastral [86]



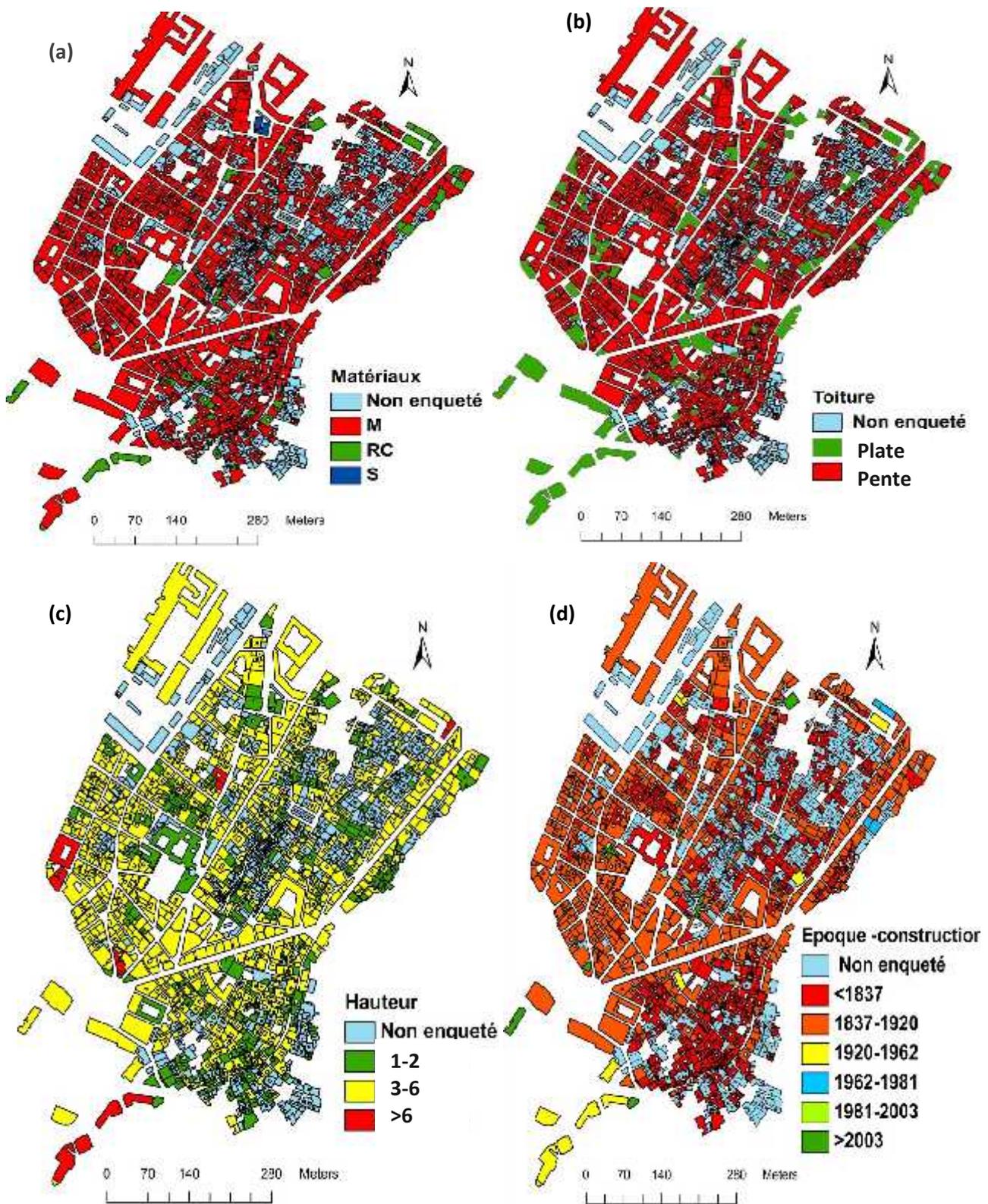
Annexe.3-3. Plan de Constantine en 1888 [85]



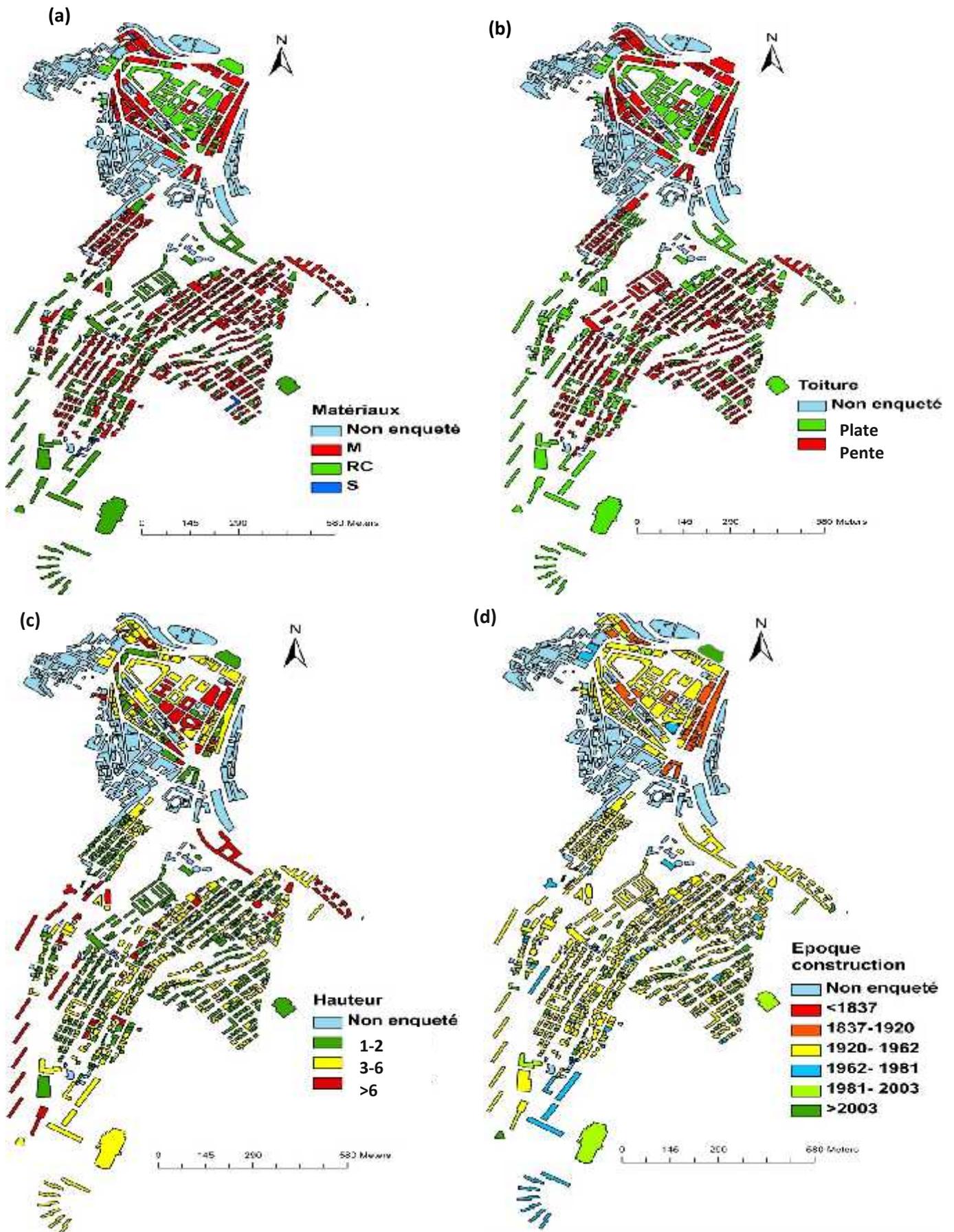
Annexe.3-4. Plan de Constantine de 1916[85]



