

UNIVERSITE DE BLIDA 1
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

VULNERABILITE SISMIQUE DU BATI ALGERIEN :
DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION

Par

Mehdi BOUKRI

Devant le jury composé de :

M. Abed	Professeur, U. Blida1, Blida	Président
S. Kenai	Professeur, U. Blida1, Blida	Examineur
D. Benouar	Professeur, USTHB, Alger	Examineur
M.N. Farsi	Directeur de Recherche, CGS, Alger	Directeur de Thèse
A. Mébarki	Professeur, UPEM, Paris, France	Co- Directeur de Thèse
A. Meslem	Maître de Recherche, Norsar, Norvège	Invité
M. Belazougui	Maître de Recherche, Directeur du CGS	Invité

Blida, Décembre 2014

REMERCIEMENT

En premier lieu, je voudrais exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse, Mohammed Naboussi Farsi, Directeur de Recherche et Directeur Adjoint au Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, CGS, pour m'avoir encadré et dirigé avec sérénité et détermination afin de mener à bien ma thèse de doctorat. Je lui dois tout mon respect et gratitude et je lui dis tout simplement Merci.

J'adresse mes profonds remerciement à Monsieur Ahmed Mébarki, Professeur au laboratoire Modélisation et Simulation Multi-Echelle, MSME, à l'Université de Marne La Vallée, Paris, pour avoir bien accepté de me co-encadrer. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, ses conseils et encouragements qui m'ont été d'une aide précieuse pendant mes travaux de thèse. Je lui en suis profondément reconnaissant.

Je voudrais remercier, Monsieur Mohamed Belazougui, Directeur du CGS, qui n'a ménagé aucun effort pour m'orienter, m'aider et encourager et dont la longue expérience m'a été d'un apport inestimable.

Je remercie respectueusement, Monsieur Mohamed Abed, Professeur à l'Université Blida 1, pour avoir bien voulu accepté de présider le jury et de n'avoir ménagé aucun effort pour faire aboutir la soutenance de cette thèse. Je lui transmets toute ma reconnaissance.

Mes vifs remerciements s'adressent particulièrement à Monsieur Saïd Kenaï, Professeur à l'Université Blida 1, pour avoir accepté de donner un peu de son temps pour examiner et commenter cette thèse.

Il m'est particulièrement honorable, d'adresser ma reconnaissance à Monsieur Djillali Benouar, Professeur à l'USTHB, qui a accepté de se rendre disponible afin d'examiner et apporter un regard critique sur ce travail.

Un remerciement particulier et chaleureux s'adresse aussi à Monsieur Abdelghani Meslem, PhD et chercheur au centre de recherche Norsar en Norvège, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'assister à ma soutenance et de faire partie du jury.

J'exprime ma reconnaissance à mes collègues qui m'ont apporté leur aide et m'ont soutenu tout au long de mon travail, en particulier, Hassan Aknouche, Nabila Guessoum, Fouad Kehila, Abdenasser Slimani, Assia Bouchelouh, Dalila Ait-Benamar, Hamid Bourenane, Mohamed Bensallah, Samira Saadi, Omar Amellal, Mounir Ait Belkacem, Nacim Yousfi, les Ingénieurs du bureau du CGS à Constantine ainsi que le personnel d'Algèbre Solutions, en particulier, Karim Lefki, Rachid Lazri et Khadidja Belgacem.

Je tiens à remercier singulièrement, Monsieur Brahim Mezazigh, Maître assistant «A», à l'université de Boumerdès pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Ma reconnaissance aussi à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à mes travaux de recherche.

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce qu'une partie des travaux de cette thèse ait été réalisée, par l'intermédiaire du co-encadrement, dans le cadre du programme de coopération Algéro-Français PHC TASSILI 2011-2014 (Code Projet: 24583XB).

En dernier, j'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à mon épouse, ma mère et mon défunt père pour leur soutien inaltérable.

DEDICACE

A la mémoire de mon père,

A ma mère,

A ma femme et mes chers enfants,

A ma sœur et mes frères,

A ma grand-mère,

A mes beaux-parents, beaux-frères et belles-sœurs,

A tous mes amis.

RESUME

Vulnérabilité sismique du bâti Algérien : Développement d'un outil d'aide à la décision

Lors d'une catastrophe sismique, les moyens de secours mobilisés dépendent de la connaissance du niveau de l'ampleur des dommages. L'expérience des séismes passés en Algérie, tels que ceux de Boumerdès, Tipasa, Mascara, etc. a montré que la mise en place des moyens d'intervention adéquats ne s'est faite qu'après le retour des premiers enquêteurs, ce qui a fait perdre beaucoup de temps dans l'intervention, et diminue donc la chance de trouver des survivants. Ce retard est dû à la localisation tardive des zones touchées et à l'ignorance du niveau d'alerte à déclencher.

Le présent travail consiste à la mise au point d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et d'outil d'aide à la décision pouvant donner une estimation des dommages sismiques probables et leur répartition spatiale dans une zone touchée par un séisme potentiel, selon le contexte du bâti existant en Algérie.

Cette méthodologie, utilisant un code informatique développé à cet effet et intégrant un système d'information géographique (SIG), permet l'automatisation du calcul et le traitement rapide de l'ensemble des données avec la génération des cartes de dommages sismiques. Le modèle d'estimation de dommages sismiques élaboré peut servir à la réalisation d'une estimation prédictive des dommages sismiques qui peuvent se produire dans une zone urbaine exposée au risque sismique, à travers la réalisation d'un scénario sismique probable, ce qui permettrait de prendre les mesures préventives adéquates pour la mitigation de ce risque sismique ; à donner une estimation des dommages post-sismiques en temps réel, dans les quelques instants qui suivent un séisme réel, une fois l'épicentre localisé et la magnitude connue, à localiser les zones les plus touchées, ce qui aiderait à connaître le niveau d'alerte à déclencher et pouvoir ainsi mobiliser les moyens de secours nécessaires. Ce modèle se présente comme un outil d'aide à la décision qui constitue un apport dans le domaine de la planification urbaine et de la gestion de crise en Algérie.

Afin de tester son efficacité et le degré de fiabilité des résultats des dommages sismiques escomptés, cette méthodologie a été validée et calibrée avec le cas du site urbain de la ville (commune) de Boumerdès qui a connu une secousse tellurique en date du 21 Mai 2003 de magnitude $M_w = 6.8$ et dont les dommages ont été recensés. Pour cela, les

dommages réels observés sur 3700 constructions ont été comparés aux dommages théoriques estimés par cette méthodologie obtenus par deux modèles d'aléas sismiques. Dans un premier temps, le spectre de réponse du site construit à partir des enregistrements accélérométriques obtenus durant le choc principal de la secousse a été considéré, et dans un deuxième temps, en adoptant le spectre des règles parasismiques algériennes en vigueur lors de l'occurrence du séisme, RPA 99.

Le concept ainsi développé et validé a été appliqué pour l'estimation des dommages sismiques plausibles dans deux grands centres urbains d'Algérie, potentiellement exposés au risque sismique, à savoir, la ville (commune) de Constantine, ayant un patrimoine immobilier avoisinant 29000 constructions, ainsi que le Grand-Blida composé de 04 communes (Blida, Ouled-Yaïch, Béni-Mered et Bouarfa), renfermant un parc bâti d'environ 46000 unités de constructions.

SUMMARY

During an earthquake disaster, the mobilised emergency facilities depend on the knowledge of the damage extent level. The experience of the last earthquakes, like those occurred in Boumerdès, Tipasa, Mascara, etc. showed that the elaboration of adequate intervention measures was done after the first in situ inspections, which may take long time to provide information and therefore decreases the chance to find survivors. This delay is due to the lack of different means to locate quickly, at the early hours, the affected areas and due also to the uncertain level of alarm to be given.

The present work consists on the development of a decision-making vulnerability methodology which allows to give an estimating of the probable seismic damage and their spatial distribution in the affected area by a potential earthquake, according to the context of the existing building in Algeria.

This methodology, using a data-processing code developed for this purpose, and integrating a Geographical Information System (SIG), allows the automation of calculation and the fast treatment of the whole of the data with the generation of the seismic damage maps. The elaborated earthquake damage estimation model is used to make a predictive estimating of the seismic damage which can occur in an urban area subjected to the seismic

risk, through the realisation of a probable earthquake scenario, enabling to take the adequate preventive measures to mitigate this seismic risk. It give in real time, an estimating of the post-seismic damage, after a disaster occurrence, once the epicentre localised and the magnitude known, as it allows a quick survey of the disaster extends in the more affected areas, which would help to know the level of alarm to be given and the necessary emergency facilities to be mobilised. This model arises as a decision-making tool which constitutes a contribution in the urban planning field and crisis management in Algeria.

To test its effectiveness and reliability of the results of expected seismic damage, this methodology has been validated and calibrated with the case of urban area of the city (commune) of Boumerdès which experienced by the magnitude $M_w=6.8$ earthquake of May 21, 2003 and that the damages were identified.

For this purpose, observed damages reported for almost 3700 buildings are compared to the theoretical predictions obtained under two distinct modelling of the seismic hazard. First, the site response spectrum built according to real accelerometric records obtained during the main shock is used. In second time, the effective Algerian seismic code response spectrum (RPA 99) is considered.

The concept thus developed and validated was applied to estimate the plausible seismic damage expected in two important urban areas in Algeria, potentially exposed to the seismic risk, namely, the city of Constantine, located at the North-Eastern part of Algeria, with a real inheritance bordering 29000 constructions, as well as the Great-Blida (Municipalities of Blida, Ouled-Yaïch, Beni-Mered and Bouarfa), for a set of almost 46000 buildings.

الملخص

أثناء حدوث كارثة زلزالية، حشد وسائل الإغاثة الموفرة ترتبط بمدى معرفة درجة حجم الخسائر. التجربة المستوحاة من الزلازل الماضية في الجزائر مثل تلك التي حدثت ببومرداس، تيبازة، معسكر، إلخ، أسفرت أنّ تجهيز وسائل التدخل المناسبة لم تتم إلا بعد عودة المحققين الأوائل، هذا ما تسبّب في تضيق الكثير من الوقت للتدخل وبالتالي يقلل من فرص العثور على ناجين. هذا التأثير راجع إلى عدم التحديد السريع للأماكن المتضررة و تجاهل مستوى التأهب الواجب تحريكه.

يهدف هذا العمل إلى وضع منهجية هشاشة لدعم القرار بإمكانها إعطاء تقديرا للخسائر و انتشارها في المنطقة المتضررة من الزلازل وفقا لسياق المباني المشيئة في الجزائر .

تمّ رقمنة هذه المنهجية في برنامج آلي الذي استحدثه لهذا الغرض، مندمج مع نظام معلومات جغرافية (SIG) الذي يسمح بآلية الحساب و العلاج السريع لمجمل المعطيات مع تحصيل خرائط الخسائر الزلزالية.

نموذج تقييم الخسائر الزلزالية المطور يسمح سواء لتحقيق تقديرات تنبؤية للخسائر الممكن حدوثها في منطقة حضرية و معرضة للزلازل ، من خلال تنفيذ سيناريو زلزالي محتمل، ما يساعد في اتخاذ التدابير الوقائية الملائمة للتخفيف من مخاطر الزلازل، و من جهة أخرى هذا النموذج يسمح بإعطاء تقديرا للخسائر حين وقوع الزلزال ، بمجرد تحديد مركز الهزة و شدتها، و تحديد المناطق الأكثر تضررا الذي يساعد على معرفة مستوى التأهب الواجب تحريكه و وسائل الإغاثة اللازم توفيرها.

هذا النموذج يمثل وسيلة مساعدة في اتخاذ القرار الذي يشكل دعما في مجال التخطيط الحضاري و تسيير الأزمات في الجزائر.

من أجل معايرة و اختبار كفاءة المنهجية المطورة ، تم تطبيقها على حالة المنطقة الحضرية لمدينة بومرداس التي عايشت زلزال عنيف في 21 مايو 2003 ($M_w=6,8$). لهذا الغرض تم مقارنة الخسائر الحقيقية لقرابة 3700 بناية بالخسائر النظرية باستعمال نموذجين للإحتمال الزلزالي. النموذج الأول، تم عن طريق استعمال طيف الإستجابة (Response Spectrum) المنجز وفقا لتسجيلات التسارع المحصل عليها خلال الهزة الرئيسية. ومن جهة أخرى، تم استعمال طيف الإستجابة للقواعد المضادة للزلازل الجزائرية الساري المفعول أثناء الزلازل (RPA99).

بعد تطوير و معايرة المنهجية، تم تطبيقها لتقدير الخسائر الزلزالية المتوقع حدوثها بمركزين حضريين كبيرين في الجزائر معرضين لخطر الزلزال ، و هما كل من مدينة قسنطينة، الواقعة شمال شرق الجزائر بحظيرة سكنية تقارب 29000 وحدة سكنية ، و منطقة البليدة الكبرى (بلديات البليدة ، أولاد يعيش ، بني مراد و بوعرفة)، المتربعة على حوالي 46000 بناية.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	20
Contexte de la thèse	20
Objectifs	22
Organisation de la thèse	23
CHAPITRE 1 : REDUCTION DU RISQUE SISMIQUE - ETAT DE L'ART	25
1.1. Introduction	25
1.2. Notions du risque	27
1.3. Le risque sismique	28
1.3.1. Analyse de l'aléa sismique.....	28
1.3.2. Conditions du sol.....	29
1.3.3. Les enjeux	29
1.3.4. Vulnérabilité sismique	30
1.4. Etat de l'art sur les procédés d'estimation des dommages sismiques.....	38
1.4.1. Méthodologie HAZUS.....	42
1.4.2. Méthodologie RADIUS	55
1.4.3. Méthodologie RISK-UE	65
1.4.4. Méthodologie CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment)	68
1.4.5. Méthodologie "Global Earthquake Model (GEM)"	70
1.5. Systèmes d'information géographique (SIG).....	72
1.5.2. Importance du SIG dans l'évaluation du risque sismique	73
1.6. Conclusion.....	73
CHAPITRE 2 : BÂTI EXISTANT EN ALGERIE - MISE AU POINT D'UNE METHODOLOGIE D'ESTIMATION DES DOMMAGES SISMIQUES.....	75
2.1. Introduction	75
2.2. Développement de la procédure d'estimation des dommages sismiques pour le bâti existant en Algérie	76
2.2.1. Algorithme de la méthode d'estimation des dommages sismiques du bâti en Algérie	77
2.2.2. Typologies de structures utilisées.....	88
2.2.3. Fonctions de dommages adoptées	89

2.2.4. Description des dommages post-sismiques du bâti en Algérie	91
2.3. Mise en place d'un outil d'aide à la décision	94
2.3.1. Utilité de la méthodologie mise au point	94
2.3.2. Développement de la plateforme informatique	96
2.4. CONCLUSION.....	105
CHAPITRE 3 : CALIBRATION ET VALIDATION DE LA METHODOLOGIE MISE AU POINT POUR L'ESTIMATION DES DOMMAGES SISMIQUES.....	107
3.1. Introduction	107
3.2. Généralités sur la zone d'étude : ville de Boumerdès.....	108
3.2.1. Aperçu sur la ville de Boumerdès	108
3.2.2. Cadre géologique et géotechnique du site urbain de la ville de Boumerdès ...	109
3.3. Séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003	110
3.3.1. Enregistrements accélérométriques	112
3.3.2. Evaluation des dommages post-sismiques.....	113
3.4. Analyse des dommages réels observés dans la ville de Boumerdès.....	114
3.5. Estimation des dommages post-sismiques par la méthodologie mise au point et comparaison avec les dommages réels	118
3.5.1. 1 ^{er} Cas: Simulation théorique utilisant le spectre de réponse du site	118
3.5.2. 2 ^{ème} Cas: Simulations et prédictions utilisant le spectre de réponse du code parasismique Algérien (RPA).....	123
3.5.3. Estimation des dommages.....	123
3.5.4. Analyse des dommages.....	126
3.6. Exemples d'application de la méthodologie mise au point à deux cités.....	130
3.6.1. Systèmes constructifs et dommages post-sismiques	131
3.6.2. Estimation des dommages.....	134
3.6.3. Analyse des dommages simulés et réels	138
3.6. Conclusion.....	142
CHAPITRE 4 : PREDICTION DE DOMMAGES POUR DE FUTURS SEISMES EN ALGERIE – APPLICATIONS AU CAS DE DEUX CENTRES URBAINS : CONSTANTINE ET BLIDA	145
4.1. Introduction	145
4.2. Estimation des dommages sismiques du bâti existant de la ville Constantine	146
4.2.1. Aperçu sur la ville de Constantine.....	146

4.2.2. Evolution urbaine de la ville	148
4.2.3. Sismicité historique de la région Constantinoise	151
4.2.4. Evaluation de l'aléa sismique et sa distribution spatiale dans la zone d'étude	153
4.2.5. Cadre géologique et géotechnique de la ville de Constantine.....	155
4.2.6. Inventaire et mise en place de la base de données du bâti de la ville de Constantine	158
4.2.7. Estimation des dommages sismiques du bâti.....	161
4.3. Estimation des dommages sismiques du bâti existant : cas du Grand-Blida.....	166
4.3.1. Aperçu sur le Grand-Blida.....	166
4.3.2. Historique du Grand-Blida.....	167
4.3.3. Survol de l'évolution urbaine du Grand-Blida.....	169
4.3.4. Sismicité historique de la région de Blida	172
4.3.5. Evaluation de l'aléa sismique dans la région de Blida.....	174
4.3.6. Cadre géologique et géotechnique du Grand Blida.....	175
4.3.7. Inventaire et mise en place d'une base de données du bâti du Grand Blida....	178
4.3.8. Estimation des dommages sismiques du bâti.....	182
4.4. CONCLUSION.....	191
CONCLUSIONS.....	193
Conclusion générale.....	193
Perspectives.....	195
APPENDICE A : SYSTEMES D'ALERTE SISMIQUE PRECOCE, D'ALARME SISMIQUE ET DE REPOSE SISMIQUE RAPIDE.....	196
APPENDICE B : VALEURS DES PARAMETRES DEFINISSANT LES COURBES DE CAPACITE ET DE FRAGILITE ADOPTEES POUR LES TYPOLOGIES DU BATI EXISTANT EN ALGERIE	212
APPENDICE C : LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	215
REFERENCES.....	216
REFERENCES SCIENTIFIQUES DU DOCTORANT	229

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure a : Carte des séismes passés durant les trois dernières décennies	21
Figure 1.1 : Convolution du Risque sismique.....	28
Figure 1.2 : Effets de sites induits et directs	29
Figure 1.3 : La représentation physique des courbes de capacité [50].....	31
Figure 1.4 : Représentation d'une courbe de capacité (Effort – Déplacement)	32
Figure 1.5 : Exemple de courbes de vulnérabilité.....	35
Figure 1.6 : Exemple d'une courbe de fragilité avec quatre niveaux de dommages	36
Figure 1.7 : Organigramme de la méthodologie HAZUS	44
Figure 1.8 : Schématisation du développement de la courbe du spectre de	49
Figure 1.9 : Conversion du spectre de réponse élastique en format ADRS	50
Figure 1.10 : Détermination de la demande en déplacement (Point de demande)	51
Figure 1.11 : Principe de la méthode du spectre de capacité de l'ATC-40	52
Figure 1.12 : Représentation des courbes de fragilité pour 4 niveaux de dommages	55
Figure 1.13 : Plan de scénario catastrophe sismique de RADIUS	56
Figure 1.14 : Modèle simple d'une source sismique	58
Figure 1.18 : Courbes de vulnérabilité des différentes classes de constructions	61
Figure 1.19 : Fonctions de vulnérabilité des infrastructures et réseaux vitaux adoptées par RADIUS	62
Figure 1.20 : Algorithme de COBURN et al.	64
Figure 1.21 : Exemple de courbes de vulnérabilité développées dans le projet RISK-UE pour le cas de la ville de Nice, France	67
Figure 1.22 : Organigramme du modèle CAPRA	70
Figure 1.23 : Organigramme du modèle GEM	71
Figure 2.1 : Schématisation de la Procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie.....	76
Figure 2.2 : Organigramme général de la procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie	78
Figure 2.3 : Représentation bilinéaire du spectre de capacité	79
Figure 2.4 : Procédure de définition du point de performance initial (a_{pi} , d_{pi}) par l'hypothèse des égalités des déplacements	83
Figure 2.5 : Développement du spectre de demande réduit.....	86

Figure 2.6 : Détermination de la période de la borne supérieure du plateau du spectre de demande réduit (T_{sr})	87
Figure 2.7 : Détermination du point de performance final de la structure	88
Figure 2.8 : Schématisation de la courbe de capacité caractérisant la typologie RC2-M [Bas-Code].....	90
Figure 2.9 : Schématisation de la courbe de fragilité caractérisant la typologie RC2-M [Bas-Code].....	91
Figure 2.10 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie:(a)-Données générales et dommages des éléments structuraux; (b)-Dommages des éléments Non-structuraux et évaluation générale.....	93
Figure 2.11 : Interface du menu principal de l'outil d'estimation des dommages sismique du bâti existant en Algérie développé	97
Figure 2.13 : Interface du module de base de données du bâti.....	98
Figure 2.14 : Exemple de la base de données du bâti sous format SIG	99
Figure 2.15 : Fiche d'enquête et d'évaluation du Bâti	101
Figure 2.16 : Génération des courbes de dommages.....	102
Figure 2.17 : Rubrique de calcul des points de performance et des matrices de dommages	103
Figure 2.18 : Exemple de génération d'une carte de dommages sur SIG (classification du bâti selon le degré de dommages prépondérant).....	104
Figure 3.1 : a. Droite : Image Satellite Quick-bird du bâti de la ville Boumerdès prise le 22/04/2002 (Avant le séisme du 21.05.2003) (Source OYO Corp). b. Gauche : Position de l'épicentre du choc principal du séisme de Boumerdès montré par l'étoile noire [106]... 108	108
Figure 3.2 : Coupe géologique à travers les plateaux de la ville et le Sahel de Boumerdès	109
Figure 3.3 : Carte géologique et géotechnique de la ville de Boumerdès	110
Figure 3.4 : Région secouée par le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003 ($M_w = 6.8$)... 111	111
Figure 3.5 : a). Cadre tectonique de la région d'Alger et Boumerdès, b). Positions de l'épicentre du choc principal du séisme de Boumerdès montré par l'étoile blanche, c). Positions de l'épicentre, montrées par les étoiles rouges, du séisme de Boumerdès données par divers centres, d). Positions des 2 stations accélérométrique (ST1 et ST2) de Keddara montrée par le triangle vert.....	112
Figure 3.6 : Pourcentages de dommages (D1 à D5) pour chaque typologie de la ville de Boumerdès	118

Figure 3.7 : Accélérogrammes des composantes horizontales du choc principal (Keddara ST1). (a) Composante Est-Ouest, (b) Composante Nord-Sud.....	119
Figure 3.8 : Spectre de réponse élastique normalisé pour un amortissement ($\xi=5\%$).....	120
Figure 3.9 : Carte de distribution des fréquences propres du sol dans la ville de Boumerdès. Les ronds noirs correspondent aux enregistrements H/V et les triangles bleus correspondent aux réseaux. Les chiffres rouges correspondent aux numéros des enregistrements H/V.....	122
Figure 3.10 : Histogramme des dommages des 3663 constructions existantes dans la ville de Boumerdès: Observés D_{obs} , Simulations théoriques selon le spectre de réponse (Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, <i>Spectre de calcul RPA</i> D_{sc} : Simulation 2).....	125
Figure 3.11 : Histogrammes de comparaison des dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès selon leurs typologies (<i>Spectre réel du site</i> D_{sr} : Simulation 1, <i>Spectre de calcul RPA</i> D_{sc} : Simulation 2).....	128
Figure 3.12 : Histogrammes de comparaison des dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès selon la période du code parasismique (<i>Spectre réel du site</i> D_{sr} : Simulation 1, <i>Spectre de calcul RPA</i> D_{sc} : Simulation 2).....	128
Figure 3.13: Dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès (Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, Spectre de calcul RPA D_{sc} : Simulation 2).....	129
Figure 3.14 : Histogramme des valeurs résiduelles : rapports des différences entre les fréquences théoriques et observées selon les catégories de dommages.....	129
Figure 3.15 : Image Satellite Quick-bird montrant les 2 cités « Ibn Khaldoun » et « 800 logements » prise le 22/04/2002 (Avant le séisme de Boumerdès du 21.05.2003).	130
Figure 3.16 : Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la cité Ibn Khaldoun.....	131
Figure 3.17 : Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la cité des 800 logements	133
Figure 3.18 : Répartition des dommages dans les deux cités (Ibn Khaldoun et 800 logements).....	133
Figure 3.19 : Courbe de capacité bilinéaire du type RC1-M Pré-code (Cité Ibn Khaldoun)	134
Figure 3.20 : Détermination du point de performance RC1-M Pré-code.....	135
Figure 3.21 : Courbes de fragilité RC1-M Pré-Code (Cité Ibn Khaldoun)	136
Figures 3.22 et 3.23 : Endommagement et destruction de l'extrémité du poteau du fait de l'absence d'armatures transversales dans la zone nodale (zone critique du poteau)	141
Figures 3.24 et 3.25 : Comportement aléatoire des bâtiments de la cité Ibn Khaldoun....	141
Figure 3.26 : Fissures au niveau de la jointure des panneaux préfabriqués et la structure	142

Figure 4.1 : Situation géographique de la ville de Constantine	147
Figure 4.2 : Ville de Constantine. Extension urbaine [131]	148
Figure 4.3 : Carte de la ville de Constantine durant l'époque Ottomane	149
Figure 4.4 : Carte de sismicité historique de la région de Constantine	152
Figure 4.5 : Carte des intensités historiques maximales.....	152
Figure 4.6 : Carte des failles actives dans la région de Constantine.....	154
Figure 4.7 : Représentation de la faille d'Ain-Smara et de la ville de Constantine.....	155
Figure 4.8 : a) carte géologique et géotechnique de la ville de Constantine; b) Carte des glissements de terrains de la ville de Constantine.....	156
Figure 4.9 : Classification des sols du site urbain de la ville de Constantine selon le RPA 99/2003.....	157
Figure 4.10 : Répartition du bâti de la ville de Constantine selon la structure de contreventement	160
Figure 4.11 : Dommages estimés pour les constructions de la ville de Constantine selon le type structurel.....	163
Figure 4.12 : Dommages estimés pour le bâti de la ville de Constantine selon le règlement en vigueur lors de sa construction.....	163
Figure 4.13 : Classification des districts de la ville de Constantine selon le degré de dommages moyen prépondérant	164
Figure 4.14 : Taux d'endommagement par secteur de la ville de Constantine.....	165
Figure 4.15 : Situation géographique du Grand-Blida «communes : Blida, Ouled-Yaïch, Beni-Mered et Bouarfa»	166
Figure 4.16 : a). Plan de la ville dans la période précoloniale ; b). Sept portes de la ville de Blida	168
Figures 4.17 et 4.18 : Auto-constructions dans le Grand-Blida.....	172
Figure 4.19 : Sismicité historique et instrumentale dans la région de Blida, entre 1825 et 2005. a) Magnitudes instrumentales « Mi » (cercles rouges) ; b) Magnitudes macrosismiques « Mm » (cercles bleus).....	173
Figure 4.20 : Carte des intensités maximales de la région de Blida	173
Figure 4.21 : Failles actives ou supposées actives dans la région de Blida.....	175
Figure 4.22 : Carte géologique de la région du Grand-Blida	176
Figure 4.23 : Classification des sols du site urbain du Grand Blida selon le RPA 99/2003	177

Figure 4.24 : Exemple de digitalisation du bâti du Grand-Blida sous plateforme SIG en utilisant l'image satellite haute résolution Geo-Eye (po_902114_0000000).....	179
Figure 4.25 : Répartition du bâti de la ville de Constantine selon le type de structure.....	181
Figure 4.26 : Carte des iso-accélérations maximales pour les périodes de retour de 500 ans dans la région de Blida	182
Figure 4.27 : Positions des mesures H/V dans le Grand-Blida (triangles noirs inversés)	184
Figure 4.28 : Types de courbes H/V observées dans le Grand-Blida : a) courbe du type 1- b) courbe du type 2.....	185
Figure 4.29 : Probabilités de dommages théoriques du bâti du Grand Blida selon le type de structure	186
Figure 4.30 : Probabilités de dommages théoriques du bâti du Grand Blida selon l'actualisation de la conception parasismique	187
Figure 4.31 : Taux d'endommagement par secteur du Grand-Blida- Z.M : Zone Militaire ; Z.MO : Zone Montagneuse	189
Figure A.1 : Système d'Alerte Sismique de la ville de Mexico.....	202
Figure A.2 : Disposition des stations numériques d'enregistrement de mouvements forts le long de Guerrero	203
Figure A.3 : Vitesse Cumulative Absolue	207
Figure A.4 : Interface du CISNDisplay (après le séisme de Médéa du 27 Mai 2007, M=4)	210

Tableau 1.1 : Eléments de calcul de l'indice de vulnérabilité .	37
Tableau 1.2 : Typologies utilisées dans la méthodologie HAZUS .	46
Tableau 1.3 : Niveaux du code parasismique à considérer pour les structures existantes .	47
Figure 1.17 : Conditions d'amplification du sol .	60
Tableau 2.3 : Valeurs minimales de SR_A et SR_V .	86
Tableau 2.4 : Typologie de structures définies dans la méthodologie mise au point .	89
Tableau 2.5 : Niveaux de conception parasismique selon les périodes d'évolution des versions du code parasismique Algérien (RPA) .	90
Tableau 2.6 : Dommages structuraux et non-structuraux : Classification des constructions en béton armé et en maçonnerie .	94
Tableau 2.7 : Couleur associée à chaque degré de dommage.	104
Tableau 3.1 : Caractéristiques du séisme de Boumerdès données par différents centres .	111
Tableau 3.2 : Valeurs des accélérations maximales du choc principal enregistrées par le CGS .	112
Tableau 3.3 : Répartition des constructions de la commune de Boumerdès selon la typologie, le niveau de dommages et la période de construction.	116
Tableau 3.4 : Répartition des constructions de la commune de Boumerdès selon la typologie et le niveau de dommages. .	117
Tableau 3.5: Distances épacentrales des stations de Boumerdès et de Keddara ST1 .	122
Tableau 3.6 : Valeurs de T_1 et T_2 selon le code parasismique Algérien .	123
Tableau 3.7 : Probabilités de dommages par typologie.	124
Tableau 3.8 : Probabilités de dommages par périodes d'application du code parasismique Algérien (RPA) .	124
Tableau 3.9 : Comparaison des probabilités des dommages globaux pour l'ensemble des constructions de la ville de Boumerdès en fusionnant toutes les typologies.	125
Tableau 3.10 : Pourcentage des dommages de la cité Ibn Khaldoun.	132
Tableau 3.11 : Pourcentage des dommages de la cité des 800 logements .	132
Tableau 3.12 : Valeurs de la courbe de capacité RC1-M Pré-code .	134
Tableau 3.13 : Paramètres de la courbe de fragilité du type RC1-M Pré-code .	135
Tableau 3.14 : Procédure de calcul des probabilités cumulatives du type RC1-M Pré-code .	136
Tableau 3.15 : Probabilités cumulatives du type RC1-M Pré-code.	136
Tableau 3.16 : Matrice de probabilité de dommages du type RC1-M Pré-code.	137

Tableau 3.17 : Pourcentages de probabilités des dommages du type RC1-M Pré-code (Cité Ibn Khaldoun)	137
Tableau 3.18 : Valeurs des points de performances des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)	137
Tableau 3.19 : Probabilités cumulatives des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)	138
Tableau 3.20 : Matrice de probabilité de dommages des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)	138
Tableau 3.21 : Pourcentages des probabilités de dommages des types RC2-M et RC2-H (Bas-code) de la Cité des 800 logements.....	138
Tableau 3.22 : Comparaison des pourcentages des dommages simulés et réels des 2 cités	139
Tableau 4.1 : Capacité sismique des failles actives ou supposées actives de la région de Constantine	153
Tableau 4.2 : Répartition des constructions selon leurs typologies	159
Tableau 4.3 : Probabilités de dommages par type et par catégorie de dommages.....	162
Tableau 4.4 : Probabilités de dommages selon les périodes de construction règlementaires	162
Tableau 4.5 : Probabilités de dommages de chaque secteur de la ville de Constantine....	164
Tableau 4.6 : Caractéristiques sismiques des failles actives et supposées actives de la région de Blida	174
Tableau 4.7 : Répartition des constructions du Grand-Blida selon leurs typologies	180
Tableau 4.8 : Coefficients multiplicateurs proposés par l'EC-8 en fonction du type de sol	183
Tableau 4.9 : Probabilités de dommages par type et par catégorie de dommages.....	186
Tableau 4.10 : Probabilités de dommages selon les périodes de construction règlementaires	186
Tableau 4.11 : Probabilités de dommages de chaque secteur du Grand-Blida.....	188
Tableau B.1 : Valeurs des paramètres définissant les courbes de fragilité.....	212
Tableau B.2 : Valeurs des paramètres définissant les courbes de capacité	214

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de la thèse

Les séismes représentent une menace permanente pour l'homme et ses biens. Les questions relatives à la nature de ces séismes et leurs conséquences constituent une préoccupation pour les populations vivant dans les zones à risque du fait des pertes potentielles aussi bien en vies humaines qu'en infrastructures.

Après chaque séisme destructeur et meurtrier, les hommes s'investissent en profondeur pour cerner les causes du cataclysme et se fixer le défi d'en réduire les conséquences désastreuses à défaut de les empêcher.

Dans ce cadre, beaucoup de recherches ont été menées et diverses études ont été réalisées pour connaître l'origine des mouvements sismiques et de trouver les solutions les plus adéquates à même de réduire les pertes en vies humaines et les pertes économiques.

A ce titre, durant les trois dernières décennies, une attention particulière fut accordée à la réduction des effets destructeurs des séismes, sur la base des enseignements de la décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles, « IDNDR », (1990-1999).

L'historique des séismes passés montre que l'Algérie est fortement exposée aux risques de tremblements de terre violents, qui peuvent engendrer des catastrophes à grande échelle avec des dégâts considérables. En effet, durant les trois dernières décennies, depuis le séisme d'EL Asnam ($M_s = 7.3$; Octobre 10, 1980) qui a causé plus de 2.600 décès, détruisant et endommageant sérieusement plus de 60.000 constructions [1, 2, 3], l'Algérie a connu plusieurs séismes destructeurs bien qu'ils soient de magnitudes modérées. Durant cette période, les principaux événements sismiques (voir figure a) se sont produits à Constantine ($M_s = 5,9$; 27 Octobre 1985) [4, 5, 6], à Chenoua (Tipasa) ($M_s = 6,0$; 29 Octobre 1989) [7, 8, 9], à Mascara ($M_s = 5.6$; 18 Août 1994) [10, 11], à Ain-Benian près d'Alger ($M_s = 5,7$; 04 Septembre 1996) [12], à Ain Témouchent ($M_w = 5,7$; 22 Décembre 1999) [13, 14, 15], à Beni-Ourtilane ($M_s = 5.7$; 10 Novembre 2000) [16] et plus récemment celui de Boumerdès ($M_w = 6,8$; 21 Mai 2003) [17, 18, 19] qui a provoqué des dégâts considérables et provoqué la mort de plus de 2,300 personnes. Ces tremblements de terre montrent que l'activité sismique est importante en Algérie et concerne

particulièrement la partie nord du pays [20] où sont localisées les grandes villes. Ces séismes ont occasionné des pertes humaines et économiques considérables dans les tissus urbains proches des zones épicentrales.

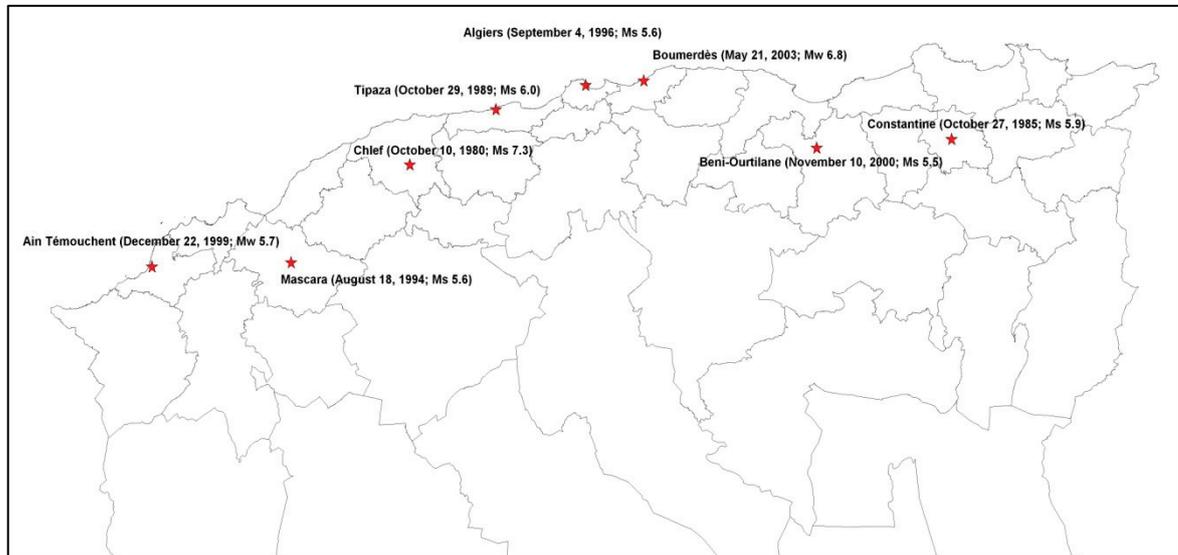


Figure a : Carte des séismes passés durant les trois dernières décennies

En Algérie, la sismicité est jugée assez active et plus particulièrement dans sa partie située au nord. L'expérience des séismes passés a montré que la mise en place des moyens d'intervention adéquats ne s'est faite qu'après le retour des premiers enquêteurs, ce qui a fait perdre beaucoup de temps pour secourir les blessés, sachant que pendant les vingt-quatre heures après l'occurrence du tremblement de terre, la chance de trouver des survivants et de les secourir diminue considérablement [21]. Ce retard est dû à la localisation souvent tardive des zones touchées et l'absence de connaissance rapide de l'ampleur des dommages qui permet de déclencher le niveau d'alerte.

A la suite d'un tremblement de terre destructeur, les organismes et institutions chargés de la gestion des secours doivent prendre des décisions urgentes et faire face à de multiples questionnements : Quels sont les principaux dégâts? Quelles sont les zones endommagées et à quel niveau d'endommagement ? Quels sont les moyens qui doivent être mobilisés et dans quelles quantités?

Cela montre la nécessité et l'urgence de se doter de stratégies de mitigation du risque sismique, afin d'éviter des catastrophes aux niveaux humain et économique lors d'un éventuel tremblement de terre pouvant affecter une région donnée.

De ce fait, il s'avère nécessaire de développer un processus et une méthodologie de prédiction et d'estimation de dommages sismiques en guise d'outil d'aide à la décision pour les pouvoirs publics, les responsables de la protection civile, les responsables de la planification et du développement urbain ou régional, etc.

Objectifs

L'objectif de ce travail consiste à mettre au point une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique et d'outil d'aide à la décision pour le bâti Algérien. A cet effet, les principales tâches à réaliser sont :

- Mise au point d'une approche d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie.
- Automatisation de la méthodologie dans un code informatique intégrant un système d'information géographique (SIG).
- Développement d'un outil d'aide à la décision, permettant le calcul et le traitement rapide de l'ensemble des données avec la génération des cartes de dommages, et qui servira :
 - à la prédiction des dommages sismiques qui peuvent se produire dans une zone urbaine exposée au risque sismique. Sur la base d'un scénario sismique probable, il convient de mettre à la disposition des décideurs et responsables de la gestion urbaine les moyens nécessaires pour prendre les mesures préventives adéquates pour la mitigation du risque sismique.
 - à l'estimation, en temps réel dans les quelques instants qui suivent un séisme réel, des dommages post-sismiques. En effet dès que l'épicentre est localisé et la magnitude connue, il est possible d'identifier les zones, là où cet outil est utilisé, les zones du site urbain plus touchées et estimer les dommages afin de définir le niveau d'alerte à déclencher en vue de mobiliser les moyens, de manière adéquate en termes de délais et en proportion, et les mettre à la disposition de opérations de secours afin de restreindre autant que possible les pertes humaines et socio-économiques.

Organisation de la thèse

Le présent mémoire de thèse est subdivisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique se rapportant à l'analyse du risque sismique (aléa sismique, conditions du sol, enjeux et vulnérabilité sismique) et l'état de l'art sur les procédés de réduction de ce risque ainsi que les méthodologies d'estimation des dommages sismiques, en particulier la méthode HAZUS (Hazard-United States) [22].

Le second chapitre présente, dans un premier temps, la mise au point d'une méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie. Elle est inspirée de l'approche HAZUS en adaptant les courbes de capacité et de fragilité aux typologies correspondantes du bâti Algérien. Cette méthode permet d'estimer les probabilités de dommages sismiques du bâti. A cet effet, des illustrations sont fournies en guise de mise en œuvre du code informatique avec l'automatisation de la méthode mise au point et son intégration à un système d'information géographique (plateforme SIG). La procédure développée constitue un outil d'aide à la décision et permet une évaluation rapide des dommages enregistrés dans les constructions et équipements existants ainsi que leur localisation à l'aide d'un SIG. Elle permettrait de faire ressortir de manière synthétique les zones les plus touchées, avant ou en temps réel après l'occurrence d'un séisme potentiel.

Le troisième chapitre aborde la mise en application et la validation de la méthodologie mise au point en utilisant les données du bâti de la ville de Boumerdès (Algérie) endommagé par le séisme du 21 Mai 2003 de magnitude $M_w = 6,8$

Enfin, le quatrième chapitre aborde l'application de l'outil développé en vue d'estimer les dommages que pourraient induire de futurs séismes. A cet effet, deux grands centres urbains potentiellement menacés par le risque sismique sont considérés en guise d'illustration :

- estimation de risque sismique pour le patrimoine immobilier de la ville (commune) de Constantine.
- évaluation des dommages sismiques pour le bâti du Grand-Blida composé de 04 communes (Blida, Ouled-Yaïch, Béni-Mered et Bouarfa).

L'automatisation du concept mis au point, dans un code informatique développé à cet effet, permettrait le traitement et la classification automatique des constructions inventoriées selon les prescriptions établies par la méthodologie, d'une part, et le calcul prédictif rapide des dommages sismiques probables et de leur distribution spatiale avec génération automatique des cartes de dommages sur une plateforme Système d'Information Géographique (SIG), d'autre part.

Des conclusions générales et des perspectives, permettant de résumer ce travail et d'ouvrir la voie à une suite, seront aussi discutées.

CHAPITRE 1 :

REDUCTION DU RISQUE SISMIQUE - ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

L'ambition des approches méthodologiques et opérationnelles de réduction des risques est de protéger les vies humaines et les biens contre l'impact des risques de catastrophes naturelles. Au stade actuel des connaissances scientifiques, il serait illusoire de prétendre vivre dans un environnement sans risque. Cependant, il est possible de réduire ces risques par des stratégies de prédiction et de gestion appropriées.

Dans ce contexte, les nations unies ont lancé, durant les années (1990-1999), l'initiative de la décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles (DIPCN), dont l'intérêt était de promouvoir la capacité de résister aux diverses catastrophes naturelles, industrielles et environnementales (www.unisdr.org) [23].

Parmi les risques naturels, il y a les tremblements de terres qui occasionnent d'énormes dommages. L'intérêt de se prémunir contre les effets destructeurs de ces phénomènes est devenu un défi croissant ces trois dernières décennies, et en particulier pour la protection et la préservation des constructions et infrastructures existantes.

Les tremblements de terre sont des événements naturels imprédictibles au stage actuel des connaissances. En effet, ni le moment ni le lieu précis d'occurrence, ni l'énergie libérée, et encore moins la date et le moment exact ne peuvent être prédits avec précision dans l'état actuel des connaissances. Ce sont, en outre, des phénomènes de très courte durée dont les effets directs sont quasiment instantanés.

Depuis longtemps, la prévision de ces phénomènes naturels a constitué une des préoccupations majeures des hommes et en particulier les scientifiques. Ils ont été, en grande partie, étudiés par les géophysiciens, les géologues et les sismologues, faisant collaborer une grande variété de disciplines, d'approches et de connaissances. Cependant, la complexité des processus de rupture géologique à l'origine de ces séismes est telle qu'il n'est toujours pas possible, au stade actuel de la science, de faire des prédictions dans une période de temps raisonnable et satisfaisante. Connaître la période d'occurrence, la position

et la magnitude d'un événement sismique important d'une manière précise, afin d'évacuer les zones susceptibles d'être en danger constitue un défi scientifique [24].