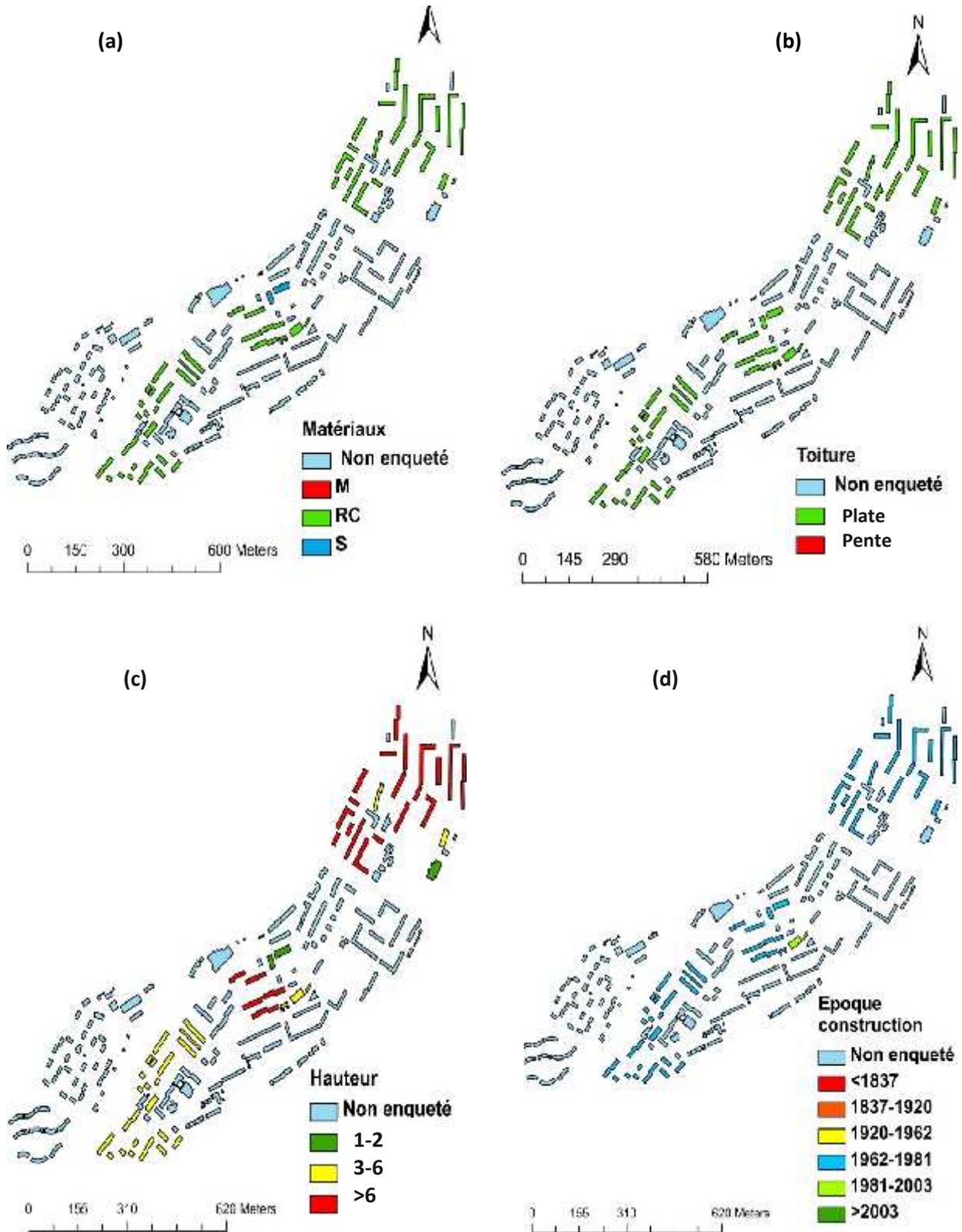
Annexe.3-5. Carte de Constantine de de 1937 [85]



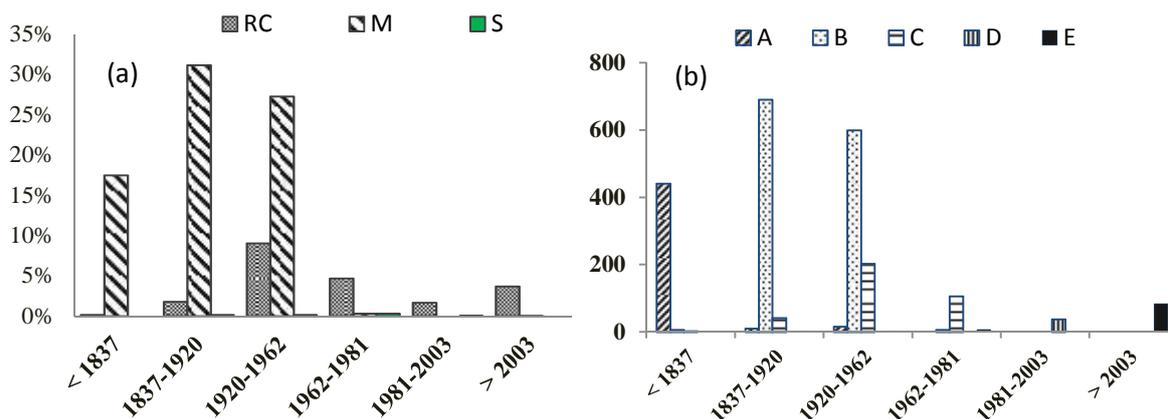
Annexe.3-6. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction



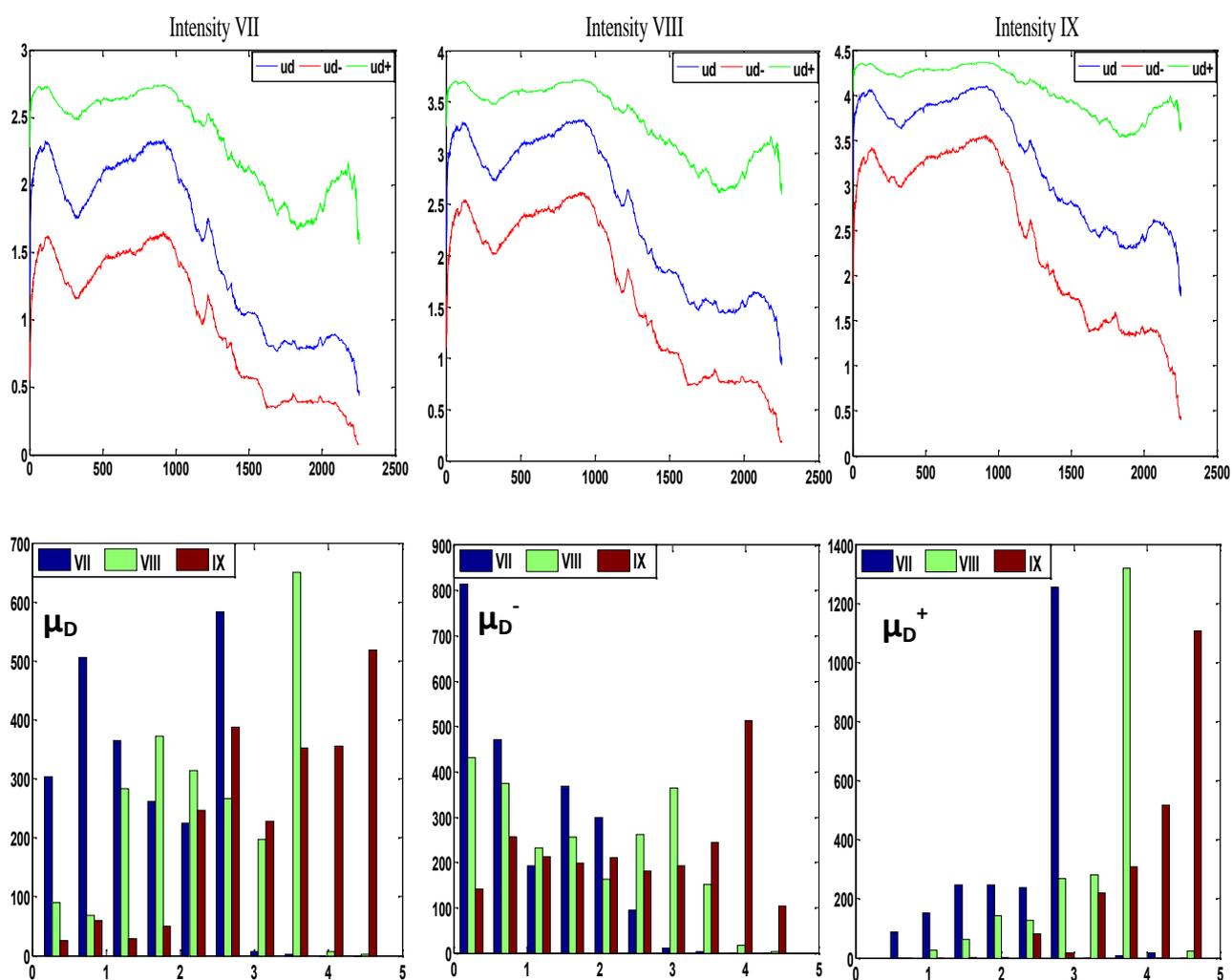
Annexe.3-7. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction



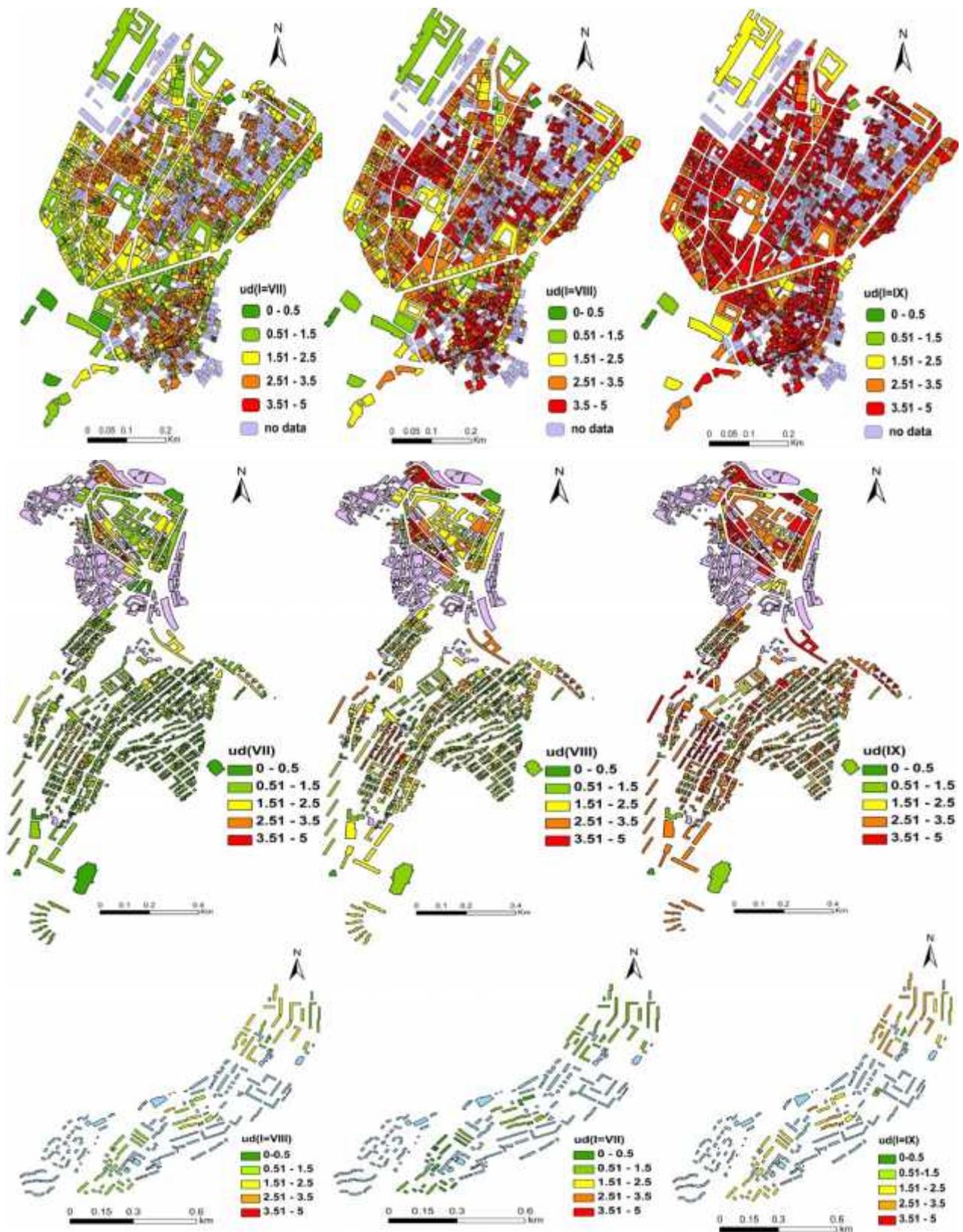
Annexe.3-8. Distribution spatiale : (a)Matériaux ;(b) forme du toit ; (c) hauteur ;(d) époque de construction.



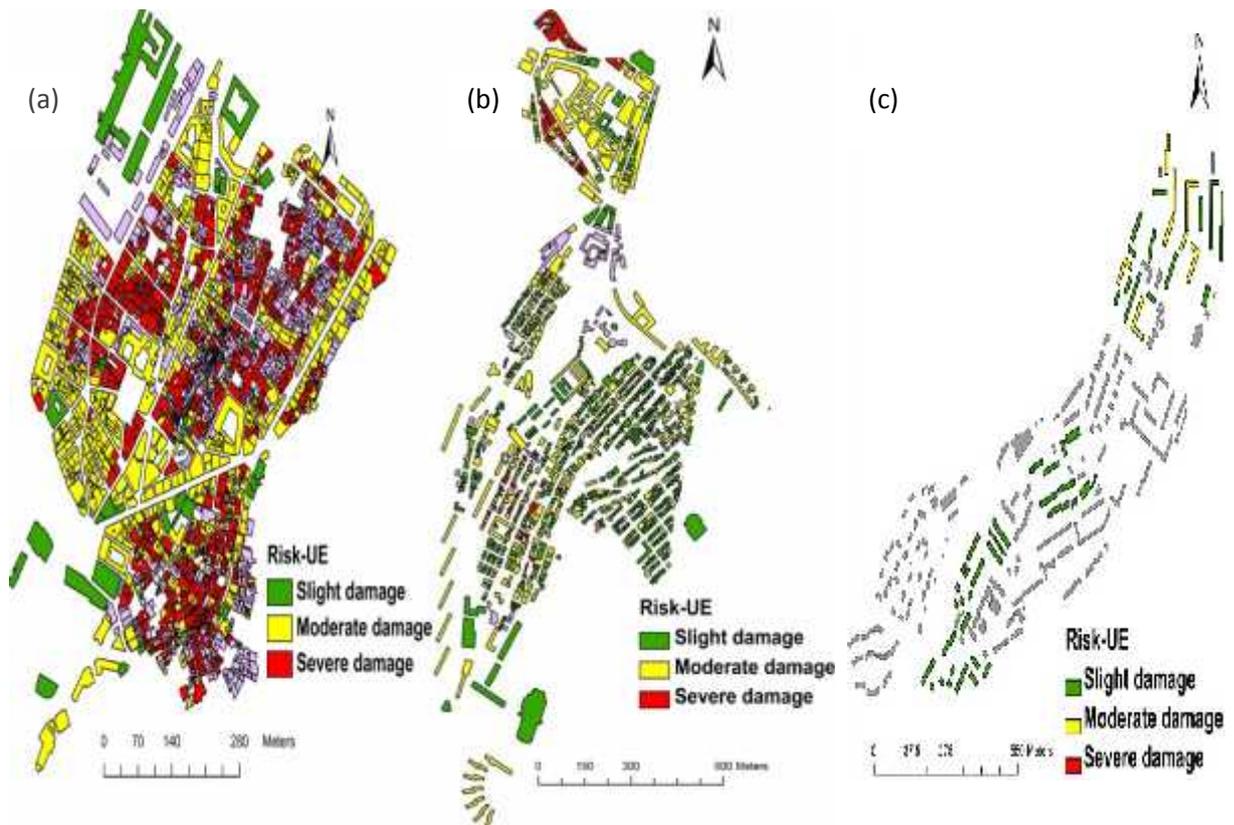
Annexe.4-1: Distribution des constructions en fonction de l'époque de construction : (a) matériaux de construction ;(b) classes de vulnérabilité.



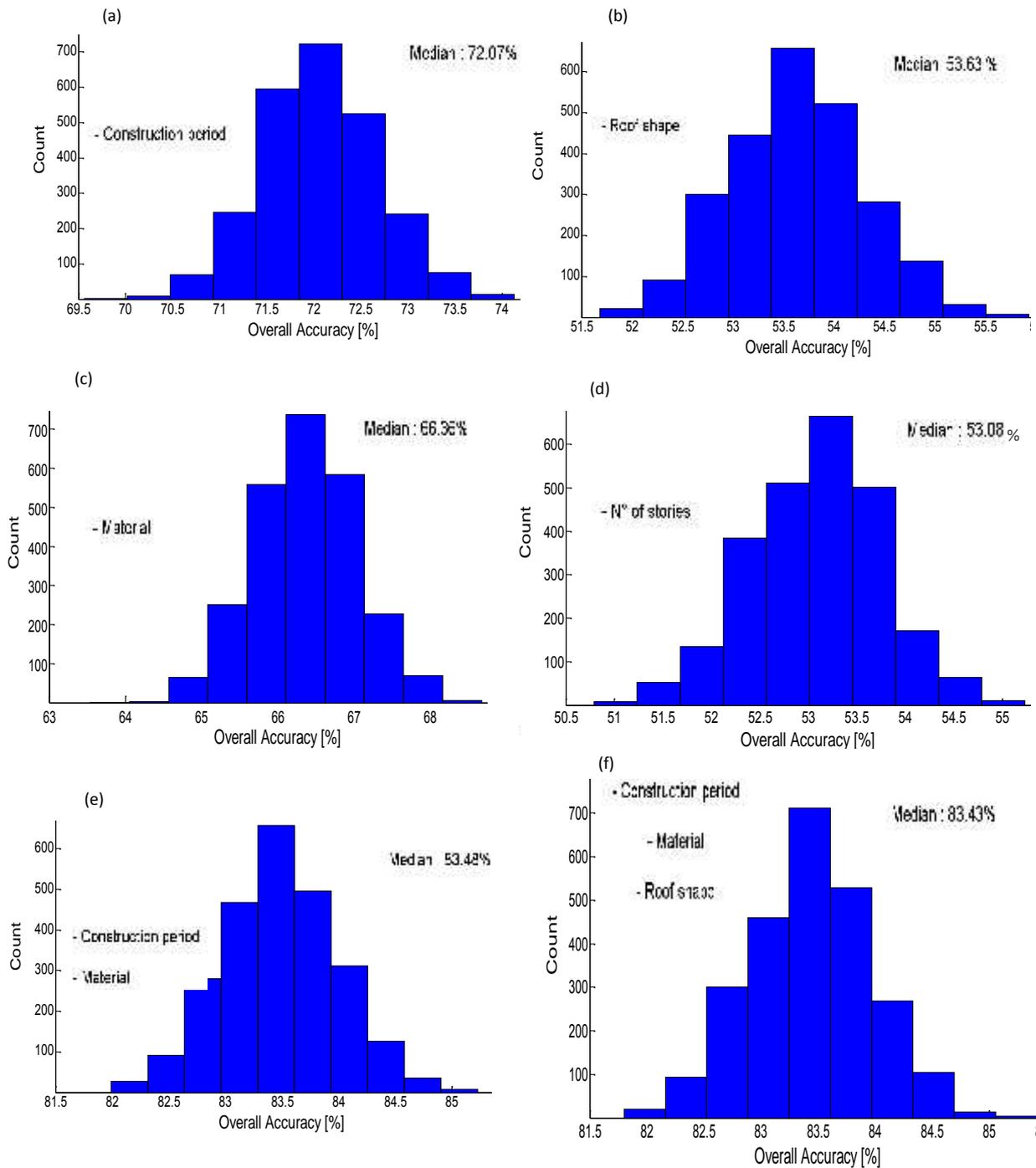
Annexe.4-2. Courbes de dommage moyen, avec représentation des différentes valeurs probables du dommage (d^- , d_{moy} , d^+) et histogramme du dommage moyen selon la Méthode Risk-UE et l'intensité de calcul : VII, VIII, IX.