Néanmoins, l'impact potentiel des séismes majeurs sur les sociétés urbaines peut être réduit par des actions judicieuses. La technologie moderne dans le domaine de télécommunication, de l'instrumentation et le traitement rapide des données, peuvent beaucoup aider à la conception de systèmes performants pouvant atténuer l'impact des séismes majeurs et réduire ainsi le risque sismique dans les zones urbaines et industrielles exposées.

D'une part, les systèmes d'alerte sismique précoce (Early warning system) et systèmes d'alarme sismique (Seismic alarm system) s'avèrent capables d'alerter quelques secondes à quelques dizaines de secondes de l'arrivée des secousses majeures dans les zones urbaines et industrielles exposées au risque sismique (voir Appendice A) lors d'un violent séisme. Le fait de donner l'alerte avant l'arrivée de ces ondes peut suffire pour déclencher les systèmes de sécurité des équipements critiques (centrales nucléaires, centres de production d'électricité et de gaz, etc.) afin d'éviter des catastrophes [25].

D'autre part, certains processus permettent de fournir des informations sur les effets possibles avant ou en temps réel juste après l'occurrence d'un séisme ainsi que leur répartition géographique dans les zones urbaines exposées au risque sismique. Il s'agit des systèmes de réponse sismiques rapides (voir Appendice A) qui sont appelés aussi modèles d'estimation des dommages sismiques. Ils se basent sur des simulations d'estimation des dommages sismiques. Il peut s'agir de la réalisation de scénarios sismiques prédictifs (avant séisme) probables des régions potentiellement sujettes au risque sismique, avec la génération des cartes de dommages permettant de situer les endroits susceptibles d'être endommagés. L'exploitation de telles cartes permet de lancer des programmes de planification et restructuration urbaines ainsi que la prise en charge du tissu urbain vulnérable. Il peut aussi s'agir de simulations post-sismiques utilisant les paramètres issus d'un séisme réel (magnitude, épicentre, etc.). Les résultats permettraient de donner une première estimation des dommages et leur répartition spatiale synthétisée sur des cartes de dommages dans les quelques instants qui suivent l'occurrence du séisme. Ces cartes aideraient à pré-localiser les zones réputées être les plus touchées et permettre ainsi d'accélérer et d'optimiser les opérations de secours dans le but de minimiser la perte des vies humaines et des biens [26, 27, 28, 29].

Pour une meilleure compréhension du présent travail, le concept de risque sismique, les différents moyens de quantification et de réduction de ce risque ainsi que les méthodes d'estimation des dommages sismiques, principalement pour le bâti existant, sont présentés dans ce qui suit.

1.2. Notions du risque

Plusieurs définitions du risque sont données dans la littérature:

Selon BARBAT et al. [30], le risque est défini comme étant les conséquences économiques, sociales et environnementales potentielles occasionnées par un aléa donné qui peuvent se produire dans une région dans une période donnée. Son évaluation demande une approche multidisciplinaire qui tient compte non seulement des dommages physiques occasionnés aux structures, du nombre et du type de victimes ou des pertes économiques, mais également des facteurs sociaux, organisationnels et institutionnels.

COBURN et al. [31] définissent le risque comme étant la probabilité des dommages et les pertes relatives à un élément donné, sur une période donnée. Il est important de noter aussi la distinction entre le risque et la vulnérabilité :

- Le risque combine les pertes prévues pour tous les niveaux de sévérité de l'aléa, tenant compte également de leur probabilité d'occurrence.
- La vulnérabilité d'un élément est habituellement exprimée pour un niveau de sévérité de risque donné [32].

Selon CARDONA et BARBAT [33], le risque ($R_{ie|T}$), peut être défini comme la probabilité de perte dans un élément exposé e suite à l'occurrence d'un événement d'une intensité supérieure ou égale à i pendant une période d'exposition T .

$$R_{ie|T} = f(A_i \otimes V_e)|_T \quad (1.1)$$

L'aléa ($A_i|_T$) peut être défini comme la probabilité d'occurrence d'un événement avec une intensité supérieure ou égale à i pendant une période d'exposition T .

La vulnérabilité, V_e , est la prédisposition intrinsèque de l'élément exposé e à être affecté ou d'être susceptible de souffrir une perte en raison de l'occurrence d'un événement d'intensité « i ».

À partir de ces définitions, le risque est une fonction f de la convolution (ou croisement) entre l'aléa A_i et la vulnérabilité V_e pendant une période d'exposition T .

Le symbole \otimes exprime la convolution ou le croisement.

1.3. Le risque sismique

Le risque sismique exprime la convolution (croisement) entre l'aléa sismique, la vulnérabilité et les enjeux d'une région donnée (conditions du sol) [34], (voir équation 1.2 et figure 1.1). Ceci signifie le produit de la probabilité d'occurrence d'un certain niveau d'aléa sismique par la vulnérabilité d'un groupe d'enjeux, multiplié par leur nombre et étendu à tous les niveaux possibles d'aléas sismiques.

$$\text{Risque (Site)} = \text{Aléa} \otimes \text{Vulnérabilité} \otimes \text{Enjeu} \quad (1.2)$$

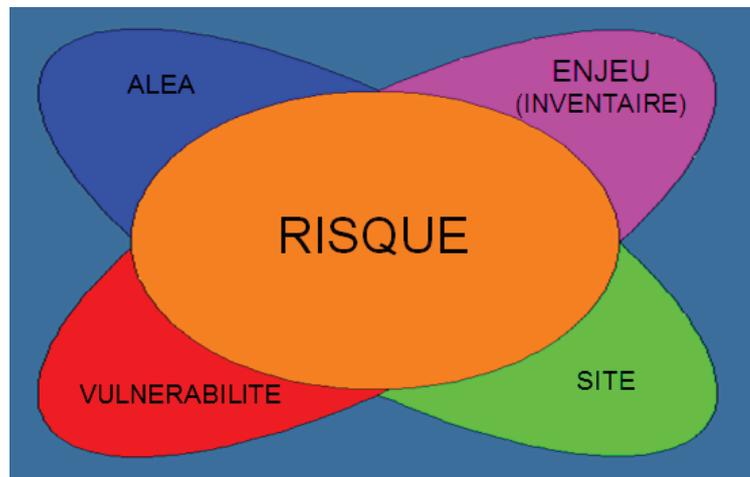


Figure 1.1 : Convolution du Risque sismique

Donc, l'estimation du risque sismique se base sur les critères suivant [32, 35] :

- (1) l'analyse de l'aléa sismique;
- (2) les conditions du sol;
- (3) les enjeux ;
- (4) la vulnérabilité;
- (5) l'analyse de la vulnérabilité et l'estimation des dommages sismiques.

1.3.1. Analyse de l'aléa sismique

C'est l'estimation quantitative du mouvement du sol, dans un site ou une région donnés, basée sur les caractéristiques des sources sismiques environnantes. Cette phase d'étude relevant principalement des disciplines de la géologie et de la sismologie est considérée comme une donnée d'entrée importante dans le domaine du génie civil [36]. A

cet effet, la signification technique de l'aléa sismique se limite au comportement du sol indépendamment des effets attendus sur les enjeux.

1.3.2. Conditions du sol

Les conditions géologiques et géotechniques (sol) telles la magnitude, le contenu fréquentiel ainsi que la durée peuvent influencer, de manière significative, les caractéristiques du mouvement du sol [37]. L'évaluation précise des conditions locales de site (caractéristiques géotechniques) est importante pour la détermination des paramètres du mouvement du sol, des effets de sites induits (glissement, liquéfaction) ainsi que des effets directs (topographie) (voir figure 1.2). Ces caractéristiques du sol permettent de développer les spectres de réponses spécifiques à chaque région ou à chaque site.

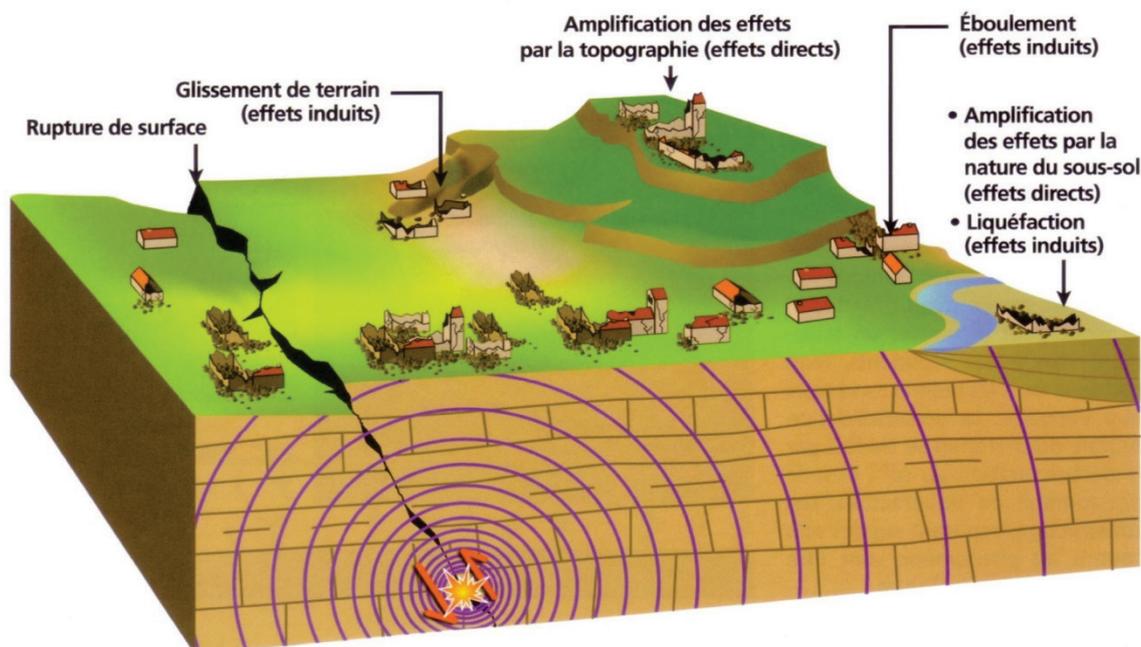


Figure 1.2 : Effets de sites induits et directs [38].

1.3.3. Les enjeux

L'ensemble des personnes, des biens et des éléments exposés ayant, de manière générale, une valeur (sociale, économique, fonctionnelle) susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel potentiellement dangereux [38] constitue la notion d'enjeux. On peut distinguer trois types d'enjeux :

- Enjeux humains ;
- Enjeux économiques (bâti, infrastructures et réseaux vitaux) ;
- Enjeux environnementaux.

1.3.4. Vulnérabilité sismique

1.3.4.1. Définition

La définition de la vulnérabilité sismique varie selon les auteurs. Elle peut être définie comme la sensibilité des enjeux aux aléas sismiques. La vulnérabilité d'un élément est généralement exprimée comme le pourcentage de pertes pour un niveau donné de sévérité de l'aléa [31, 39].

Selon BENEDETTI et al. [40], elle est généralement liée au degré de perte des éléments concernés par les résultats spécifiques causés par des facteurs bien déterminés.

AMBRASEYS la définit comme étant le degré d'endommagement qu'infligerait un séisme de paramètre donné (magnitude, intensité, amplitude, etc.) à une construction donnée ainsi qu'à l'assise [41].

1.3.4.2. Analyse de la vulnérabilité et estimation des dommages sismiques du bâti existant

L'analyse de la vulnérabilité du bâti existant est un processus complexe et difficile de par la quantité d'ouvrages concernés, l'incertitude relative à la sollicitation, de la multitude d'imprécisions ou incertitudes entachant les diverses méthodes d'évaluation des dommages [42].

Pour évaluer cette vulnérabilité, il faut classer le bâti dans des groupes typologiques. Ces groupes peuvent être fonction de la nature des matériaux de constructions, du système structural porteur, du nombre d'étages, de l'âge, etc. [19, 43].

Les expériences sismiques ont montré la grande influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction [40, 44]. Compte tenu de ces effets, l'estimation des dommages sismiques du bâti est réalisée par des méthodologies permettant un calcul proportionné des pertes probables des éléments exposés [45] et qui reposent sur le développement des fonctions de dommages. Ces fonctions sont représentées par [22, 46, 47] :

- Des courbes de capacité (push-over) combinées avec des spectres de demande et qui permettent de déterminer la réponse maximale d'une structure donnée ;
- Des fonctions de vulnérabilité ou de fragilité qui décrivent la probabilité d'atteindre ou de dépasser différents états de dommages selon la réponse maximale de cette structure.

1.3.4.2.1. Courbes de capacité

La réponse des structures est traduite par des courbes de capacité obtenues à l'aide de la technique de poussées progressives (push-over) qui est une procédure dont le principe est de considérer une force horizontale sollicitant la structure en l'augmentant graduellement jusqu'à atteindre un certain état limite [48, 49],(voir figure 1.3).

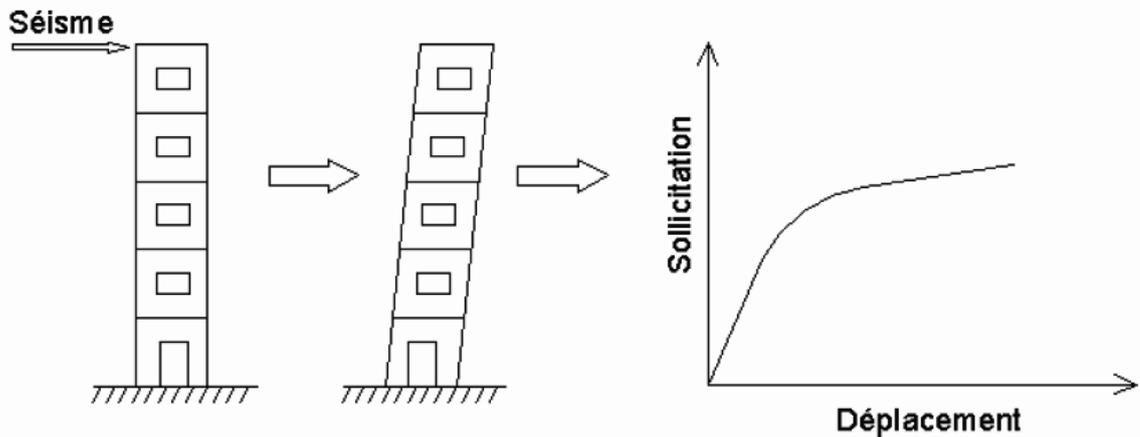


Figure 1.3 : La représentation physique des courbes de capacité [50].

Les courbes de capacité expriment la relation entre le déplacement latéral total au sommet d'une structure, à titre d'exemple, et la force sismique latérale appliquée dont la résultante correspond à l'effort tranchant à la base (voir figure 1.4). Cette courbe définit donc la performance de la structure jusqu'à la rupture. Elle est obtenue à l'aide de modèles mathématiques des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une structure, d'une part, et par une analyse statique non linéaire en appliquant une force latérale incrémentale jusqu'à atteindre un certain état limite, d'autre part [34, 51, 52].

Ces courbes décrivent le déplacement maximal pour chaque type de bâtiment et niveau de conception parasismique en fonction du chargement sismique latéral appliqué. Elle est généralement construite pour représenter la réponse du premier mode de vibration de la structure avec l'hypothèse que le mode fondamental est la réponse prédominante de la structure. Cela est valide seulement dans le cas des structures dont les périodes de vibration fondamentales ne dépassent pas une seconde. Pour des structures plus flexibles avec d'autres ordres de grandeur des périodes fondamentales, l'effet des modes supérieurs doit être pris en considération dans l'analyse [51].

Une structure est capable de se déformer au-delà de sa limite ultime sans perte de stabilité, mais son système structural ne fournira aucune résistance additionnelle pour une autre sollicitation sismique. Jusqu'à la limite élastique, la courbe de capacité est supposée linéaire et les déformations sont réversibles (sans perte de résistance significative dans la structure). Au-delà de cette limite et jusqu'à la limite ultime, elle passe d'un état élastique à un état plastique, et donc, les déformations deviennent irréversibles (perte de résistance dans la structure) (voir figure 1.4).

Les courbes de capacité de chaque structure ou typologie sont construites avec trois points de contrôle de dommages comme illustré dans la figure 1.4 [22] :

- Le premier point (capacité de conception) représente le niveau de conception parasismique de la structure correspondant à sa résistance nominale. La structure reste dans un état de déformation purement élastique dont les dommages sont négligeables ;
- Le deuxième point (capacité élastique) correspond à la résistance latérale de la structure où l'endommagement est contrôlé (dommages mineurs) ;
- Le troisième point (capacité ultime) correspond à la résistance maximale de la structure dont la stabilité est menacée (endommagement avancé). Au-delà de ce niveau, la structure, ne présente plus aucune capacité de résistance, elle est donc, susceptible d'atteindre sa ruine.

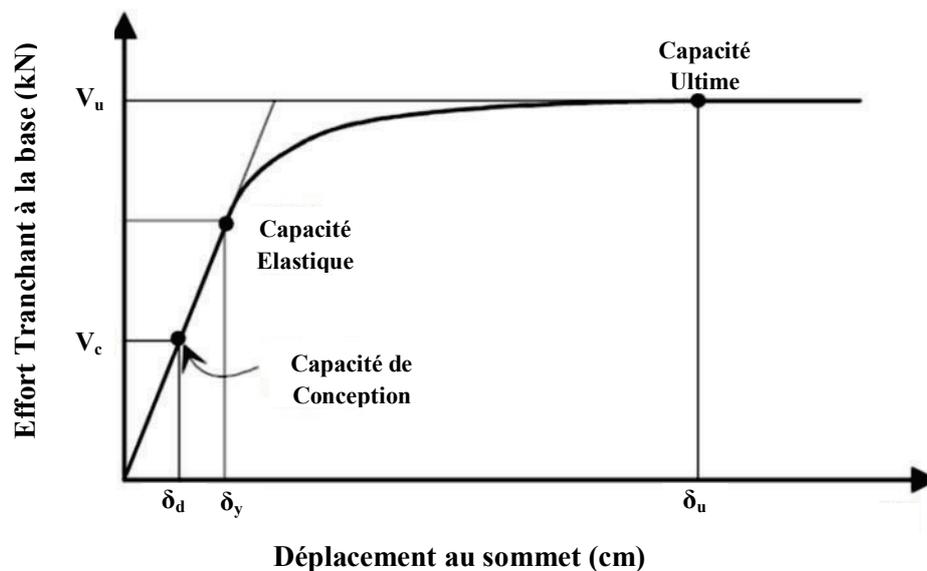


Figure 1.4 : Représentation d'une courbe de capacité (Effort – Déplacement) [22]

1.3.4.2.2. Fonctions de vulnérabilité et de fragilité

Les fonctions de vulnérabilité sismiques expriment la relation entre l'intensité sismique et le degré de dommage d'une structure. En outre, elles représentent la relation probabiliste entre l'intensité sismique et le coût de réparation d'une structure ou un groupe de structures [46, 47, 53].

Par ailleurs, les fonctions de fragilité sismique représentent la relation entre une caractéristique du séisme (intensité, accélération, déplacement, etc.) et la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain état limite (niveaux de dommages) selon le degré de sévérité de ce séisme (exemple d'un état d'effondrement: si une structure ne répond plus aux critères de conception appropriés) [54, 55].

Dans la littérature, cinq méthodes d'analyse de vulnérabilité sismique peuvent être utilisées pour déterminer les fonctions de vulnérabilité ou de fragilité des structures. Ces méthodes sont décrites dans ce qui suit :

- **Méthodes empiriques** : elles sont les premières approches utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Ces méthodes sont basées sur le retour d'expérience et des statistiques des dommages observés durant les séismes passés, à partir des données collectées lors des enquêtes post-sismiques. Les fonctions réalisées par ces méthodes sont représentées sous formes de matrices de probabilités de dommages (DPM) [56, 57], courbes de vulnérabilité ou de fragilité [53]. Lors des campagnes post-sismiques, l'évaluation des dégâts par des spécialistes de génie parasismique et des ingénieurs ou techniciens ayant une expérience attestée dans la construction, peut établir des corrélations entre les paramètres caractérisant les mouvements du sol et les dommages affectant certaines catégories de constructions [7, 13, 58]. La méthode ATC-13 [59] développée par *Applied Technology Council* aux Etats-Unis est la première méthode globale pour l'évaluation des dommages [42] et constitue la référence dans le développement des matrices de dommages ; elle considère 78 structures représentatives en Californie.

Cette approche utilisant les estimations de dommages n'est valide que pour un grand échantillon de structures [60]. Une base de données exhaustive des dommages observés est toujours souhaitable pour appliquer de telles approches. Cependant, cela n'est possible seulement que pour certaines régions de sismicité élevée où des campagnes d'enquêtes post-sismiques ont été correctement réalisées. Dans le cas de manque d'informations, les matrices de dommages et les fonctions de vulnérabilité peuvent être établies en utilisant les données disponibles et le jugement d'experts [61].

Dans les pays où il n'y a pas de base de données de dommages disponibles, les données d'autres régions semblables peuvent être utilisées sous une forme directe [62] ou modifiée, en utilisant le jugement d'experts [63].

- **Méthodes basées sur le jugement d'experts** : Les fonctions réalisées dépendent du jugement des experts qui doivent fournir une estimation de la probabilité des dommages pour différents types de structures et plusieurs niveaux d'intensité sismique [53]. Cette méthode n'est pas affectée par les limitations concernant la quantité et la qualité des données de dommages structuraux et des statistiques post-sismiques. Cependant, les résultats sont strictement corrélés avec l'expérience individuelle des experts.

- **Méthodes théoriques analytiques** : Elles sont basées sur le calcul numérique de structures représentatives [64]. Les programmes informatiques permettent actuellement de faire des modélisations et des calculs très poussés. Cependant, le seul inconvénient demeure dans leur application difficile dans le cas de bâtiments existants, souvent anciens, se heurtant à la méconnaissance fréquente des plans structuraux, d'une part, et à une très mauvaise connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux, d'autre part. Les fonctions déduites de ces méthodes demeurent cependant relativement précises et représentent au mieux l'état réel des structures [22]. Elles sont construites à partir d'études statistiques des distributions de dommages qui sont simulées à partir d'analyses des modèles structuraux sous chargements sismiques progressifs. Généralement, il y a deux genres d'analyses analytiques, à savoir l'analyse statique non-linéaire (Push-over) ou l'analyse dynamique non-linéaire (analyse transitoire par accélérogrammes) [53].

- **Méthodes hybrides** : Les fonctions déduites par ces approches tentent de compenser le manque de données observées, les insuffisances dans les modèles analytiques ainsi que la subjectivité dans les données tirées à partir des jugements d'experts et en combinant des données de différentes sources [53].

- **Méthodes expérimentales** : Les fonctions de vulnérabilité ou de fragilité sont réalisées à partir d'essais sur des modèles réduits en laboratoires (tables vibrantes, murs de réactions, etc.). Ces essais en laboratoire se font de plus en plus sur des prototypes de bâtiments à des échelles assez grandes [65]. Des courbes de fragilité peuvent être réalisées aussi à partir des techniques de bruits de fonds (vibrations ambiantes) [66].

Commentaire :

Les courbes de fragilité issues des essais de vibrations ambiantes sont effectuées sur des structures dont le comportement reste dans le domaine élastique linéaire, donc loin de la rupture et non-linéarité. Cela affecte le degré de précision de ces courbes.

- Matrice de probabilité de dommage (DPM)

Les matrices de probabilité de dommages expriment la probabilité d'occurrence d'un certain niveau de dommage [60] pour chaque degré d'intensité sismique [42]. Ces matrices sont construites à partir d'observations et de jugements d'experts [67, 68].

- Courbes de Vulnérabilité

Ces courbes expriment la relation entre le dommage moyen et le degré d'intensité sismique. Elles peuvent être générées à partir d'un ajustement statistique de données observées ou par une simulation numérique.

Plusieurs études ont été effectuées afin de développer des courbes de vulnérabilité. On peut citer, à titre d'exemple, celles proposées dans la méthode LM1 par (Risk-UE 2003) [60] qui définit des courbes de vulnérabilité semi empiriques qui mettent en corrélation le dommage moyen μ_D avec l'intensité macrosismique (I) et l'indice de vulnérabilité I_V (voir figure 1.5).

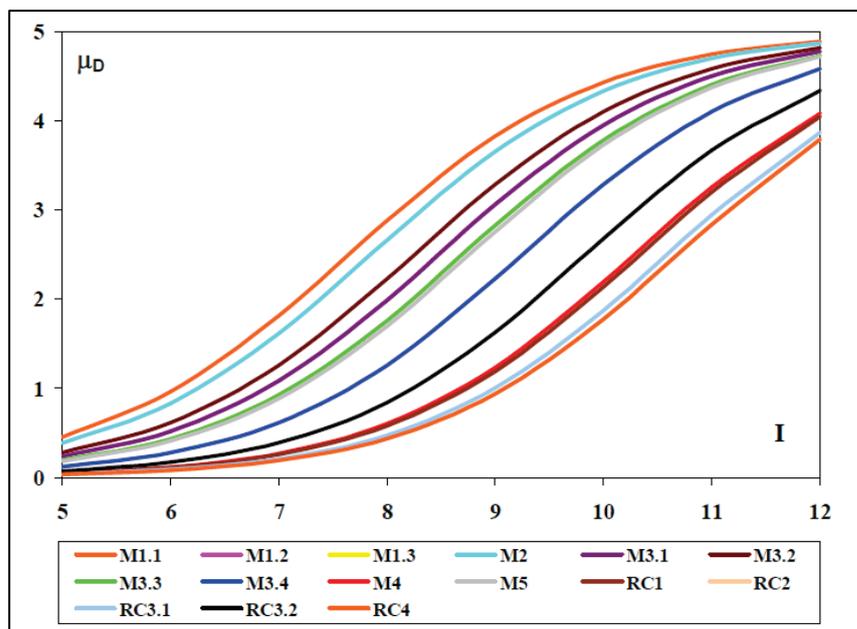


Figure 1.5 : Exemple de courbes de vulnérabilité [60]

Le dommage moyen pour chaque intensité sismique $\mu_D(I)$ pour un type de bâtiment est donné par l'équation suivante [60] :

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left[\frac{1+6.25I_V-13.1}{2.3} \right] \right] \quad (1.3)$$

Où :

I : Intensité sismique ;

I_v : Indice de vulnérabilité.

- Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité définissent la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain état (ou plusieurs états) de dommage, structurel ou non structurel, pour un paramètre de demande sismique donné [22]. Ces courbes sont la représentation graphique des matrices de probabilités de dommages [42]. Ces courbes tiennent compte de la variabilité et de l'incertitude liées aux propriétés des courbes de capacité, aux états de dommage et à la sollicitation sismique [34].

L'expression analytique de chaque courbe de fragilité est basée sur l'hypothèse que la distribution des dommages sismiques peut être représentée par une distribution log-normale [22, 52]. L'axe horizontal représente un paramètre de la réponse sismique (PGA, PGD, déplacement spectral, accélération spectrale etc.), tandis que l'axe vertical représente probabilité cumulée de dommages atteignant ou dépassant le seuil d'un état de dommages donné (voir figure 1.6).

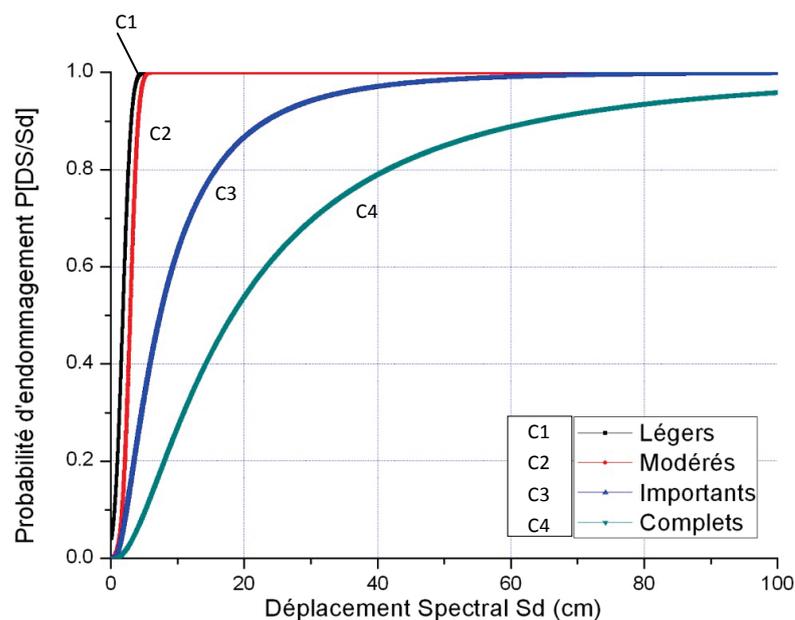


Figure 1.6 : Exemple d'une courbe de fragilité avec quatre niveaux de dommages [22]

La probabilité conditionnelle d'atteindre ou de dépasser un certain état de dommage, numéroté k , pour un paramètre de réponse sismique donné (par exemple: le déplacement spectral, S_d) est exprimée par la relation suivante [39] :

$$P[\text{Dommage} \geq D_k/S_{dp}] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_k} \ln(S_{dp}/\bar{S}_{d,k})\right] \quad (1.4)$$

Où $\Phi(.)$ représente la fonction de répartition gaussienne standard, S_{dp} est le déplacement spectral, $\bar{S}_{d,k}$ est le déplacement spectral médian auquel la structure atteint le seuil de l'état de dommages (numéroté k) et β_k représente l'écart type du logarithme népérien de $S_{d,k}$.

- Indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité 'Iv' représente la somme pondérée des valeurs numériques exprimant la qualité sismique des éléments structuraux et non structuraux.

L'indice de vulnérabilité 'Iv' constitue un indicateur de l'état de la structure qui peut être estimé avant et après l'occurrence d'un événement sismique. Il permet ainsi de connaître la qualité sismique des constructions d'une région et de faire leur classification. Donc, il joue un rôle significatif dans l'estimation de la réponse sismique attendue de la structure [40].

Cette valeur est calculée sur la base de l'état des éléments structuraux et non structuraux composant une typologie de constructions [40], dont une mise en application est détaillée en [41].

Tableau 1.1 : Eléments de calcul de l'indice de vulnérabilité [40, 41, 44].

Elément	Classe (Ci)				Facteurs de pondération (Wi)
	A	B	C	D	
1. Résistance total au cisaillement	0	5	25	45	1.50
2. Régularité en plan	0	5	25	45	0.50
3. Régularité en élévation	0	5	25	45	0.50
4. Connexion de murs	0	5	25	45	1.00
5. Type de murs	0	5	25	45	0.25
6. Plancher	0	5	25	45	0.25
7. Toiture	0	15	25	45	0.25
8. Conditions du sol	0	5	25	45	0.75
9. Détails	0	0	25	45	0.25
10. Maintenance	0	5	25	45	1.00
11. Modifications	0	5	25	45	0.50

L'indice de vulnérabilité d'un élément est donc le coefficient affecté à la classe de la construction multiplié par un facteur de pondération. La somme des indices de vulnérabilité 'I_v' de tous les éléments représente l'index de vulnérabilité de la construction comme donnée par l'expression suivante [40, 41]:

$$I_v = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i \quad (1.5)$$

1.4. Etat de l'art sur les procédés d'estimation des dommages sismiques

Juste après l'occurrence d'un évènement sismique, les acteurs en charge de la gestion de l'évènement doivent prendre des décisions urgentes afin de prendre les mesures adéquates et nécessaires, selon les dommages et leur répartition géographique. Ceci requiert des étapes préalables de préparation et de mise en place de stratégies de réduction du risque sismique, afin de confiner les pertes humaines et économiques à leur niveau minimal [19]. A cet effet, il est requis l'utilisation de méthodologies fiables permettant un calcul approprié des risques catastrophiques. Les résultats qu'elles fournissent permettent de prédire les pertes potentielles en cas d'occurrence d'un évènement extrême.

Généralement, ce genre d'estimations est anticipé et réalisé par le secteur financier privé, [45]. Néanmoins, il est largement admis que l'estimation et la quantification des pertes potentielles pouvant se produire, à un moment donné, intéresse non seulement les assureurs, réassureurs et investisseurs privés, mais aussi les gouvernements. En effet, les budgets d'intervention, de secours et de reconstruction pourraient être significatifs à l'échelle d'une ville ou d'un pays [45].

En outre, l'estimation des pertes probables fournit des informations pertinentes et exige des stratégies prédictives pour réduire ces pertes ou en préparer le financement. L'estimation des pertes potentielles permet d'allouer des budgets de renforcement et de reconstruction des infrastructures afin d'en réduire les dommages. Elle permet, aussi, de mettre en application une stratégie de protection financière efficace censée garantir ces infrastructures publiques et privées afin de préserver les ressources gouvernementales et le développement socio-économique d'un pays [45].

Les études d'estimation des dommages pré-sismiques ont prouvé leur grande utilité pour le développement de plans de préparation et de gestion de secours [69]. Du point de vue historique, le processus d'estimation des risques a vu le jour vers la fin du 19^{ème} siècle, par l'enregistrement systématique du climat, hauteur des flots et séismes [70].

Le premier à s'intéresser aux avantages des études de réduction du risque était John R. Freeman, dans son travail *Earthquake Damage and Earthquake Insurance*, écrit en 1932 [70], où il a passé en revue l'histoire des catastrophes. Durant les années 1990, les modèles d'estimation des dommages ont vu un développement significatif et rapide [71], suite à plusieurs tempêtes en Europe, à l'ouragan Andrew en 1992, au séisme de Northridge en 1994 aux Etats Unis et celui de Kobe au Japon en 1995 qui ont occasionné des pertes désastreuses aux assureurs et réassureurs mondiaux qui ont reconnu l'utilité de tels modèles prédictifs. En outre, ces modèles permettent une meilleure quantification des risques qu'ils couvrent et donc une meilleure connaissance de leur exposition [50].

Les pays développés, comme les Etats-Unis et le Japon, restent le centre d'innovation et d'application des modèles de risque. Plusieurs modèles d'estimation des dommages relatifs aux risques naturels et plus particulièrement au risque sismique ont été développés et actualisés durant les deux dernières décennies. Ces méthodes d'estimation des risques peuvent être classées comme commerciales et non-commerciales [72]. Les premières firmes de modélisations des catastrophes naturelles comme AIR Worldwide (Applied Insurance Research), EQECAT (filiale du groupe ABS) et RMS (Risk Management Solution) ont vu le jour à la fin des années 1980. Ces firmes, leaders mondiaux, proposent des modèles spécifiques pour les pays exposés aux différents risques naturels [73]. Cependant, leurs outils spécifiques sont à usage commercial restant privés et confidentiels. Par conséquent, ils ne sont pas du domaine public. Dans ce cadre, on peut citer le cas de EQEHAZARD (EQECAT) et CATMAP (AIR) ainsi que d'autres méthodes commerciales développées par d'autres compagnies telles que MunichRe, Risk Link (RSM), CATEX (CATEX), EPEDAT (Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool, Image Cat), REDARS (Risk from Earthquake Damage to Roadway Systems), etc.

Par ailleurs, il existe diverses méthodes accessibles sans limitation et à la disposition du public. La plupart de ces méthodes sont développées par des autorités nationales telles que celles mises au point aux états Unis par USArmy Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Centre (HEC), Federal Emergency Management Agency (FEMA), et National Institute of Building Sciences (NIBS). Au Canada, the Natural Hazards Electronic Map and Assessment Tools Information System (NHEMATIS) ont été développés par Emergency Preparedness Canada. Sous l'égide des Nations Unies, le secrétariat de la décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles (IDNDR) a lancé, en 1996, le projet d'estimation des dommages sismiques des tissus

urbains, RADIUS (**R**isk **A**ssessment **T**ools for **D**iagnosis of **U**rban **A**reas against **S**eismic **D**isasters), pour les pays en voie de développement, avec le support technique et financier du gouvernement du Japon [74] ainsi qu'avec l'assistance de Geo-Hazard International (GHI) aux Etats-Unis.

Le plus important développement aux Etats-Unis, dans ce domaine, demeure la méthodologie HAZUS (Hazard-United States) qui est une méthodologie novatrice initialement dédiée à l'estimation des dommages sismiques des structures et infrastructures. Cette méthode a été développée en 1997, par la Federal Emergency Management Agency (FEMA) en accord avec le National Institute of Building Science, sous la direction d'une équipe d'experts pluridisciplinaires en dommages sismiques, Géologues, Ingénieurs, Architectes, Gestionnaires de secours, Economistes et Sociologues [22]. A ce jour, cette méthodologie universelle d'estimation des dommages sismique reste très simple à prendre en main et à mettre en application [75], Elle demeure la plus novatrice et conviviale au niveau mondial.

En dehors des Etats-Unis, on peut citer les plus en vue à savoir :

- Risk-UE "*An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*" développé en 2003 dans le cadre d'un projet Européen [60],
- le modèle EXTREMUM en Russie [76],
- le modèle GEMITIS en France (1990-2000) [77],
- le modèle basé sur SIG, d'évaluation de la vulnérabilité sismique, dommages sismiques et risque sismique à l'échelle nationale, développé et appliqué en Allemagne [78],
- le système d'estimation des dommages sismiques Taiwan (TELES : Taiwan Earthquake Loss Estimation System) basé sur le modèle de HAZUS [79].

Ces approches permettent, sur la base de modélisations, d'estimer les dommages et dégâts des structures et des infrastructures ainsi que les pertes économiques indirectes face à des scénarii catastrophiques potentiels définis par l'utilisateur. Plusieurs de ces méthodes sont mises en application au niveau mondial lorsque les données sont disponibles ; il convient ainsi de citer le cas de la mise en application en Algérie [19].

Il existe d'autres méthodes qui sont essentiellement élaborées à partir d'observations post-sismiques et reposent sur la définition d'un aléa sismique régional et local, sur l'inventaire et la cartographie des constructions de la zone d'étude et sur l'état de vulnérabilité du bâti. Ce dernier est représenté par des indices de vulnérabilité obtenus à l'aide d'évaluations plus ou moins sophistiquées [44, 60].

Avec l'apparition des techniques spatiales et des satellites à très haute résolution, la tendance des recherches s'est orientée vers l'utilisation de la télédétection dans le domaine du génie parasismique et l'évaluation des dommages post-sismiques. Les premières études consistantes ont été réalisées après le séisme de Kocaeli en 1999 (Turquie) où l'imagerie radar et optique a été utilisée pour la détection des zones affectées [77].

Ces techniques offrent la possibilité de détection des dommages du bâti sur la base d'images satellitaires de très haute résolution (jusqu'à 50 centimètres de précision) juste après l'occurrence d'un séisme majeur. Cela permet de fournir des informations rapides et précises sur l'ampleur des dommages et leur localisation, lesquelles informations sont capitales pour les gestionnaires et décideurs en cas de catastrophe.

Dans ce qui suit, les méthodologies d'estimation des dommages sismiques, les plus utilisées dans le monde sont détaillées et discutées.

1.4.1. Méthodologie HAZUS

1.4.1.1. Etat de l'art de la méthodologie HAZUS

Reconnaissant la nécessité de développer une approche normalisée pour l'estimation des dommages sismiques et d'autres risques naturels, le Federal Emergency Management Agency (FEMA) en partenariat avec le National Institute of Building Science (NIBS) a développé la première version du modèle HAZUS (Hazard - United States) en 1997. Cette approche développée puis revue en 1999 [42] a comme objectif de déterminer, en premier lieu, les pertes et dommages induits par les tremblements de terres sur les éléments exposés (bâti, infrastructures, réseaux vitaux et population) dans une région donnée, afin de donner aux décideurs et aux pouvoirs publics la capacité d'anticiper en vue de réduire ce risque sismique (Avant), de la préparation et l'organisation des opérations de secours (pendant), et la gestion de la catastrophe et la prise de décision rapide (Après). La méthodologie fut implémentée sous forme d'un logiciel interactif public qui utilise un système d'information géographique (SIG) pour introduire les données des aléas et afficher les résultats en termes de dommages. A partir de 2004, FEMA a introduit d'autres risques naturels dans le modèle Hazus qui est devenu HAZUS Multi-Hazard dont sa quatrième mise à jour, Hazus-MH 2.1 est parue en Février 2012 [80].

HAZUS se compose de six modules principaux (Figure 1.7), qui sont interdépendants. Cette approche modulaire permet la réalisation de différents niveaux d'analyse. Ces analyses peuvent être des estimations basées sur des modèles simplifiés et des inventaires par défaut allant jusqu'à des études plus raffinées basées sur des données détaillées correspondant à une région donnée. Une description sommaire de chaque module est donnée ci-après [75] :

Module 1: Module d'Aléa

Ce module concerne la détermination du mouvement du sol ainsi que l'analyse des effets induits (potentiel de liquéfaction du sol, glissement de terrain, rupture des failles en surface). Le mouvement du sol est caractérisé par les spectres de réponse d'accélération (PGA) et de vitesses (PGV), défini par des approches déterministe ou probabiliste.

L'approche déterministe se décline sous trois types de calcul. Le premier est basé sur le choix d'une source sismique à partir d'un inventaire précis de toutes les failles sismiques existantes accompagné de toutes les informations sismiques et géotectoniques des failles. Le deuxième type de calcul est basé sur le choix d'un séisme historique dont les

caractéristiques sont connues. Enfin, le troisième type est basé sur la définition d'un événement sismique arbitraire en spécifiant les caractéristiques nécessaires, à savoir, l'épicentre, la profondeur du foyer, le type et l'orientation de la faille ainsi que la magnitude [77].

La seconde approche dite probabiliste, est définie à partir des cartes de zonage sismique. Cette approche permet également de spécifier un spectre de réponse.

Le signal sismique, à considérer pour l'analyse des enjeux dans une zone donnée, résulte de l'une de ces deux approches. Il y a lieu de prendre en compte l'atténuation par rapport à l'épicentre de la faille. A cet effet, il convient d'utiliser les lois d'atténuation spécifiques à la zone d'étude. Le signal peut également être amplifié en tenant compte de l'effet de site pour exprimer les conditions locales du site.

Des cartes SIG peuvent être introduites dans le modèle pour l'estimation d'autres aléas, comme les tsunamis et les inondations par exemple.

Module 2: Inventaire des enjeux

Ce module est dédié à l'introduction des enjeux exposés aux différents risques de catastrophes naturelles : bâti, infrastructures et population notamment.

Module 3: Dommages Directs

Ce module permet l'estimation des dommages sismiques affectant les constructions recensées et introduites dans le modèle. Pour cela, le modèle HAZUS se base sur la technique du spectre de capacité ainsi que sur les courbes de fragilité. Cette approche consiste, en effet, à évaluer l'endommagement que peut subir une structure sous l'effet d'une sollicitation sismique donnée. Cinq degrés de dommages sont alors définis : Négligeable, Léger, Modéré, Sévère et Complet.

Module 4: Dommages induits

Un dommage induit est défini comme étant une conséquence secondaire d'un événement. Ce module permet d'estimer le potentiel d'inondation dans les barrages et les digues. Il permet aussi d'évaluer un incendie généré suite à un tremblement de terre ainsi que l'accumulation des débris.

Module 5: Pertes directes

Ce module permet l'estimation des pertes économiques et sociales. Les pertes économiques incluent le coût des dommages survenus aux bâtiments et infrastructures avec leurs coûts de réparation et de relogement, les pertes dans le revenu des entreprises,

commerces et bureaux endommagés ainsi que les pertes relatives à la location des biens endommagés. Les pertes sociales sont estimées en termes de victimes (blessés et morts), ménages déplacés ainsi que les abris nécessaires à court terme. L'estimation des victimes comprend quatre niveaux de sévérité (de blessés légers jusqu'aux morts) pour quatre groupes de population (résidentiel, commercial, industriel, et transitoire) et pour trois scénarios pendant les 24 heures de la journée (02H00, 14H00 et 17H00).

Module 6: Pertes indirectes

Ce module permet d'estimer les effets qui peuvent se répercuter à long terme sur l'économie régionale en se basant sur les pertes issues d'un séisme passé.