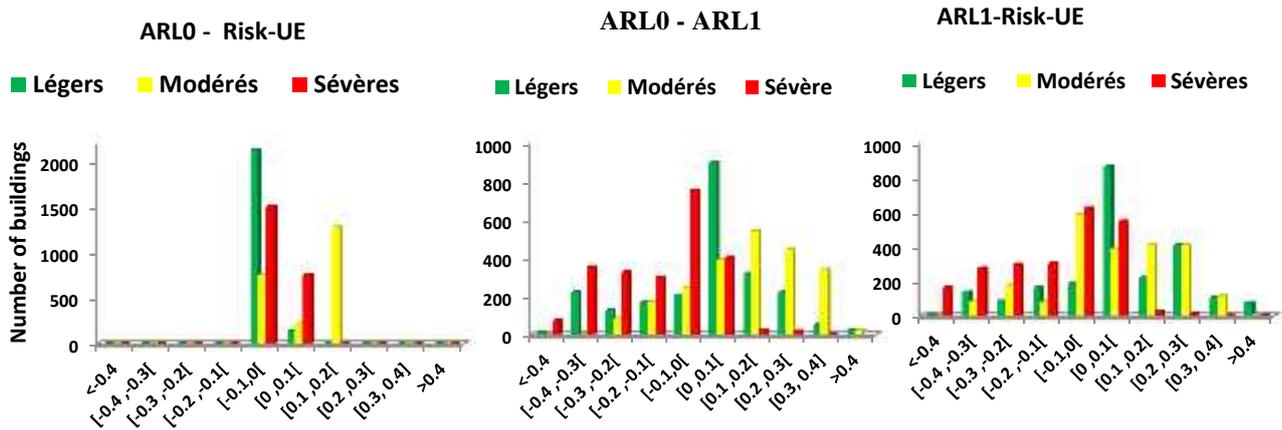
Annexe.4-3: Distribution spatiale, du dommage moyen μ_D estimé par la méthode Risk-UE.



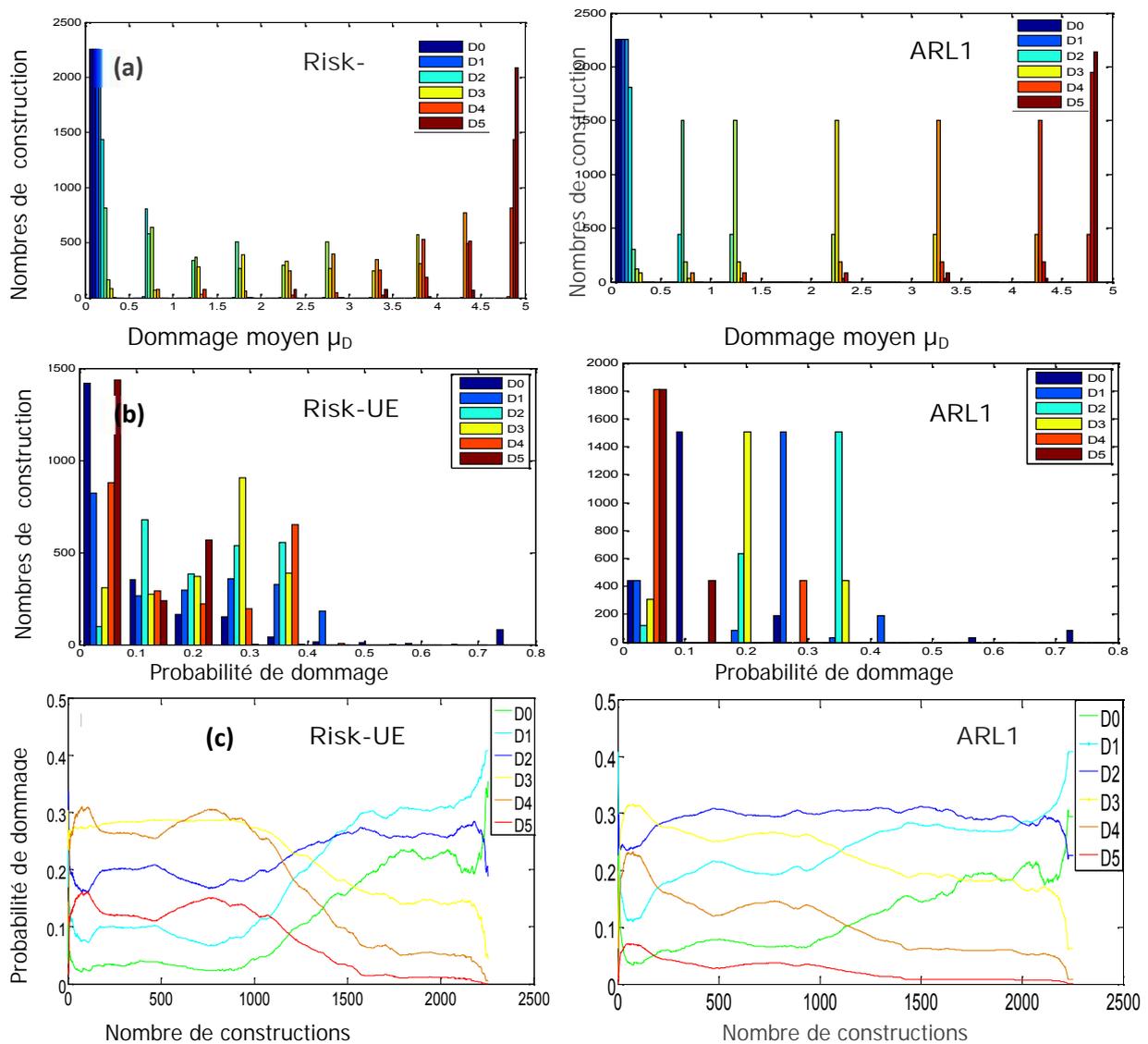
Annexe 4-4 : Distribution spatiale du dommage pour un scénario sismique d'intensité VIII estimé par la méthode Risk-UE.