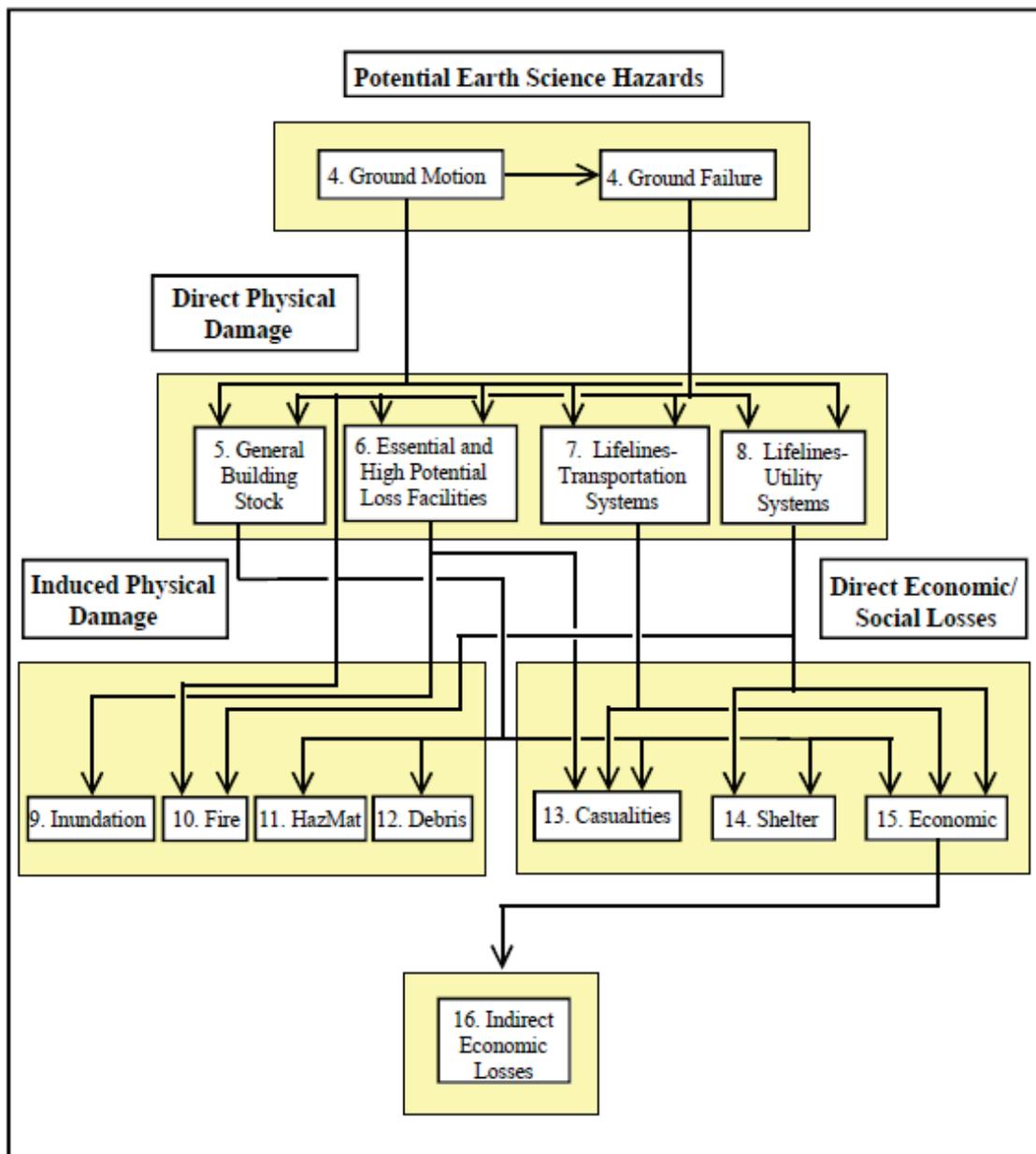


Figure 1.7 : Organigramme de la méthodologie HAZUS [42].

1.4.1.2. Approche «HAZUS» d'estimation des dommages sismique du bâti

L'estimation des dommages sismiques du bâti existant dans la méthodologie HAZUS se base sur les fonctions de dommages qui sont représentées par : (1) courbes de capacité (push-over) qui sont combinées avec des spectres de demande modifiés permettant de déterminer la réponse maximale d'une structure donnée, et (2) courbes de fragilité qui décrivent la probabilité d'atteindre ou de dépasser différents états de dommages selon la réponse maximale de cette structure [22].

Les principaux paramètres à identifier dans le processus d'estimation des dommages sismiques en utilisant les fonctions de dommages du bâti dans la méthodologie HAZUS sont donnés ci-après [22] :

- Typologie du bâtiment (ou groupe de bâtiment) à étudier : type du système constructif, nombre d'étages avec leurs fonctions de dommages ainsi que le niveau de conception parasismique (selon les codes parasismiques appliqués pour le dimensionnement) ;
- Spectre de réponse du site d'implantation de la typologie à analyser.

Afin de déterminer la réponse sismique d'une structure, la méthodologie HAZUS se base sur la méthode du spectre de capacité [19, 22]. Le dimensionnement d'une structure est défini en termes de déplacement et non pas en termes de force [77]. En outre, la performance est exprimée en termes de déplacement maximale (capacité) vis-à-vis de la sollicitation latérale imposée (demande).

1.4.1.2.1 Typologies utilisées

Pour déterminer les typologies à étudier, un inventaire du bâti est nécessaire afin de classer les constructions recensées dans des catégories de constructions prédéfinies. Dans la méthodologie HAZUS, les constructions sont regroupées en 36 typologies ou classes de constructions selon leurs systèmes constructifs, le type de matériaux, la hauteur d'étages (voir tableau 1.2) [22]. Il convient de distinguer cinq (05) catégories de constructions selon qu'elles sont en bois, en acier, en béton armé, en béton préfabriqué ou en maçonnerie [22].

Tableau 1.2 : Typologies utilisées dans la méthodologie HAZUS [42].

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq.ft.)		All	1	14
2	W2			All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame	Low-Rise Mid-Rise High-Rise	All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4-7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls With Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls With Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	39
36	MH	Mobile Homes		All	1	12

1.4.1.2.2. Niveaux de conception parasismique des constructions

La méthodologie HAZUS utilise des fonctions de dommages (courbes de capacité et de fragilité) développées en respectant le niveau de conception parasismique des constructions ainsi que les zones sismiques de leurs implantations. La méthodologie propose quatre (04) niveaux de conception parasismique, à savoir : pré-code, bas-code,

code-moderé et haut-code (voir tableau 1.3). Cette classification se base sur les prescriptions des codes modernes aux Etats Unis (Uniform Building Code, UBC 1976 et recommandations NEHRP 1985) [22] ainsi que les éditions récentes (UBC 1994 et recommandations NEHRP 1994) [34].

Tableau 1.3 : Niveaux du code parasismique à considérer pour les structures existantes [42]

Zonage sismique (UBC, NEHRP)	Post –1975	1941 -1975	Pre-1941
Zone 4	Haut code	Code modéré	Pré code (W1 : Code modéré)
Zone 3	Code modéré	Code modéré	Pré code (W1 : Code modéré)
Zone 2B	Code modéré	Bas code	Pré code (W1 : Bas code)
Zone 2A	Bas code	Bas code	Pré code (W1 : Bas code)
Zone 1	Bas code	Pré code (W1 : Bas code)	Pré code (W1 : Bas code)
Zone 0	Pré code (W1 : Bas code)	Pré code (W1 : Bas code)	Pré code (W1 : Bas code)

W1 : structures en bois

1.4.1.2.3. Détermination de la réponse sismique

Afin de déterminer la réponse sismique d'une structure, la méthodologie HAZUS se base sur la méthode du spectre de capacité développée dans le rapport «*ATC-40 : Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*» [34]. Dans cette méthode, le dimensionnement d'une structure est défini en termes de déplacement et non pas en termes de force [77].

1.4.1.2.4. Méthode du spectre de capacité

La méthode du spectre de capacité (Capacity Spectrum Method - CSM) est une des techniques d'analyse de la conception basée sur la performance des structures, i.e. performance-based design [81]. Elle est définie comme une méthode d'analyse pseudo-statique non-linéaire simplifiée [77].

La méthode du spectre de capacité a été développée initialement par Freeman [82]. Elle a été utilisée dans les années 1970 pour un projet pilote d'estimation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'une base navale à Washington (USA) [81]. Dans les années '80, elle a été utilisée pour trouver une corrélation entre le mouvement sismique et la

performance d'une structure [81]. La méthode a été également développée pour vérifier la conception des bâtiments stratégiques militaires américains (armée de terre, marine et forces aériennes).

Dans cette procédure, les deux principaux éléments sont la demande et la capacité. La demande est une représentation de la sollicitation sismique, tandis que la capacité est une mesure de l'aptitude de résistance à la demande sismique. La performance dépend ainsi de la façon dont la capacité peut faire face à la demande. En d'autres termes, la structure doit avoir la capacité de résister aux demandes sismiques de telle sorte que la performance de la structure soit compatible avec les objectifs de la conception.

Le principe de la méthode du spectre de capacité est d'établir une comparaison graphique entre la capacité d'une structure et la demande sismique (voir figure 1.10). L'utilisation de la méthode du spectre de capacité stipule que les spectres de demandes ainsi que les courbes de capacité doivent être converties dans le format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectra), à savoir spectres de réponses d'accélération et de déplacement, selon MAHANEY et al. [83].

- La capacité

La capacité de la structure est représentée par la courbe de capacité (force-déplacement) déduite de l'analyse statique non linéaire par poussée progressive ou push-over. Cette courbe de capacité est convertie en format ADRS d'un système à 1 seul degré de liberté (sdof) [84] et devient « courbes de spectre de capacité » [34], où l'effort tranchant à la base d'une structure et le déplacement au sommet sont convertis en accélération spectrale (S_a), et en déplacement spectral (S_d), respectivement, en utilisant les propriétés modales (voir figure 1.8). Ces valeurs définissent ainsi le spectre de capacité.

Afin de convertir la courbe de capacité en spectre de capacité dans le format ADRS, il est nécessaire de calculer le facteur de participation modal PF_1 ainsi que le coefficient de masse modal α_1 du mode fondamental, en utilisant les équations suivantes:

$$PF_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1} \right]}{\left[\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2 \right]} \quad (1.6)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n m_i \right] \left[\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2 \right]} \quad (1.7)$$

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (1.8)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{Toit}}{PF_1 \phi_{Toit,1}} \quad (1.9)$$

Avec :

PF_1 : facteur de participation modale du mode fondamental ;

α_1 : Coefficient de masse modale du mode fondamental ;

ϕ_{i1} : Amplitude du premier mode au niveau i ;

V : Effort tranchant à la base ;

W : Poids de la structure ;

Δ_{Toit} : Déplacement au sommet de la structure ;

S_a : Accélération spectrale ;

S_d : Déplacement spectral.

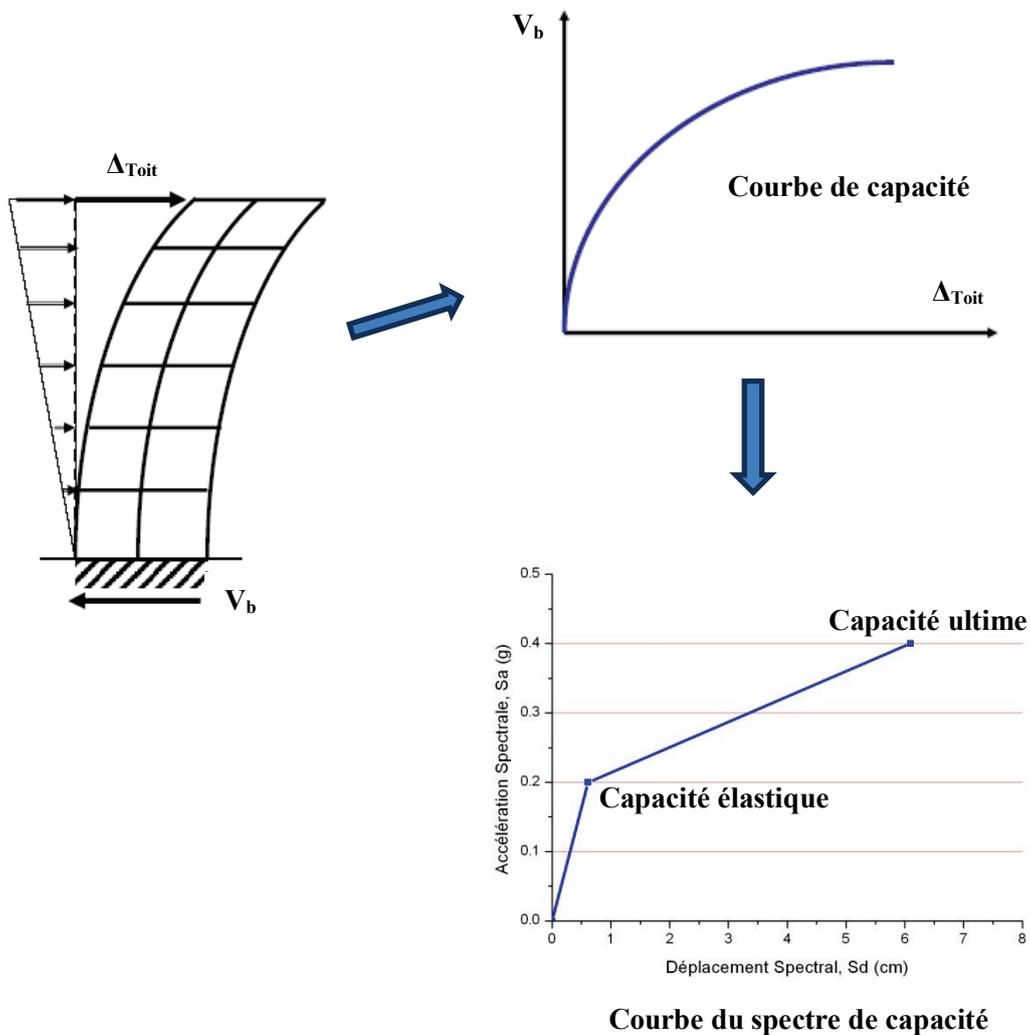


Figure 1.8 : Schématisation du développement de la courbe du spectre de [85, 86]

Dans la méthodologie HAZUS, les valeurs définissant les courbes de spectres de capacité ont été obtenues sur la base de calculs précis réalisés sur un grand échantillon de structures pour chaque typologie et des calculs empiriques se résumant à des valeurs moyennes par typologie [77]. Ces valeurs sont définies pour deux niveaux de capacité, à savoir les capacités élastique (S_{ay} , S_{dy}) et ultime (S_{au} , S_{du}). Ces paramètres de la capacité sont développés pour toute typologie (voir tableau 1.2) en prenant en considération les différents niveaux du code (conception) parasismique et de la performance sismique (voir tableau 1.3) [34].

- La demande

La demande, qui est une représentation de la sollicitation sismique, est définie par un spectre de demande élastique sur-amorti qui est converti dans le format ADRS (voir figure 1.9) [85]. Ainsi, chaque ordonnée d'accélération spectrale, S_a , associée à une période T , est convertie en ordonnée de déplacement spectral, S_d , correspondante en utilisant la formule suivante :

$$S_{di}(T) = S_{ai}(T)/\omega^2 \quad (1.10)$$

$$S_{di}(T) = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai}(T) \quad (1.11)$$

Où :

S_a : spectre d'accélération ;

S_d : spectre de déplacement

ω : pulsation ($2\pi/T$)

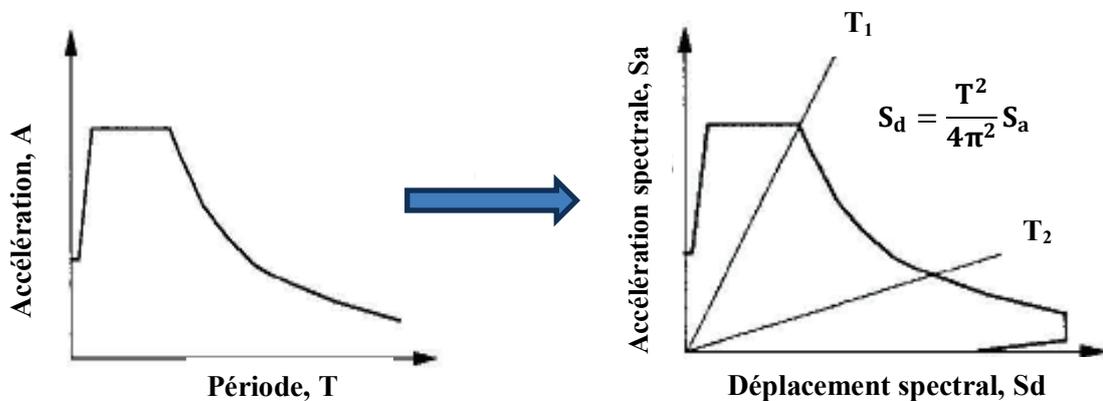


Figure 1.9 : Conversion du spectre de réponse élastique en format ADRS [51, 85]

Afin de prendre en considération le comportement non linéaire du système structural, des valeurs d'amortissements visqueux effectives sont appliquées aux spectres de réponses linéaires élastiques [81].

- La performance

Le point d'intersection entre le spectre de capacité et le spectre de demande donne une approximation de la performance de la structure [81]. Ce point, appelé « point de demande ou de performance » (voir figure 1.10), permet d'estimer les accélérations et les déplacements spectraux ainsi que les dommages qui peuvent se produire dans une structure donnée sous un séisme donné.

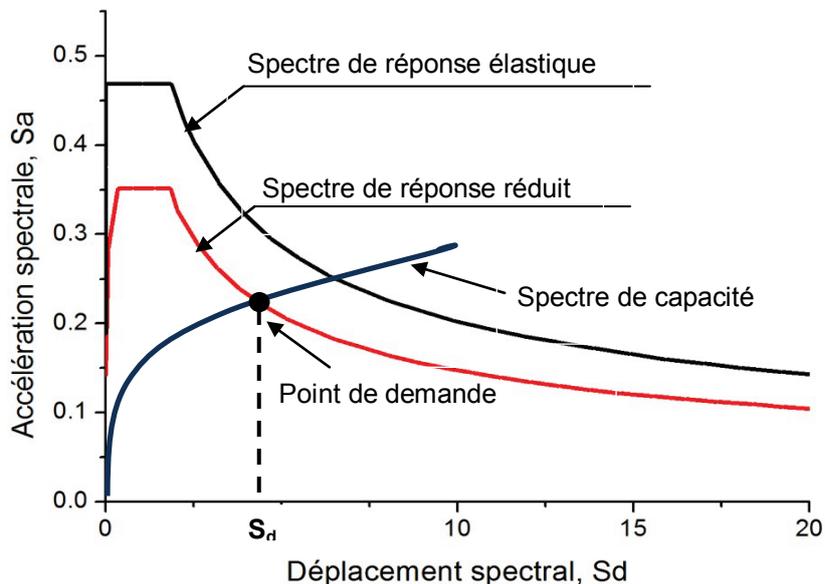


Figure 1.10 : Détermination de la demande en déplacement (Point de demande)

1.4.1.2.5. Calcul de la performance en utilisant la méthode du spectre de capacité développée dans l'ATC-40

Le conseil de technologie appliquée « Applied Technology Council », de l'Etat de la Californie aux Etats Unis, composé d'un groupe d'ingénieurs experts et de chercheurs spécialisés, dans le domaine d'analyse et de réhabilitation sismique des structures existantes, a mis au point, dans son rapport « *ATC-40 : Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* », une approche modifiée et simplifiée de la méthode du spectre de capacité développée initialement par FREEMAN [51, 82]. Cette approche appelée aussi

« Méthode Linéaire Equivalente » décrit la réponse des systèmes inélastiques par des systèmes élastiques sur-amortis équivalents [85].

Dans ce cas, le comportement non linéaire est simulé par l'augmentation de l'amortissement. Cette méthode est basée sur la construction d'un spectre de demande inélastique dit « élastique réduit équivalent » en termes d'accélération spectrale S_a et de déplacement spectral S_d pour différentes valeurs d'amortissements équivalents ξ_{eq} dont le spectre élastique initial doit toujours être relatif à un amortissement ($\xi = 5\%$) (voir figure 1.11). Donc, le système élastique correspond à une réponse maximale jugée équivalente comparée à un système non linéaire [78]. Le spectre de demande élastique réduit équivalent (S_a - S_d) est déduit du spectre de réponse élastique linéaire ($S_a - T$) converti en format ADRS. Ainsi, pour une période donnée T , chaque point du spectre de demande élastique correspond à un point dans le spectre de demande élastique réduit.

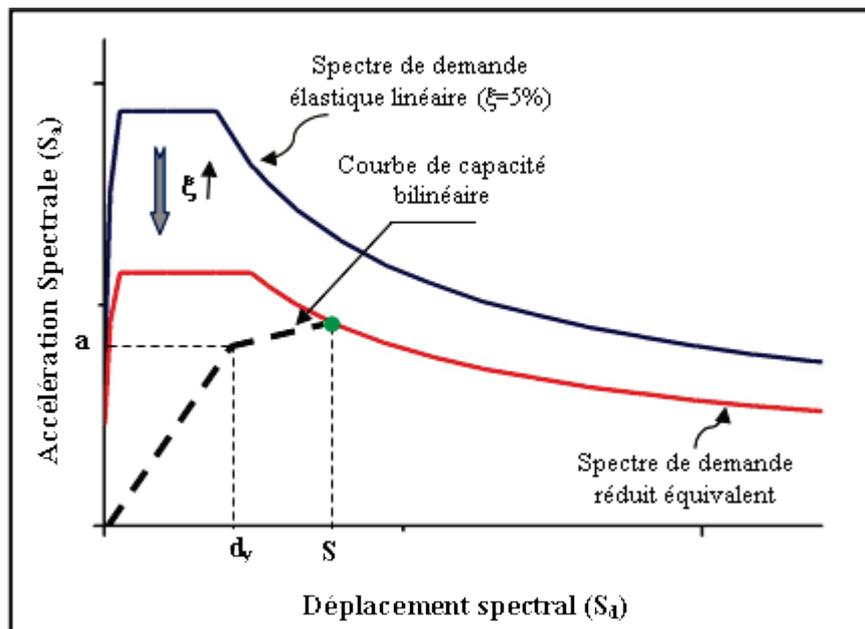


Figure 1.11 : Principe de la méthode du spectre de capacité de l'ATC-40 [51]

Le point de performance (S_d) qui représente l'intersection entre la courbe du spectre de capacité et le spectre de demande doit satisfaire deux aspects :

- 1) il doit se trouver sur la courbe du spectre de capacité afin de représenter la structure à un déplacement donné, et
- 2) il doit se trouver aussi sur le spectre de demande spectral réduit, de son état élastique à 5% d'amortissement, qui représente la demande non-linéaire dans le même déplacement structural.

Pour cela, des facteurs de réduction spectraux sont donnés en termes d'amortissements équivalents basés sur les études effectuées par Newmark et Hall en 1982 [51]. L'amortissement équivalent approximatif est calculé sur la base de la forme de la courbe de capacité, de la demande en déplacement estimée ainsi que de la boucle hystérésis résultante [51].

Trois procédures distinctes (A, B et C) sont proposées par l'ATC-40 pour l'estimation de la demande en déplacement (point de performance, S_d) d'une structure donnée, induite par un séisme (réponse inélastique) [51, 87]. Ces procédures sont basées sur les mêmes principes fondamentaux, mais différentes au niveau de leur application. Les procédures A et B sont plus analytiques que graphiques et sont programmables par des algorithmes informatiques adéquats, tandis que la procédure C est plus graphique. Une brève description des trois procédures est donnée ci-après :

- Procédure A

La procédure A est conçue pour représenter une application directe du concept du spectre de capacité. C'est une approche analytique itérative basée sur des formulations simples et faciles à inclure dans un programme informatique. De ce fait, elle est considérée comme la meilleure des trois procédures [51, 88].

- Procédure B

Des simplifications ont été introduites dans la modélisation bilinéaire de la courbe de capacité qui permet une solution relativement directe du point de performance avec peu d'itérations. Comme la procédure A, c'est une méthode plutôt analytique que graphique. Elle est programmable en algorithme informatique bien qu'elle soit plus complexe que la procédure A. Dans certains cas, l'estimation du point de performance doit être vérifiée avec les autres procédures A ou C.

- Procédure C

C'est une procédure purement graphique pour localiser le point de performance, semblable à la méthode de spectre de capacité d'origine développée par Freeman [82]. C'est la méthode la plus recommandée pour une utilisation manuelle. Sa programmation informatique n'est pas commode. Elle représente l'application la moins claire de la méthodologie.

1.4.1.2.6. Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité développées dans la méthodologie HAZUS définissent la probabilité $P[ds=S_d]$ d'atteindre un certain état, ou plusieurs états, de dommages ou de le dépasser $P[ds>S_d]$, pour un paramètre de demande sismique donné. Le paramètre utilisé dans cette méthode pour le calcul des dommages structuraux est le déplacement spectral, S_d , [22].

Chaque courbe de fragilité est caractérisée par des valeurs de la moyenne ($\bar{S}_{d,ds}$) et de l'écart type (β) du Logarithme naturel du déplacement spectral, S_d , (paramètre de la demande sismique utilisé). Elle est exprimée par la relation suivante [22]:

$$P[ds / S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (1.12)$$

S_d représente le déplacement spectral qui est le paramètre de la demande sismique;

$\bar{S}_{d,ds}$ est la valeur moyenne du déplacement spectral, S_d , pour lequel la structure atteint un certain seuil du niveau de dommage, ds ;

β_{ds} définit le logarithme de l'écart-type du déplacement spectral, S_d , pour un niveau de dommage donné « ds ». Cette valeur dépend conjointement de la courbe de capacité et du spectre de demande.

$\Phi(\cdot)$ exprime la fonction de répartition de distribution normale standardisée.

Les valeurs moyennes des déplacements spectraux se basent sur les rapports (ratios) des distorsions ou déplacements inter-étages décrivant le seuil des états de dommages. Ces valeurs ont été développées, en partie, sur la base de synthèses d'études disponibles qui définissent les rapports de déplacements inter-étages/dommages (KUSTU et al. 1982, FERRITTO 1982 et 1983, CZARNECKI 1973, HASSELMAN et al. 1980, WHITMAN et al. 1977 et WONG 1975) dans [22]. Les valeurs de ces paramètres ont été calibrées aussi par des observations collectées par retour d'expérience suite aux séismes de Loma Prieta (1985) et de Northridge (1994) [77]. Ces valeurs diffèrent d'un modèle de structure à un autre.

Les paramètres de modélisation de la courbe de fragilité ($\bar{S}_{d,ds}$, β_{ds}) sont développés à partir de la combinaison des données tirées à travers des essais de performance en laboratoires sur les modèles de structures, des dommages observés des séismes passés, tels que ceux de Loma Prieta de 1985 et de Northridge en 1994, ainsi que sur des jugements

d'experts [22]. Les valeurs, caractérisant ces paramètres, sont mises au point pour tous les modèles de structures (typologies) donnés dans le tableau 1.2 et pour chaque niveau de conception (code) parasismique (voir tableau 1.4). Ils prennent en considération chaque état ou niveau de dommages définis dans la méthodologie HAZUS (voir figure 1.12).

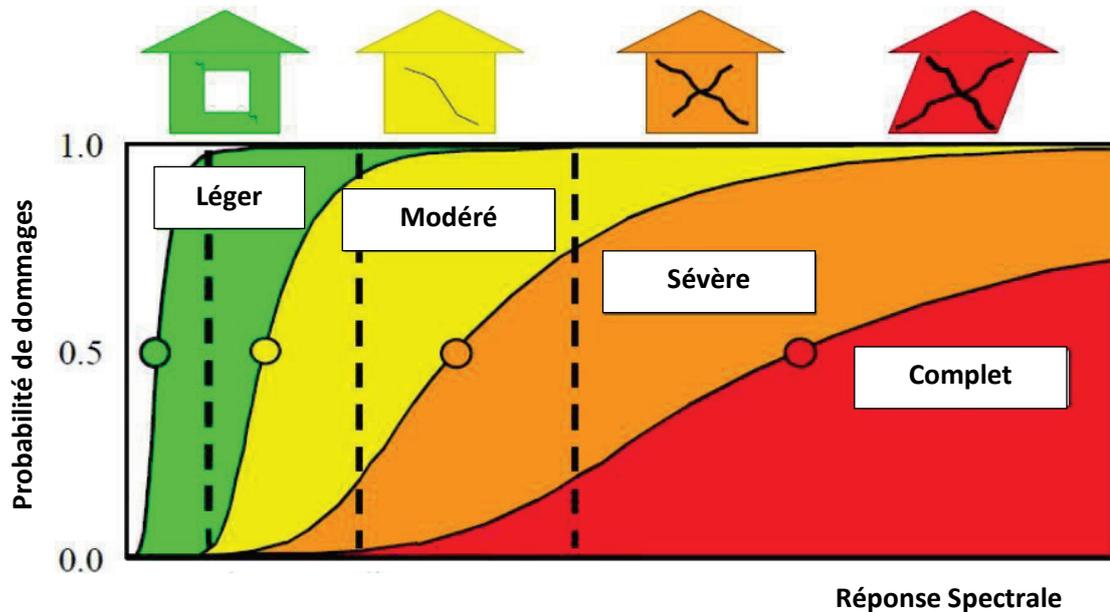


Figure 1.12 : Représentation des courbes de fragilité pour 4 niveaux de dommages [34]

La méthodologie HAZUS définit 04 niveaux (états) de dommages de structures, à savoir : Dommages légers (D1), modérés (D2), étendus ou sévères (D3) et complets (D4). Un autre état de dommages négligeables (notée D0) est pris en compte dans la quantification des dommages de structures [22].

1.4.2. Méthodologie RADIUS

La méthodologie RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disaster) [74, 89] a été lancée par le Secrétariat des Nations Unies en 1996 par une initiative prise lors de la Décennie Internationale pour la Réduction des Catastrophes Naturelles (IDNDR) entre 1990 et 1999, avec le support technique et financier du gouvernement du Japon [74] ainsi qu'avec l'assistance de Geo-Hazard International (GHI) aux Etats-Unis.

Elle s'adresse plus particulièrement aux pays en voie de développement afin de leur fournir un outil pour estimer la vulnérabilité des centres urbains.

Dans le cadre de la mise au point de cette approche, 58 villes situées dans les pays en voie de développement où la sismicité est jugée active, y compris la ville d'Alger (Algérie), ont été proposées pour la réalisation de scénarii sismiques avec la proposition des plans de gestion de risques adéquats. Parmi ces 58 villes, seules neuf ont été retenues pour en évaluer le risque sismique. Il s'agit de : Addis-Abeba (Ethiopie), Antofagasta (Chili), Bandung (Indonésie), Guayaquil (Equateur), Izmir (Turquie), Skopje (Macédoine), Tashkent (Ouzbékistan), Tijuana (Mexique) et Zigong (Chine) [89].

Cette méthodologie s'avère simple d'usage. Elle peut être utilisée pour calculer la distribution de l'intensité sismique, des dommages dans les bâtiments, du nombre de victimes et des dégâts dans les réseaux vitaux. Bien que les estimations des dommages fournies par RADIUS soient assez approximatives, elles permettent néanmoins la connaissance et la prise de conscience de l'ampleur des dégâts que la ville encourt si un séisme venait à se produire.

Cette méthodologie fût implémentée dans un outil informatique sous format Excel qui peut facilement interagir avec un système d'information géographique (SIG).

1.4.2.1. Principes de la méthode

La méthodologie RADIUS prend en considération les données disponibles et s'articule autour des 04 principales étapes présentées dans la figure 1.13 :

- Evaluation de l'aléa sismique et sa distribution spatiale, à l'échelle régionale et locale ainsi que les conditions du sol ;
- Analyse du système urbain et identification des éléments essentiels (humain, physique, fonctionnel, etc.) exposés à l'aléa ;
- Analyse de la vulnérabilité (fonctions de vulnérabilité), et
- Evaluation de l'impact du séisme choisi (risque sismique ou pertes humaines et matérielles globales et distribution par subdivisions urbaines).

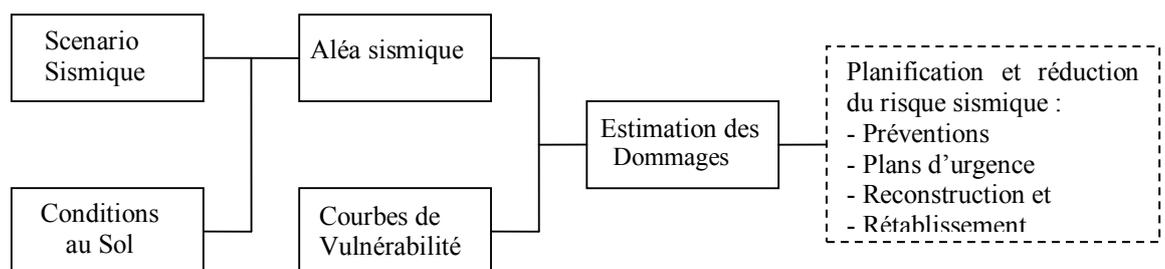


Figure 1.13 : Plan de scénario catastrophe sismique de RADIUS [89]

1.4.2.1.1. Evaluation de l'aléa sismique et sa distribution spatiale

Afin de simplifier la procédure, la méthodologie RADIUS suggère que la distribution des intensités observées lors des derniers séismes puisse être appliquée pour l'évaluation des dommages dans les bâtiments existants et dans les infrastructures. Si ces données n'existent pas, RADIUS propose une méthode simplifiée basée sur un séisme de référence dont on évalue les caractéristiques principales : localisation, faille correspondante, distance focale, niveau (magnitude, distance, atténuation), distribution de la réponse. Dans tous les cas, une synthèse géologique et géotechnique doit être réalisée afin d'avoir une meilleure estimation de la distribution de la réponse. Les résultats de l'étude de microzonage sismique du site doivent aussi être pris en compte afin de tenir compte des aléas collatéraux (ou risques induits) tels que les glissements de terrains et la liquéfaction.

1.4.2.1.2. Séisme de scénario

Les dommages des bâtiments et infrastructures d'une ville incluent la réponse des bâtiments et infrastructures à un certain séisme et les effets induits.

Les structures importantes telles que les hôpitaux, les écoles, les structures gouvernementales, les ouvrages d'arts, les réseaux vitaux, à titre d'exemple, nécessitent une analyse à part qui se focalise sur les types de dommages et leur réparation afin de les maintenir fonctionnels durant la « crise ». Afin de vérifier l'efficacité des secours, des simulations doivent être faites en imaginant des schémas de circulation par rapport à des rues bloquées par l'effondrement de bâtiments et les voitures abandonnées, à des ponts effondrés, etc. Les pertes en vies humaines peuvent être estimées en se basant sur les dommages des bâtiments et des infrastructures ainsi que sur l'efficacité des secours.

Le choix des paramètres du séisme de scénario sont la magnitude, l'épicentre, la profondeur et l'heure d'occurrence de l'événement (jour ou nuit) car le nombre de victimes en dépend, voir figure 1.14.

Pour les caractéristiques du séisme, on considère soit l'occurrence d'un séisme passé particulièrement destructeur, soit une faille supposée active. Un ensemble de tremblements de terre historiques sont fournis dans cet outil dans le cas d'absences d'études d'aléa spécifiques à la zone d'étude.

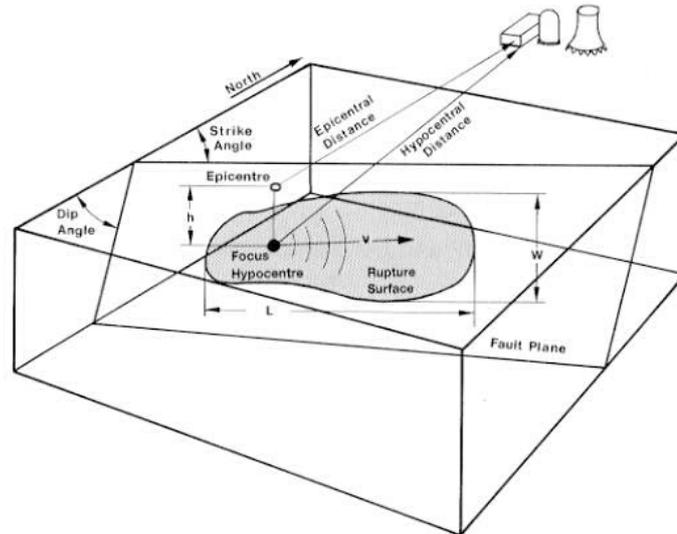


Figure 1.14 : Modèle simple d'une source sismique [89]

1.4.2.1.3. Intensité sismique

L'échelle des intensités sismiques est l'indice le plus usuel pour indiquer la puissance d'un séisme et/ou comment une région est affectée par ce dernier. Plusieurs types de niveau d'intensité existent et différents types sont utilisés à travers le monde. L'outil RADIUS utilise une échelle d'intensité très répandue dans le monde, à savoir l'échelle MMI (Modified Mercalli Intensity). Elle est définie par la conversion de l'accélération maximale au sol (PGA : Peak Ground Acceleration) en utilisant les formules empiriques de Trifunac et Brady (1975) [89] (voir équations 1.13, 1.14 et figure 1.15).

$$\log(PGA \times 980) = 0.30 \times MMI + 0.014 \quad (1.13)$$

Ou

$$MMI = 1/0.3 \times [\log_{10}(PGA \times 980) - 0.014] \quad (1.14)$$

L'accélération maximale au sol (PGA : m/s^2) peut être calculée en utilisant une des trois lois d'atténuation définies dans RADIUS [89], à savoir Joyner and Boore (1981), Campbell (1981) ou Fukushima & Tanaka (1990), comme illustré dans le tableau 1.4 et la figure 1.16.

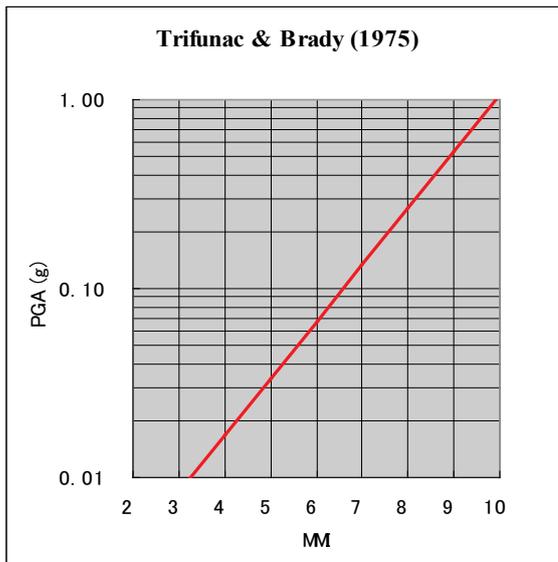


Figure 1.15 : Allure de la loi Trifunac et Brady (1975) [89]

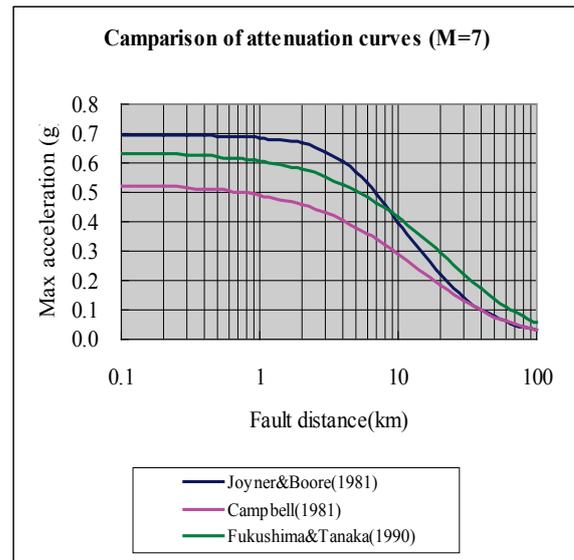


Figure 1.16 : Courbes d'atténuation utilisées par RADIUS [89]

Tableau 1.4 : lois d'atténuations utilisées par RADIUS [89]

Source	Loi d'atténuation
Joyner&Boore - 1981	$PGA=10^{(0.249*M-\text{Log}(D)-0.00255*D-1.02)}$, $D=(E^2+7.3^2)^{0.5}$
Campbell - 1981	$PGA=0.0185*\text{Exp}(1.28*M)*D^{(-1.75)}$, $D=E+0.147*\text{EXP}(0.732*M)$
Fukushima & Tanaka - 1990	$PGA=(10^{(0.41*M-\text{LOG}10(R+0.032*10^{(0.41*M)})-0.0034*R+1.30))}/980$
M : Magnitude ; E : Distance épacentrale (Km) ; R : Distance Hypocentrale (Km) ; D : Profondeur (Km).	

1.4.2.2. Zonage

L'outil RADIUS introduit une méthode simplifiée afin de subdiviser la zone d'étude en mailles ou cellules. Un maillage de 0.5 à 5 km de côté est proposé car l'objectif principal de cet outil est la description de la ville et de son étendue. Le zonage de la ville peut aussi être effectué par districts ou secteurs de formes irrégulières nécessitant l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG). Plus le zonage est fin, plus les résultats seront précis. Ainsi l'estimation des dommages est effectuée pour chaque unité considérée de la zone d'étude.

1.4.2.3. Conditions du sol

La classification du sol doit être faite pour chaque unité (maille) de la région subdivisée parce que les conditions du sol peuvent être différentes dans les différents sites de la ville.

Les conditions du sol sont importantes dans le processus d'estimation des dommages sismiques car elles affectent directement l'amplification sismique de ce dernier.

Dans la méthodologie RADIUS, le type de sol est divisé en 4 classes, à savoir, "Rocher Dur," "Rocher Mou", "Sol Moyen", et "Sol Mou".

Pour chaque type de sol correspond un facteur d'amplification comme montré sur la figure 1.17.

- *Le Rocher dur* : Le facteur d'amplification est spécifié à 0.55 ;
- *Le Rocher Mou* : Le facteur d'amplification correspondant est égal à 0.7 ;
- *Le Sol "moyen"* : "est fixé, par défaut, à 1.00, et
- *Le Sol "Mou"* : est pris à 1.30.

Si les caractéristiques du sol sont inconnues, 1.0 est utilisé comme facteur d'amplification. La valeur de tous les facteurs d'amplification peut être changée par les utilisateurs.

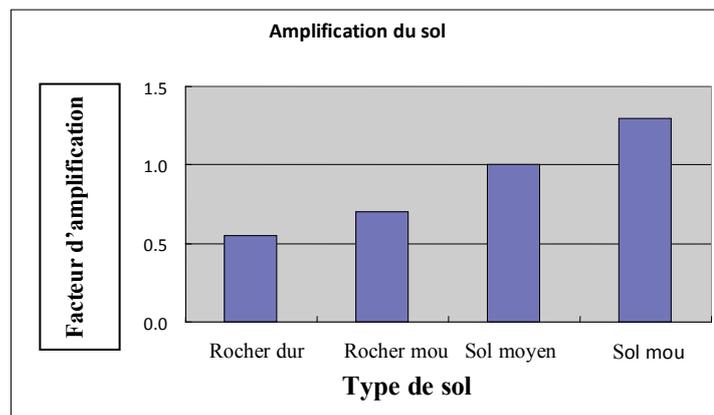


Figure 1.17 : Conditions d'amplification du sol [89]

1.4.2.4. Estimation des dommages

1.4.2.4.1. Constructions

Les dommages causés aux constructions par les tremblements de terre contribuent aux désastres et génèrent des victimes humaines ainsi que des incendies. Les dommages sismiques dans les constructions sont considérablement influencés par leurs typologies. La classification adoptée par le modèle RADIUS a été établie pour dix (10) classes de constructions considérées comme les plus représentatives dans la plupart des pays d'Amérique Latine et d'autres régions dans le monde. La classification est basée sur des facteurs qui correspondent étroitement aux dégâts observés lors de séismes passés. Ces facteurs sont les types de matériaux, le système constructif, le code parasismique appliqué,

l'âge, l'usage et le nombre d'étages. Chaque classe de construction est définie par une fonction de vulnérabilité basée sur l'expérience tirée des séismes passés (voir figure 1.18). En outre, cette classification considère que cet outil est principalement utilisé dans les pays en voie de développement. Ces classes ou typologies sont données comme suit [89]:

- RES1--- Constructions précaires et informelles ;
- RES2--- Constructions en maçonnerie et en béton armé, ayant un nombre d'étages inférieur ou égal à 3, non calculées au séisme ;
- RES3--- Constructions en maçonnerie et béton armé, ayant un nombre d'étages supérieur ou égal à 4, non calculées au séisme ;
- RES4--- Constructions en béton armé multi-étages calculées au séisme ;
- EDU1--- Bâtiments à usages scolaire et administratif ne dépassant pas 2 étages ;
- EDU2--- Bâtiments à usages scolaire et administratif de plus de 2 étages ;
- MED1--- Bâtiments à usage hospitalier de basses et moyennes hauteurs ;
- MED2--- Bâtiments à usage hospitalier, de grandes hauteurs ;
- COM---- Centres commerciaux ;
- IND----- Installations industrielles.

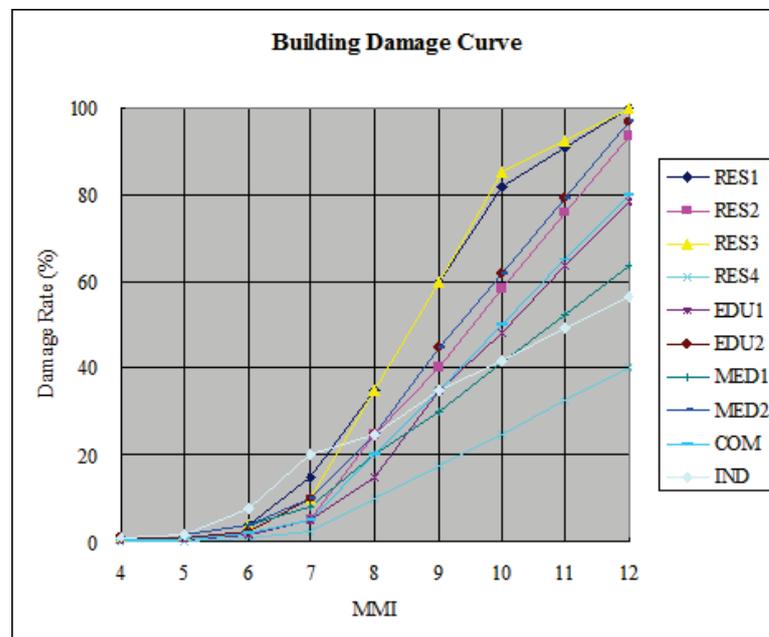


Figure 1.18 : Courbes de vulnérabilité des différentes classes de constructions [81]

Les niveaux de dommages considérés dans cet outil sont les dommages complets (effondrement partiel ou total) ainsi que les dommages sévères ou très importants. Les dommages légers et modérés ne sont pas considérés. Le nombre de constructions dans chaque maille ou unité de la zone d'étude est nécessaire pour calculer les dommages par unité, par secteur (groupe d'unités) ou pour toute la zone d'étude. Dans le cas où il est difficile de déterminer le nombre précis de bâtiments dans chaque unité, cet outil l'estime à partir du nombre total de bâtiments de la zone étudiée et de la densité relative de chaque maille qui est appelée "Poids de la maille". Le poids de la maille peut être spécifié comme "Très Haut", "Haut", "Moyen", ou "Bas". La valeur des poids est soit spécifiée par défaut ou personnalisée par l'utilisateur.

1.4.2.4.2. Infrastructures et réseaux vitaux

Afin d'estimer précisément les dommages sismiques des infrastructures (ouvrages d'arts) et réseaux vitaux de la zone d'étude, une base de données incluant les données relatives à l'implantation, au plan de situation, type de matériaux, diamètres, et les attributs de ces installations est nécessaire. L'outil RADIUS adopte une méthode simple qui estime approximativement le taux de dommage moyen à partir du nombre total de ces installations dans la zone d'étude.

Les fonctions de vulnérabilité (voir figure 1.19) pour chaque paramètre sont déterminées comme une fonction de (accélération / intensité MMI) basée sur les dommages observés lors des différents séismes passés.

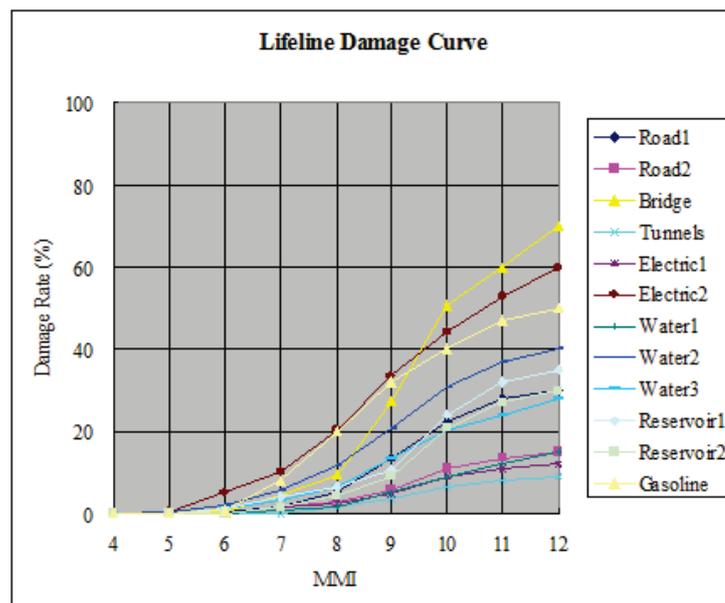


Figure 1.19 : Fonctions de vulnérabilité des infrastructures et réseaux vitaux adoptées par RADIUS [89]

1.4.2.4.3. Pertes en vies humaines

Les victimes causées par les séismes représentent les principaux "dommages" et leur réduction demeure l'objectif visé lors de la préparation des plans de réduction des risques de catastrophes. L'effondrement ou dommages lourds des bâtiments sont considérés comme étant la cause principale des victimes (morts ou blessés) pendant un tremblement de terre. Le nombre de victimes peut être calculé en fonction du nombre de bâtiments endommagés. L'information sur le nombre de personnes se trouvant à l'intérieur des bâtiments pendant le tremblement de terre est nécessaire pour le calcul des pertes humaines. Généralement, le nombre de personnes se trouvant à l'intérieur des bâtiments pendant le jour ou la nuit n'est pas identique, car le ratio d'usage ou la classe des bâtiments est différente, comme illustré sur le tableau 1.6. Par exemple, la population de jour est moins importante que la population de nuit dans les bâtiments résidentiels. Alternativement, les populations des écoles, des administrations, usines, etc., sont plus importantes pendant le jour et presque insignifiantes pendant la nuit.

Dans cet outil, les populations jour et nuit sont estimées pour chaque classe de bâtiment. La période du jour est définie de 6H à 18H, tandis que la période de nuit est définie de 18H à 6H du matin et l'utilisateur peut changer les définitions de l'horaire de ces périodes.

Tableau 1.6: Ratio de population (jour ou nuit) pour chaque classe de constructions [89]

Classe de bâtiment	RES1	RES2	RES3	RES4	EDU1	EDU2	MED1	MED2	COM	IND
Période										
Nuit (18H-6H)	1.0	1.0	4.0	10.0	0.2	0.2	2.0	4.0	0.2	0.2
Jour (6H-18H)	0.5	0.5	2.0	5.0	10.0	25.0	6.0	12.0	4.0	4.0

La méthodologie RADIUS utilise l'algorithme de COBURN et al. [31, 89], représenté dans la figure 1.20, pour l'estimation du nombre de morts et de blessés (modérés et graves). Dans cet algorithme, le taux des décès est lié aux opérations de secours. Ainsi les aspects suivants sont pris en compte:

- A partir du nombre de personnes présentes dans les bâtiments lors du séisme, le pourcentage de celles qui ne pourront pas s'échapper lors de l'effondrement est estimé ;

- Il est fait l'hypothèse qu'une partie des personnes présentes dans les bâtiments lors de l'effondrement décèderont instantanément à cause des chocs dus à la chute des planchers et des toits, ou par suffocation ;
- Pour les personnes qui ne décèderont pas instantanément, mais qui ne pourront pas s'échapper par leur propre moyen (prises sous les décombres), un certain nombre d'entre elles décèderont au fur et à mesure que le temps passe ;
- Le succès des opérations de secours dépend principalement du temps et de la rapidité d'intervention. Le pourcentage des personnes secourues est quasiment nul après 72h, car la majorité d'entre elles prises dans les décombres succombera, d'où l'importance des opérations de secours dans la détermination du pourcentage des décès après effondrement des bâtiments.
- Le nombre de victimes par maille ou pour une zone donnée dépend aussi de la classification des bâtiments discutée précédemment et de l'heure d'occurrence de l'évènement (jour ou nuit).

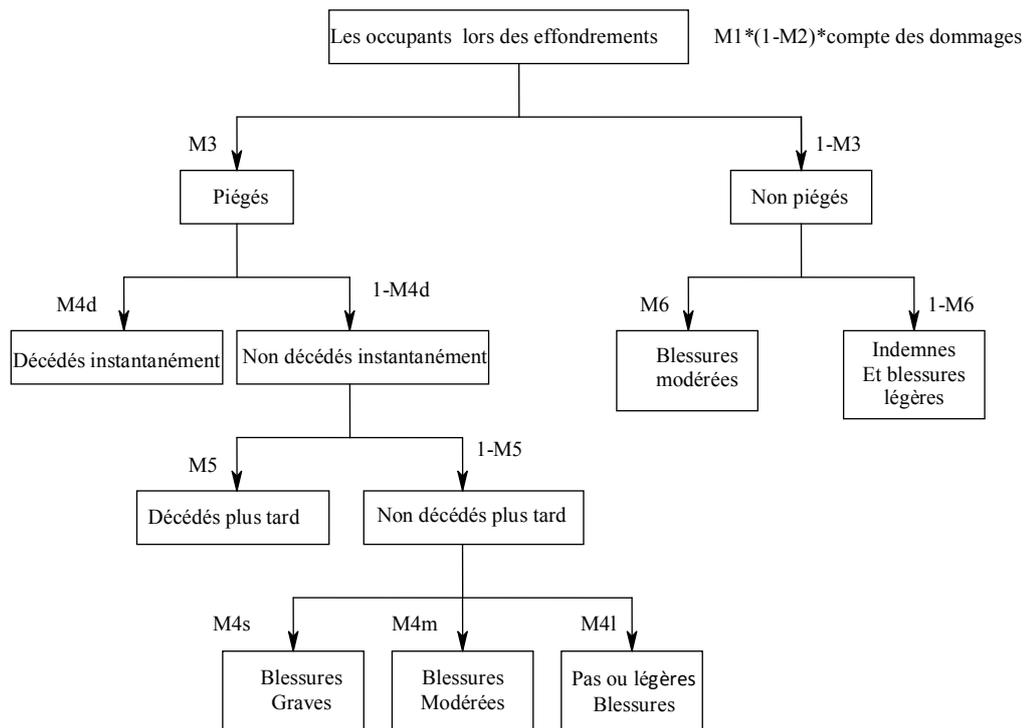


Figure 1.20 : Algorithme de COBURN et al. [89]

L'idée exprimée ci-dessus peut être formulée comme suit [89]:

$$K_s = D5 \times M1 \times M2 \times M3 \times [M4d + (1 - M4d) \times M5] \quad (1.15)$$

Où :

K_s : représente les pertes humaines ; $D5$: représente le nombre de bâtiments effondrés ; $M1$ est le nombre de personnes dans chaque bâtiment ; $M2$: représente le taux d'occupation au moment du séisme ; $M3$: représente le nombre de personnes ensevelies dans les décombres ; $M4d$: représente le taux de décès à 0hr après l'effondrement des bâtiments ; $M5$: représente le taux de mortalité avant l'arrivée des secours (nombre de personnes qui ne sont pas mortes instantanément).

1.4.3. Méthodologie RISK-UE

Le projet européen Risk-UE a été lancé en 1999, à la fin de la décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles (IDNDR). Ce projet, parrainé par la commission Européenne, a été piloté par des organismes scientifiques (institutions universitaires et centres de recherches) et techniques [90] de 2001 à 2004.

Le projet a consisté à mettre au point une méthode d'évaluation de la vulnérabilité et du risque sismique adaptée au contexte européen, et ce à travers l'estimation des dommages directs et indirects, suite à un scénario sismique et les conséquences résultant de ces dommages. L'objectif principal de ces scénarii est d'accroître la conscience du risque sismique dans les centres de prise de décision d'une ville afin de prendre les mesures préventives nécessaires pour réduire efficacement ce risque, à travers la réalisation des plans d'actions et de gestions [82]. Le projet a été appliqué à sept (07) villes européennes de l'Est et de l'Ouest, situées dans des zones de sismicités actives, à savoir : Nice (France), Barcelone (Espagne), Catane (Italie), Sofia (Bulgarie), Bucarest (Roumanie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine) [60].

La méthodologie développée dans ce projet a été organisée sous format modulaire pour la réalisation des scénarii sismiques en considérant les caractéristiques spécifiques des villes européennes en ce qui concerne les constructions courantes et historiques, ainsi que leur organisation fonctionnelle et sociale afin d'identifier les points faibles dans le système urbain. Cette méthode a la particularité, en comparaison avec les autres méthodes, de prendre en considération les anciens centres urbains, les monuments et les bâtiments historiques.

1.4.3.1. Organisation du projet RISK-UE

Sept rubriques (Work-packages) sont développées pour la mise en application de la méthodologie:

WP01 : Identification des caractéristiques européennes distinctives, Systèmes d'Information Géographique (SIG), base de données des différentes typologies du bâti ;

WP02 : Estimation de l'aléa sismique au niveau régional et local ;

WP03 : Analyse du système urbain faisant ressortir les points faibles dans des conditions normales, au moment de crise et de récupération;

WP04 : Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments courants ;

WP05 : Evaluation de la vulnérabilité des anciens centres villes, des monuments et des bâtiments historiques ;

WP06 : Évaluation de la vulnérabilité des réseaux vitaux et bâtiments stratégiques ;

WP07 : Scénarios de risque sismique.

1.4.3.2. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant

Deux méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant ont été mises au point dans le cadre du projet RISK-UE, à savoir : Méthode de Niveau 1 (Level 1) et Méthode de Niveau 2 (Level 2) selon la précision des données d'entrée.

La méthode « LM1 » est appropriée pour l'évaluation de la vulnérabilité, des dommages et des pertes dans des environnements urbains n'ayant pas de détails sur la sismicité de la région. Elle peut être réalisée en utilisant l'échelle d'intensité macrosismique européenne (EMS-98), tandis que la méthode « LM2 » est applicable pour des environnements urbains possédant des études de micro-sismicité détaillées exprimées en termes de quantités spectrales spécifiques (accélérations spectrales, vitesses spectrales ou déplacements spectraux).

1.4.3.2.1. Méthode LM 1

Cette approche est basée sur les méthodes classiques telles que les méthodes macrosismiques ou statistiques qui utilisent les données de dommages d'un grand nombre d'échantillons de constructions obtenues lors de campagnes post-sismiques et du retour d'expériences de séismes passés en Italie, Grèce, Roumanie et l'ancienne Yougoslavie [60, 90]. Les fonctions de vulnérabilité réalisées dans cette méthode sont représentées sous formes de matrices de probabilités de dommages (DPM) ou courbes de vulnérabilité (voir figure 1.5). Ces fonctions expriment la relation entre l'intensité macrosismique (EMS-98)

et le dommage moyen μ_D (voir figure 1.21 et équation 1.2), et permettent ainsi de définir la distribution des probabilités correspondant aux différentes classes de vulnérabilité (06 classes notées A à F) et degrés de dommage. Cette distribution se fait par l'intermédiaire de la loi Beta (voir équation 1.15). Ces fonctions sont basées sur l'évaluation de l'indice de vulnérabilité, I_v , (voir paragraphe 1.3.4.2) pour chaque typologie qui varie généralement entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable) afin de quantifier la réponse de la structure.

Cette méthode définit 06 niveaux de dommages dont les dommages négligeables : D0 pour Dommages négligeables, D1 pour Dommages faibles, D2 pour Dommages modérés, D3 pour Dommages importants, D4 pour Dommages très importants et D5 pour Destruction.

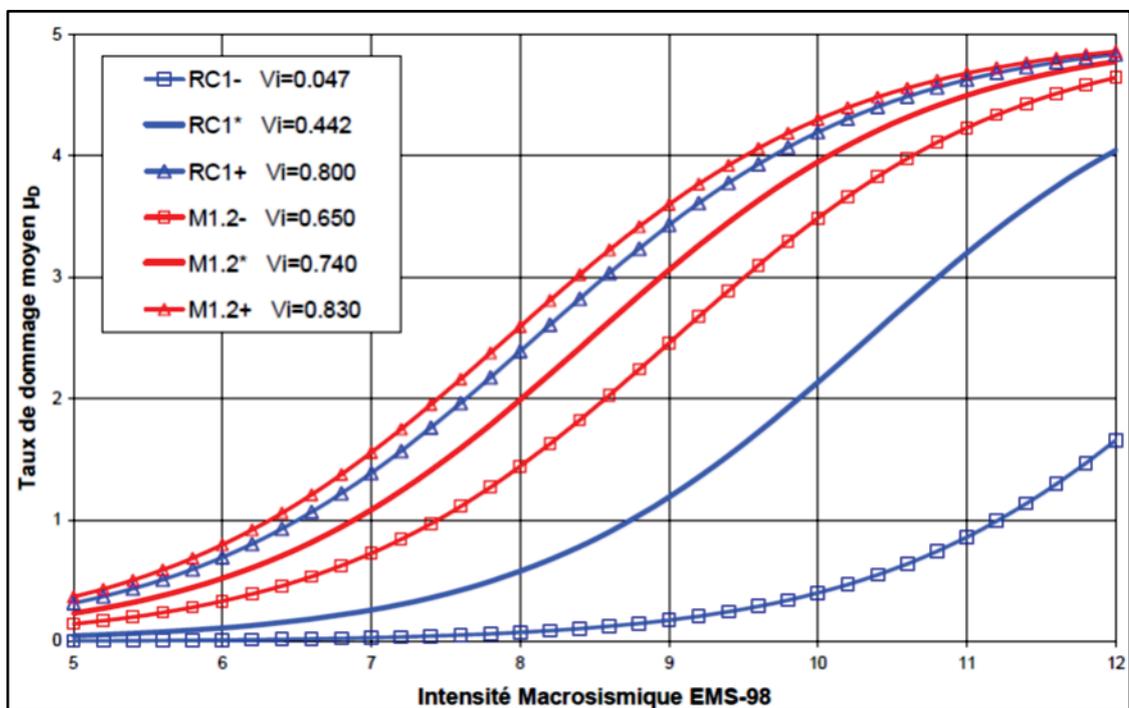


Figure 1.21 : Exemple de courbes de vulnérabilité développées dans le projet RISK-UE pour le cas de la ville de Nice, France [90]

1.4.3.2.2. Méthode LM 2

La deuxième approche est basée sur des études analytiques ou numériques des structures, soit par les analyses transitoires ou par des méthodes simplifiées [60]. Elle est inspirée dans son développement de la méthodologie HAZUS et des méthodes du spectre de capacité développé dans le rapport « *ATC-40 : Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* » [51]. Cette approche définit 05 niveaux de dommages similaires à ceux utilisés dans la méthodologie HAZUS.

Le développement des courbes de capacité et de fragilité a été réalisé par les différentes institutions participant au projet Risk-UE. Chaque équipe s'est appuyée sur une des 07 villes étudiées dans le projet [86].

A partir des résultats de ces courbes obtenus et mentionnés dans le rapport « WP04 » (Risk-UE), il apparaît que, dans la plupart des cas, ils ne sont pas uniformes pour une même typologie. D'après les études menées par BELMOUDEN et al. [86], cela est dû à plusieurs raisons dont :

- Différence dans les caractéristiques du bâti d'une ville à une autre ;
- Utilisation de spectres de réponses spécifiques à chaque ville dans l'analyse du spectre de capacité nécessaire pour le développement des courbes de fragilité ;
- Les coefficients de réduction ne sont pas donnés en fonction de l'amortissement ;
- Utilisation d'approches différentes dans la réalisation des courbes de capacité qui servent de base pour le développement de courbes de fragilité pour les différents degrés de dommages. Cela est dû principalement au manque de coordination entre les différentes équipes qui ont travaillé de façon indépendante.

Commentaire :

Le modèle d'évaluation du risque sismique « Risk-UE » constitue la première alternative au modèle HAZUS. Il a regroupé des équipes européennes de travail de grande envergure dans le domaine du Génie parasismique qui ont pu développer des approches, certes appropriées au contexte européen, mais qui peuvent être utilisées dans d'autres environnements urbains similaires.

1.4.4. Méthodologie CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment)

CAPRA est une méthodologie technico-scientifique et une plateforme d'information composée d'outils pour l'évaluation et la communication du risque à plusieurs niveaux territoriaux. Elle a été développée avec le support financier et technique de la Banque Mondiale, de la Banque de Développement Inter-Américaine (BID) et de la stratégie internationale des Nations Unies pour la réduction des catastrophes (ISDR) [91].

Cette méthodologie a été implémentée dans un logiciel intégrant un système d'Information Géographique (SIG). Ce modèle permet l'évaluation des pertes probables sur les éléments exposés en utilisant des approches probabilistes, telles que les courbes de vulnérabilité, courbes de fragilité, pertes probables maximum, utiles pour des analyses

multi-risques. La plateforme est conceptuellement orientée pour faciliter la prise de décision.

En utilisant le modèle CAPRA (voir figure 1.22), il est possible de concevoir les instruments de transfert de risque, l'évaluation du rapport des coûts et bénéfices probabilistes, fournissant un outil innovateur pour les décideurs pour analyser les avantages nets des stratégies de réduction du risque, telles que la réhabilitation future des structures. Le caractère innovateur de ce modèle réside dans l'intégration du Web pour la communication des résultats et cartes de dommages sur SIG. Ce modèle est utile pour la réalisation des scénarii de dommages, la planification urbaine, l'estimation des dommages en temps réel qui seront communiqués en ligne (par internet) afin de faciliter la réduction du risque sismique et l'aide à la prise de décision rapide. CAPRA a été utilisé dans la région d'Amérique du centre et du Sud et dans quelques pays en Europe et en Asie, comme la Colombie, le Mexique et le Népal. Il a ensuite été complété pour traiter les autres risques naturels qui touchent les pays d'Amérique centrale et du sud, tels que les inondations, ouragans, etc. Il constitue une contribution potentielle pour le modèle sismique global (Global Earthquake Model-GEM) [91].

Ce modèle est conçu sous forme de modules dans une plateforme (SIG) pour l'estimation des dommages sismiques:

- Module « Aléa sismique »
- Module « Enjeux »
- Module « Vulnérabilité »
- Module « Dommages et pertes ».

L'estimation des dommages sismiques dans la méthode CAPRA se fait de 2 manières :

- Utilisation des courbes de vulnérabilité pour estimer le taux de dommages moyens des classes de constructions (Typologies) en fonction d'intensité ou accélération, en se basant sur l'approche développée par MIRANDA et al. (1999) [91].
- Utilisation des courbes de fragilité pour calculer la probabilité des dommages d'atteindre ou dépasser un certain niveau de dommages pour les différentes catégories de constructions concernées.

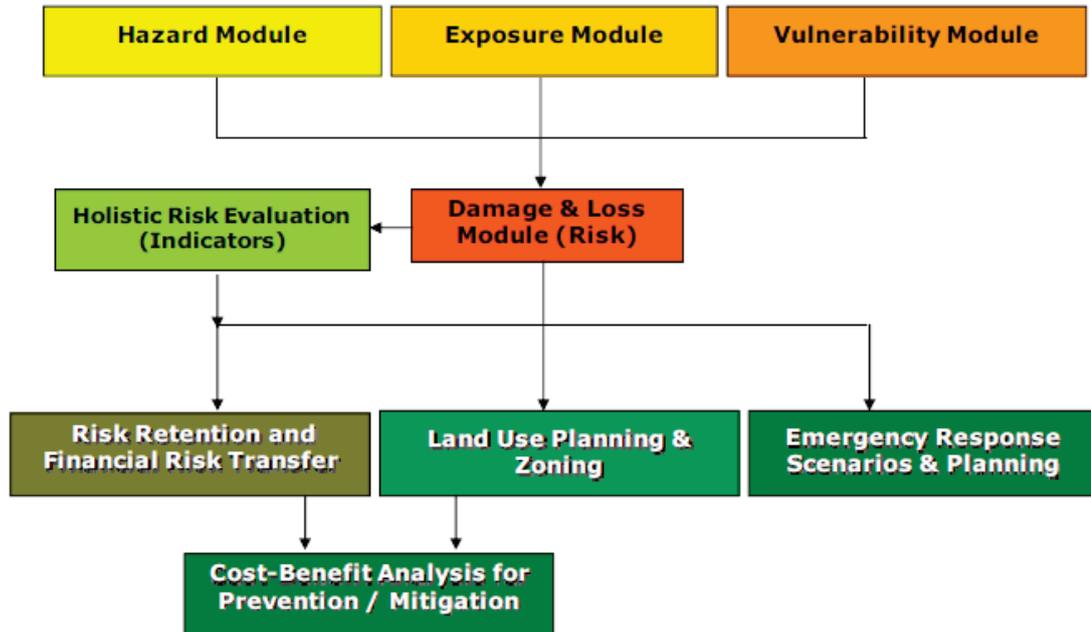


Figure 1.22 : Organigramme du modèle CAPRA [83]

1.4.5. Méthodologie “Global Earthquake Model (GEM)”

Le modèle sismique global (Global Earthquake Model, GEM) a été initié par le forum global de la Science, en mars 2009 à Pavie en Italie. Le modèle GEM (voir figure 1.23), encore en cours de développement et évolution, constitue une innovation dans le domaine d'estimation des dommages sismiques dans le monde. Il est issu d'un effort de collaboration de chercheurs internationaux pour la mise en place d'une plateforme accessible à tout le monde pour le calcul et communication du risque sismique à travers le monde entier. Le modèle est implémenté dans un logiciel open-source utilisant une plateforme SIG. Il est organisé en modules [46] :

- Module « Enjeux »
- Module « Aléa sismique »
- Module vulnérabilité
- Module « Impact socio-économique »

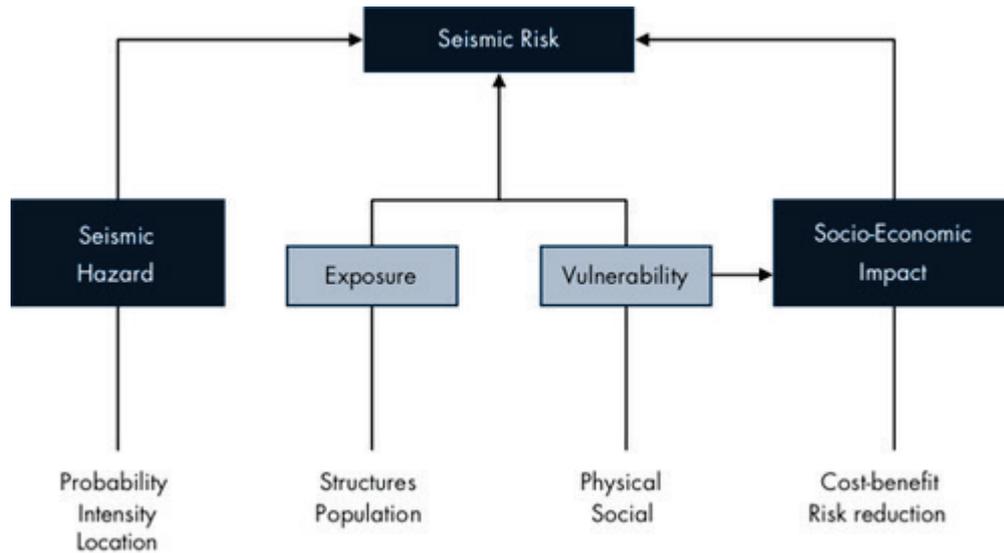


Figure 1.23 : Organigramme du modèle GEM [46].

L'analyse de la vulnérabilité dans le modèle GEM est réalisée par 2 approches, à savoir PAGER et ATC-13.

1.4.5.1 Approche de vulnérabilité de PAGER

L'approche de vulnérabilité utilisée a été initiée par le groupe PAGER à l'USGS (United States Geological Survey) puis a été reconduite et améliorée par le même groupe dans le modèle GEM. Le modèle de vulnérabilité utilisé se compose de 50 fonctions log-normales (27 courbes de fragilité pour des pays particuliers et 23 courbes pour des groupes de pays). Ces fonctions de distribution log-normales sont données par l'expression suivante:

$$v(S) = \phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{S}{\theta} \right) \right] \quad (1.16)$$

Où, $\phi(\cdot)$ est la fonction de distribution cumulative normale standard, S est la valeur discrète du niveau d'intensité et β et θ sont des paramètres de la distribution.

1.4.5.2 Approche de vulnérabilité de l'ATC-13

Les fonctions de dommages utilisées sont sous formes de matrices de probabilité de dommages pour 78 classes de structures : 40 classes de bâtiments et 38 classes de réseaux vitaux [59]. Ces fonctions sont définies en fonction de l'échelle d'intensité modifiée de Mercalli (MMI) avec un incrément d'une unité de mesure, allant de 6 à 12.

1.5. Systèmes d'information géographique (SIG)

1.5.1. Définition des SIG

Le *Système d'Information Géographique* (SIG) fait partie de la famille des systèmes d'informations (SI). Un SI est « un système de communication permettant de communiquer et de traiter l'information » [92]. Les données peuvent être de nature numérique, textuelle ou audiovisuelle.

Les SI en général et les SIG en particulier se situent entre le modèle conceptuel intersubjectif et la représentation binaire dans l'ordinateur. De ce point de vue, ils constituent une interface homme machine (IHM) [93].

La particularité des SIG tient à la nature des données à traiter. Ces dernières sont géoréférencées, c'est-à-dire que leur position est connue dans un référentiel spatial et que le SI dispose d'outils spécifiques au caractère spatial des données : la panoplie de l'analyse spatiale [93].

Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) sont définis par plusieurs auteurs. Selon PAEGELOW [94], le SIG est un ensemble de matériel (hardware) et logiciel (software), de plus en plus imbriqué dans des réseaux (netware), de données et de personnel qualifié capable d'acquérir, de stocker, de traiter, d'analyser, de modéliser et de représenter des données numériques géoréférencées, qui sont utilisées dans de nombreux domaines d'application, manipulant l'information spatialisée, où cet outil apporte une aide à la prise de décision.

Un SIG performant comporte au moins deux séries d'éléments fonctionnant en parfaite association [92]:

- Un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) qui n'est autre qu'un logiciel de traitement d'une information plus ou moins « classique » ;
- Une base de données géographique permettant de localiser avec précision les données du SGBD.

La base de données géographique est raccordée à un système de coordonnées terrestre, généralement les méridiens et les parallèles, dans le cadre d'une projection cartographique donnée. Cela est appelé « géo-référencement » (tout point de la base de données, et par conséquent tout objet intégré au SGBD est identifié spatialement avec précision) [93].

1.5.2. Importance du SIG dans l'évaluation du risque sismique

Il y a quelques années la mise en place d'un SIG (*Système d'Information Géographique*) paraissait réservée aux grandes structures. Aujourd'hui les progrès informatiques et les possibilités offertes en matière de gestion et d'analyse, conduisent à la généralisation de l'outil dans divers domaines (www.iaat.org) tel que le risque sismique.

Les séismes, de par leur nature comme phénomènes naturels imprévisibles, peuvent survenir à n'importe quel moment et causer des dommages aux différentes infrastructures d'une zone urbaine (bâtiments, routes, ponts, réseaux vitaux, etc.). Ils peuvent paralyser la fonction urbaine et causer la perte en vies humaines en l'espace d'un temps très court. Bien qu'il soit virtuellement impossible de prédire le temps exact où se produirait cette catastrophe, il est possible d'en déterminer la probabilité d'occurrence. Il est donc essentiel de se préparer au risque pour toute zone qui en soit potentiellement sujette.

Pour réduire le risque sismique, il est très important de produire des images réalistes de cet aléa de manière à mieux s'y préparer et y réagir correctement en cas où il survient.

Dans ce cadre, les SIG peuvent être considérés comme des outils appropriés pour la réalisation des études d'évaluation du risque sismique et la conception du contenu de la base de données est essentielle pour le système lui-même.

L'objectif majeur de l'utilisation d'un SIG est la présentation des données sous forme de cartes thématiques où les informations y sont ordonnées de façon pertinente et les relations spatiales entre les couches d'information y sont aisément détectables.

La Cartographie thématique est un outil de communication et d'aide à la prise de décision de par la propriété de synthèse, de visualisation et d'interactivité sur un support cartographique [95].

1.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter diverses facettes se rapportant à la compréhension du risque sismique qui menace de plus en plus les zones urbaines à travers le monde, à l'instar des villes d'Algérie sujettes à ce risque. La quantification du risque sismique permet de fournir une base pertinente et objective pour les pouvoirs publics et décideurs, afin d'évaluer les mesures préventives adéquates, qui peuvent aider à anticiper, réduire et minimiser les impacts d'un probable événement majeur.

A cet effet, l'estimation des dommages constitue un élément indispensable pour une meilleure prévention et protection face à un risque sismique.

L'estimation rationnelle des dommages sismiques peut être réalisée à travers une analyse appropriée de la vulnérabilité sismique du bâti existant pour évaluer le degré d'endommagement vis-à-vis des événements sismiques et déterminer l'état des constructions présentant le plus de risque. De ce fait, des méthodologies appropriées d'estimation des dommages sismiques du bâti existant ont été développées de par le monde et ont pu être mises en application pour une estimation de l'état de résistance des structures.

En effet, plusieurs méthodologies et modèles d'estimation des dommages sismiques des différents enjeux exposés et plus particulièrement du bâti existant existent à travers le monde. Ces méthodologies ont connu un développement important après les innombrables pertes sismiques qui n'ont cessé de croître ces trois dernières décennies.

Toutes les méthodologies décrites dans ce chapitre, telles que HAZUS, RADIUS RISK-UE et CAPRA permettent une meilleure compréhension de ce qui peut se produire pendant un séisme plausible qui peut affecter une zone urbaine donnée.

L'utilisation de la cartographie thématique dans la représentation des résultats de dommages sismiques dans les zones touchées à travers des Systèmes d'Information Géographique permet d'avoir une localisation précise et une évaluation synthétisée concernant les constructions et les zones les plus sujettes aux dommages. Ces résultats de dommages sismiques prédictifs ou post-sismiques, malgré les incertitudes liées à plusieurs facteurs, permettraient aux gestionnaires techniques, aux décideurs et aux pouvoirs publics de se préparer dans la gestion du risque sismique, d'analyser le système urbain et de proposer les plans d'action les plus efficaces pour une réduction systématique du risque sismique.

Dans la suite du présent travail, nous nous proposons de mettre au point une méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie en adaptant la méthodologie HAZUS pour le contexte Algérien.

CHAPITRE 2 :

BATI EXISTANT EN ALGERIE - MISE AU POINT D'UNE METHODOLOGIE D'ESTIMATION DES DOMMAGES SISMIQUES

2.1. Introduction

L'estimation des dommages, qui peuvent être causés par un séisme, constitue une étape primordiale pour la réduction du risque sismique dans les zones exposées. En Algérie, l'expérience des séismes passés, tels que ceux d'El-Asnam de 1980 et de Boumerdès de 2003, a montré que la mise en place des moyens d'intervention adéquats ne s'est faite qu'après le retour des premiers enquêteurs. Cela peut faire perdre beaucoup de temps pour secourir les blessés dont la chance de survie diminue rapidement avec le temps. En outre, des pertes financières considérables peuvent être engendrées dans la mobilisation des moyens de secours et la gestion de la crise en cas où tardent les zones touchées à être localisées et le niveau d'alerte à être déclenché.

Dans le cadre du présent travail de recherche, nous nous intéressons à la mise au point d'une méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie.

Cette méthode est inspirée de l'approche HAZUS (Hazard-United States) en adoptant les courbes de capacité et de fragilité judicieuses et adaptées aux typologies correspondantes du bâti Algérien. Elle a comme objectif de donner une estimation des probabilités des dommages sismiques du bâti dans les zones touchées.

Cette méthode, une fois mise au point, est numérisée dans un code informatique, intégrant un système d'information géographique (SIG), qui permette l'automatisation du calcul et le traitement rapide de l'ensemble des données avec la génération des cartes de dommages. Le modèle d'estimation de dommages sismiques élaboré peut aussi bien servir à la réalisation d'une estimation prédictive des dommages sismiques qu'à l'estimation en temps réel des dommages en phase post-sismique.

Dans l'optique de prédiction des dommages pouvant se produire dans une zone urbaine exposée au risque sismique, sous l'hypothèse d'un scénario sismique probable, les résultats peuvent constituer le support objectif et rigoureux permettant de prendre les mesures préventives adéquates pour la mitigation de ce risque.

En phase d'évaluation post-sismique, la méthode permet de donner une évaluation des dommages post-sismiques en temps réel, dans les quelques instants qui suivent un séisme réel, dès que l'épicentre est localisé et la magnitude connue. Les résultats permettraient de faire alors ressortir les zones les plus touchées, ce qui aiderait à définir le niveau d'alerte à déclencher et pouvoir ainsi mobiliser les moyens de secours adéquats.

Ce modèle se présente comme un outil d'aide à la décision qui constitue un apport dans le domaine de la planification urbaine et de la gestion de crise en Algérie.

2.2. Développement de la procédure d'estimation des dommages sismiques pour le bâti existant en Algérie

La procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie (voir la figure 2.1) est inspirée de l'approche HAZUS qui se base sur la technique ou méthode du spectre de capacité (CSM). Les courbes de capacité et de fragilité des typologies qui y sont développées ont été adoptées pour les typologies réputées correspondre au bâti Algérien [19, 43].

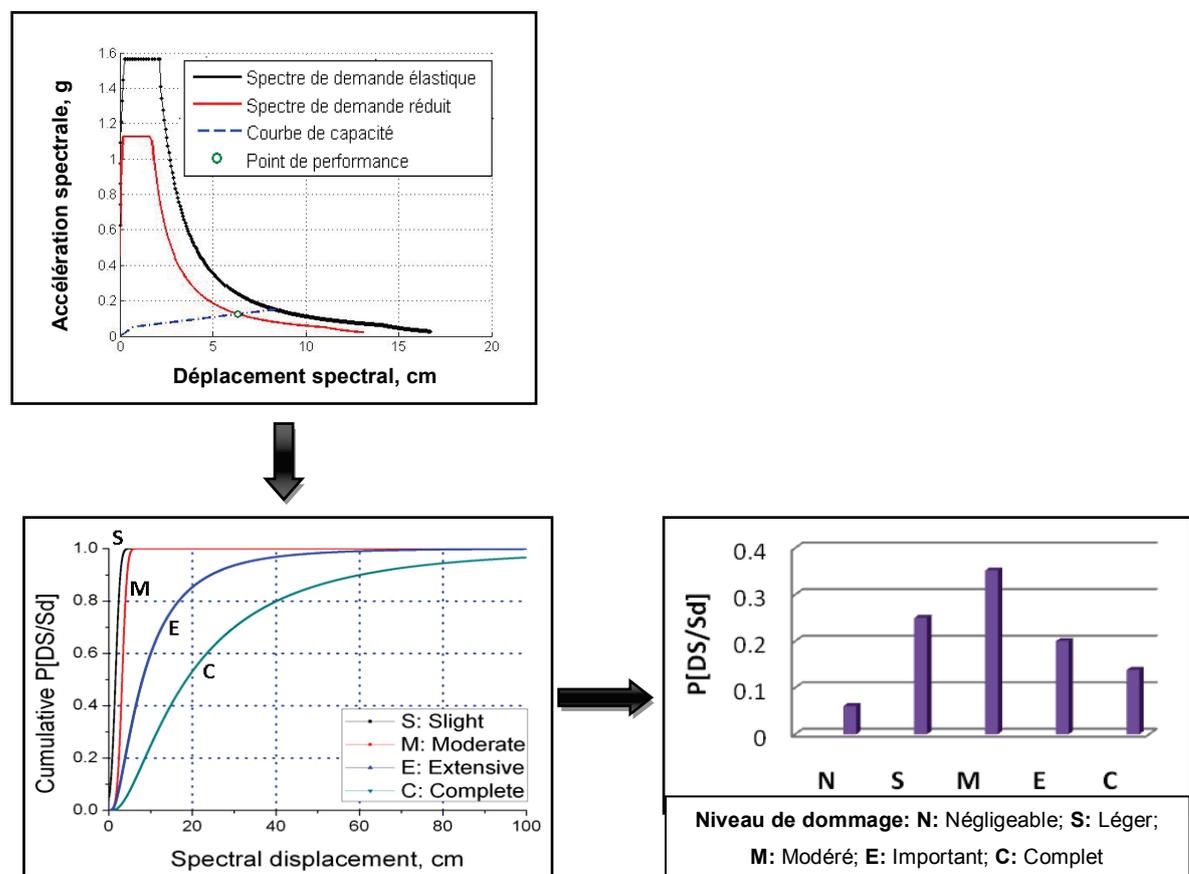


Figure 2.1 : Schématisation de la Procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie [19, 43, 96]

Pour l'adaptation au contexte Algérien, nous proposons de considérer, d'abord, les caractéristiques du sol et leurs propriétés dynamiques (données sismiques). Nous proposons, aussi, de classer judicieusement les typologies selon les matériaux et le schéma structural car elles régissent la réponse dynamique de structures (résultats).

Pour la suite des étapes de la procédure, le point performance demeure l'intersection entre la demande sismique (spectre de réponse élastique) et la réponse de la structure (courbe de capacité), voir la figure 2.1, le déplacement spectral correspondant décrivant le niveau des dommages structuraux, comme montré dans le tableau 1.4.

Ainsi, ce déplacement spectral fournirait la probabilité d'occurrence du niveau de dommage sur la courbe de fragilité adoptée pour le type de structure considérée. Par conséquent, les probabilités de dommages et leurs catégories sont obtenues pour la structure étudiée sous l'action d'une demande sismique donnée.

2.2.1. Algorithme de la méthode d'estimation des dommages sismiques du bâti en Algérie

L'algorithme général de la méthode d'estimation des dommages sismiques adoptée pour le contexte du bâti en Algérie (voir figure 1.2) nécessite les principales étapes données ci-après [19, 43, 96]:

- **Choix de la typologie de structure:**

Le choix du type du modèle de structure à étudier en fonction de la hauteur (nombre d'étages) et le niveau du code parasismique correspondant (voir tableaux 2.4 et 2.5).

- **Développement du spectre de demande élastique avec un amortissement ($\xi = 5\%$) :**

Deux types de spectre sont considérés pour les simulations. En premier abord, le spectre de réponse élastique ($\xi = 5\%$) est développé à partir d'un signal accélérométrique enregistré durant un séisme donné. Le second spectre d'étude est la sollicitation de référence proposée dans les normes parasismiques Algériennes (RPA99/2003).

Le spectre doit prendre en considération les conditions du sol et les effets de sites relatives à la zone d'implantation de la structure (ou structures) à étudier. Une fois développé, ce spectre est converti en spectre de demande élastique correspondant, dans le format ADRS (Spectre de réponse Accélération-Déplacement), en utilisant la formulation donnée par MAHANEY et al. [83] :

$$S_{di}(T) = \frac{S_{ai}(T)}{4\pi^2} T^2 \quad (2.1)$$

Ainsi, chaque ordonnée d'accélération spectrale associée à une période T , est convertie en ordonnée de déplacement spectrale correspondante multipliée par le facteur $T^2/4\pi^2$.

Où:

T [unité:s] représente la période de la structure; S_{dy} [unité:m] et S_{ay} [unité:m.s⁻²] représentent le déplacement spectral et l'accélération spectrale, respectivement.