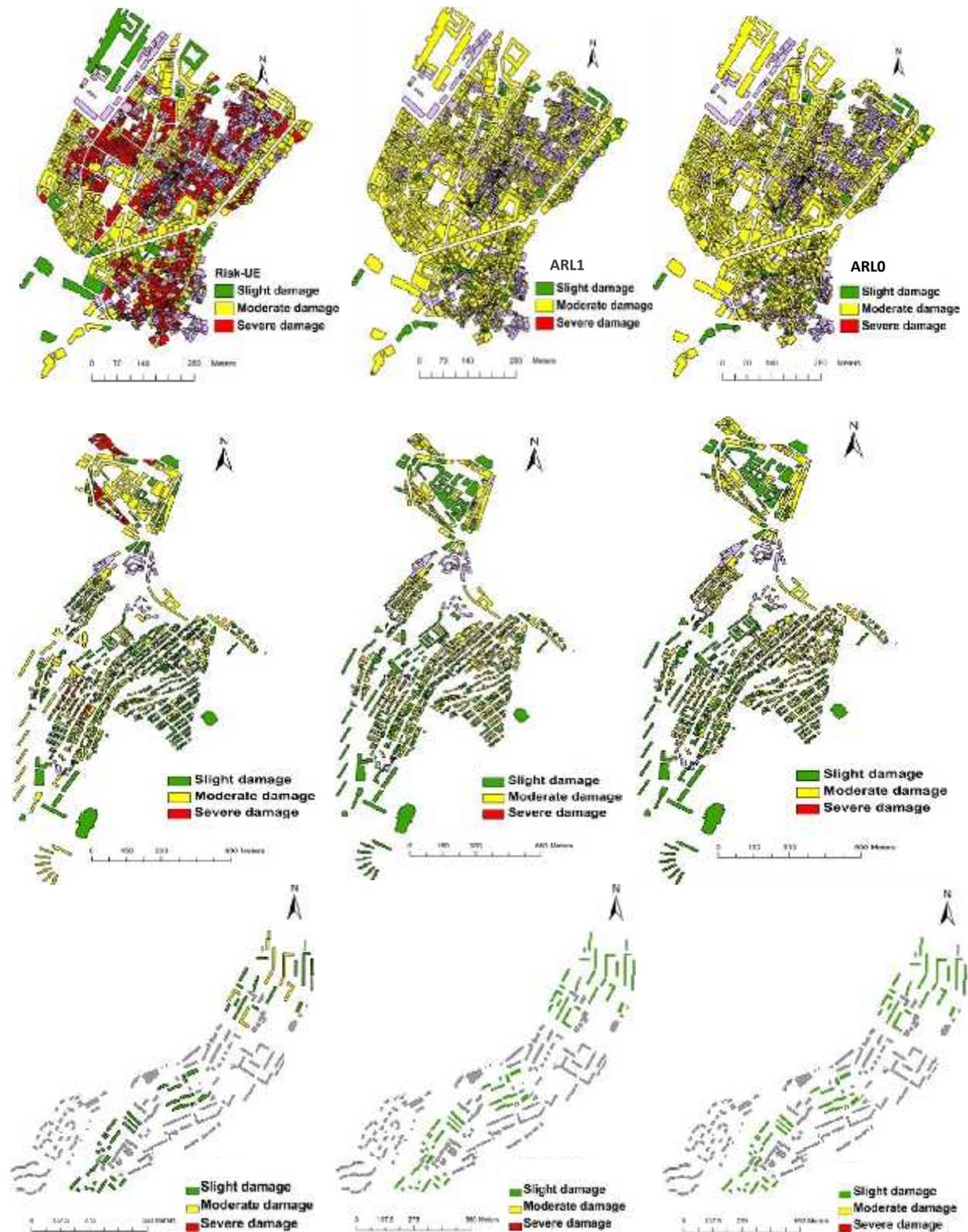
Annexe.5-1. Précision de la classification de vulnérabilité considérant 2500 génération aléatoires de 30% de la base de donnée des constructions à Constantine pour plusieurs combinaisons: (a) la période de construction (b) la forme du toit ; (C) le matériau (D) le nombre d'étages ;(e) le matériau, et la de la période de construction ;(f) la période de construction, le matériau, et la forme du toit.



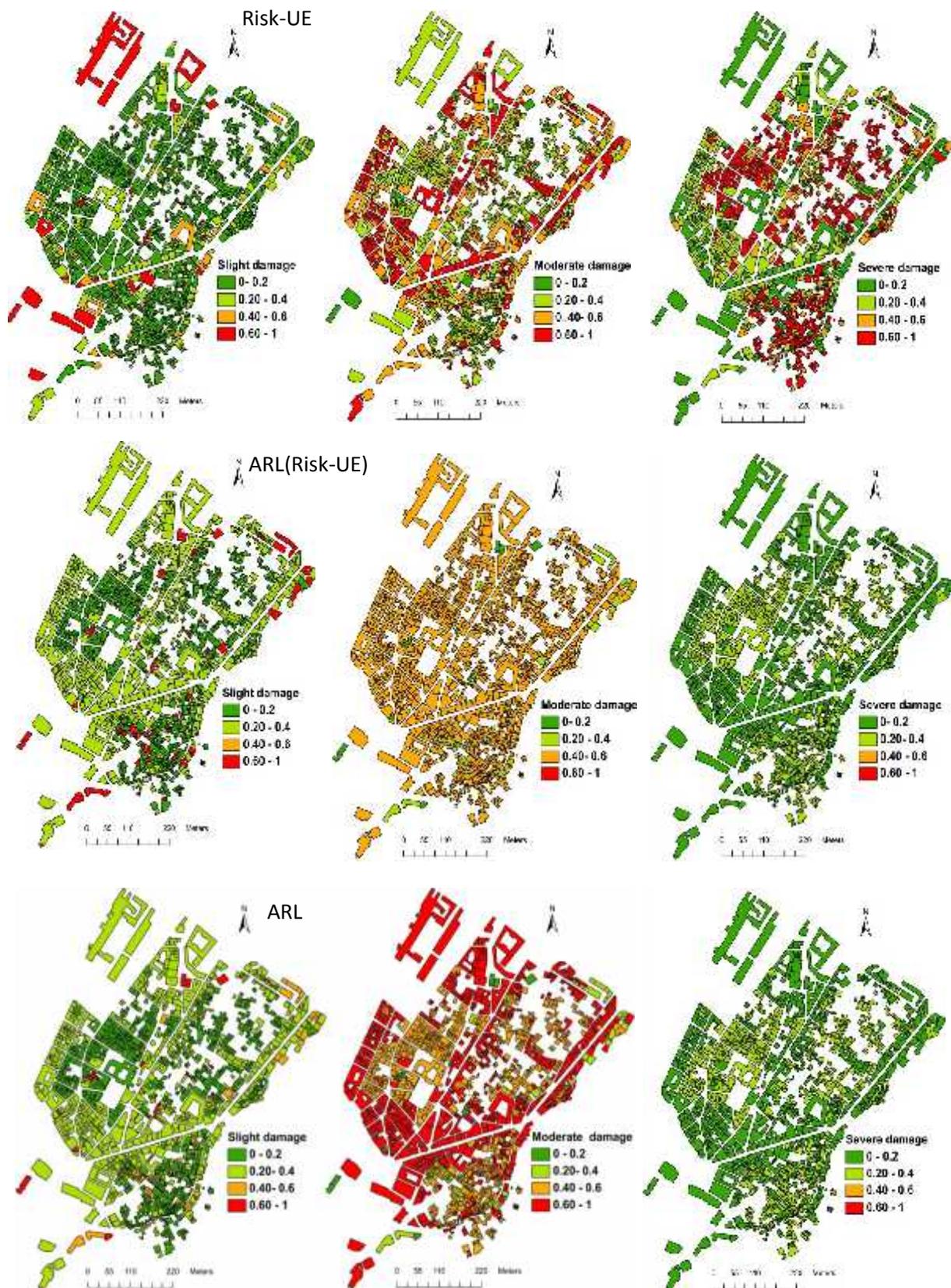
Annexe.5-2. La différence de la distribution des dommages sismiques entre évalués par les méthodes ARLO, Risk-UE, et ARL1.