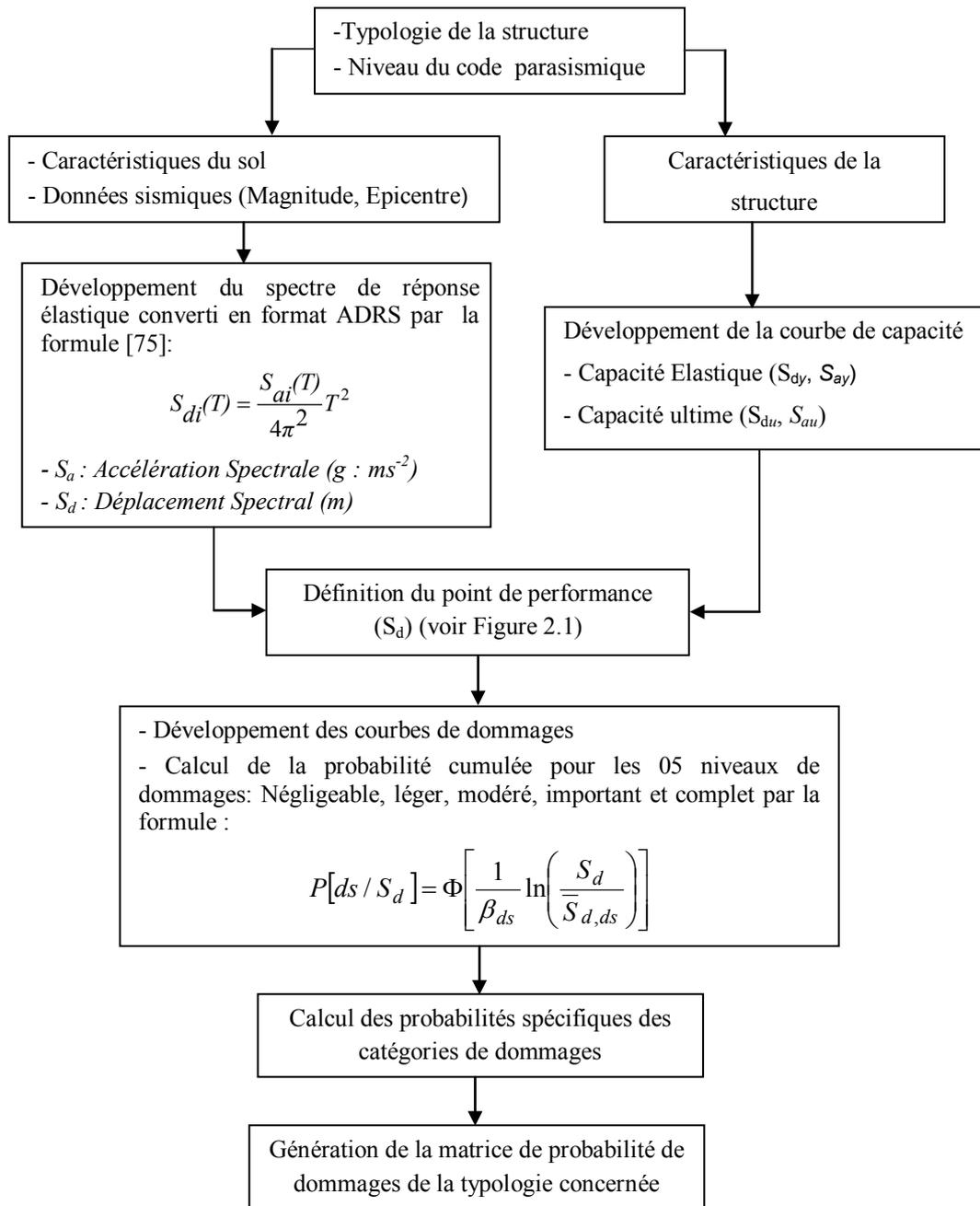


Figure 2.2 : Organigramme général de la procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie [19, 43, 96]

- **Développement de la courbe de capacité bilinéaire :**

La courbe de capacité exprime la relation entre l'effort tranchant résultant agissant à la base de la structure et le déplacement maximal obtenu au sommet de l'édifice. La réponse de la structure dépend de la géométrie et du comportement des matériaux constitutifs considérés comme linéaires ou non-linéaires, avec des effets de second ordre (P-Delta) possibles [97]. Cette courbe est transformée en format ADRS en spectre de capacité comme décrit dans le chapitre 1 (voir figure 2.3).

La courbe de spectre de capacité résultante est convertie en format bilinéaire selon la technique d'égalité des aires [51]. La forme bilinéaire permet de déduire le point d'écoulement plastique global de la structure (S_{ay} , S_{dy}) nécessaire au calcul du taux d'amortissement effectif ainsi que les facteurs de réduction spectraux.

Les principaux paramètres de cette courbe de spectre de capacité bilinéaire sont :

- Capacité élastique (S_{dy} , S_{ay}) ;
- Capacité ultime (S_{du} , S_{au}).

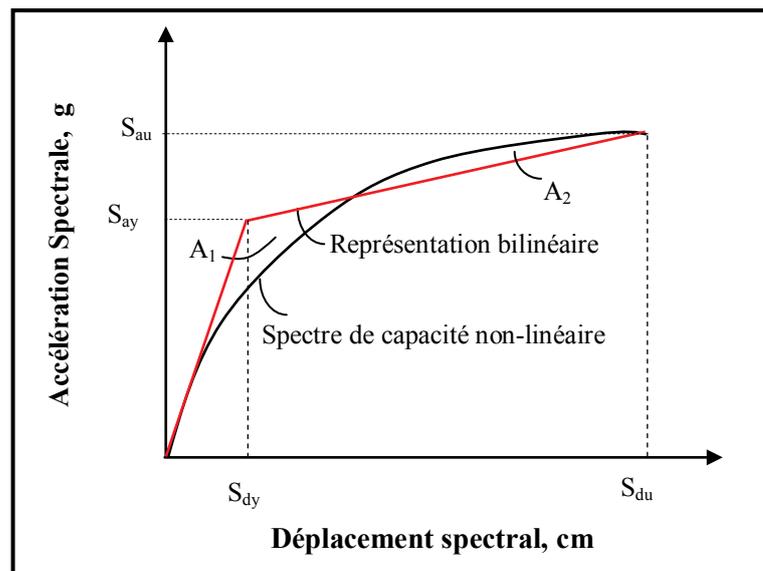


Figure 2.3 : Représentation bilinéaire du spectre de capacité [51]

- **Définition du point de performance ou demande en déplacement :**

Le point de performance (S_d) représente la performance d'une structure ou classe de structures (typologie) sous l'effet d'une sollicitation sismique donnée. Il exprime l'interaction entre la courbe de capacité du bâtiment et la sollicitation sismique représentée par le spectre de réponse élastique du site étudié [42, 46]. Une fois défini, ce point permet d'estimer les probabilités d'atteindre le niveau de dommage spécifié en utilisant les courbes de fragilité.

La définition de ce point de performance, dans la méthode mise au point pour l'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie, est développée dans le paragraphe 2.2.1.2.

• **Génération des courbes de dommages**

Les courbes de dommages sont adoptées sous formes de courbes de fragilité log-normale qui expriment la probabilité $P[ds|S_d]$ d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage structurel ou non-structurel (ds), pour un déplacement spectral (S_d) au point de demande (point de performance).

La distribution cumulée pour un niveau de dommage donné (ds) définit donc les probabilités pour 05 états de dommages (voir tableau 2.1). Ces probabilités sont décrites comme suit:

$P[N|S_d]$: Probabilité d'occurrence d'un dommage négligeable "**N**" (no damage) ;

$P[S|S_d]$: Probabilité d'occurrence d'un dommage léger "**S**" (slight damage) ;

$P[M|S_d]$: Probabilité d'occurrence d'un dommage modéré "**M**" (moderate damage) ;

$P[E|S_d]$: Probabilité d'occurrence d'un dommage important "**E**" (extensive or severe damage) ;

$P[C|S_d]$: Probabilité d'occurrence d'un dommage complet "**C**" (complete damage).

Pour un état de dommage donné, la courbe de fragilité est exprimée par la fonction de densité de probabilité log-normale donnée par l'équation suivante [42] :

$$P[ds / S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (2.2)$$

Où :

S_d représente le déplacement spectral (paramètre de la demande sismique) ; $\bar{S}_{d,ds}$ est la valeur moyenne du déplacement spectral, S_d , pour un certain niveau de dommage pris égal à « ds » ;

β_{ds} définit l'écart-type du logarithme du déplacement spectral, S_d , pour un état de dommage « ds ». $\Phi(.)$ exprime la distribution Gaussienne standard cumulée.

- **Calcul des probabilités spécifiques des catégories de dommages**

La probabilité spécifique à chaque catégorie ou niveau de dommage est déduite des probabilités cumulées comme suit [22]:

$$\text{Dommage Complet "C":} \quad P[ds=C] = P[C|S_d] \quad (2.3)$$

$$\text{Dommage Important "E":} \quad P[ds=E] = P[E|S_d] - P[C|S_d] \quad (2.4)$$

$$\text{Dommage Modéré "M":} \quad P[ds=M] = P[M|S_d] - P[E|S_d] \quad (2.5)$$

$$\text{Dommage Léger "S"} \quad P[ds=S] = P[S|S_d] - P[M|S_d] \quad (2.6)$$

$$\text{Dommage Négligeable "N":} \quad P[ds=N] = 1 - P[S|S_d] \quad (2.7)$$

- **Génération de la matrice de probabilité de dommages pour la typologie de structure étudiée**

La matrice de probabilité de dommages (DPM) (voir tableau 2.1) exprime, sous une forme discrète, la probabilité conditionnelle $P[D=j|i]$ pour obtenir un niveau de dommage « j », dû à un séisme de sévérité « i » [98].

Tableau 2.1 : Matrice de probabilités de dommages adoptée dans la méthodologie

Catégorie de dommage	Matrice de probabilités de dommages				
	Négligeable	Léger	Modéré	Important	Complet
Probabilité	P[N]	P[S]	P[M]	P[E]	P[C]

2.2.1.1 Spectre de réponse proposé par les règles parasismiques Algériennes (RPA99/2003)

La forme générale du spectre de réponse proposé par les règles parasismiques Algériennes (RPA99 version 2003) est donnée par la formulation suivante [99] :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A_c \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A_c) \frac{Q}{R} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A_c) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A_c) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases} \quad (2.8)$$

Où :

A : Coefficient d'accélération (g) ;

ξ : Pourcentage d'amortissement critique ;

R : Coefficient de comportement de la structure ;

T_1 et T_2 : Limites inférieures et supérieures de l'intervalle des périodes définissant la branche de l'accélération spectrale constante.

Q : Facteur de qualité.

η : Facteur de correction d'amortissement donné par l'équation suivante :

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \quad (2.9)$$

L'utilisation de la méthode du spectre de capacité nécessite l'utilisation d'un spectre de réponse élastique avec un amortissement (ξ) pris égal à 5%. Dans ce cas, les facteurs R, η et Q seront remplacés par la valeur unité (1). L'allure du spectre résultant est donnée sous la forme suivante :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 \left(1 + 1.5 \frac{T}{T_1} \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5(1.25 A_c) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5(1.25 A_c) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5(1.25 A_c) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases} \quad (2.10)$$

2.2.1.2 Etapes de détermination du point de performance (S_d) dans la méthode mise au point

La définition du point de performance, dans la méthode mise au point pour l'estimation des dommages sismiques du bâti existants en Algérie, est réalisée en utilisant la procédure « A » de la méthode du spectre de capacité développé par le Conseil de Technologie Appliqué dans le rapport « *ATC-40 : Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* » [51] et adoptée par la méthodologie HAZUS [22]. En tenant compte du contexte Algérien, le point de performance est déterminé comme suit [19, 43, 96]:

1. Superposition de la courbe du spectre de capacité de la structure (ou typologie) et du spectre de demande élastique ($\xi=5\%$) développé sur un même diagramme.
2. Choisir un point de performance initial (point de commencement des itérations), a_{pi} , d_{pi} ($d_{pi} > S_{dy}$) sur le spectre de capacité comme montré sur la figure 1.3. Ce point peut être

obtenu de différentes manières, soit comme l'intersection du prolongement du segment élastique du spectre de capacité et le spectre de réponse élastique basé sur l'hypothèse des déplacements égaux, soit par les coordonnées ultimes du spectre de capacité ou tout autre point basé sur le jugement de l'ingénieur. Il peut être aussi le point intermédiaire de la branche post élastique du spectre de capacité déterminé comme suit :

$$a_{pi} = \frac{S_{au} - S_{ay}}{2} \quad (2.11)$$

et

$$d_{pi} = \frac{S_{du} - S_{dy}}{2} \quad (2.12)$$

Dans le cas d'utilisation de l'hypothèse des déplacements égaux, on détermine les coordonnées initiales du point de performance, [51], à partir de l'intersection du prolongement du segment élastique de la courbe du spectre de capacité non-linéaire (rigidité initiale) et le spectre de demande élastique. On peut en déduire la période élastique (T_0) de la structure ainsi que les déplacements et accélérations spectraux correspondant [$S_d(T_0) = d_{\text{élastique}}$; $S_a(T_0)$] sur le spectre de demande élastique. La projection de ce déplacement sur le spectre de capacité, permet d'en déduire le déplacement spectral inélastique ($d_{\text{élastique}} = d_{\text{inélastique}}$) ainsi que l'accélération spectrale inélastique correspondante. Ce point sera pris comme étant le point de performance initial (a_{pi}, d_{pi}), comme illustré sur la figure 2.4.

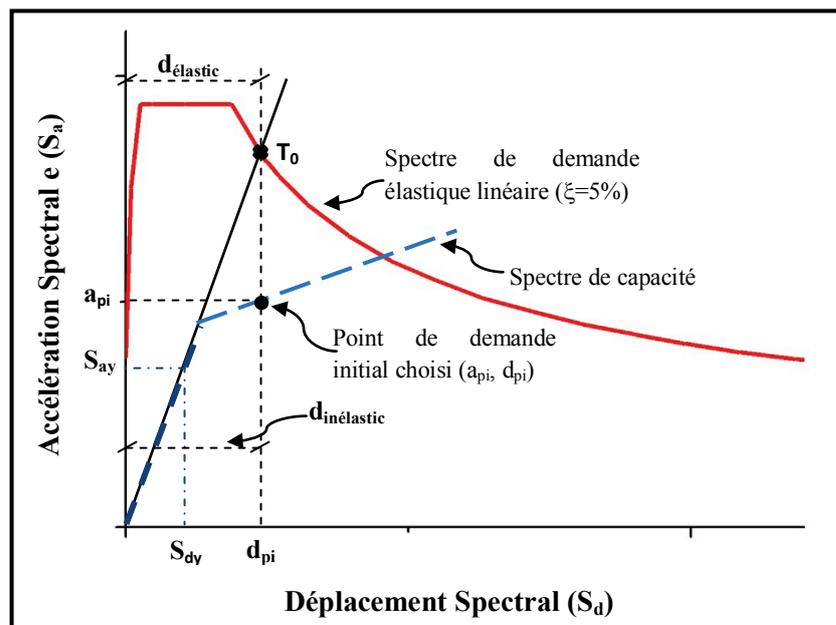


Figure 2.4 : Procédure de définition du point de performance initial (a_{pi}, d_{pi}) par l'hypothèse des égalités des déplacements

3. Calculer les facteurs de réductions spectraux SR_A et SR_V donnés par les équations 2.13 et 2.14 [51], puis développer le spectre de demande élastique réduit par ces facteurs. Superposer ce dernier dans le même diagramme avec le spectre de capacité bilinéaire (voir figure 2.5).

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\xi_{eff})}{2.12} \quad (2.13)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\xi_{eff})}{1.65} \quad (2.14)$$

Les facteurs de réductions spectraux SR_A et SR_V sont fonction des amortissements effectifs, ξ_{eff} . La formule utilisée pour le calcul de ces amortissements, basés sur les études effectuées par Newmark et Hall [51, 100], a été développée initialement pour le calcul des amortissements équivalents (ξ_{eq}) (voir équation. 2.17) des structures ductiles ayant un comportement hystérétique stable avec des boucles hystérésis parfaites. L'amortissement équivalent (ξ_{eq}) représente l'amortissement d'une structure donnée, dans sa phase inélastique, après l'occurrence d'un séisme. Il est obtenu comme suit :

$$\xi_{eq} (\%) = \xi_0 + \xi \quad (2.15)$$

Où :

ξ_0 représente l'amortissement hystérétique donné par l'équation suivante :

$$\xi_0 = \frac{63.7(S_{ay}d_{pi} - S_{dy}a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}} \quad (2.16)$$

ξ décrit l'amortissement naturel de la structure à l'état élastique qui est supposé constant, il est pris égal à 5%, en général.

De ce fait, l'équation de l'amortissement équivalent des structures ductiles est exprimée de la manière suivante :

$$\xi_{eq} = \frac{63.7(S_{ay}d_{pi} - S_{dy}a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}} + 5 \quad (2.17)$$

Dans le cas des structures existantes qui ne sont pas ductiles généralement, cette formulation donne des valeurs surestimées des amortissements équivalents réels. De ce fait, pour prendre en considération les imperfections possibles, un facteur de modification d'amortissement (κ), appelé aussi facteur de dégradation, a été introduit dans l'équation 2.15 [51]. Dans ce cas, il y a lieu de calculer un facteur d'amortissement effectif défini comme suit :

$$\xi_{eff} = \frac{63.7\kappa(S_{ay}d_{pi} - S_{dy}a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}} + 5 \quad (2.18)$$

Le facteur (κ) dépend intimement du comportement hystérétique des trois types de structures décrits ci-dessous. Le type A décrit un comportement stable et parfait de la boucle hystérésis alors que le type C représente les boucles dégradées, tandis que le type B décrit un comportement intermédiaire entre les types A et C [46, 77]. Les valeurs définissant ce facteur (κ) pour les trois types (A, B et C) de comportement structuraux sont données dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2: Définition du facteur de dégradation en fonction du type de comportement structural [46]

Type de structure	ξ_0 (en %)	κ
A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_e d_{pi} - d_e d_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
B	≤ 25.0	0.65
	> 25.0	$0.845 - \frac{0.446(a_e d_{pi} - d_e d_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
C	Aucune valeur	0.33

(A) Constructions neuves ou existantes dimensionnées selon les normes parasismiques en vigueur (RPA99/2003), c.-à-d. celles réalisées après 2003.

(B) Constructions réalisées entre 1981 et 2003.

(C) Constructions réalisées avant l'apparition des Règles Parasismiques Algériennes de 1981 (RPA 1981).

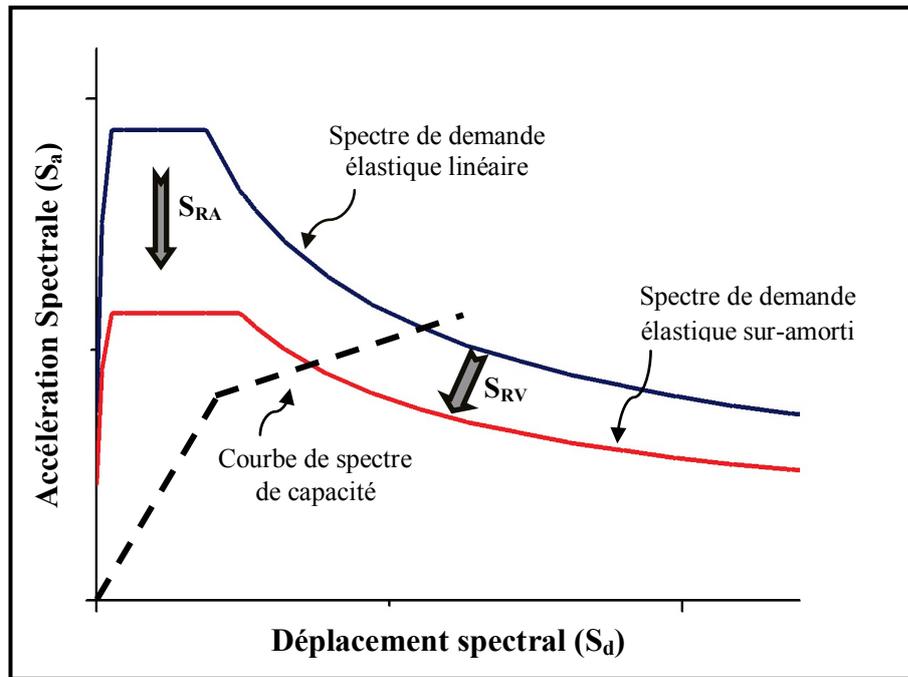


Figure 2.5 : Développement du spectre de demande réduit

Les valeurs minimales des facteurs de réductions spectraux S_{RA} et S_{RV} ne doivent pas dépasser celles données dans le tableau 2.3 ci-après :

Tableau 2.3 : Valeurs minimales de S_{RA} et S_{RV} [51]

Type de comportement structural	S_{RA}	S_{RV}	$\xi_{\text{eff max}}$
A	0.33	0.50	40
B	0.44	0.56	29
C	0.56	0.67	20

4. Déterminer la période du spectre de demande réduit résultant, au point de basculement entre l'intervalle d'accélération constante (le plateau du spectre de demande réduit) et l'intervalle du déplacement constant (branche descendante du spectre de demande réduit). Cette période, notée T_{sr} (Période du spectre réduit), comme illustré dans la figure 2.6, est déterminée à partir de l'égalité entre les expressions de la 2^{ème} et 3^{ème} ligne de la formulation du spectre de réponse élastique donné par le RPA99/2003 (voir équation 2.10). Elle est obtenue comme suit :

$$2.5(1.25A_c)S_{RA} = 2.5(1.25A_c) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{x/y} S_{RV} \quad \Rightarrow \quad T = T_{sr} = \left[\frac{S_{RV}}{S_{RA}} (T_2)^{y/x} \right] \quad (2.19)$$

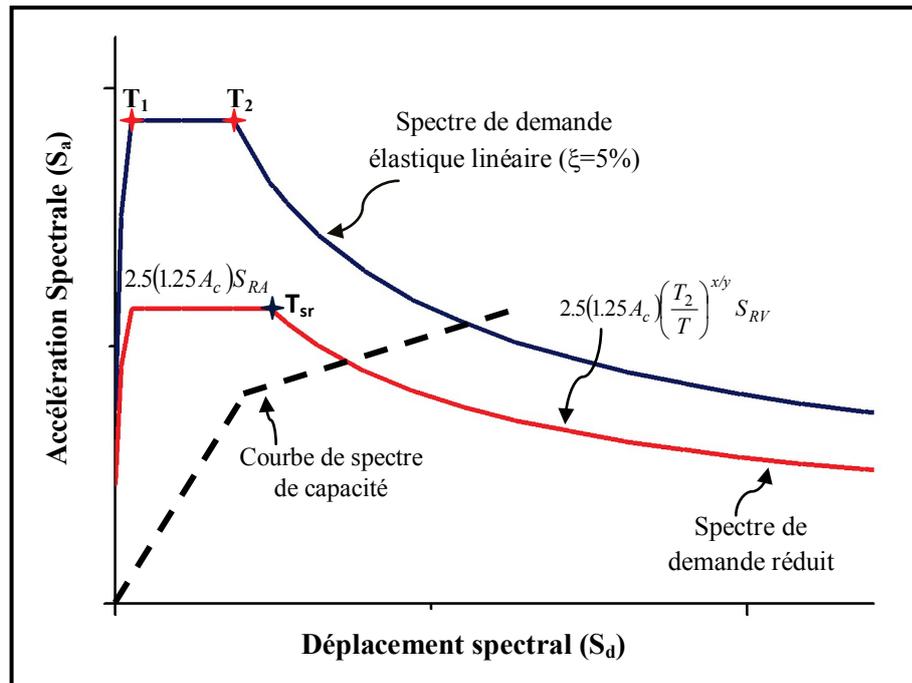


Figure 2.6 : Détermination de la période de la borne supérieure du plateau du spectre de demande réduit (T_{sr})

5. Déterminer si le point d'intersection du spectre de demande élastique réduit et du spectre de capacité (a_{pi} , d_{pi}) est dans une tolérance acceptable n'excédant pas 5 %, c.-à-d. :

$$0,95d_{pi} \leq S_d \leq 1,05d_{pi}$$

6. Dans le cas contraire, un nouveau point (a_{pi}^{new} , d_{pi}^{new}) doit être choisi et reprendre les calculs à partir de l'étape 2 jusqu'à convergence des calculs. Le nouveau point d'intersection peut être celui déterminé dans l'étape 5, ou bien tout autre point basé sur le jugement de l'ingénieur.

7. Si le nouveau point de performance se trouve dans la bande de tolérance (voir figure 2.7). Alors, ce point est considéré comme le point de performance final de la structure (a_p , d_p).

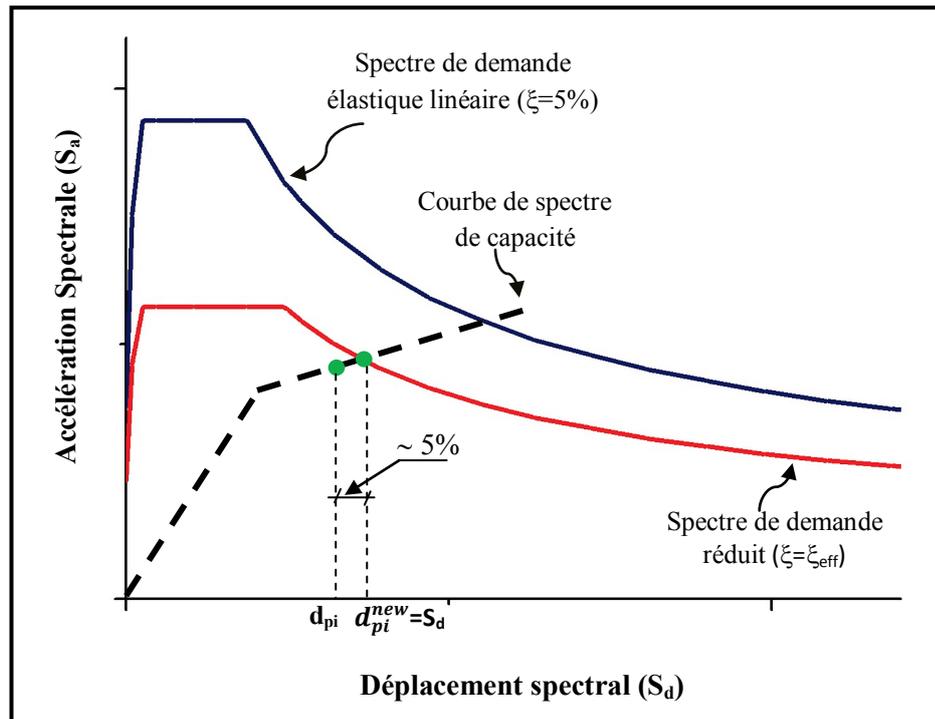


Figure 2.7 : Détermination du point de performance final de la structure

2.2.2. Typologies de structures utilisées

L'inventaire du bâti et sa classification constituent la principale étape pour l'estimation des dommages sismiques dans un site urbain. Le choix de la typologie des structures est basé sur la nature du contreventement, le nombre d'étages ainsi que la période de construction. Dans la méthodologie mise au point, nous proposons d'adopter les types de constructions les plus utilisées en Algérie et qui sont définis dans le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/Version 2003) [99]. En effet, nous adoptons 04 catégories de systèmes de contreventement, à savoir les structures en portiques (poteaux-poutres) en béton armé, les structures en voiles en béton armé, les structures maçonnerie ainsi que les structures métalliques.

Les structures en acier et en béton armé sont séparées en trois classes, en fonction de leur hauteur et du nombre d'étages: bâtiments de moins de 4 étages (hauteur basse), de 4 à 7 étages, de 8 étages et plus. Cependant, les structures en maçonnerie (murs porteurs) sont classées en deux (02) catégories, celles de 1 à 2 niveaux et celles de 3 niveaux et plus.

Cette distinction a comme souci d'être relativement homogène avec la plupart des classifications existantes pour les méthodes d'estimation de dommages sismiques dans le monde et particulièrement celle utilisée par la méthode HAZUS [22]. Ainsi, 11 classes de bâtiments standards ont été analysées représentant les quatre (04) catégories de systèmes de contreventement, comme illustré dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Typologie de structures définies dans la méthodologie mise au point [19, 43, 96]

N°	Typologie	Description du système structural	Intervalle des étages	
			Nature	Etage
1	RC1-B	Portique (poteaux – poutres) en béton armé	Hauteur Basse	1 – 3
2	RC1-M		Hauteur Moyenne	4 – 7
3	RC1-H		Hauteur Haute	8 et plus
4	RC2-B	Voile en Béton Armé	Hauteur Basse	1 – 3
5	RC2-M		Hauteur Moyenne	4 – 7
6	RC2-H		Hauteur Haute	8 et plus
7	S-B	Charpente métallique	Hauteur Basse	1 – 3
8	S-M		Hauteur Moyenne	4 – 7
9	S-H		Hauteur Haute	8 et plus
10	URM-B	Maçonnerie non confinée (murs porteurs)	Hauteur Basse	1 -2
11	URM-M		Hauteur Moyenne	3 et plus

Type RC1 : Structures en portiques (poteaux – poutres) en béton armé avec remplissage en maçonnerie.

Type RC2 : Structures contreventées essentiellement par des voiles en béton armé.

Type S : Structures en charpente métallique, on distingue :

- Structures en charpente métallique avec remplissage en maçonnerie (Pré-code) (Voir tableau 2.5) ;
- Structures en charpente métallique contreventées (Bas-code à Haut-code)

Type URM : Structures en maçonnerie porteuse non confinée.

2.2.3. Fonctions de dommages adoptées

Dans la méthode d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie mise au point dans ce travail, nous adoptons des fonctions de dommages (courbes de capacité et de fragilité) développées et utilisées dans la méthodologie HAZUS [22] qui tiennent compte du niveau de conception parasismique américain (haut code, code modéré, bas code et pré-code), illustré dans le tableau 1.3.

Ce choix est fait en prenant en compte le contexte du bâti Algérien. En effet, nous utilisons les courbes de capacité et de fragilité dont les caractéristiques paraissent cohérentes avec les types du bâti existant en Algérie définis dans le tableau 2.4. Ainsi, nous

faisons un rapprochement entre les niveaux d'application du code parasismique Américain « Uniform Building Code, UBC » [22] et Algérien « Règles Parasismiques Algériennes, RPA », afin d'utiliser ces courbes pour le bâti Algérien. Nous définissons, ainsi, quatre (04) niveaux de conception parasismique en fonction des périodes d'apparition des versions successives du règlement parasismique Algérien apportant un changement dans le niveau de conception, comme illustré dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Niveaux de conception parasismique selon les périodes d'évolution des versions du code parasismique Algérien (RPA) [99]

Version du code (RPA)	Post-2003	2000–2003	1981-1999	Pre-1981
Niveau du code	Haut code	Code modéré	Bas code	Pré-code

Les valeurs des paramètres définissant les courbes de capacité et de fragilité adoptées pour les typologies du bâti existant en Algérie en fonction des niveaux de conception parasismique sont données dans les tableaux B.1 et B.2 (Appendice B) [22].

A partir des valeurs des paramètres données dans ces tableaux (B.1 et B.2), les courbes de capacité et de fragilité adoptées dans la méthodologie mise au point, pour l'ensemble des typologies existantes en Algérie en fonction des différents niveaux d'application du code parasismique, peuvent dès lors être générées. Les figures 2.8 et 2.9 montrent des exemples des courbes de capacité et de fragilité de la typologie RC2-M (Bas-code).

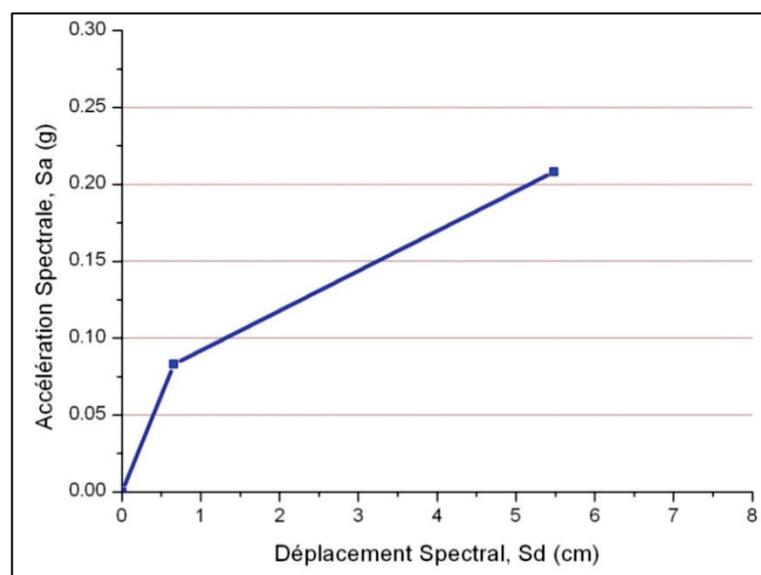


Figure 2.8 : Schématisation de la courbe de capacité caractérisant la typologie RC2-M [Bas-Code]

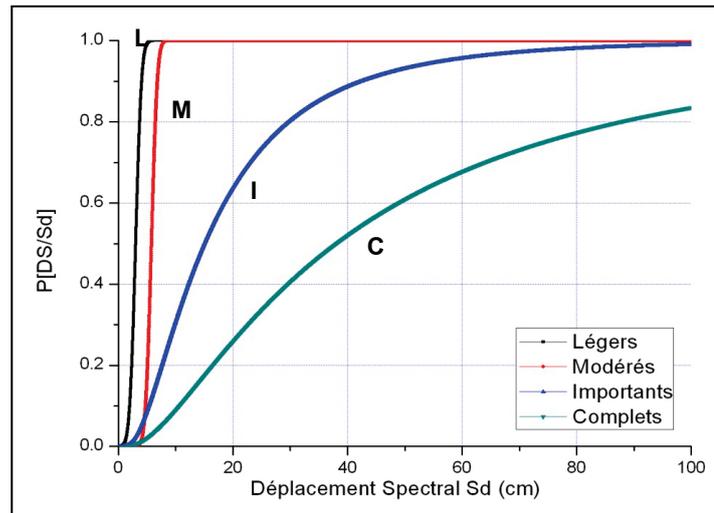


Figure 2.9 : Schématisation de la courbe de fragilité caractérisant la typologie RC2-M [Bas-Code]

2.2.4. Description des dommages post-sismiques du bâti en Algérie

En Algérie, suite à un séisme, une mission d'expertise et d'évaluation technique des constructions est toujours menée par les autorités nationales ou régionales. A cet effet, une fiche d'évaluation des dommages post-sismiques est utilisée depuis le séisme d'El Asnam (Chlef) de 1980. Cette fiche, illustrée dans la figure 2.10, a été développée par un groupe scientifique et technique composé principalement d'Ingénieurs de l'Organisme de Contrôle Technique de la Construction (CTC). Elle regroupe les informations de chaque construction expertisée à partir de l'inspection visuelle des éléments structuraux (fondations, poutres, poteaux, murs, planchers, etc.) ainsi que les éléments non structuraux (escaliers, cloisons, balcons, cheminées, etc.) [1, 2, 7, 101]. Cela, permet de consigner l'état de dommages correspondant à chaque construction expertisée, selon une classification à 5 degrés de dommages [101, 102, 18] proche de celle utilisée par la commission européenne de sismologie dans le rapport « Echelle Macrosismique Européenne, EMS 98 » [103]. Par ailleurs, des couleurs sont associées au degré de dommages : « **1 : Vert clair** » pour aucun dommage ou dommages négligeables ; « **2: Vert-foncé** » pour les dommages légers ; « **3 : Orange-clair** » pour les dommages modérés ; « **4: Orange-foncé** » pour les dommages importants et « **5: Rouge** » pour les dommages sévères et complets, comme montré dans le tableau 2.6. Initialement il n'y avait que 3 couleurs : Vert : niveaux 1 et 2, orange : niveaux 3 et 4 et rouge : niveau 5.

En fait, les inspecteurs, chargés de la mission l'expertise du bâti et le renseignement des fiches, sont supposés être des ingénieurs et personnels techniques qualifiés formés et préparés pour l'évaluation des dommages post-sismiques.

FICHE D'EVALUATION DES DOMMAGES			
Code Inspecteur :			
Date :			
IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION			
Secteur :	zone :	Construction calculée au séisme :	Oui - Non
Adresse ou élément d'identification :		Construction contrôlée :	Oui - Non
USAGE DE LA CONSTRUCTION (*)			
Logement	Scolaire	Commercial	
Administratif	Hospitalier	Industriel	
Socioculturel	Sportif	Réservoir d'eau	
Autres (à préciser)			
DESCRIPTION SOMMAIRE			
Age approximatif :		Vide sanitaire : Oui - Non (*)	
Nombre de niveaux :		Sous-sol : Oui - Non (*)	
Nombre de joints de dilatation :		Eléments extérieurs indépendants	
- en élévation:			
- Infrastructure			
PROBLEME DE SOL AUTOUR DE LA CONSTRUCTION (*)			
- Faille :	Oui - Non	- Affaissement- Soulèvement :	Oui -Non
- Liquéfaction	Oui - Non	- Glissement :	Oui-Non
PROBLEME DE SOL AUTOUR DE LA CONSTRUCTION (*)			
<u>Fondation :</u>		<u>Infrastructure (dans le cas VS ou S/Sol) :</u>	
- Type de fondation		Voiles en béton continu :	1-2-3-4-5
- Type de dommages		Poteaux en béton avec remplissage	1-2-3-4-5
-Tassement uniforme :	Oui - Non		
-Glissement	Oui - Non		
-Basculement	Oui - Non		
STRUCTURE RESISTANTE (*)			
<u>Eléments porteurs (charges verticales)</u>		<u>Eléments de contreventement</u>	
-Murs en maçonnerie	1-2-3-4-5	-Murs en maçonnerie	1-2-3-4-5
-Voiles en béton	1-2-3-4-5	-Voiles en béton	1-2-3-4-5
-Poteaux en béton	1-2-3-4-5	-Portiques en béton armé	1-2-3-4-5
-Poteaux métalliques	1-2-3-4-5	-Portiques métalliques	1-2-3-4-5
-Poteaux en bois	1-2-3-4-5	-Palées triangulées	1-2-3-4-5
-Autres	1-2-3-4-5	-Autres	1-2-3-4-5
<u>Planchers-Toiture terrasse</u>		<u>Eléments de contreventement</u>	
-Béton armé	1-2-3-4-5	-Charpente métallique	1-2-3-4-5
-Solives métalliques	1-2-3-4-5	-Charpente en bois	1-2-3-4-5
-Solives en bois	1-2-3-4-5	-Couverture en tuile	1-2-3-4-5
		-Couverture en amiante de ciment	1-2-3-4-5
		-Couverture métallique	1-2-3-4-5
(*) entourer la mention utile, dans le cas de numéros :			
un ou plusieurs numéros peuvent être entourés			

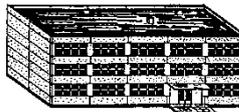
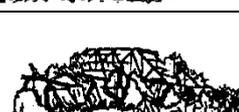
(a)

ELEMENTS SECONDAIRES			
<u>Escaliers</u>		<u>Remplissages Extérieurs</u>	
- Béton	1-2-3-4-5	- Maçonnerie	1-2-3-4-5
- Métal	1-2-3-4-5	- Béton préfabriqué	1-2-3-4-5
- Bois	1-2-3-4-5	- Bardages	1-2-3-4-5
		- Autres	1-2-3-4-5
<u>Autres éléments intérieurs</u>		<u>Eléments extérieurs</u>	
- Plafonds	1-2-3-4-5	- Balcons	1-2-3-4-5
- Cloisons	1-2-3-4-5	- Garde-corps	1-2-3-4-5
- Eléments vitrés	1-2-3-4-5	- Au vent	1-2-3-4-5
		- Acrotères-corniches	1-2-3-4-5
		- Cheminées	1-2-3-4-5
		- Autres	1-2-3-4-5
INFLUENCE DES CONSTRUCTIONS ADJACENTES (*)			
- La construction menace une autre construction :			Oui - Non
- La construction est menacée par une autre construction :			Oui - Non
- La construction peut-être un soutien pour une autre construction :			Oui - Non
- La construction peut-être soutenue par une autre construction :			Oui - Non
VICTIMES (*)			
Oui – Non – Peut être		Si Oui, Combien ?	
COMMENTAIRES SUR LANATURE ETLACAUSEPROBABLEDES DOMMAGES			
	<u>Sens Transversal(*)</u>		<u>Sens Transversal(*)</u>
-Symétrie en plan	Bon	Moyen	Mauvais
-Régularité en élévation	Bon	Moyen	Mauvais
-Redondances des files	Bon	Moyen	Mauvais
AUTRESCOMMENTAIRES:			
EVALUATION FINALE (*)			
<u>Niveau général des dommages</u>		<u>Couleur à utiliser</u>	
1 – 2 – 3 – 4 - 5		VERT – ORANGE - ROUGE	
MESURES IMMEDIATES A PRENDRE			

(b)

Figure 2.10 : Fiche d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérie:(a)-Données générales et dommages des éléments structuraux; (b)-Dommages des éléments Non-structuraux et évaluation générale [1, 7, 101]

Tableau 2.6 : Dommages structuraux et non-structuraux : Classification des constructions en béton armé et en maçonnerie [103, 101]

Constructions en maçonnerie	Constructions en Béton armé	Description des dommages
		Degré 1: Dommages Négligeables (pas de dommages structuraux)
		Degré 2: Dommages Légers (dommages structuraux légers, dommages non structuraux modérés)
		Degré 3: Dommages Modérés (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)
		Degré 4: Dommages Importants (dommages structuraux importants, dommages non structuraux considérables)
		Degré 5: Dommages Sévères ou Complets Bâtiments condamnés ou effondrés (dommages structuraux très importants) Effondrement total ou partiel

2.3. Mise en place d'un outil d'aide à la décision

2.3.1. Utilité de la méthodologie mise au point

La méthodologie mise au point dans ce travail, a pour objectif de servir de base dans la conception d'un outil d'aide à la décision qui permette d'estimer les dommages au bâti dans les zones urbaines exposées au risque sismique en Algérie.

Afin de faciliter son utilisation, elle est numérisée dans un programme informatique interactif intégré à un Système d'Information Géographique (SIG). Les résultats de dommages sismiques peuvent ainsi être générés sous forme de cartes et tableaux permettant d'appréhender l'ampleur des dommages et leurs localisations.

La procédure ainsi développée permet d'estimer les dommages dans le bâti existant en Algérie en phase prédictive (avant la survenue d'un séisme : estimation prédictive) ou en phase post-désastre (suivi en temps réel suite à l'occurrence d'un séisme : estimation post-sismique rapide) ainsi que leur répartition géographique dans les zones urbaines touchées.

L'estimation des dommages sismiques par la procédure mise au point nécessite l'identification du bâti et ses caractéristiques, les caractéristiques du séisme probable ou

réel (magnitude, épicentre, distance épacentrale, profondeur focale, etc.) ainsi que les conditions du sol (études de microzonage sismique) dans la zone d'étude.

2.3.1.1. Estimation prédictive des dommages sismiques

L'estimation prédictive des dommages du bâti dans une zone urbaine donnée, qui peut être potentiellement touchée par un probable séisme majeur, se fait à travers un scénario tremblement de terre dont les caractéristiques sont définies à partir d'études d'aléa sismique réalisées auparavant. Les résultats de la simulation permettent de déterminer les probabilités de dommages aux structures ou typologies concernées par l'étude. Il est de même possible de localiser les zones qui seraient les plus vulnérables au risque sismique et de générer, à cet effet, les cartes de dommages sur SIG.

Cette prédiction de dommages permettrait, dès lors, de quantifier les effets d'un séisme probable en une étape primordiale pour la prise de décision consistant à développer une stratégie de prévention et de préparation bien avant l'avènement du séisme potentiel.

L'estimation prédictive des dommages sismiques constitue un apport utile dans la prévention et la préparation vis-à-vis du risque sismique. Elle permet, en effet, de fournir des informations importantes aux décideurs, à l'échelle nationale, régionale ou locale, afin de prendre les mesures préventives nécessaires, telles que:

- Développer des stratégies et des plans de gestion de crise pour minimiser les pertes socio-économiques ;
- Préparer les moyens matériels et humains pour les secours;
- Identifier les ouvrages existants jugés vulnérables afin de préparer des opérations de confortement et de réhabilitation parasismiques adéquates ;
- Estimer la vulnérabilité de la zone urbaine sujette au séisme ;
- Prendre des mesures adéquates dans la planification et restructuration urbaine ainsi que dans l'occupation des sols (P.O.S) dans les zones exposées au risque sismique ;
- Décider des programmes de démolition des bâtiments qui peuvent présenter des dangers de ruine et prévoir les structures de relogement afin de sauvegarder les vies humaines ;
- Aménager des espaces ouverts et des routes de secours ;
- Sensibiliser la population vis-à-vis du risque sismique potentiel et lui montrer comment se comporter en cas de séisme, etc.

2.3.1.2. Estimation rapide des dommages post-sismiques

L'estimation rapide des dommages post-sismiques, dans une zone urbaine potentiellement touchée par un séisme majeur venant d'avoir lieu et dont les paramètres

sont connus (magnitude, épicode, etc.) aidera les institutions concernées pour l'analyse de la situation et la prise de décision dans les meilleurs délais. Cette évaluation des dommages sismiques faite en temps réel permettrait de donner une première estimation rapide des dommages ainsi que leur répartition spatiale sous forme de cartes. Ces cartes aideraient à localiser les zones les plus touchées et les constructions les plus endommagées afin d'accélérer et d'optimiser les opérations de secours dans le but de minimiser les pertes en vies humaines.

En effet, l'estimation rapide des dommages post-sismiques permet de délimiter les zones les plus affectées dans une période courte après l'occurrence du séisme, en vue de la prise de décision par les gestionnaires de la crise post-séisme, à savoir :

- Estimation rationnelle du niveau d'alerte à déclencher, ce qui aiderait les organismes concernés dans l'intervention à gagner du temps pour apporter les secours dans les délais et proportions nécessaires ;
- L'orientation administrée des secours ;
- Localisation rapide des populations affectées afin de secourir les blessés et diminuer les pertes en vies humaines ;
- Minimiser les pertes financières induites par l'inadéquation quantification des dommages et la mauvaise répartition des secours.

2.3.2. Développement de la plateforme informatique

L'automatisation de la méthode d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie peut être réalisée grâce à la plateforme informatique interactive dédiée, appelée « *Earthquake Loss Estimation Tool For Building In Algeria* », développée à cet effet (voir figure 2.11). Cet outil, réalisé en langage de programmation (Dotnet), utilise le système de gestion de bases de données (Microsoft Access), comme plateforme de lecture des données des structures existantes, analyses et affichages des résultats des dommages sismiques.

L'outil développé interagit directement avec un système d'information géographique pour assurer l'affichage automatique des résultats et la génération des cartes synthétiques de dommages. Ces cartes constituent un support pertinent et quantitatif et seraient d'une précieuse aide pour les responsables et gestionnaires de crise comme support pour la prise de décision. Elles permettent, entre autres, d'identifier les zones les plus touchées par un séisme potentiel, les constructions pouvant avoir été sérieusement endommagées, la détection des installations industrielles pouvant être en danger ou

constituer un danger par phénomène de cascade et qui nécessitent une intervention rapide afin de secourir les occupants et minimiser les effets induits (explosions, incendies, etc.), l'identification des centres d'interventions et hôpitaux proches des zones sinistrées afin d'accélérer les secours des victimes. Elles donneraient aussi un aperçu sur les axes routiers à prendre afin de gagner du temps dans l'intervention des secours, etc.

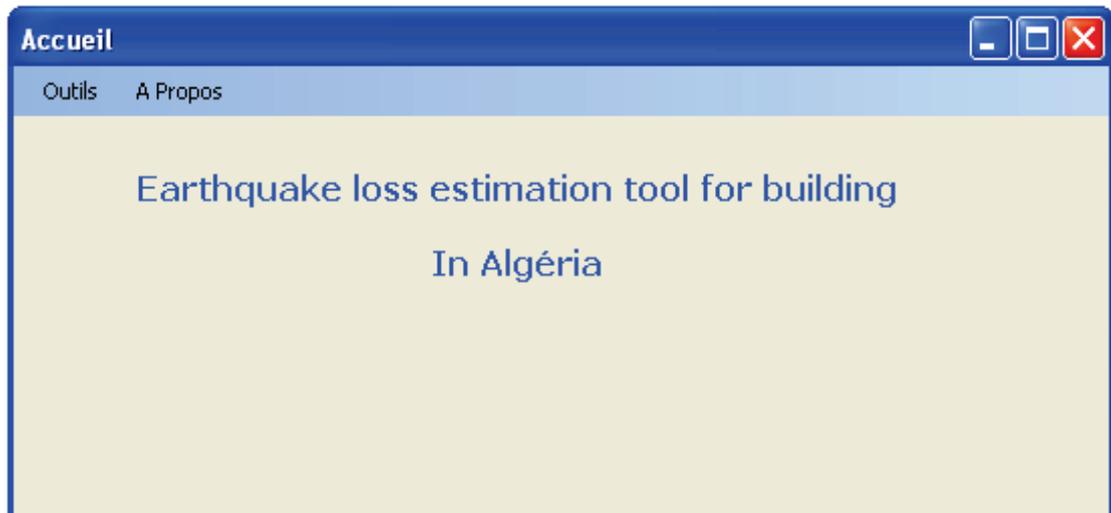


Figure 2.11 : Interface du menu principal de l'outil d'estimation des dommages sismique du bâti existant en Algérie développé [96]

Cette procédure d'estimation des dommages sismiques du bâti existant s'avère être un support pertinent pour l'aide à la décision, en matière de séismes et leurs effets en Algérie. L'architecture de cet outil est organisée en cinq rubriques interdépendantes (voir figure 2.12) qui sont décrites et détaillées ci-après.

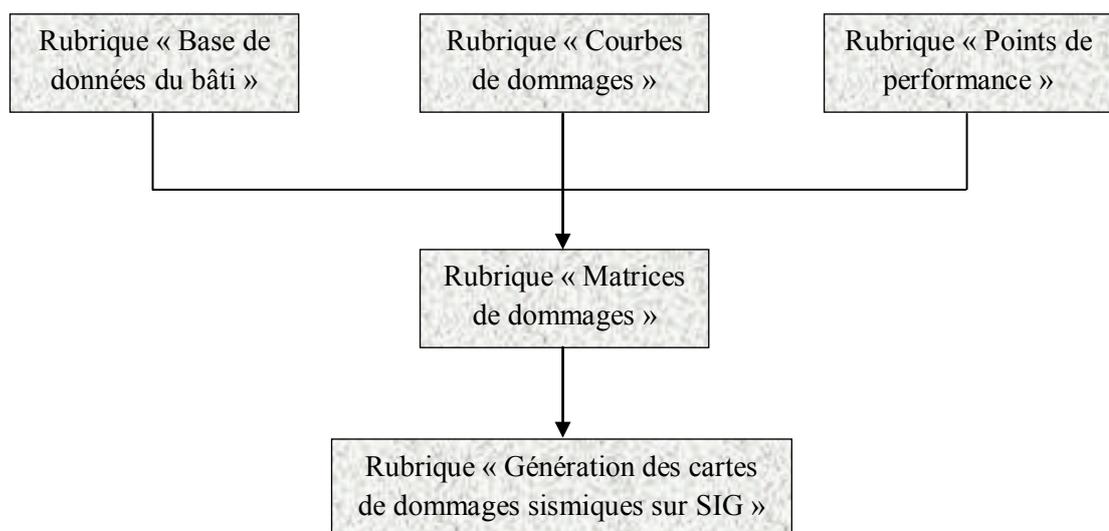


Figure 2.12 : Organigramme de l'outil d'estimation des dommages sismique du bâti existant en Algérie développé

2.3.2.1 Rubrique « Base de données du Bâti »

Une estimation rationnelle des dommages sismiques, dans une zone exposée ou touchée par un séisme potentiel, dépend du degré de fiabilité et de la pertinence des données concernant le bâti existant. Cette rubrique est dédiée à la numérisation des données des constructions collectées sur terrain, après une campagne d'inventaire et d'enquête pré-sismiques (voir figure 2.13).

La base de données du bâti existant réalisée est hiérarchisée automatiquement de manière à respecter la classification du bâti élaborée dans la méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie (voir tableaux 2.4 et 2.5).

The screenshot displays a web-based data entry form for building information. The form is organized into several sections:

- Identification:** Includes fields for 'Nom' (Med), 'Date' (18/03/2012), 'Numéro de fiche' (B0014), 'Numéro de zone' (B00), 'District' (B0025), and 'Ilot' (B0012).
- Adresse:** A text field containing 'Cité des 120 Logements'.
- Type de construction:** A dropdown menu set to 'Bâtiment'.
- Usage de la construction:** A dropdown menu set to 'Habitation'.
- Type de structure:** Two dropdown menus, 'Béton armé' and 'Portique'.
- Date de la construction (approximativement):** A dropdown menu set to '1981-1999' and an 'Année proche' field set to '1986'.
- SS:** A dropdown menu set to 'NON', 'Nbr NIV' (5), and 'Présence de vides sanitaires' (OUI).
- Dimension de la structure:** Fields for 'X = 25', 'Y = 10', and 'Nombres travées' (6).
- Régularité en plan:** A dropdown menu set to 'Régulier', and 'Régularité en élévation' (Régulier).
- Implantation de l'ouvrage:** A list of checkboxes for site conditions: 'Sur un terrain instable (tassant)', 'Au bord d'une falaise', 'En haut ou en bas d'une colline', 'Au bord d'une rivière ou d'un oued', and 'Sur un terrain accidenté avec changement de pente importante'.
- La construction est:** A dropdown menu set to 'À l'angle', 'Présence du joint sismique' (OUI), and 'épaisseur (cm)' (02).
- Etat général de la construction:** A dropdown menu set to 'Moyen'.
- Remarques générales:** A large text area for additional notes.

Buttons for 'Annuler' and 'Valider' are located at the bottom right of the form.

Figure 2.13 : Interface du module de base de données du bâti

Les données numérisées pour chaque construction sont stockées dans une base de données sous format Microsoft Access et sont liées avec les entités graphiques des constructions sur une plateforme de Système d'Information Géographique (SIG) comme illustré dans la figure 2.14.

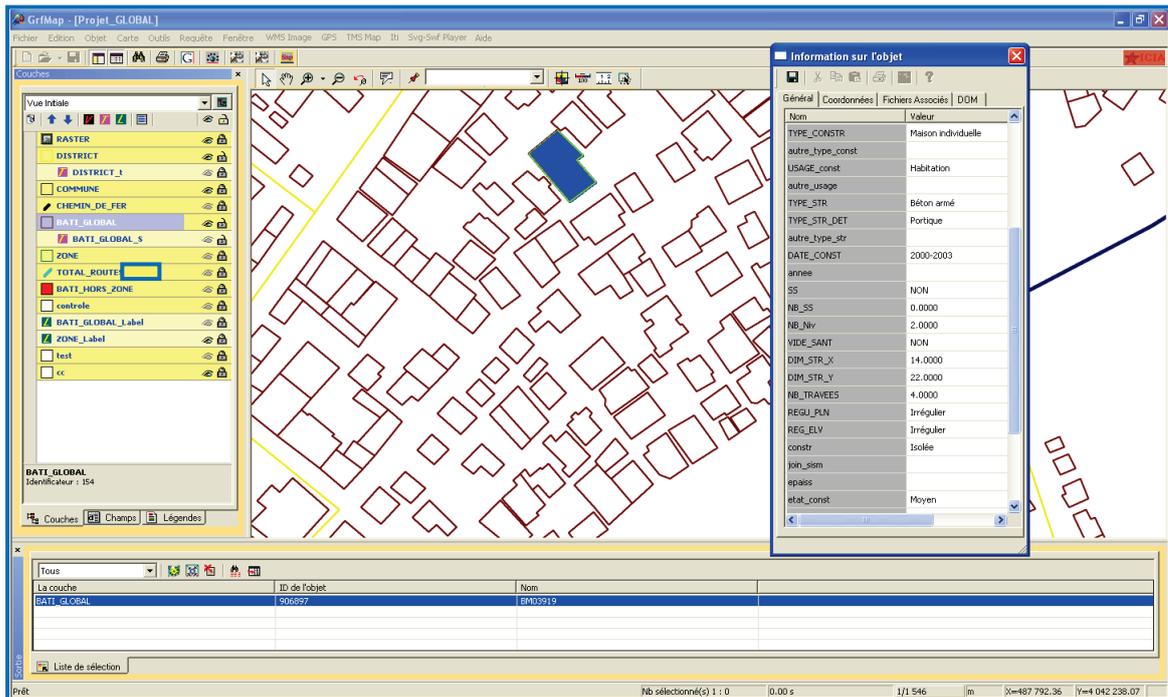


Figure 2.14 : Exemple de la base de données du bâti sous format SIG

- Inventaire du Bâti

L'inventaire des constructions d'une zone urbaine se base sur les relevés au moyen d'une fiche d'enquête et d'évaluation du bâti sur site développée à cet effet. Cette fiche, réalisée dans le cadre de notre travail, est utilisée pour les besoins des études d'évaluation du risque sismique au Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique. Chaque construction est identifiée par son numéro d'îlot et district selon le découpage administratif donné par l'Office National des Statistiques. Cela permet de détecter plus facilement les constructions endommagées et d'identifier rapidement les districts et les zones les plus touchées afin d'aider à la prise de décision, sur la base des cartes de dommages générées sur SIG, par les organismes concernés par l'intervention.

- Elaboration de la fiche d'enquête

L'élaboration de la fiche d'enquête permettant l'évaluation et le recensement du bâti d'une zone urbaine, nécessite la connaissance des paramètres de nature structurale et non structurale, ayant une influence sur le comportement de la structure et donc sur la réponse sismique.

COCHRANE et al. [104] ont montré que les paramètres relatifs à l'âge, la hauteur de la construction, la régularité, la symétrie, l'effort de cisaillement à la base du bâtiment,

la nature du matériau de construction et la nature du sol influent sur la vulnérabilité des constructions.

Ils montrent aussi que la vulnérabilité augmente avec l'âge de la structure jusqu'à l'âge de cinquante (50) ans. A cet âge la construction devient quatre fois plus vulnérable en précisant que celle des constructions résidentielles est cinq fois plus importante que celle des constructions à usage industriel ou commercial.

En ce qui concerne la régularité, son influence est moins connue en raison de sa difficile quantification et de la diversité des irrégularités en plan ou en élévation. Mais selon BENEDETTI et al. [40] dans [41, 105], d'après les expériences sismiques, la vulnérabilité est d'autant plus élevée (environ quatre fois) pour les constructions modérément irrégulières et asymétriques par rapport aux constructions régulières et symétriques.

D'après le rapport SwissRe de 1985 cité dans [104], la vulnérabilité peut provenir de l'influence du sol qui peut avoir deux comportements, à savoir, l'instabilité due au tassement, la liquéfaction et les glissements de terrains ainsi que de l'effet de la résonance avec le sol et la hauteur de la construction.

La fiche d'enquête, développée dans ce travail (voir figure 2.15), regroupe l'ensemble des paramètres pouvant avoir une influence sur la réponse sismique des bâtiments [44]. Elle comprend les éléments principaux suivants :

- Données générales (adresse, districts, îlots, etc.) ;
- Système structural ;
- Usage de la construction ;
- Nombre d'étages ;
- Age ou période de construction (voir tableau 2.5)
- Caractéristiques géométriques ;
- Conditions du sol ;
- Etat des éléments non structuraux ;
- Position d'implantation de la construction ;
- Etat général de la construction.

Ces informations permettent d'évaluer qualitativement et quantitativement la qualité sismique des constructions. Ci-dessous, nous donnons un exemple de cette fiche.

<u>FICHE D’EVALUATION DU BATI</u>	
Nom :	Date...../...../.....
N° de fiche:	
District :	
Ilot :	
<u>Type de construction :</u>	
Bâtiment <input type="checkbox"/> Maison individuelle <input type="checkbox"/> Hangar <input type="checkbox"/> Mosquée <input type="checkbox"/> Précaire <input type="checkbox"/>	
Autres (préciser)	
<u>Usage de la construction :</u>	
Habitation <input type="checkbox"/> Hospitalier <input type="checkbox"/> Commercial <input type="checkbox"/> Administratif <input type="checkbox"/>	
Sportif <input type="checkbox"/> Industriel <input type="checkbox"/> Scolaire <input type="checkbox"/> Socioculturel <input type="checkbox"/>	
Hydraulique <input type="checkbox"/> Autres (préciser).....	
<u>Type de structure :</u>	
Béton armé <input type="checkbox"/> Maçonnerie <input type="checkbox"/> Charpente métallique <input type="checkbox"/> Bois <input type="checkbox"/>	
Autres (préciser)	
Si Béton armé : Portique <input type="checkbox"/> Voile <input type="checkbox"/> Mixte <input type="checkbox"/>	
Si Maçonnerie : Chaînée <input type="checkbox"/> Non chaînée <input type="checkbox"/>	
<u>Date de la construction (approximativement):</u>	
Avant 1981 <input type="checkbox"/> 1981-1999 <input type="checkbox"/> 2000-2003 <input type="checkbox"/> Après 2003 <input type="checkbox"/>	
Nombre de niveau : SS.....+ RDC +	
Présence de vides sanitaires : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
<u>Dimension de la structure :</u> X =m ; Y =m ; Nb travées :.....	
<u>Régularité en plan :</u> Régulier <input type="checkbox"/> Faiblement irrégulier <input type="checkbox"/> Irrégulier <input type="checkbox"/>	
<u>Régularité en élévation :</u> Régulier <input type="checkbox"/> Faiblement irrégulier <input type="checkbox"/> Irrégulier <input type="checkbox"/>	
<u>Implantation de l’ouvrage :</u>	
- Sur un terrain instable (tassant) Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
- Au bord d’une falaise Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
- En haut ou en bas d’une colline Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
- Au bord d’une rivière ou d’un oued Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
- Sur un terrain accidenté avec changement de pente importante Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
<u>La construction est :</u> A l’angle <input type="checkbox"/> Au milieu <input type="checkbox"/> Isolée <input type="checkbox"/>	
Si Présence de joint sismique :..... (épaisseur) :.....cm	
<u>Etat général de la construction :</u>	
Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/>	
<u>Observations :</u>	

Figure 2.15 : Fiche d’enquête et d’évaluation du Bâti [96]

2.3.2.2. Rubrique « courbes de dommages »

Cette rubrique permet de générer les valeurs des courbes de fragilité de l'ensemble des typologies décrites dans la méthodologie (voir paragraphe 2.2.1). Ces valeurs permettent de calculer les probabilités de dommages selon les points de performance (déplacement spectral, S_d) définis pour chaque typologie de structure (voir figure 2.16).

The screenshot shows a software interface with the following components:

- Input Fields:**
 - code: 0
 - periode: PRECODE
 - nbre niveaux: BNIV
 - type const: RC1
- Domages Section:**

Sd	damage PS	damage PM	damage PE	damage PC
1	0.039	0.000	1.162	4.822
- Main Table:**

numero	Sd	periode	Niveau	construction	DamagePS	DamagePM	DamagePE	DamagePC
0	1	PRECODE	BNIV	RC1	0.039	0.000	1.162	4.822
0	11	PRECODE	BNIV	RC1	0.040	0.001	1.548	6.755
0	12	PRECODE	BNIV	RC1	0.041	0.001	2.466	1.097
0	13	PRECODE	BNIV	RC1	0.042	0.001	3.754	1.702
0	14	PRECODE	BNIV	RC1	0.043	0.001	5.504	2.541
0	15	PRECODE	BNIV	RC1	0.044	0.001	7.812	3.672
0	16	PRECODE	BNIV	RC1	0.045	0.001	1.078	5.158
0	17	PRECODE	BNIV	RC1	0.046	0.001	1.453	7.070
0	18	PRECODE	BNIV	RC1	0.047	0.001	1.918	9.486
- Legend:**
 - Période:** Precode, BasCode, MoyenCode, HautCode
 - Nbre Niveaux:** BNIV: Bas Niveau, MNIV: Moyen Niveau, HNIV: Haut NIV
 - Type constructif:** S: Charpente métallique, RC1: Portique en béton armé, RC2: Voiles en BA et Mixte, URM: Maçonnerie
 - Domages:** Sd: Déplacement, PS: Dommages légers, PM: Dommages Modérés, PE: Dommages importants, PC: Ruine
- Navigation:** Buttons for back, forward, search, and refresh.
- Buttons:** "Vide la table", "Import Excel", and "Fermer".

Figure 2.16 : Génération des courbes de dommages

2.3.2.3 Rubrique « Point de performance »

Le calcul des points de performances « S_d » est réalisé par un programme, développé sous Matlab développé à cet effet, dont les résultats sont repris automatiquement par la rubrique module « point de performance » (voir figure 2.17).

2.3.2.4 Rubrique « Matrices de dommages »

Cette rubrique de l'outil mis en place prend en charge l'affichage des valeurs des points de performance, le calcul des matrices de probabilités de dommages de chaque typologie concernée, selon la classification à 05 degrés de dommages décrites précédemment (voir figure 2.17). Ces résultats sont affectés à l'ensemble des constructions stockées dans la base de données « Microsoft Access ».

typologie	niveau	code	ag	dp	DamagePN	DamagePS	DamagePM	DamagePE	DamagePC	t1	t2	type
RC1	BNIV	PRECODE	0.5	447	0.4	4.6	65.9	21.8	7.3	0.15	0.3	C
RC1	MNIV	PRECODE	0.5	879	0	0	65.4	24.4	10.2	0.15	0.3	C
RC1	HNIV	PRECODE	0.5	1148	0	0	67.5	23.3	9.2	0.15	0.3	C
RC2	BNIV	PRECODE	0.5	457	0.3	4.9	61.3	26.8	6.7	0.15	0.3	C
RC2	MNIV	PRECODE	0.5	660	0	1	76.4	16.7	5.9	0.15	0.3	C
RC2	HNIV	PRECODE	0.5	1398	0	0	59.3	28.8	11.9	0.15	0.3	C
S	BNIV	PRECODE	0.5	698	0	0.1	61.8	26.8	11.3	0.15	0.3	C
S	MNIV	PRECODE	0.5	1354	0	0	54.5	30	15.5	0.15	0.3	C
S	HNIV	PRECODE	0.5	2662	0	0	43.5	35.9	20.6	0.15	0.3	C
URM	BNIV	PRECODE	0.5	610	0	0.1	37.1	27.8	35	0.15	0.3	C
URM	MNIV	PRECODE	0.5	460	0.1	1.8	62.5	26.6	9	0.15	0.3	C
RC1	BNIV	BASCODE	0.5	373	6.5	40.5	38.5	11.5	3	0.15	0.3	B
RC1	MNIV	BASCODE	0.5	732	0	5	75.4	15	4.6	0.15	0.3	B
RC1	HNIV	BASCODE	0.5	957	0	16.8	65.7	13.8	3.7	0.15	0.3	B
RC2	BNIV	BASCODE	0.5	381	2.9	34.5	43.4	16.3	2.9	0.15	0.3	B
RC2	MNIV	BASCODE	0.5	548	0.2	66.1	23.1	8.1	2.5	0.15	0.3	B
RC2	HNIV	BASCODE	0.5	1166	0	0	77	17.9	5.1	0.15	0.3	B
S	BNIV	BASCODE	0.5	582	0.1	23.6	56.1	14.9	5.3	0.15	0.3	B

Figure 2.17 : Rubrique de calcul des points de performance et des matrices de dommages

2.3.2.5. Rubrique « Génération des cartes de dommages sismiques sur SIG »

La génération des cartes de dommages sismiques est réalisée dans une plateforme Système d'Information Géographique (SIG) associée automatiquement à la base de données sous format « Microsoft Access » où l'ensemble des données du bâti ainsi que les résultats des probabilités de dommages sismiques, calculées par l'outil développé, est stocké. Les informations affichées peuvent être actualisées instantanément. Cette rubrique permet de générer les cartes de dommages sous de multiples formes et thématiques offrant ainsi une interactivité aux organismes concernés par les secours pour l'interprétation des résultats et l'identification des constructions et zones les plus endommagées. Cela permet ainsi de quantifier aisément l'ampleur des dommages et leur situation dans les premiers instants consécutifs à la survenue du séisme.

a. Carte de dommages par construction

Cette thématique permet de générer les cartes de dommages pour l'ensemble des constructions. Cela permet de diagnostiquer leur état dans la zone touchée par le séisme et de localiser celles ayant des probabilités de dommages importants et sévères, afin de pouvoir y orienter rapidement l'intervention. Ces constructions peuvent être classées, aussi, selon le pourcentage de dommages probables prépondérant (voir figure 2.18) auquel on associe une couleur, comme illustré dans le tableau 2.7. Les cartes générées peuvent être exportées sous forme d'image afin de les envoyer rapidement par réseau électronique aux

autorités concernées par les secours, pour ainsi situer et identifier les constructions les plus endommagées, leur nombre, etc.

Tableau 2.7 : Couleur associée à chaque degré de dommage.

<i>Degré de dommages</i>	<i>Couleurs</i>
PN : D1	Vert clair
PS : D2	Vert foncé
PM : D3	Jaune
PE : D4	Orange
PC : D5	Rouge

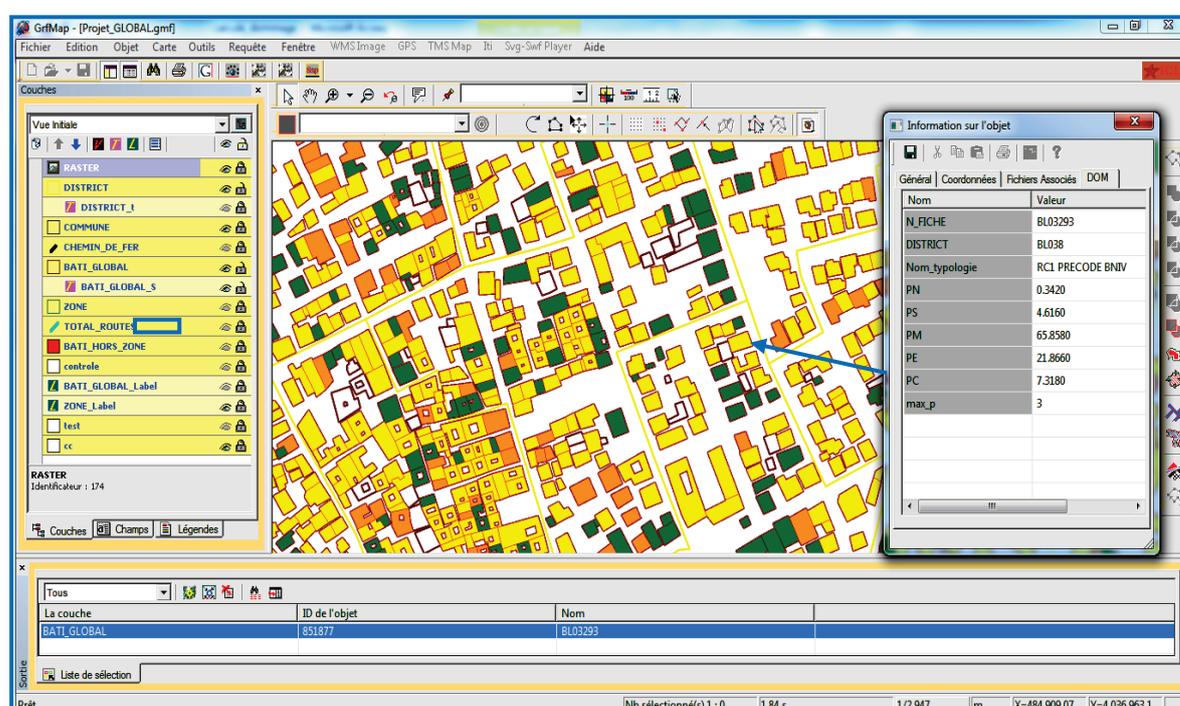


Figure 2.18 : Exemple de génération d'une carte de dommages sur SIG (classification du bâti selon le degré de dommages prépondérant)

b. Carte de dommages par districts ou par secteurs (grands ensembles urbains)

Cette thématique permet d'afficher les dommages par districts ou par secteurs (grands ensembles urbains) de la zone affectée par le séisme soit sous forme d'une moyenne de dommages le plus prépondérant (D1moyen à D5moyen) ou bien selon les taux d'endommagement calculés considérant les dommages importants et complets (D4+D5), ce qui permettra aux organismes concernés de délimiter les endroits les plus endommagés

afin de donner une première estimation de leurs états de dommages pour accélérer et orienter l'intervention en mobilisant les moyens de secours nécessaires par ordre de priorités et de connaître le niveau d'alerte adéquat à déclencher.

2.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis au point la méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie.

Cette méthodologie est inspirée de l'approche HAZUS (Hazard-United States) et a recours à l'utilisation de la technique ou méthode du spectre de capacité. Les courbes de capacité et de fragilité ont été adaptées aux typologies correspondantes du bâti Algérien.

Le choix des typologies de structures dans la méthodologie mise au point est basé sur la nature du contreventement, le nombre d'étages ainsi que la période de construction. Pour cela, nous avons adopté les types de constructions les plus utilisés en Algérie tels qu'ils sont définis dans le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/Version 2003). De ce fait, nous avons adopté 04 catégories de systèmes de contreventement, à savoir les structures en portiques (poteaux-poutres) en béton armé (jusqu'à 8 étages ou plus), les structures en voiles en béton armé (jusqu'à 8 étages ou plus), les structures métalliques (jusqu'à 8 étages ou plus), ainsi que les structures maçonnerie (jusqu'à 3 étages ou plus).

Cette méthode mise au point permet de donner une estimation des probabilités des dommages sismiques du bâti dans les zones touchées dans une échelle à 05 degrés de dommages : négligeable, léger, modéré, important, sévère ou complet.

Cette méthode a été numérisée dans une plateforme informatique, intégrant un système d'information géographique (SIG), pour permettre l'automatisation du calcul et le traitement rapide de l'ensemble des données avec la génération des cartes de dommages permettant d'identifier les constructions et les zones les plus endommagées.

Le modèle d'estimation des dommages sismiques élaboré peut ainsi servir :

- soit pour l'estimation prédictive des dommages sismiques, pouvant se produire dans une zone urbaine exposée au risque sismique, à travers la réalisation d'un scénario sismique probable, afin de prendre les mesures préventives adéquates en vue de réduire le risque sismique ;
- soit pour l'estimation post-sismique en temps réel des dommages, dans les quelques instants qui suivent un séisme réel (estimation post-sismique rapide) dans une zone

urbaine, dès lors que l'épicentre et la magnitude sont identifiés. Les résultats aideraient à connaître le niveau d'alerte à déclencher afin de pouvoir mobiliser les moyens de secours nécessaires.

Ce modèle se présente comme un outil d'aide à la décision qui constitue une contribution et un apport dans le domaine de la planification urbaine et de la gestion de crise en Algérie.

Afin de valider et calibrer la méthodologie mise au point, nous proposons de la mettre en application, dans les chapitres suivants, dans le cas du bâti d'une zone urbaine en Algérie fortement touchée par un séisme majeur, à savoir la commune de Boumerdès.

CHAPITRE 3 :

CALIBRATION ET VALIDATION DE LA METHODOLOGIE MISE AU POINT POUR L'ESTIMATION DES DOMMAGES SISMIQUES

3.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous proposons de mettre en application la méthodologie d'estimation de dommages sismiques du bâti existant en Algérie en vue d'en analyser les performances et de sa validation sur un cas réel.

Les cartes de dommages théoriques générées sont comparées et confrontées aux observations réelles collectées lors de campagnes d'évaluation en phase post-séisme.

A cet effet, nous avons choisi le site urbain de la ville (commune) de Boumerdès, illustré dans la figure 3.1, qui a été fortement affecté par le séisme en date du 21 Mai 2003 de magnitude $M_w = 6,8$ [17, 19, 44]. Ce séisme qui a, par ailleurs, fortement touché plusieurs wilayas de l'Algérie, a engendré des dégâts matériels et corporels importants dans la zone épiscopentrale.

Le présent travail consiste à estimer, de manière théorique, les dommages sismiques du bâti dans la ville de Boumerdès, par la méthodologie mise au point précédemment. Pour le séisme du 21 Mai 2003, nous considérons le spectre de réponse élastique dérivé des enregistrements accélérométriques du choc principal.

Une deuxième estimation des dommages est réalisée en utilisant le spectre de réponse réglementaire des Règles Parasismiques Algériennes en vigueur lors de l'occurrence du séisme, à savoir les RPA 99.

Les dommages estimés sont comparés aux dommages réels observés sur le terrain et collectés dans une base de données suite à la campagne post-sismique. Ceci permet d'en analyser les performances et la pertinence en matière de prédiction théorique de dommages sismiques.

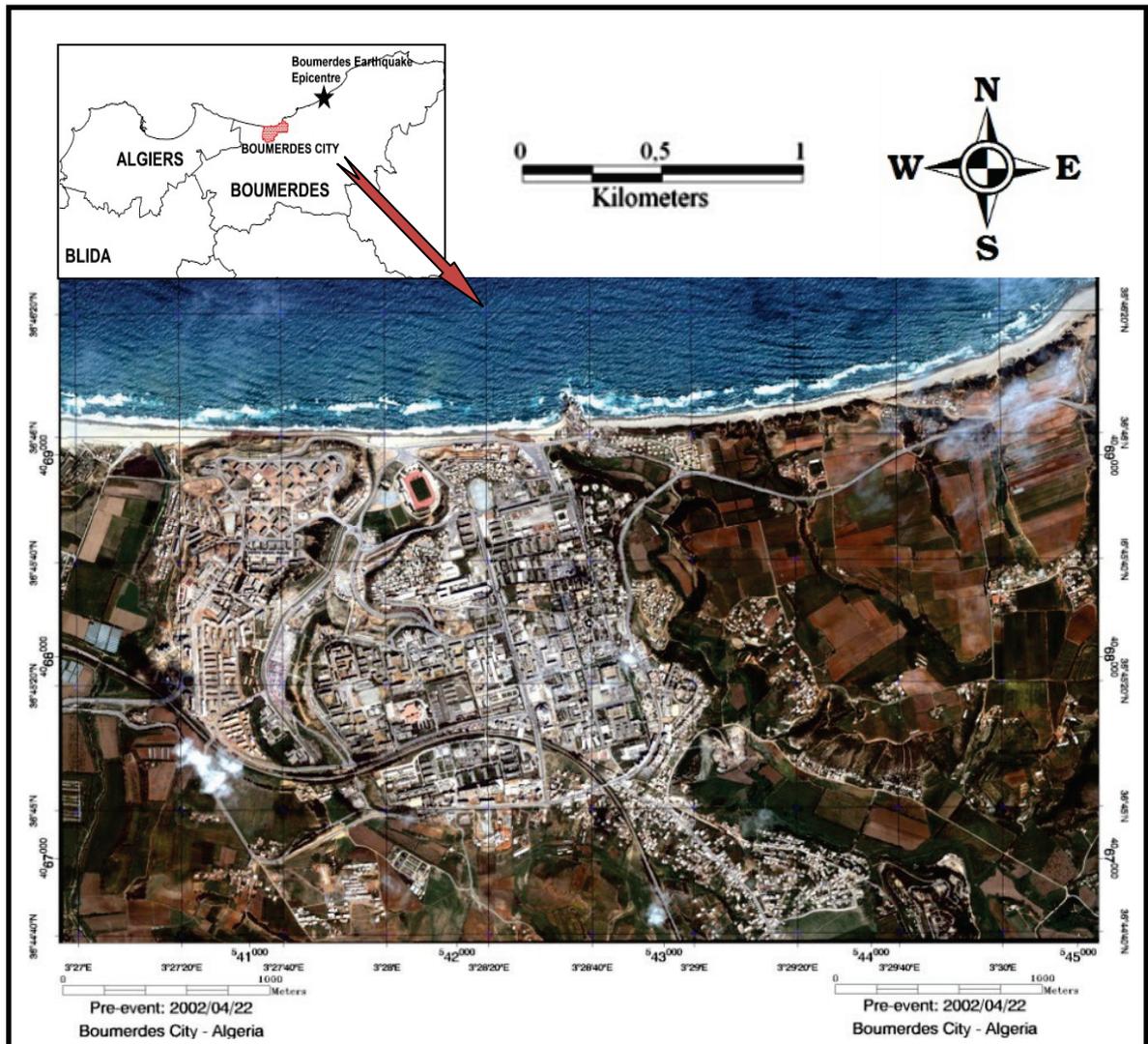


Figure 3.1 : a. Droite : Image Satellite Quick-bird du bâti de la ville Boumerdès prise le 22/04/2002 (Avant le séisme du 21.05.2003) (Source OYO Corp.). b. Gauche : Position de l'épicentre du choc principal du séisme de Boumerdès montré par l'étoile noire [106]

3.2. Généralités sur la zone d'étude : ville de Boumerdès

3.2.1. Aperçu sur la ville de Boumerdès

Alors qu'elle n'était qu'une petite agglomération connue durant la période coloniale sous le nom du Rocher Noir, Boumerdès est devenue une ville côtière importante (chef-lieu de wilaya), située à 40 km à l'est d'Alger (voir figure 3.1). Elle couvre une superficie de 19.13 km² avec une population de 41685 habitants concentrée majoritairement dans l'agglomération du chef-lieu de la commune, selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008 [107].

3.2.2. Cadre géologique et géotechnique du site urbain de la ville de Boumerdès

La ville de Boumerdès est en grande partie construite sur des sables argileux quaternaires de 10 à 30 mètres d'épaisseur, reposant sur des marnes bleues du Plaisancien qui affleurent par endroits (voir figures 3.2 et 3.3) [108, 109].

Le complexe sablo argileux recouvre toute la zone urbaine de Boumerdès : les deux plateaux, Oued Corso, Oued Tatareg et Oued Boumerdès avec une épaisseur variable d'Est en Ouest, importante au niveau du plateau Ouest (12 à 26 m). Cette épaisseur s'atténue en allant vers le Sud de la ville pour laisser apparaître le substratum marneux à 2 m de profondeur.

Ce complexe sablo argileux présente deux faciès : des argiles sableuses plastiques à 3 m de profondeur au centre de la ville, et des argiles vaseuses, des limons sableux et des sables vaseux de consistance très faible en aval. Au niveau des plateaux (ville de Boumerdès), on observe la prédominance de la fraction sableuse (sable fin rouge à argile parfois limoneux de faible épaisseur par endroits). La profondeur du substratum marneux est évaluée à moins de 4 mètres sous les sables à l'Est de la ville, de 6 à 14 mètres au centre, et au Sud de la ville.

Les dunes sableuses actuelles qui se développent le long du littoral formant ainsi les falaises côtières sont constituées essentiellement de sables fins à grossiers, rubéfiés au sommet et déconsolidés à la base. Cette formation sableuse est répandue au Nord du plateau ouest, et l'avenue Front de mer à l'Est de l'Oued Tatareg. Les alluvions récentes holocènes occupent les berges des oueds Boumerdès et Tatareg.

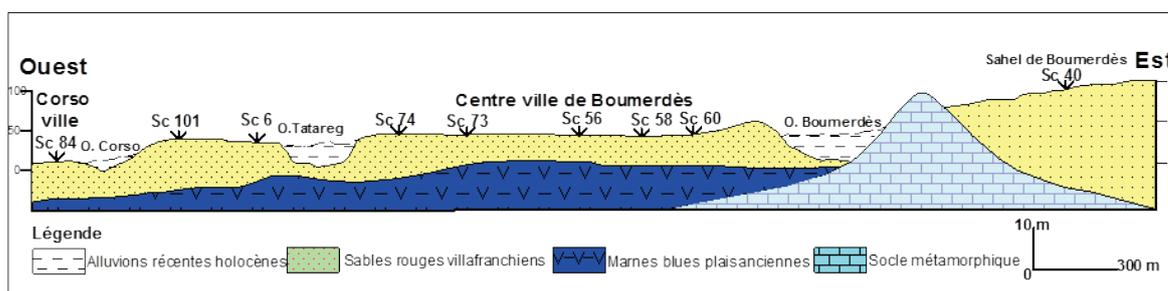


Figure 3.2 : Coupe géologique à travers les plateaux de la ville et le Sahel de Boumerdès [109, 110]

D'après ce contexte géologique et géotechnique, le site urbain de la ville de Boumerdès repose sur un sol considéré comme ferme (S2), selon la classification donnée par les Règles Parasismiques Algériennes [99], avec des vitesses de cisaillement (V_s)

comprises entre 400m/s et 800m/s. De plus, des mesures de bruits de fonds sur site indiquent des vitesses $V_s \geq 500$ m/s [111].

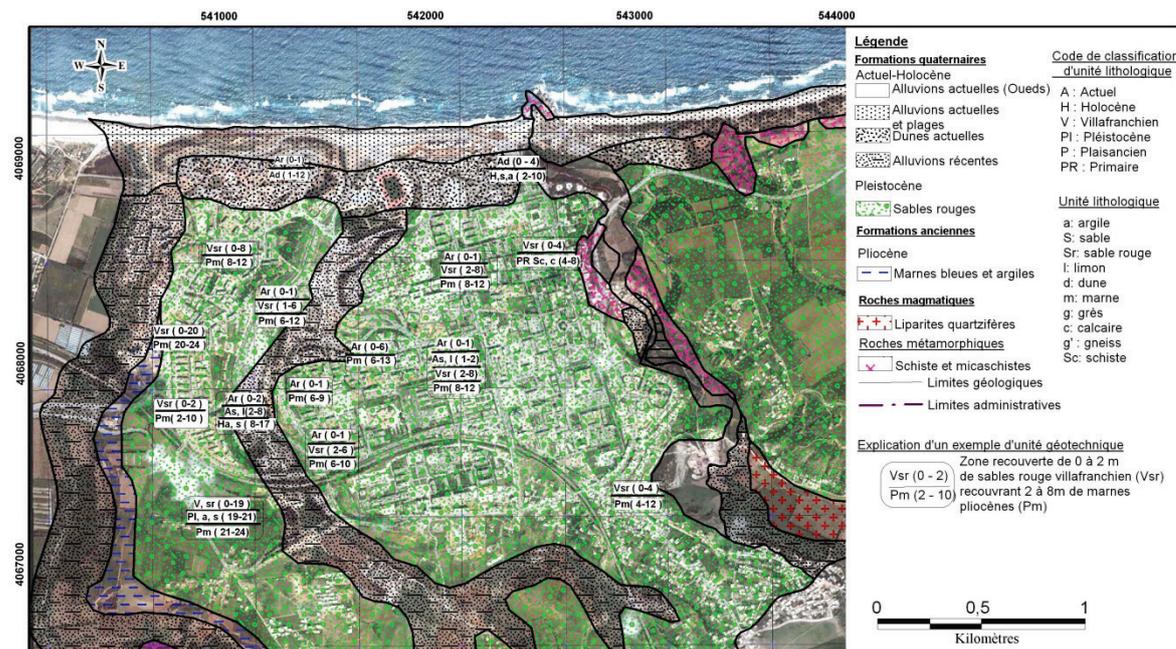


Figure 3.3 : Carte géologique et géotechnique de la ville de Boumerdès [108, 109]

3.3. Séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003

Le 21 Mai 2003 à 18h44 G.M.T, une secousse tellurique de magnitude Mw 6,8 a ébranlé la région centre de l'Algérie où plusieurs wilayas ont été touchées : Alger, Boumerdès, Tizi-Ouzou, Bouira et Blida (voir figure 3.4). Le choc principal a été ressenti dans un rayon de 300 Km, jusqu'aux îles Baléares [17]. Ce séisme est parmi les plus violents qui ont secoué la région méditerranéenne et le plus important événement touchant la région d'Alger depuis 1716 [112].

Le choc principal a été suivi, dans les jours suivants, par des centaines de répliques qui ont été enregistrées avec des magnitudes variant de 3 à 4, sans toutefois dépasser une magnitude de Mw = 5.8 (27.05.2003) [17]. Les stations du réseau accélérométrique du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) installées dans la région ont enregistré le choc principal et les principales répliques.

Des dégâts matériels et corporels importants ont été enregistrés à Boumerdès ville, Dellys, Zemmouri, Corso, Réghaia, Boudouaou, Bordj El Bahri, et d'autres localités encore.

Il est à déplorer par ailleurs 2,278 morts, 11,450 blessés, 128,000 logements sérieusement endommagés et laissant environ 200,000 sinistrés [17].