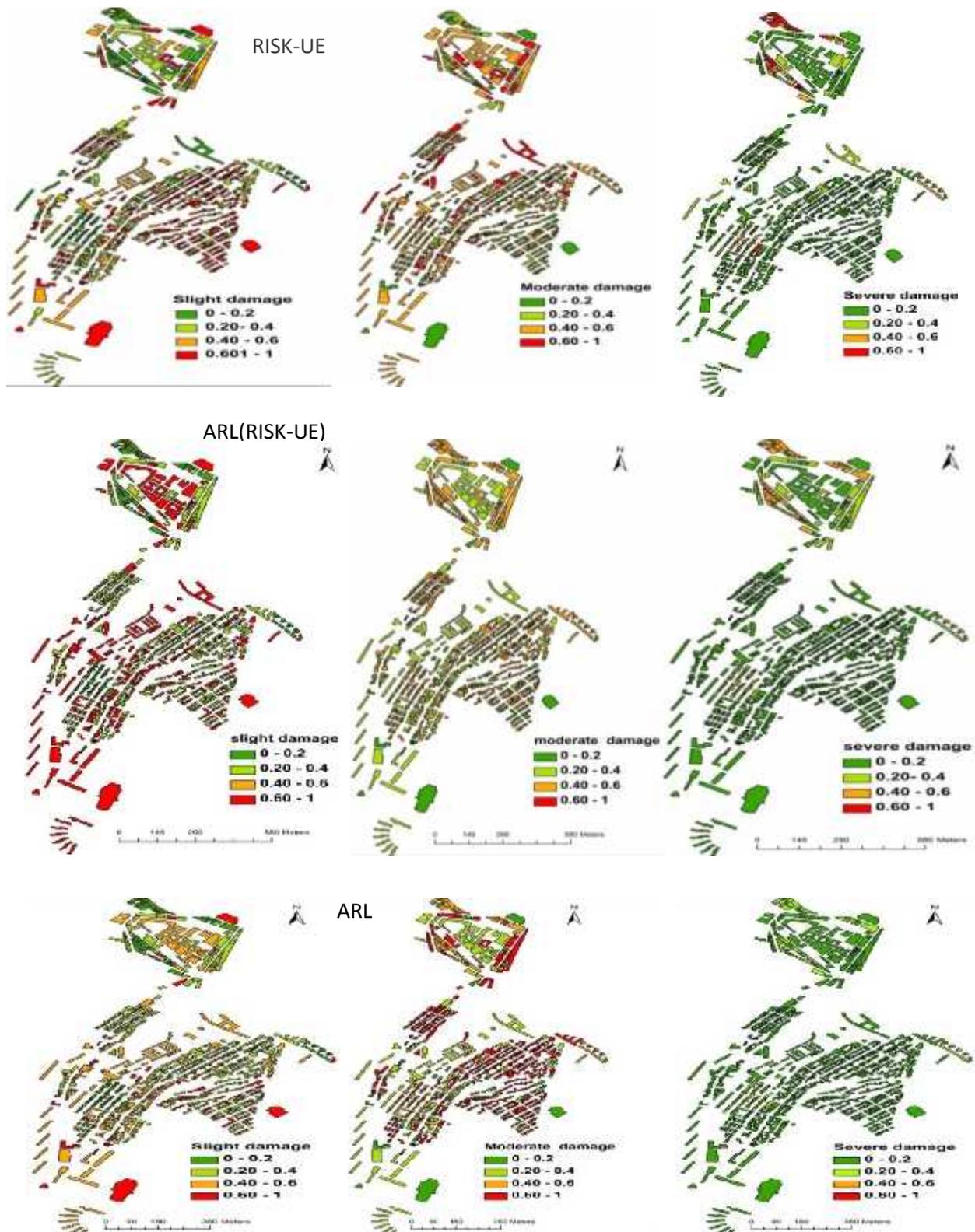
Annexe.5-3. Comparaison entre la méthode Risk-UE et la méthode ARL1 selon les nombres des constructions étudiées : (a) la distribution des dommages moyen ; (b) la distribution des classes de dommages ; (c) la distribution de la probabilité des dommages.