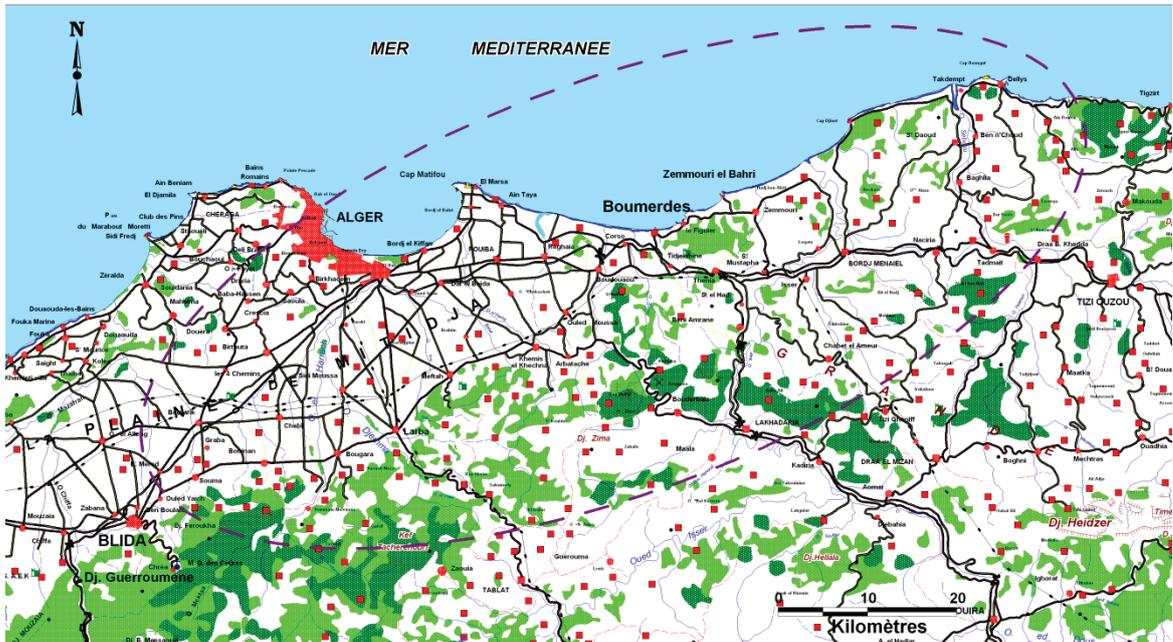


Figure 3.4 : Région secouée par le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003 ($M_w = 6.8$) [17]

Différents Instituts dans le monde ont estimé la magnitude et les coordonnées épicentrales de ce séisme, voir Tableau 3.1:

Tableau 3.1 : Caractéristiques du séisme de Boumerdès données par différents centres [17, 106]

Institut	Magnitude M_w	Latitude	Longitude	Profondeur
IISSE (Japon)	6.9	36.89N	03.78E	10 Km
USGS	6.8	36.90N	03.71E	10 Km
CSEM	6.8	37.02N	03.77E	20 Km
CGS ¹	7.0	36.81N	03.53E	-
CRAAG	6.8	36.91N	03.58E	-
Bounif et al ²	-	36.83N	03.65E	8-10 Km

- ¹ résultat obtenu à partir des enregistrements du réseau d'accélérographes du CGS
- ² BOUNIF et al [106] ont déterminé la localisation exacte de l'épicentre du choc principal à partir des données des répliques majeures (voir figure 3.5)

Comme nous pouvons le constater sur le tableau précédent, les différents centres ont donné des positions différentes de l'épicentre. En revanche, BOUNIF et al. [106] ont déterminé la localisation exacte de l'épicentre du choc principal (36.83N, 03.65E) à partir des données des répliques importantes enregistrées par le réseau accélérométriques du CGS (voir figure 3.5).

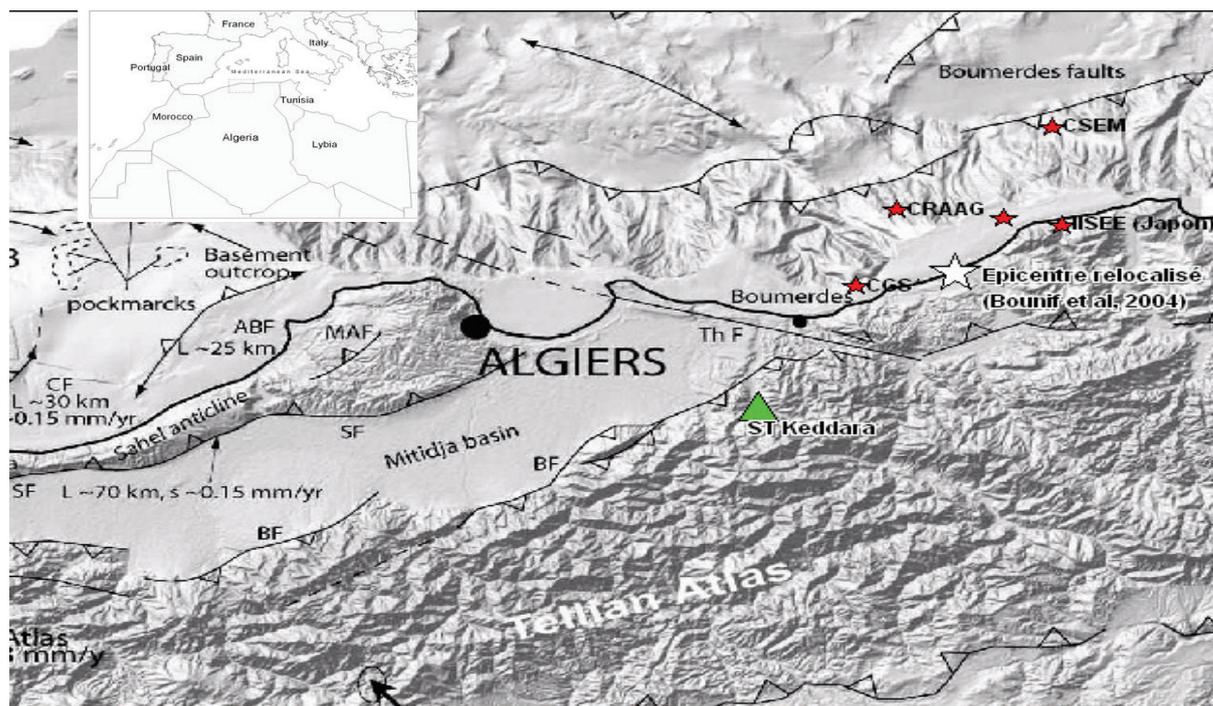


Figure 3.5 : a). Cadre tectonique de la région d'Alger et Boumerdès [113], b). Positions de l'épicentre du choc principal du séisme de Boumerdès montré par l'étoile blanche [106], c). Positions de l'épicentre, montrées par les étoiles rouges, du séisme de Boumerdès données par divers centres, d). Positions des 2 stations accélérométrique (ST1 et ST2) de Keddara montrée par le triangle vert.

3.3.1. Enregistrements accélérométriques

Les stations du CGS en champ libre les plus proches qui ont enregistré le choc principal se trouvent à 29 Km de l'épicentre, précisément au niveau du barrage de Keddara (voir figure 3.5). Les accélérations maximales enregistrées par six (06) stations sont données dans le tableau 3.2 [17] :

Tableau 3.2 : Valeurs des accélérations maximales du choc principal enregistrées par le CGS [17]

Station	Composante		
	E-W (g)	Vert (g)	N-S (g)
Keddara ST1	0.34	0.26	0.24
Keddara ST2	0.58	0.35	0.22
Hussein-Dey	0.27	0.09	0.23
Dar El Beida	0.52	0.16	0.46
Blida	0.046	0.028	0.038
El Affroun	0.16	0.03	0.09

Les deux (02) stations de Keddara sont distantes d'environ 100 m l'une de l'autre. Cette différence dans les valeurs des accélérations maximales des deux stations est expliquée par la présence d'un effet de site localisé (amplification du sol) au niveau du site de la station ST2 selon les études menées par LAOUAMI et al. [114].

3.3.2. Evaluation des dommages post-sismiques

Soucieux de reloger au plus vite le plus grand nombre de sinistrés dans des conditions de sécurité suffisantes, d'assurer une année scolaire normale et de dresser un bilan des destructions, une mission d'expertise et d'évaluation technique des constructions a été expressément requise par le Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme (M.H.U) mobilisant les experts du CGS, des organismes de contrôle C.T.C, des services techniques de l'administration locale (DUC et DLEP), du CNERIB, des OPGI, de certains bureaux d'études, etc. [17,101].

Dans la semaine qui a suivi le séisme, plus de 700 enquêteurs et experts étaient à pied d'œuvre sur les lieux formant plusieurs groupes coordonnés par deux (02) postes de commandement (PC), l'un à Alger et l'autre à Boumerdès [17, 101].

Il s'agissait, en effet, d'inventorier les parties du patrimoine utilisables immédiatement et celles qui nécessitaient des réparations et/ou renforcements, et celles qui étaient devenues irrécupérables.

A cet effet, une fiche regroupant une soixantaine d'informations a été utilisée pour la circonstance (voir paragraphe 2.2.4 et figure 2.10).

Chaque fiche a été remplie pour consigner le constat des dommages de chaque construction expertisée, lesquels dommages étaient répartis dans une échelle à 5 degrés (voir paragraphe 2.2.4 et tableau 2.6). L'usage de cette fiche a contribué à rendre systématique la procédure d'évaluation des dommages et à rendre homogènes les appréciations des Ingénieurs.

Cette campagne d'enquête post-sismique a permis d'établir un nombre de 69530 fiches. Ces fiches ont été numérisées avec un logiciel de saisie et de traitement qui a été développé à cet effet par le CGS [101]. Sur ce nombre de 69530 constructions inspectées, il a été extrait un échantillon de 3663 constructions représentant celles situées dans le site urbain de la ville de Boumerdès. Ce dernier échantillon de 3663 fiches qui a été analysé a permis de faire une comparaison entre les niveaux de dommages observés et relevés lors de l'inspection avec ceux prédits par la méthodologie d'estimation des dommages sismiques mise au point dans le cadre de ce travail.

Les fiches d'enquête post-sismique établies par les experts dans les zones touchées par le séisme ont servi, d'une part, à estimer les dommages subis par les constructions et, d'autre part, à faire une classification du bâti de la ville de Boumerdès.

3.4. Analyse des dommages réels observés dans la ville de Boumerdès

La base de données du bâti utilisée et analysée, dans ce travail, comprend un total de 3663 constructions ou blocs recensés dans la ville (commune) de Boumerdès. Ces constructions sont réparties entre usages résidentiel, industriel, commercial, éducatif, administratif, etc. Les constructions en béton armé sont prédominantes et représentent les trois quarts du bâti de la ville. Ce type de structure, réalisé après 1962, se concentre surtout dans la partie Ouest de la ville, entre les deux oueds traversant la ville, les oueds Corso et Boumerdès. Les constructions ayant un système «poteaux-poutres» avec remplissage en maçonnerie (RC1) représentent environ 71% (2596 constructions), tandis que celles en système de contreventement par voiles en béton armé représentent 3.66%, dont la plupart est constituée de bâtiments collectifs à usages d'habitation, commercial ou administratif. Par ailleurs, les constructions en maçonnerie, dont la plupart datent de l'époque coloniale (avant 1962), représentent environ un quart des constructions recensées (933 unités) et se situent essentiellement dans les agglomérations secondaires et éparses de la ville, dans les parties Est et Sud ; elles sont majoritairement des constructions individuelles. Il existe aussi quelques constructions en charpente métallique (à usage industriel) et en bois dont le nombre est faible (12 et 15 constructions respectivement, non comptabilisées dans les 3663 constructions étudiées). Ces deux typologies (métal et bois) représentant moins de 1% du bâti de Boumerdès sont écartées de la base de données dans la suite des analyses.

L'ensemble des constructions constituant le bâti de la ville de Boumerdès a été classé selon le système constructif, nombre d'étages, période de construction et niveaux de dommages occasionnés par le séisme du 21.05.2003. Cette classification respecte la procédure de la méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie mise au point dans ce travail (voir tableau 2.4).

Cependant, certaines typologies n'existent pas dans la ville de Boumerdès ; à titre d'exemple, il s'agit des RC1-H, RC2-H et URM-M (Pré-code), RC2-B et URM-M (Bas-code) et RC1-H (Moyen code). Pour la période de construction d'avant 1981 (Pré-code), le nombre de constructions est de l'ordre de 1443 unités, dont la moitié est en maçonnerie. Durant cette période, la vieille ville de Boumerdès n'était qu'une petite localité rattachée à

la commune de Thénia [115]. L'extension de la ville a commencé avec la réalisation du plan d'urbanisme de 1970. Le nombre de constructions est plus important (1866 unités) dans la période du Bas-code (1981-1999), dont près de 90% sont en béton armé. Durant cette période, Boumerdès est passé Wilaya en 1984 après le nouveau découpage administratif en Algérie. Elle a donc connu une forte urbanisation, la transformant en un pôle à la fois industriel représenté par l'entreprise SONATRACH qui active dans le domaine des hydrocarbures, avec ses différents départements instaurés dans la ville, et universitaire avec la réalisation du complexe universitaire renfermant plusieurs facultés et instituts. La ville a vu aussi la réalisation de nombreuses constructions individuelles et collectives sous formes de cités publiques destinées aux cadres travaillant dans le secteur des hydrocarbures et aux universitaires. En ce qui concerne la 3^{ème} période (2000-2003), l'ensemble des constructions est réalisé en béton armé (poteaux-poutres ou voiles) de différentes hauteurs, mais le nombre est moins important vu la courte durée de cette période.

L'analyse des dommages sismiques observés in-situ (voir tableaux 3.3 et 3.4) montre qu'un pourcentage conséquent des constructions en maçonnerie (environ 30%) a subi des dommages importants (D4) et sévères (D5), car ces constructions ne répondent à aucune norme parasismique ou code de calcul de structures. En effet, la majorité a été édifiée par une main d'œuvre non qualifiée avec des matériaux de qualités médiocres et n'utilisant aucun chaînage.

En ce qui concerne les structures en béton armé du type RC1, prédominantes dans la ville de Boumerdès, bien que la moitié n'ait été que légèrement touchée, il convient de relever qu'elles représentent le plus grand nombre d'édifices sévèrement endommagés (574 unités classées entre D4 et D5). Les dommages sont dus essentiellement à la mauvaise qualité du béton et à la faible qualité de mise en œuvre au niveau de la jonction poteau-poutre, avec manque ou absence d'armatures transversales "cadres" qui doivent assurer le confinement et la reprise au cisaillement. Ce système de construction pourrait convenir pour des zones de séismicité faible ou moyenne mais comme la secousse du 21 mai 2003 a été forte, les dommages ont été importants. Suite à la révision du règlement parasismique Algérien (RPA) en 1999, le système portique en béton armé a été limité à 6 niveaux pour la région de Boumerdès classée zone II à l'époque (RPA99). Cependant, après le séisme et avec la nouvelle version du RPA en 2003, le nombre de niveaux a été revu à la baisse pour être limité à 2 seulement dans la ville de Boumerdès classée depuis en zone III.

Le système de construction le plus épargné par les dommages, avec un comportement meilleur au séisme, est le système RC2 qui est utilisé essentiellement pour la réalisation des immeubles appartenant au patrimoine public tel que les cités d'habitation à l'image de la «cité des 800 logements». Ce système a montré qu'il convient bien dans les zones de forte sismicité s'il est bien conçu et réalisé.

D'après cette analyse, les constructions de la commune de Boumerdès seront à classer selon les 03 niveaux de conception parasismique : Pré-code, Bas-code et Code modéré. La période de Haut code concerne les constructions réalisées après 2003, en conformité avec la version du RPA 99/2003.

Les résultats tirés de ce traitement sont donnés dans les Tableaux 3.3 et 3.4.

Tableau 3.3 : Répartition des constructions de la commune de Boumerdès selon la typologie, le niveau de dommages et la période de construction

Pré-code						
Typologie	Niveau de dommages observé					Nombre de constructions
	D1	D2	D3	D4	D5	
RC1-B	2 <i>0.4%</i>	262 <i>55.4%</i>	124 <i>26.2%</i>	73 <i>15.4%</i>	12 <i>2.5%</i>	473
RC1-M	46 <i>19.8%</i>	24 <i>10.4%</i>	59 <i>25.4%</i>	87 <i>37.5%</i>	16 <i>6.9%</i>	232
RC2-B	0 <i>0.0%</i>	12 <i>100.0%</i>	0 <i>0.0%</i>	0 <i>0.0%</i>	0 <i>0.0%</i>	12
RC2-M	0 <i>0.0%</i>	17 <i>56.7%</i>	7 <i>23.3%</i>	6 <i>20.0%</i>	0 <i>0.0%</i>	30
URM-B	2 <i>0.3%</i>	258 <i>37.1%</i>	215 <i>30.9%</i>	153 <i>22.0%</i>	68 <i>9.7%</i>	696
Total	50 <i>3.4%</i>	573 <i>39.7%</i>	405 <i>28.1%</i>	319 <i>22.1%</i>	96 <i>6.7%</i>	1443
Bas code						
Typologie	Niveau de dommages observé					Nombre de constructions
	D1	D2	D3	D4	D5	
RC1-B	6 <i>0.4%</i>	881 <i>60.7%</i>	361 <i>24.9%</i>	162 <i>11.2%</i>	40 <i>2.8%</i>	1450
RC1-M	0 <i>0.0%</i>	18 <i>16.7%</i>	31 <i>28.7%</i>	35 <i>32.4%</i>	24 <i>22.2%</i>	108
RC1-H	0 <i>0.0%</i>	0 <i>0.0%</i>	5 <i>83.3%</i>	1 <i>16.7%</i>	0 <i>0.00%</i>	06
RC2-M	0 <i>0.0%</i>	41 <i>80.4%</i>	9 <i>17.6%</i>	1 <i>2.0%</i>	0 <i>0.00%</i>	51
RC2-H	0 <i>0.0%</i>	5 <i>35.7%</i>	8 <i>57.2%</i>	1 <i>7.1%</i>	0 <i>0.00%</i>	14
URM-B	2 <i>0.8%</i>	127 <i>53.6.0%</i>	55 <i>23.2%</i>	51 <i>21.6%</i>	2 <i>0.8%</i>	237
Total	8 <i>0.4%</i>	1072 <i>57.4%</i>	469 <i>25.1%</i>	251 <i>13.5%</i>	66 <i>3.6%</i>	1866

Moyen-Code						
Typologie	Niveau de dommages observé					Nombre de constructions
	D1	D2	D3	D4	D5	
RC1-B	0 <i>0.0%</i>	98 <i>37.0%</i>	66 <i>24.9%</i>	68 <i>25.7%</i>	33 <i>12.4%</i>	265
RC1-M	0 <i>0.0%</i>	10 <i>16.1%</i>	29 <i>46.8%</i>	11 <i>17.7%</i>	12 <i>19.45%</i>	62
RC2-B	0 <i>0.00%</i>	1 <i>16.7%</i>	0 <i>0.00%</i>	5 <i>83.3%</i>	0 <i>0.00%</i>	06
RC2-M	0 <i>0.00%</i>	4 <i>50.0%</i>	2 <i>25.0%</i>	2 <i>25.0%</i>	0 <i>0.00%</i>	08
RC2-H	0 <i>0.00%</i>	7 <i>53.8%</i>	4 <i>30.8%</i>	2 <i>15.4%</i>	0 <i>0.00%</i>	13
Total	0 <i>0.0%</i>	120 <i>33.9%</i>	101 <i>28.5%</i>	88 <i>24.9%</i>	45 <i>12.7%</i>	354

La classification de ces constructions selon la typologie et leur degré de dommages correspondant ainsi que la classification globale est donnée dans le Tableau 3.4 et figure 3.6.

Tableau 3.4 : Répartition des constructions de la commune de Boumerdès selon la typologie et le niveau de dommages.

Typologie	Niveau de dommages observé					Nombre de constructions
	D1	D2	D3	D4	D5	
RC1	54 <i>2.1%</i>	1293 <i>49.8%</i>	675 <i>26.0%</i>	437 <i>16.8%</i>	137 <i>5.3%</i>	2596
RC2	0 <i>0.0%</i>	83 <i>61.9%</i>	33 <i>24.6%</i>	18 <i>13.5%</i>	0 <i>0.00%</i>	134
URM	3 <i>0.3%</i>	386 <i>41.4%</i>	270 <i>28.9%</i>	204 <i>21.9%</i>	70 <i>7.5%</i>	933
Global	57 <i>1.6%</i>	1762 <i>48.1%</i>	978 <i>26.7%</i>	659 <i>18.0%</i>	207 <i>5.6%</i>	3663

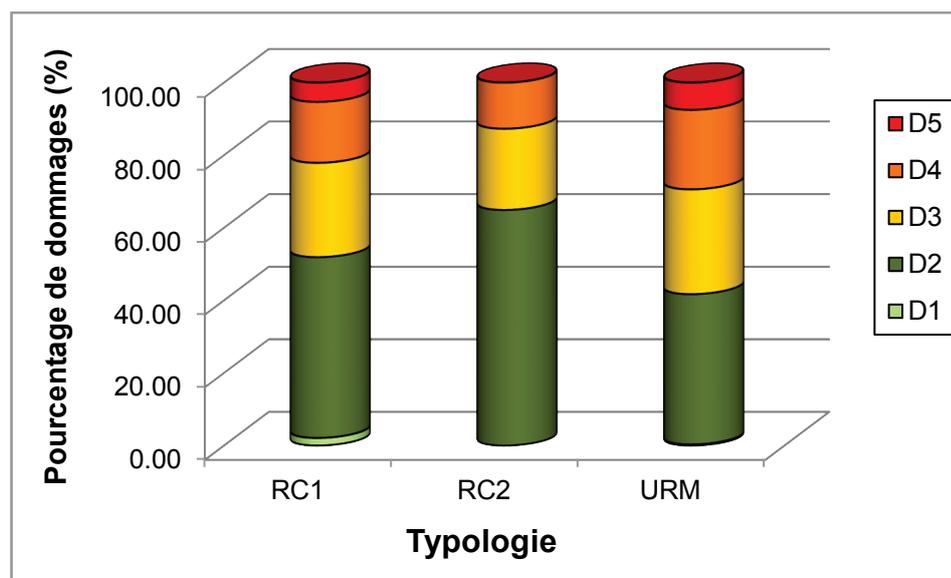


Figure 3.6 : Pourcentages de dommages (D1 à D5) pour chaque typologie de la ville de Boumerdès

3.5. Estimation des dommages post-sismiques par la méthodologie mise au point et comparaison avec les dommages réels

Dans la méthodologie mise au point pour l'estimation des dommages sismiques spécifique au bâti en Algérie, l'évènement sismique est caractérisé par son spectre de réponse élastique. A cet effet, et dans le but d'appliquer cette méthodologie sur le cas du site urbain de la ville de Boumerdès et d'en analyser les performances en matière d'estimation des dommages sismiques futurs, nous distinguons deux cas de spectre de réponse élastique :

- Un premier spectre correspond au spectre de réponse élastique construit avec les enregistrements accélérométriques du choc principal du séisme de Boumerdès du 21.05.2003 de la station en champ libre la plus proche, appartenant au réseau d'accélérographes du CGS, comme indiqué précédemment (voir Tableau 3.2).
- Un deuxième spectre correspond au spectre normalisé préconisé par les Règles Parasismiques Algériennes en vigueur lors de l'occurrence du séisme, à savoir, le RPA 99, [116].

3.5.1. 1^{er} Cas: Simulation théorique utilisant le spectre de réponse du site

Du fait de la défection de la station accélérométrique située à Boumerdès ville (36.75N, 03.47E) à une distance épacentrale de 18 Km, c'est la station accélérométrique 1 (ST1) de Keddara (36.65N, 03.41E) située au sud-ouest de la zone du mouvement fort, à

une distance épacentrale de 29 Km qui a fourni l'enregistrement accélérométrique qui a servi à la construction du spectre de réponse élastique utilisé. Le choix d'utiliser cet enregistrement est dû au fait que cette station est la plus proche de la zone d'étude. Ce spectre de réponse a été développé en tenant compte des effets de site, car les mesures de bruit de fonds (H/V) [117], réalisées par MESLEM et al.[118], montrent l'existence d'une couche rocheuse en surface du site d'implantation de la station de Keddara ST1, correspondant à une absence d'amplification du signal.

3.5.1.1 Développement du spectre de réponse élastique ($\xi = 5\%$)

Le spectre de réponse élastique moyen normalisé, utilisé dans ce cas, a été construit à partir des deux (02) composantes horizontales (E-W et N-S) de l'accélérogramme enregistré à la station de Keddara (ST1) (voir figure 3.7).

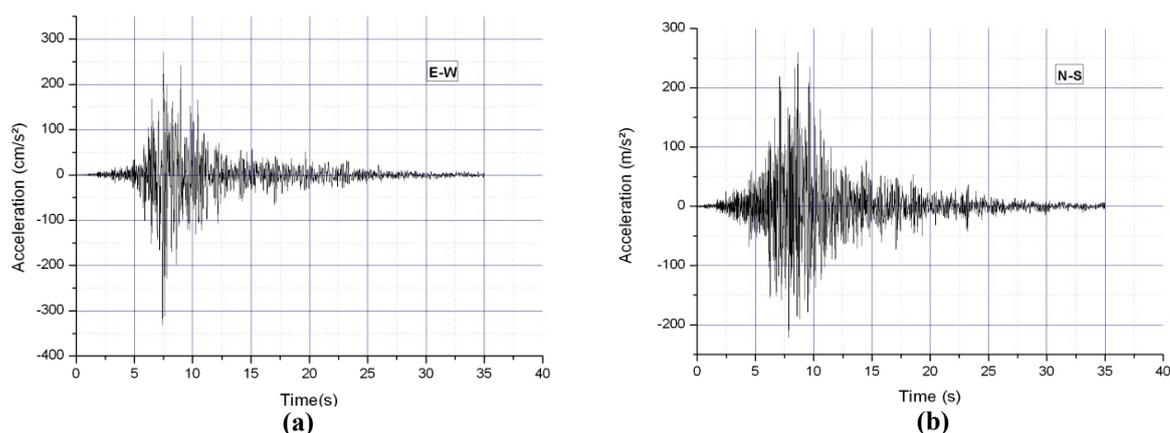


Figure 3.7 : Accélérogrammes des composantes horizontales du choc principal (Keddara ST1). (a) Composante Est-Ouest, (b) Composante Nord-Sud

A partir de ce spectre de réponse, nous collectons les valeurs des périodes caractéristiques T_1 et T_2 de la branche d'accélérations spectrales constantes (plateau), qui ont pour valeurs respectives (0.088s et 0.227s). Ces 2 périodes permettent de tracer le spectre de réponse élastique normalisé correspondant (voir figure 3.8) de forme similaire à celle du spectre donné par le code parasismique Algérien de 1999 [116] (Séisme produit avant la parution de la dernière version du code parasismique, RPA99/2003 [99]). Sa formulation est donnée comme suit :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A_c \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A_c) \frac{Q}{R} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A_c) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{5/4} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A_c) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{5/4} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases} \quad (3.1)$$

Où:

A_c est le coefficient d'accélération du site pris égal à 1 ($A_c=1$); T_1 and T_2 [unité: s] représentent les limites des périodes supérieures et inférieures définissant la branche d'accélérations spectrales constantes ; Q décrit le facteur de qualité ($Q=1$) ; R est le facteur de comportement ($R=1$) et η représente le facteur de correction de l'amortissement défini par l'équation suivante (Equation 3.2) :

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \quad (3.2)$$

ξ est le pourcentage d'amortissement critique (pris égale à $\xi=5\%$).

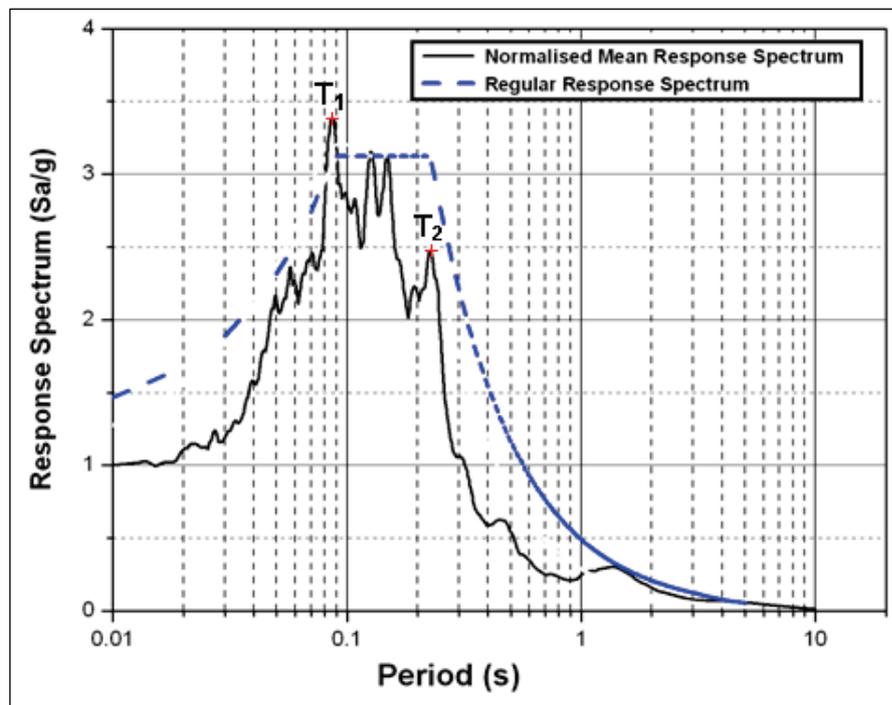


Figure 3.8 : Spectre de réponse élastique normalisé pour un amortissement ($\xi=5\%$)

3.5.1.2. Accélération du site

L'accélération horizontale au niveau de la ville de Boumerdès a été estimée à partir des deux composantes horizontales (EW: 0.34g et NS: 0.26g) de l'enregistrement de la station 1 à Keddara, en utilisant la loi d'atténuation développée par AMBRASEYS et al. [119]. Plusieurs lois d'atténuations existantes, que ce soit Américaines ou Européennes, ont été étudiées en vue de les adapter au contexte Algérien, à l'instar de celles développées par [119, 120, 121, 122, 123, 124]. Des lois d'atténuations locales ont été également développées par [125, 126]. Toutefois, la base de données des accélérations maximales algérienne existante manque de données des événements majeurs. Cependant un ensemble de données a été collecté durant le séisme de Boumerdès (2003). Au Centre National de Recherches Appliquée en Génie Parasismique (CGS), des études sont en cours avec l'objectif de développer des lois d'atténuation spectrales appropriées aux événements majeurs.

Le choix d'utiliser la loi d'atténuation spectrale développée par AMBRASEYS et al. vient du fait qu'elle a été établie à partir de 595 enregistrements de mouvements forts dans la zone Europe et du Moyen Orient dont 3 enregistrements d'Algérie (réplique du séisme d'El-Asnam de 1980 ; choc principal du séisme de Constantine de 1985 et celui de Chenoua de 1989) [96]. Ces mouvements forts ont été provoqués par des séismes peu profonds avec des magnitudes $M_w \geq 5$ et des distances de projection en surface de la faille de moins de 100 kilomètres. Cette loi (Equation 3.3) répond le plus aux caractéristiques du séisme de Boumerdès. La valeur de l'accélération maximale au rocher calculée est de l'ordre de 0.5g [19].

$$\log A_h = a_1 + a_2 M_w + (a_3 + a_4 M_w) \log \sqrt{d^2 + a_5^2} + a_6 S_s + a_7 S_A + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_0 \quad (3.3)$$

Où :

A_h représente l'accélération maximale au sol (PGA) [unité: ms^{-2}], $S_s=1$ pour les sols meubles et 0 autrement, $S_A=1$ pour les sols fermes et rocheux et 0 autrement, $F_N=1$ pour les failles normales et 0 autrement, $F_T=1$ pour les failles en décrochement 0 autrement et $F_0=1$ pour failles indéfinies (odd-Faulting) et 0 autrement.

a_1 à a_{10} sont des coefficients dérivés pour l'évaluation de l'accélération horizontale maximale au sol et l'accélération de réponse spectrale pour 5% d'amortissement, d [unité: Km] représente la distance épacentrale.

Tableau 3.5: Distances épacentrales des stations de Boumerdès et de Keddara ST1

Station	Position	Distance épacentrale [unité : km]
Boumerdès	36.65N, 03.41E	18
Keddara ST1	36.75N, 03.47E	29

Les études de bruit de fonds (H/V) effectuées sur ce même site par HELLAL et al. [127] (voir figure 3.9) ainsi que celles réalisées par GUILLIER et al. [111] et MESLEM et al. [118] montrent que le phénomène d'effet de site (amplification du sol) est à écarter dans la ville de Boumerdès. Ceci plaide pour que la valeur d'accélération ($A = 0.5g$) calculée au niveau de la station de Boumerdès soit prise pour le calcul du spectre de réponse élastique (amortissement de 5%) pour l'ensemble de la ville.

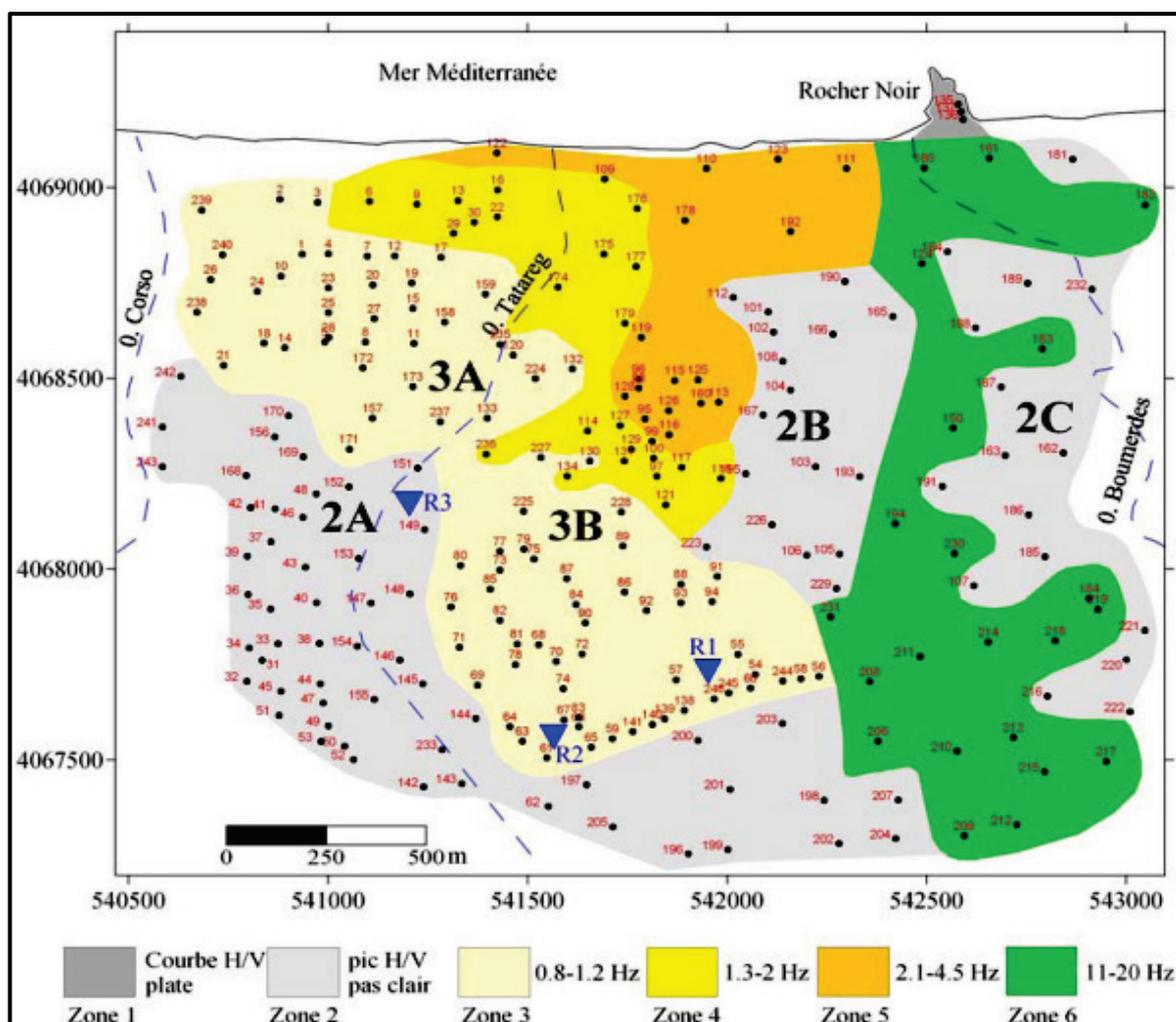


Figure 3.9 : Carte de distribution des fréquences propres du sol dans la ville de Boumerdès. Les ronds noirs correspondent aux enregistrements H/V et les triangles bleus correspondent aux réseaux. Les chiffres rouges correspondent aux numéros des enregistrements H/V [127].

3.5.2. 2^{ème} Cas: Simulations et prédictions utilisant le spectre de réponse du code parasismique Algérien (RPA)

Dans ce second cas, les dommages sismiques théoriques sont estimés avec l'hypothèse que le spectre de réponse élastique ($\xi=5\%$) correspond au spectre de réponse réglementaire adopté par la version du code parasismique Algérien en vigueur lors de l'occurrence du séisme, à savoir, le RPA 99, qui est donné par la formulation suivante [116] (voir section 2.2.1):

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \frac{Q}{R} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases} \quad (3.4)$$

Où, A représente le coefficient d'accélération du site ($A=0.5g$), comme discuté dans la section 3.5.1.2.

Comme montré précédemment, le type de sol du site urbain de la ville de Boumerdès est classé S2 (sol ferme) selon les Règles Parasismiques Algériennes [99, 116], ayant comme périodes limitant le plateau $T_1 = 0.15$ sec et $T_2 = 0.40$ sec.

Tableau 3.6 : Valeurs de T_1 et T_2 selon le code parasismique Algérien [99, 116]

Type de sol	Rocheux (S1)	Ferme (S2)	Meuble (S3)	Très Meuble (S4)
Période T_1 [unité: s]	0.15	0.15	0.15	0.15
Période T_2 [unité: s]	0.30	0.40	0.50	0.70

3.5.3. Estimation des dommages

L'estimation théorique des dommages sismiques du bâti de la ville de Boumerdès a été réalisée par l'application de la méthodologie mise au point précédemment (voir chapitre 2), puis ont été comparés avec ceux observés in-situ après le séisme, comme illustré sur les tableaux 3.7 à 3.9 ainsi que dans la figure 3.10.

Tableau 3.7 : Probabilités de dommages par typologie

Typologie	Cas	Probabilité de dommages					
		PN	PS	PM	PS+PM	PE	PC
RC1	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	2.0%	30.0%	49.2%	79.2% (30.0+49.2)	15%	3.8%
	D_{obs} : Observé	2.1%	49.8%	26.0%	75.8% (49.8+26)	16.8%	5.3%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	1.0%	9.5%	57.1%	66.6% (9.5+57.1)	22.4%	10.0%
RC2	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	4%	50.9%	37.4%	88.3% (50.9+37.4)	6.6%	1.1%
	D_{obs} : Observé	0%	61.9%	24.6%	86.5% (61.9+24.6)	13.5%	0%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	0.1%	11.6%	60.2%	71.8% (11.6+60.2)	21.3%	6.8%
URM	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	5.7%	24.7%	39.6%	64.3% (24.7+39.6)	19.7%	10.3%
	D_{obs} : Observé	0.3%	41.4%	28.9%	70.3% (41.4+28.9)	21.9%	7.5%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	0.0%	0.01%	40.5%	40.5% (0.01+40.5)	28.7%	30.8%

PN: Probabilité d'absence ou de dommages négligeables (No damage) ; PS: Probabilité de dommages légers (Slight) ; PM: Probabilité de dommages modérés (Moderate) ; PE: Probabilité de dommages importants (Extensive) ; PC: Probabilité de dommages sévères ou complets (Complete)

Tableau 3.8 : Probabilités de dommages par périodes d'application du code parasismique Algérien (RPA)

Période	Cas	Probabilité de dommages					
		PN	PS	PM	PS+PM	PE	PC
Pré-code	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	1.3%	25.9%	49.1%	75.0% (25.9+49.1)	16.6%	7.1%
	D_{obs} : Observé	3.4%	39.7%	28.1%	67.8% (39.7+28.1)	22.1%	6.7%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	0.1%	1.3%	61.1%	62.4% (1.3+61.1)	22.6%	14.9%
Bas-code	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	4.4%	36.9%	44.6%	81.5% (36.9+44.6)	11.2%	2.9%
	D_{obs} : Observé	0.4%	57.4%	25.1%	82.5% (57.4+25.1)	13.5%	3.6%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	1.1%	21.9%	54.6%	76.5% (21.9+54.6)	15.3%	7.1%
Code-Modéré	D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	3.6%	47.9%	36.9%	85% (47.9+36.9)	10.2%	1.4%
	D_{obs} : Observé	0%	33.9%	28.5%	62.5% (33.9+28.5)	24.9%	12.7%
	D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	0%	0%	54.1%	54.1% (0+54.1)	31.9%	14.0%

Comme décrit précédemment, les constructions de la ville de Boumerdès ont été classées selon les trois premières périodes des versions des règles parasismiques Algériennes (RPA) : Pré-code, Bas-code et Code-Modéré. Cela est dû au fait que la période du Haut code concerne les constructions réalisées selon la dernière version du RPA en vigueur publiée après la survenue du séisme de Boumerdès de 2003 (c.à.d. RPA 99 version 2003) [99].

Tableau 3.9 : Comparaison des probabilités des dommages globaux pour l'ensemble des constructions de la ville de Boumerdès en fusionnant toutes les typologies

Cas	Probabilité de dommages					
	PN	PS	PM	PS+PM	PE	PC
D_{sr} : 1 ^{ère} Simulation	3.3%	37.6%	43.2%	80.8% (37.6+43.2)	12.3%	3.6%
D_{obs} : Observé	1.6%	48.1%	26.7%	74.8% (48.1+26.7)	18.0%	5.6%
D_{sc} : 2 ^{ème} Simulation	0.5%	9.1%	56.1%	65.2% (9.1+56.1)	22.8%	11.5%

Où :

- D_{obs} = Dommages observés et collectés in-situ par les enquêteurs durant la campagne post-sismique ;
- D_{sr} = Dommages théoriques estimés en considérant le spectre élastique réel du site ;
- D_{sc} = Dommages théoriques estimés sous l'hypothèse du spectre élastique réglementaire : Spectre de calcul du RPA 99.

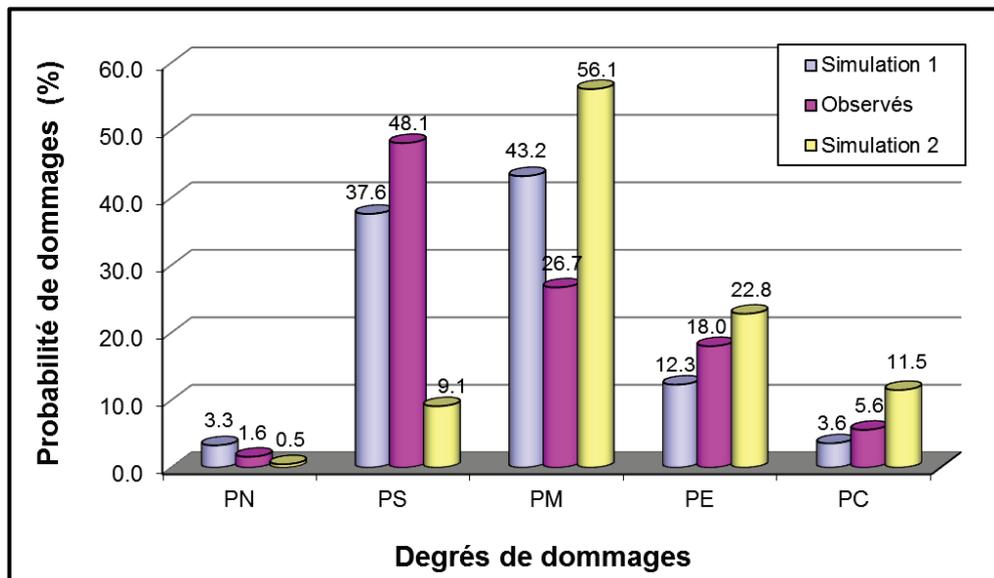


Figure 3.10 : Histogramme des dommages des 3663 constructions existantes dans la ville de Boumerdès: Observés D_{obs} , Simulations théoriques selon le spectre de réponse (Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, Spectre de calcul RPA D_{sc} : Simulation 2).

3.5.4. Analyse des dommages

Les dommages sismiques théoriques estimés par les deux simulations (1^{ère} et 2^{ème} simulation selon le spectre de réponse élastique : spectre réel du site ou règlementaire) et comparés aux dommages réels observés in-situ, pour les différentes typologies et les différentes périodes réglementaires, sont proches dans l'ensemble des cas (dommages négligeables "D1", importants "D4" et sévères "D5") et dans le cas de la 1^{ère} simulation utilisant le spectre réel du site comme événement sismique (voir figure 3.10). Pour les dommages légers (D2) et modérés (D3), il y a lieu de remarquer qu'il y a un écart significatif entre les pourcentages réels et simulés. Toutefois l'effectif cumulé des deux degrés de dommages (D2+D3) donne des valeurs comparables entre la simulation et les dommages réels (voir figures 3.11 à 3.13). Le diagnostic et la classification des dommages D2 et D3 sur le terrain nécessitent une certaine qualification et une expérience. Il n'est pas toujours aisé pour les inspecteurs de discriminer de manière rigoureuse les deux catégories lorsque l'état du dommage se trouve à la limite des deux catégories. Il est délicat de décider rigoureusement si les dommages devraient être à la catégorie de dommages 2 ou 3 par une inspection visuelle rapide, beaucoup de cas étant à la frontière entre deux catégories voisines. Cette situation peut aboutir à des résultats différents entre les dommages réels et ceux simulés lorsqu'on fait des statistiques en différenciant les dommages D2 et D3. Cette possible hétérogénéité dans les expertises peut induire des résultats différents entre les dommages observés et ceux estimés par les simulations théoriques comme cela a pu être le cas pour la différenciation entre les deux catégories de dommages : 2 et 3, comme illustré dans la figure 3.10 pour la distribution de dommages PS et PM.