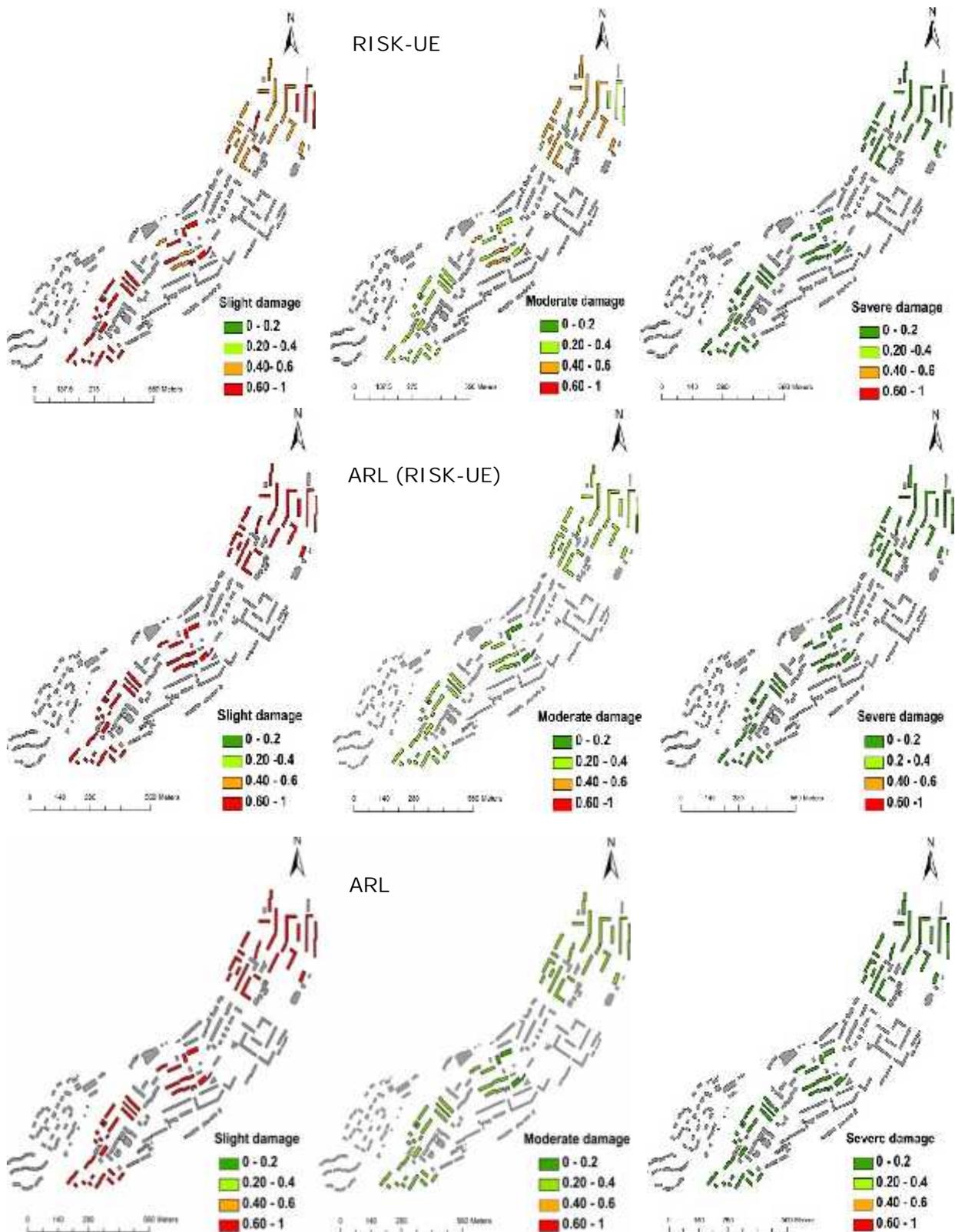
Annexe.5-4. Répartition spatiale des dommages à Constantine pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5)



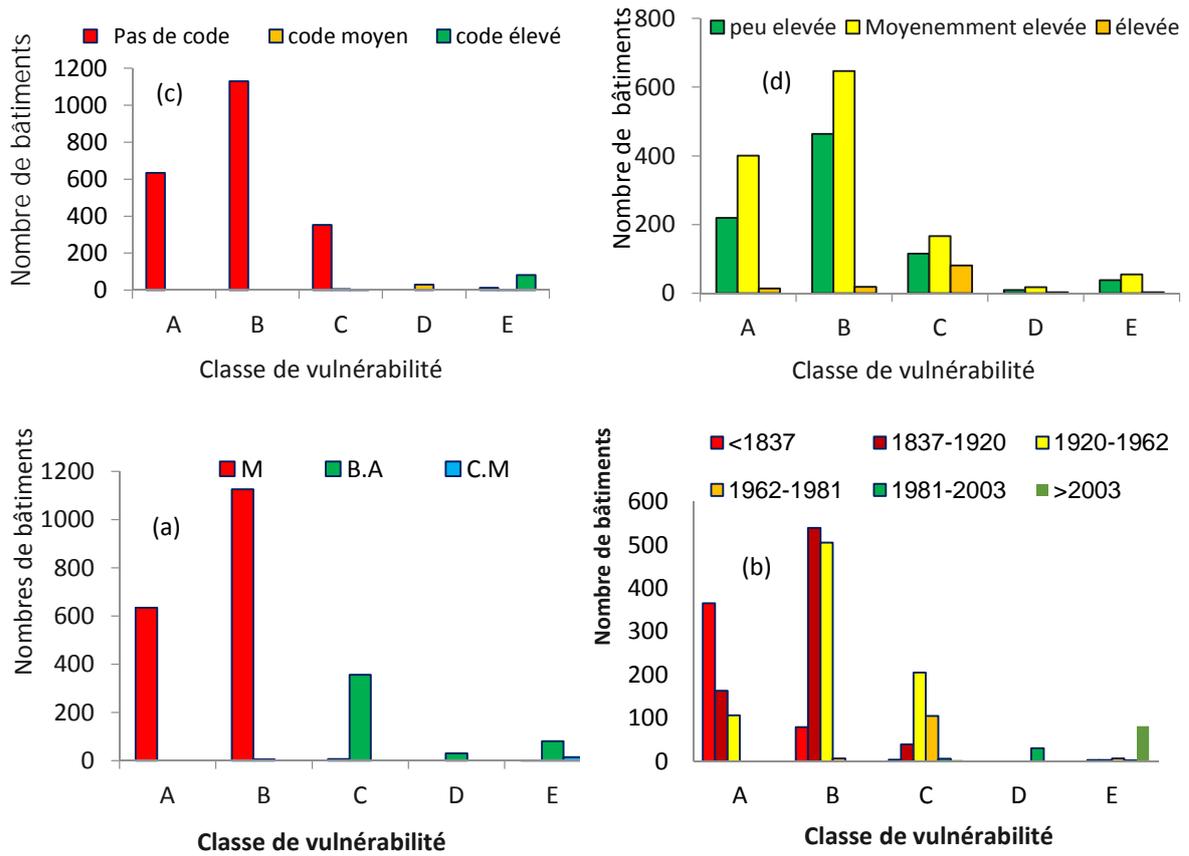
Annexe.5-5. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 1 "Rocher " pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).



Annexe.5-6. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 2 pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).



Annexe.5-7. Répartition spatiale de la probabilité des dommages sur la zone 3 pour un scénario de dommage d'intensité VIII. Les Niveaux de dégâts sont donnés par les trois méthodes et regroupés en dommages le plus probable : légers (D0 + D1), modérés (D2 + D3) et sévères (D4 + D5).



Annexe.5-8. Histogramme de la distribution des classes de vulnérabilité selon la méthode ARL qui utilise la combinaison (Age + matériau +forme du toit) : (a) Matériaux de construction ;(b) époque de construction ;(c) code parasismique ; (d) Hauteur de la construction