Les dommages observés selon les typologies existantes dans la ville de Boumerdès (RC1, RC2 et URM) comparés à ceux simulés, en utilisant le spectre réel du site, concordent et présentent un écart admissible dans la plupart des cas. Cette concordance est plus avérée lorsqu'on fusionne les deux catégories de dommages *S* et *M* (voir figure 3.11). Cette situation est confirmée pour les types RC1 et URM, mais pas pour le système RC2 pour lequel le niveau de dommages "E" observé est de façon ou d'une autre plus élevé que ceux simulés.

En effet, en ce qui concerne les constructions appartenant aux périodes de Pré-code et Bas-code, c.-à-d. les diverses périodes d'évolution du code parasismique Algérien, on peut noter l'existence d'une bonne adéquation et cohérence entre les résultats observés et

théoriques (Simulation du 1^{er} cas) dans la plupart des catégories de dommages (voir figure 3.12). Cependant, la période du code-Modéré présente des différences significatives pour les degrés de dommages "E " et "C ". Cette période, étant la plus courte (2000-2003), concerne 354 constructions seulement parmi un ensemble de 3663 unités érigées dans la ville de Boumerdès. En fait, plus de 90% des constructions de cette période correspondent au système RC1, et principalement les bâtiments de 3 et 4 niveaux qui ont subi les dommages les plus sévères. Selon l'étude effectuée par LAOUAMI et al. [114], cela est expliqué par le fait que le contenu fréquentiel en champs proche commence à 3Hz avec une fréquence centrale aux alentours de 8Hz. Cette bande de fréquence contient les fréquences propres des constructions se trouvant dans la zone épiscopale.

Les différences entre les dommages observés et estimés peuvent aussi avoir, en partie, une relation avec l'adoption de courbes de capacité et de fragilité américaines pour le cas du bâti Algérien, bien qu'une attention particulière ait été accordée pour établir une correspondance adéquate entre les typologies américaines et algériennes. D'autres sources possibles des différences de résultats pourraient être liées au spectre de réponse élastique du site réalisé à partir du signal enregistré à la station en champs libre de Keddara (ST1), éloignée de 12 km de la station accélérométrique défectueuse située à la ville de Boumerdès (36.75N, 03.47E), à 18 km de l'épicentre, au moment du choc principal du séisme du 21.05.2003, et qui aurait pu mieux représenter les caractéristiques du séisme à l'origine des dommages.

D'autres causes des différences pourraient provenir de la mauvaise qualité de réalisation et des matériaux de construction ainsi que du non-respect des normes parasismiques et de calcul de structures [17]. A ces causes peuvent venir s'ajouter des sources de biais découlant de l'effet des répliques importantes atteignant une magnitude $M_w = 5.8$ en date du 27.05.2003, de l'effet de l'orientation des constructions par rapport à la faille (effet de directivité avéré), comme c'est le cas de la cité Ibn Khaldoun-1200 logements [115] (voir figure 3.16), ainsi que la présence de nombre d'étages souples au niveau des rez-de-chaussée (RDC). Ces derniers paramètres ont dû considérablement influencé les dommages effectifs occasionnés dans le bâti de la ville de Boumerdès. En outre, une étude plus récente réalisée par MESLEM et al. [18], dans le site urbain de la ville de Boumerdès, montre la relation entre la vulnérabilité des constructions et les effets topographiques, essentiellement celles proches des escarpements allongeant les oueds de la ville de Boumerdès (cités Ibn Khaldoun, 11 Décembre 1960, etc.). Une bonne partie des

différences entre les dommages théoriques et observés peut provenir de l'effet de ces paramètres qui ne sont pas complètement pris en considération dans les procédures théoriques, lesquelles nécessiteraient davantage d'améliorations afin de mieux décrire les propriétés intrinsèques des bâtiments existants.

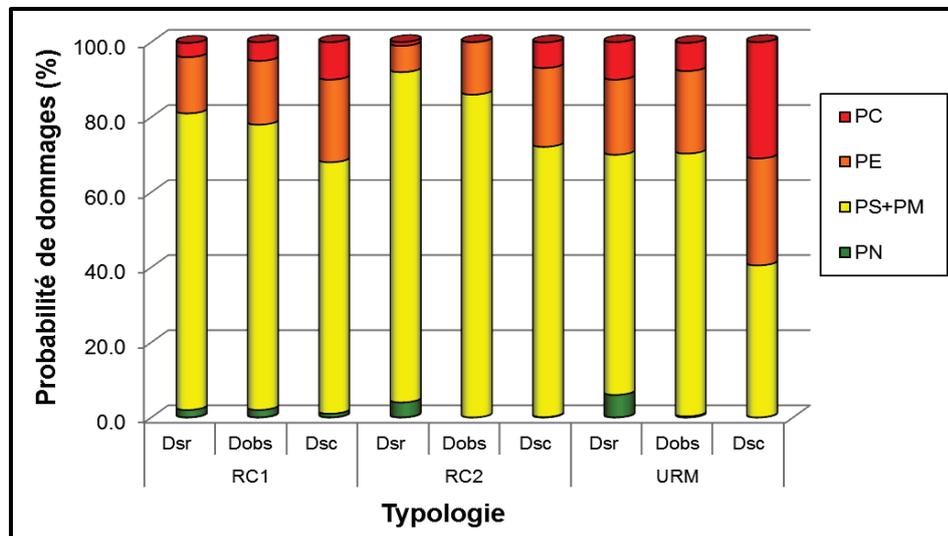


Figure 3.11 : Histogrammes de comparaison des dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès selon leurs typologies (*Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, Spectre de calcul RPA D_{sc} : Simulation 2*)

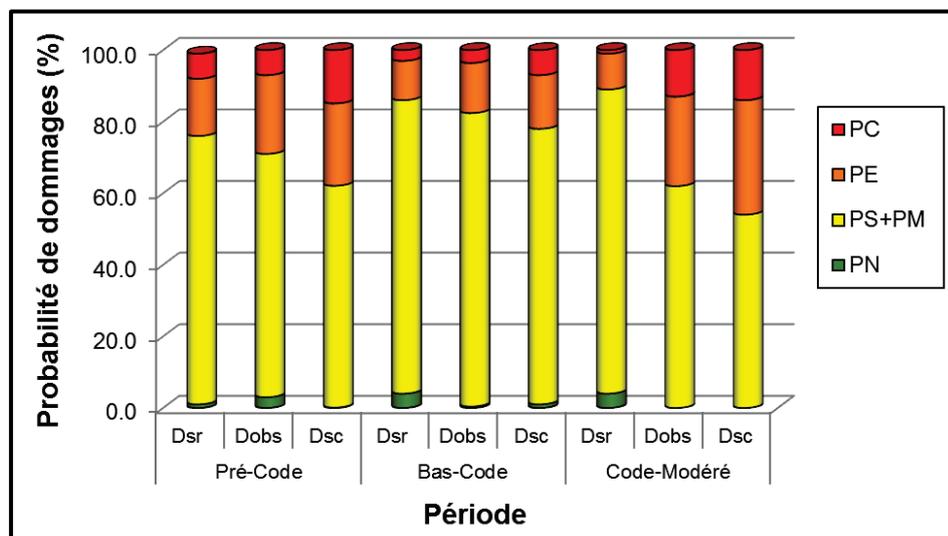


Figure 3.12 : Histogrammes de comparaison des dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès selon la période du code parasismique (*Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, Spectre de calcul RPA D_{sc} : Simulation 2*)

La simulation réalisée, en utilisant le spectre de réponse élastique des Règles Parasismiques Algériennes de 1999 (RPA 99) [116], surestime légèrement les probabilités des dommages importants "E" et sévères "C" par rapport à l'état réel des dommages enregistrés suite au séisme de Boumerdès. Cela est expliqué par le fait que le spectre de

réponse du Règlement Parasismique Algérien soit un spectre sécuritaire qui tient compte du contexte du bâti Algérien et de ses caractéristiques. En effet, un ensemble de facteurs est considéré afin de garantir des marges de sécurité acceptables, comme observé dans le cas des dommages "E" et "C" pour le code-Modéré (voir tableau 3.8).

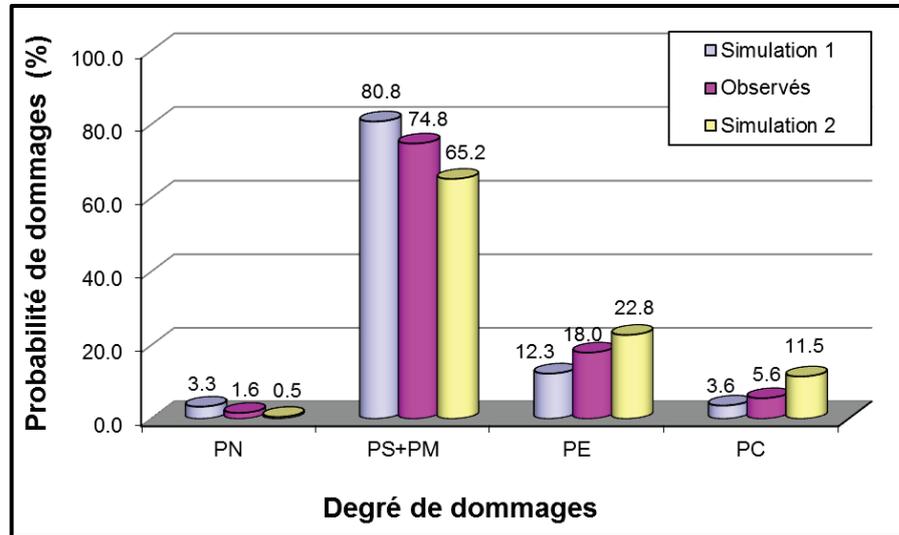


Figure 3.13: Dommages observés et estimés du bâti de la ville de Boumerdès (Spectre réel du site D_{sr} : Simulation 1, Spectre de calcul RPA D_{sc} : Simulation 2)

De manière générale, les résidus (différences) entre les pourcentages de dommages théoriques et ceux observés, pour les différentes catégories de dommages, ne dépassent pas 6 %, dans le cas d'utilisation du spectre de réponse élastique réel du site, et n'excède pas 10 % en considérant comme évènement sismique, le spectre de calcul réglementaire (RPA 99), comme illustré dans la figure 3.14.

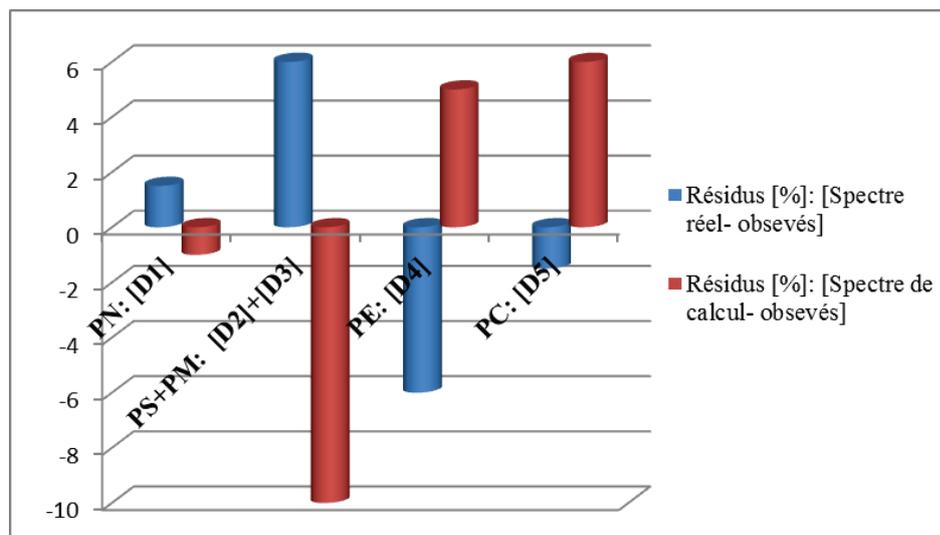


Figure 3.14 : Histogramme des valeurs résiduelles : rapports des différences entre les fréquences théoriques et observées selon les catégories de dommages

3.6. Exemples d'application de la méthodologie mise au point à deux cités



Figure 3.15 : Image Satellite Quick-bird montrant les 2 cités « Ibn Khaldoun » et « 800 logements » prise le 22/04/2002 (Avant le séisme de Boumerdès du 21.05.2003).

Afin de mieux illustrer et expliciter la méthodologie d'estimation des dommages sismiques mise au point pour le bâti Algérien, nous proposons deux exemples d'applications sur deux typologies différentes de la ville de Boumerdès touchées par le séisme du 21.05.2003, en utilisant comme événement sismique le spectre de réponse élastique du site. Il s'agit du bâti de la cité Ibn Khaldoun (1200 logements) et de la cité des 800 logements distante d'environ 1 Km dans la partie ouest de la ville. Les bâtiments de ces cités ont été numérisés et leurs caractéristiques collectées dans la base de données SIG sur un fond de carte satellite prise avant le séisme, en date du 22/04/2002 (voir figure 3.15).

3.6.1. Systèmes constructifs et dommages post-sismiques

3.6.1.1 Cité Ibn Khaldoun (1200 logements)

La cité Ibn Khaldoun, plus connue sous le nom de la cité des 1200 logements, a été réalisée à la fin des années 1970 avant la parution du 1^{er} code parasismique Algérien, RPA 1981. Le système structurel est constitué de portiques en béton armé avec remplissage en maçonnerie de briques. Elle comporte 54 immeubles de 5 étages (15 m de hauteur), formés de 1 à 4 blocs, séparés par des joints de faible épaisseur ($e \leq 1\text{cm}$) [128], dont le total des blocs est de l'ordre de 121. Ils sont donc classés dans le type RC1-M pré-code suivant la classification établie dans la méthodologie que nous développons et proposons. La vue en plan d'un bloc caractéristique est donnée dans 3.16.

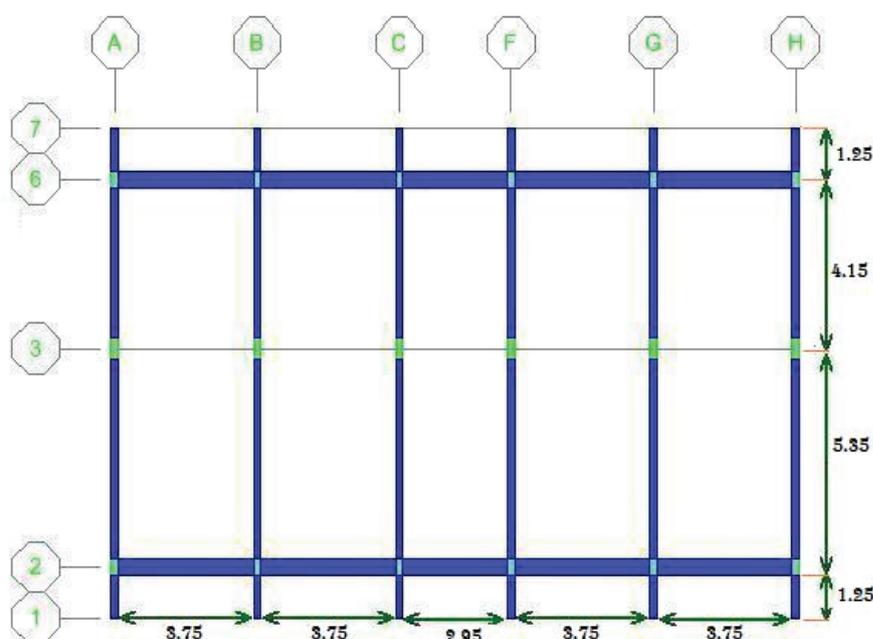


Figure 3.16 : Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la cité Ibn Khaldoun [119]

Le système structural se compose d'éléments auto-stables (poteaux-poutres) en béton armé. Les blocs présentent 2 variantes, avec une même largeur de 12 m, composées de 2 trames et deux longueurs, 18m (5 trames) et 21.8m (6 trames).

Les dimensions des éléments porteurs verticaux sont de 20cmx40cm pour les poteaux de rives et 20cmx50cm pour les poteaux centraux. Les poutres de dimensions 20cmx40cm sont disposées parallèlement à la grande dimension des poteaux, tandis que dans l'autre sens, les poutres ont des dimensions de 40cmx20cm noyées dans le plancher et disposées transversalement uniquement sur les poteaux de rives. La maçonnerie de remplissage externe est réalisée en deux panneaux de briques dans le plan des portiques.

Tableau 3.10 résume le pourcentage des dommages occasionnés dans la cité Ibn Khaldoun suite au séisme du 21.05.2003.

Tableau 3.10 : Pourcentage des dommages de la cité Ibn Khaldoun

Cité Ibn Khaldoun (RC1-M Précode)					
Niveau de dommage	D1	D2	D3	D4	D5
Nombre de blocs	46	8	15	36	16
Pourcentage de dommages	38.02%	6.61%	12.40%	29.75%	13.22%

3.6.1.2. Cité des 800 logements

La cité des 800 logements a été construite en 1986. Les bâtiments sont de moyenne à grande hauteur à savoir cinq ou dix étages réalisés avec un système de voiles en béton armé et des remplissages extérieurs en panneaux préfabriqués en béton armé [115]. Les bâtiments de 5 étages sont composés de 2 blocs séparés par des joints de faible épaisseur avec des dimensions en plan de 22.2m x 18.3m (voir figure 3.17) et une hauteur de 14 m, tandis que ceux de 10 étages sont en un seul bloc de 17.5mx11.6m en plan avec une hauteur de 28m. Ces blocs sont classés respectivement RC2-M et RC2-H dans la période bas-code selon la classification établie dans la méthodologie. Les pourcentages de dommages occasionnés dans cette cité sont donnés dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Pourcentage des dommages de la cité des 800 logements

Cité des 800 Logements					
Niveau de dommages	D1	D2	D3	D4	D5
RC2-M	0	52	8	0	0
	0.00%	86.67%	13.33%	0.00%	0.00%
RC2-H	0	2	3	1	0
	0.00%	33.33%	50.00%	16.67%	0.00%

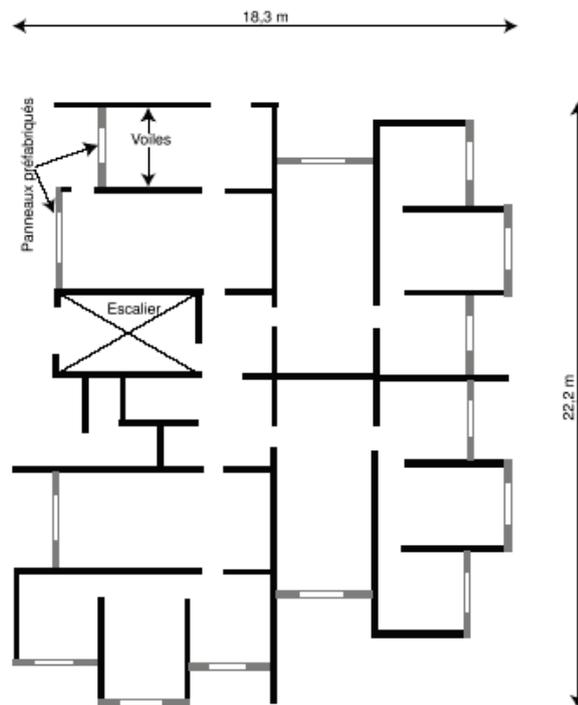


Figure 3.17 : Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la cité des 800 logements [115]

La figure ci-dessous montre la classification des dommages du bâti des deux cités après le séisme du 21.05.2003.

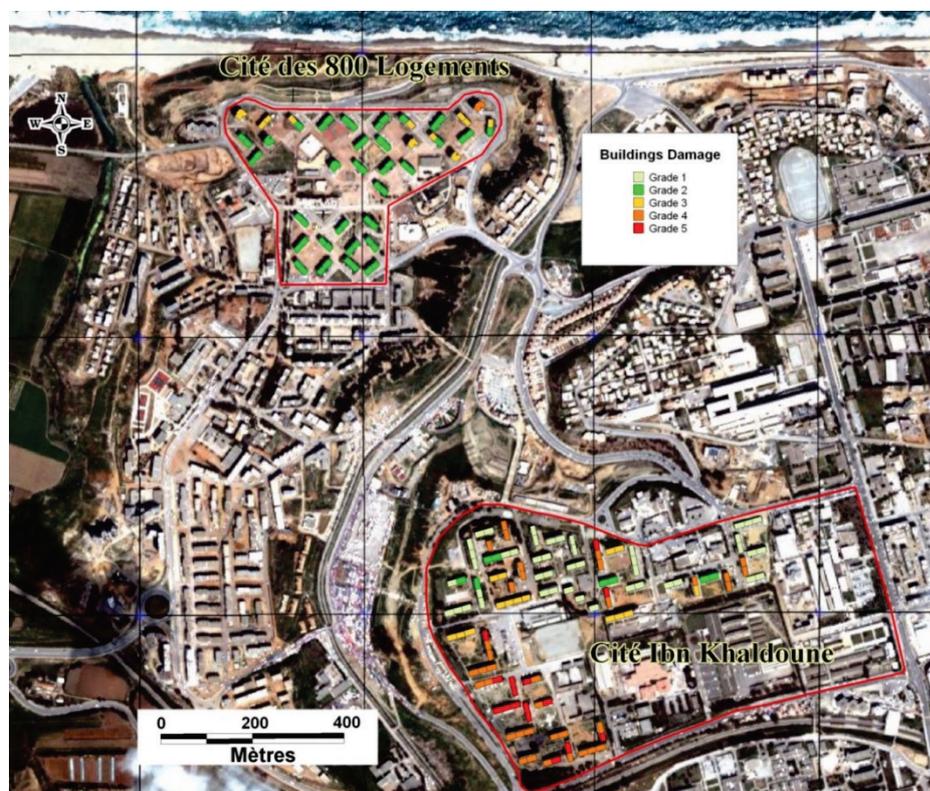


Figure 3.18 : Répartition des dommages dans les deux cités (Ibn Khaldoun et 800 logements)

3.6.2. Estimation des dommages

L'algorithme de calcul des probabilités de dommages, comme décrit dans la section 2.2.1, pour les typologies des deux cités est décrit ci-dessous.

3.6.2.1. Cité Ibn Khaldoun (1200 logements)

- **Etape 1** : Choix de la typologie du bâtiment
 - Précision du type de bâtiment : **RC1-M**
 - Précision du niveau du code parasismique : **Pré-code**
 - Précision du type de comportement structural selon le tableau 2.2 : **C**

- **Etape 2** :

Développement du spectre réponse élastique pour un amortissement de 5% correspondant au site comme expliqué précédemment, puis le convertir dans le format ADRS.

- **Etape 3** : Génération de la courbe de capacité bilinéaire

Les valeurs des points de capacité élastiques (S_{dy} ; S_{ay}) et ultimes (S_{du} ; S_{au}) du type RC1-M Pré-code tirées à partir du tableau B.2 (Appendice B) sont données au Tableau 3.12.

Tableau 3.12 : Valeurs de la courbe de capacité RC1-M Pré-code [22]

Type de structure	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
	S_{de} (cm)	S_{ae} (g)	S_{du} (cm)	S_{au} (g)
RC1-M	0.66	0.083	4.95	0.188

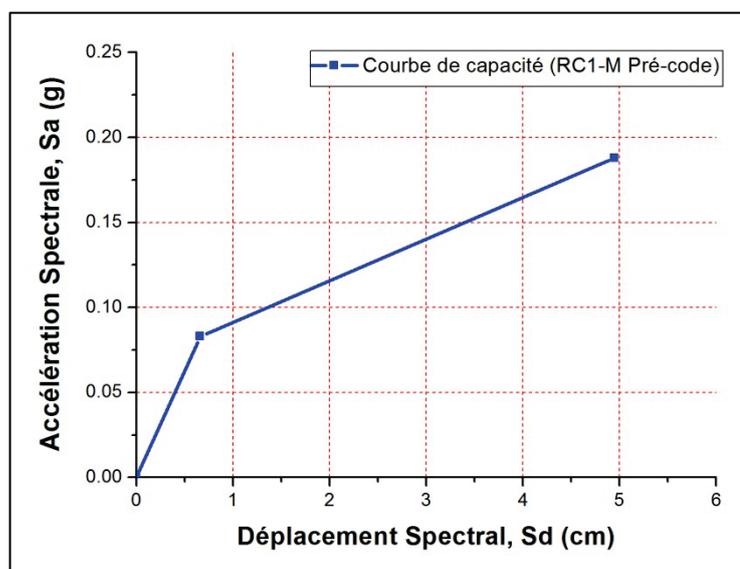


Figure 3.19 : Courbe de capacité bilinéaire du type RC1-M Pré-code (Cité Ibn Khaldoun)

- **Etape 4 : Détermination du point de performance**

Les étapes de calcul du point de performance sont détaillées dans la section 2.2.1.2. Le point de performance calculé à partir de l'intersection de la courbe de capacité et du spectre de réponse réduit est $S_d = 4.92$ cm (voir figure 3.20).

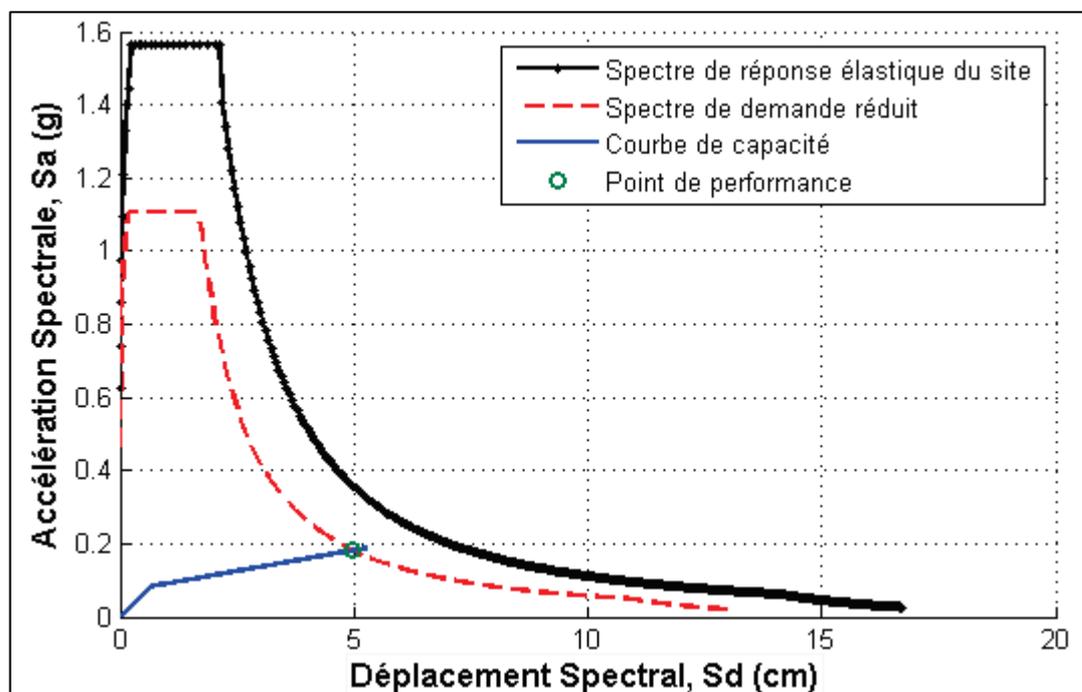


Figure 3.20 : Détermination du point de performance RC1-M Pré-code

- **Etape 5 : Génération des courbes de dommages**

- *Génération de la courbe de fragilité :*

Les paramètres de la courbe de fragilité du type RC1-M Pré-code (voir figure 3.21) tirée à partir du tableau B.1 (Appendice B) sont données au Tableau 3.13.

Tableau 3.13 : Paramètres de la courbe de fragilité du type RC1-M Pré-code [22]

Typologie	Déplacement Spectral S_d (cm)							
	Dommage Léger		Dommage Modéré		Dommage Important		Dommage Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
RC1-M (Pré-code)	1.83	0.90	3.66	0.86	9.14	0.90	21.34	0.96

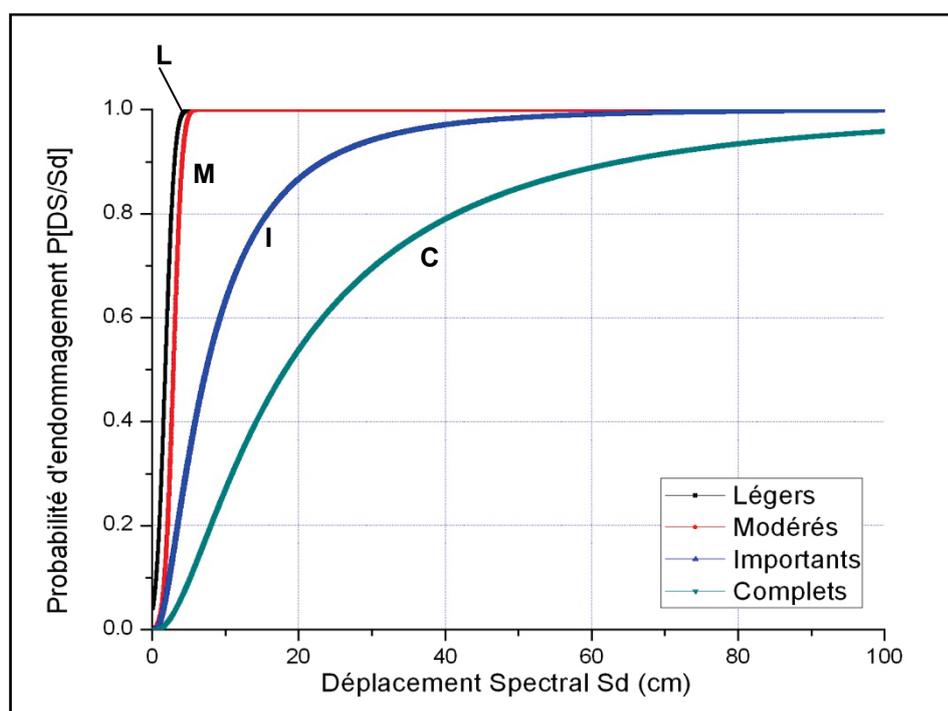


Figure 3.21 : Courbes de fragilité RC1-M Pré-Code (Cité Ibn Khaldoun)

- Calcul des probabilités de dommage cumulatives pour les constructions du type RC1-M

A partir de la courbe de fragilité du type RC1-M Pré-code ci-dessus et pour la valeur du point de performance $S_d = 4.92$ cm, les valeurs des probabilités sont résumées au Tableau 3.14.

Tableau 3.14 : Procédure de calcul des probabilités cumulatives du type RC1-M Pré-code

Niveau de dommage	S_d	$\bar{S}_{d,ds}$	β	$S_d / \bar{S}_{d,ds} = X$	$\ln(x)$	$\ln(x)/\beta = Y$	$\Phi[Y]$
Légers	4.92	1.83	0.9	2.689	0.989	1.099	0.9997
Moyen	4.92	3.66	0.86	1.344	0.296	0.344	0.9286
Important	4.92	9.14	0.9	0.538	-0.619	-0.688	0.2457
Complet	4.92	21.34	0.96	0.231	-1.467	-1.528	0.0632

Tableau 3.15 : Probabilités cumulatives du type RC1-M Pré-code

S_d (cm)	Probabilités cumulatives			
	P[S/Sd]	P[M/Sd]	P[E/Sd]	P[C/Sd]
4.92	0.9997	0.9286	0.2457	0.0632

- **Etape 6** : Calcul des probabilités de dommages discrètes

Probabilité de dommage Complet, $P[C] = P[C|SD] = 0.0632$

Probabilité de dommage Important, $P[E] = P[E|SD] - P[C|SD] = 0.2457 - 0.0632 = 0.1825$

Probabilité de dommage Modéré, $P[M] = P[M|SD] - P[E|SD] = 0.9286 - 0.2457 = 0.6829$

Probabilité de dommage Légers, $P[S] = P[S|SD] - P[M|SD] = 0.9997 - 0.9286 = 0.0711$

Probabilité de dommage Négligeable, $P[N] = 1 - P[S|SD] = 1 - 0.9997 = 0.0003$

- **Etape 7** : Génération de la matrice de probabilité de dommages du type RC1–M (Pré-code)

Tableau 3.16 : Matrice de probabilité de dommages du type RC1–M Pré-code

Matrice de probabilité de dommages				
Type	P[S/Sd]	P[M/Sd]	P[E/Sd]	P[C/Sd]
RC1-M	0.0711	0.6829	0.1825	0.0632

Tableau 3.17 : Pourcentages de probabilités des dommages du type RC1-M Pré-code (Cité Ibn Khaldoun)

Niveau de dommage	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
Pourcentage de dommage	0.03%	7.1%	68.3%	18.3%	6.3%

3.6.2.1. Cité des 800 logements

L'algorithme décrit précédemment est à suivre pour calculer les probabilités de dommages des typologies constituant la cité des 800 logements.

- Types de bâtiments : **RC2-M et RC2-H**
- Précision du niveau du code parasismique : **Bas-code**
- Précision du type de comportement structural selon le tableau 2.2: **B**

Les valeurs des courbes de capacités de ces deux types sont données dans le tableau B.2 (Appendice B). Le tableau 3.18 résume les valeurs des points de performance des types de bâtiments de la cité des 800 logements calculés à partir de l'intersection entre leurs courbes de capacités et leurs spectres de réponses réduits correspondants.

Tableau 3.18 : Valeurs des points de performances des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)

Points de performances		
Typeologie	RC2-M (Bas-code)	RC2-H (Bas-code)
S_d (cm)	4.09	5.80

A partir des courbes de fragilités des types RC2-M et RC2-H (Bas-code), il devient de calculer les probabilités cumulatives de ces deux types. Elles sont données dans le tableau 3.19.

Tableau 3.19 : Probabilités cumulatives des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)

		Probabilités cumulatives			
Typologie	Sd	P[S/Sd]	P[M/Sd]	P[E/Sd]	P[C/Sd]
RC2-M	4.09	0.9491	0.4346	0.1036	0.0214
RC2-H	5.80	0.9809	0.7820	0.1376	0.0243

Il devient alors possible de déduire la matrice de probabilités de dommages des 2 types de bâtiments, voir tableau 3.20.

Tableau 3.20 : Matrice de probabilité de dommages des types RC2-M et RC2-H (Bas-code)

Matrice de probabilité de dommages				
Typologie	P[S/Sd]	P[M/Sd]	P[E/Sd]	P[C/Sd]
RC2-M	0.5145	0.3310	0.0821	0.0214
RC2-H	0.1989	0.6445	0.1132	0.0243

Tableau 3.21 : Pourcentages des probabilités de dommages des types RC2-M et RC2-H (Bas-code) de la Cité des 800 logements

Pourcentages de dommages					
Typologie	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
RC2-M	5.1%	51.5%	33.1%	8.2%	2.1%
RC2-H	1.9%	19.9%	64.5%	11.3%	2.4%

3.6.3. Analyse des dommages simulés et réels

Le tableau 3.22 montre que les pourcentages des dommages réels observés in-situ dans la cité Ibn Khaldoun, lors du séisme de Boumerdès de 2003, sont loin d'être comparables avec ceux estimés théoriquement en utilisant le spectre réel du site. Les résultats de dommages du bâti de cette cité (RC1-M Précode) dépassent de loin les moyennes des dommages (D1 à D5) constatées pour l'ensemble de la typologie RC1 dans la ville de Boumerdès.

Tableau 3.22 : Comparaison des pourcentages des dommages simulés et réels des 2 cités

Typologie	Résultat	Pourcentage des dommages				
		PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
RC1-M	<i>D_{sr} : Simulé</i>	0.03%	7.1%	68.3%	18.3%	6.3%
	<i>D_{obs} : Observé</i>	38.0%	6.6%	12.4%	29.8%	13.2%
RC2-M	<i>D_{sr} : Simulé</i>	5.1%	51.5%	33.1%	8.2%	2.1%
	<i>D_{obs} : Observé</i>	0.0%	86.7%	13.3%	0.0%	0.0%
RC2-H	<i>D_{sr} : Simulé</i>	1.9%	19.9%	64.5%	11.3%	2.4%
	<i>D_{obs} : Observé</i>	0.0%	33.3%	50.0%	16.7%	0.0%

Les résultats de la simulation donnent des pourcentages de dommages modérés (M) élevés, de l'ordre de 68.3%, et des dommages (E) et (C) cumulés de l'ordre de 25%, avec un pourcentage négligeable de constructions non endommagés et environ 7% du bâti légèrement touché (S). Par contre, les pourcentages de dommages réels survenus aux blocs de construction de cette cité sont majoritairement partagés entre ceux n'ayant subi aucun dommage (D1=38%) et ceux sévèrement endommagés et effondrés (D4+D5 = 43%). Le reste du bâti de la cité, à savoir 6.6% et 12.4%, a subi des dommages légers et modérés respectivement. Cet état des lieux est observé à un degré moindre pour l'ensemble du bâti relevant de cette typologie et réalisé avant l'apparition du code parasismique RPA 1981 (RC1-M Pré-code) dans la ville de Boumerdès (voir tableau 3). Cependant, cette situation n'est pas généralisée à l'ensemble des constructions de la ville en système poteaux-poutres avec remplissage en maçonnerie (RC1).

Cet écart dans les résultats simulés et observés de la cité Ibn Khaldoun peut avoir plusieurs causes parmi celles décrites précédemment (voir section 3.5.4). Certes, les pourcentages de dommages simulés se basent sur des courbes de capacité et de fragilité prédéfinies qui tiennent compte du contexte du bâti américain qui présente certaines différences par rapport au bâti Algérien, bien qu'un choix minutieux ait été effectué pour établir une correspondance adéquate entre les typologies des deux contextes. Cependant, il n'en demeure pas moins que d'autres causes ont pu jouer un rôle prépondérant dans l'endommagement catastrophique du bâti de cette cité. Parmi ceux que nous jugeons importants, il est possible de signaler la mauvaise conception des blocs constituant cette cité, du fait que les contreventements par portiques existent seulement dans le sens transversal (voir figure 3.16), tandis que dans l'autre sens il n'existe aucun vrai portique de contreventement. En outre, une des dimensions des poteaux très faible de l'ordre de 20cm

a pu les rendre très vulnérables à l'endommagement et a favorisé le phénomène d'influence de l'orientation des bâtiments sur les dommages (effet de directivité). En effet, les études menées par DUNAND et al. [128] montrent que les bâtiments orientés Nord-Sud (N-S) ont été plus endommagés que ceux orientés Est-Ouest (E-W) en prenant comme orientation le sens longitudinal de ces bâtiments. La figure 3.18 montre que 14 bâtiments (27 blocs) parmi un ensemble de 20 immeubles orientés (N-S) ont été sévèrement touchés, tandis que, sur un total de 34 bâtiments, seulement 9 immeubles (25 blocs) orientés dans la direction (E-W) qui ont souffert de dommages sévères (E et C). Ce phénomène n'est pas la seule cause, car même les bâtiments dans le sens E-W ont été touchés.

Il est possible de signaler aussi la mauvaise qualité du béton utilisé dans certains cas et la mauvaise exécution apparente surtout par insuffisance des armatures transversales dans les poteaux et même leurs absences dans la zone nodale (zone critique) (voir figures 3.22 et 3.23). En outre, des modifications dans la structure de base surtout dans les étages inférieurs (RDC) transformés, à des fins commerciales, en supprimant les murs de remplissage en maçonnerie qui jouent un certain rôle dans le contreventement, et même certains poteaux a aggravé la situation en rendant ces étages souples. Ce sont donc les poteaux qui ont dû relayer et supporter toutes les sollicitations dynamiques horizontales et verticales.

Le phénomène d'effet de site est à écarter d'après les études menées par HELLEL et al. [127] dans cette cité (Zone 3B), comme illustré dans la figure 3.9.

L'étude menée par MESLEM et al. [18], dans le site urbain de la ville de Boumerdès, montre l'influence de l'effet topographique sur la vulnérabilité des blocs de construction de cette cité proche du « Oued Boumerdès » (voir figure 3.3), pour lesquels les dommages restent concentrés dans la partie sud-ouest de la cité longeant les escarpements (voir figure 3.18).

Ces causes parmi d'autres ont pu conduire à ces résultats, sans omettre qu'il y a un pourcentage important de blocs (38%) n'ayant subi aucun dommages et dont la majeure partie (32 blocs sur 46) est orientée Est-Ouest. Pour prospecter d'autres pistes qui puissent donner des explications plausibles du comportement aléatoire des bâtiments endommagés (figures 3.24 et 3.25), des études géotechniques et géophysiques plus poussées dans cette zone seraient recommandées.



Figures 3.22 et 3.23 : Endommagement et destruction de l'extrémité du poteau du fait de l'absence d'armatures transversales dans la zone nodale (zone critique du poteau)



Figures 3.24 et 3.25 : Comportement aléatoire des bâtiments de la cité Ibn Khaldoun

Pour la cité des 800 logements, la comparaison entre les pourcentages des dommages simulés et observés est plutôt acceptable pour les 2 typologies (RC2-M et RC2-H). Les 52 blocs de la cité constituant la typologie RC2-M ne présentent que des dommages légers (D2) à modérés (D3) (86.7% et 13.3% respectivement). Ces résultats sont comparables à ceux estimés théoriquement ($S=51.5\%$ et $M=33.1\%$), où leur cumul avoisine les 85%; les 15% restants sont partagés entre les autres niveaux de dommages. Pour les blocs constituant la 2^{ème} typologie de la cité, malgré leur nombre faible (6 blocs), les pourcentages de dommages sont bien corrélés avec ceux de la simulation, où les pourcentages de dommages observés et simulés des niveaux (S+M) sont de l'ordre de 83.3% et 84.3% respectivement. Ceux du niveau de dommages (E) présentent des valeurs

respectives de 16.7% et 11.3% Cela est en parfaite adéquation avec les résultats trouvés pour l'ensemble du système RC2 dans la ville de Boumerdès. En effet, ces constructions se sont bien comportées, en général, lors du séisme du 21.05.2003, n'engendrant aucun effondrement ni dommages sévères dans les éléments structuraux ou aux façades pour les blocs de moyenne hauteur. Cependant, dans les bâtiments de 10 étages, un mouvement relatif entre les panneaux de façades préfabriqués s'est produit, laissant apparaître des fissures au niveau de leurs jointures (voir figure 3.26), avec des degrés différents selon les bâtiments [115].

Donc, la comparaison faite pour ce système est correcte et illustre les similarités entre les deux contextes Algériens et Américains.



Figure 3.26 : Fissures au niveau de la jointure des panneaux préfabriqués et la structure

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, la méthodologie d'estimation probabiliste des dommages sismiques du bâti en Algérie a été calibrée sur le cas du bâti de la ville de Boumerdès qui a été ébranlée le 21 Mai 2003 par un désastreux séisme d'une magnitude $M_w = 6,8$.

La calibration de la méthodologie a été faite, dans un premier temps, en représentant le signal sismique du séisme de Boumerdès par le spectre de réponse élastique construit à partir des enregistrements accélérométriques obtenus durant le choc principal du séisme. Les résultats de ce scénario en termes de dommages ont été comparés aux

dommages réels recensés sur le site urbain de la ville de Boumerdès touchée par le séisme. Les dommages réels et théoriques sont proches dans la plupart des cas avec des écarts restreints. En outre, les résultats deviennent presque identiques en fusionnant les catégories de dommages 2 (S) et 3 (M).

Les différences dans les résultats peuvent avoir plusieurs causes :

- 1) l'adaptation de courbes de capacité et de vulnérabilité utilisés par la méthodologie HAZUS, développées pour le bâti Américain, aux typologies du bâti Algérien ;
- 2) l'utilisation d'un spectre de réponse construit à partir des enregistrements de la station ST1 en champ libre de Keddara éloignée de 12 Km de la station de Boumerdès, défectueuse lors du choc principal et qui aurait mieux représenté l'excitation sismique à l'origine des dommages ;
- 3) l'hétérogénéité des degrés d'expertise et d'expérience des inspecteurs sur sites et les erreurs qui ont pu être enregistrées dans la classification des dommages des constructions recensées ;
- 4) les caractéristiques intrinsèques du séisme ;
- 5) la position de la ville de Boumerdès dans la zone épiscopentrale (zone de mouvement fort),
- 6) la mauvaise qualité de réalisation des constructions et celles des matériaux utilisés ;
- 7) le non-respect des normes parasismiques de conception et réalisation de structures ;
- 8) l'effet des répliques importantes atteignant une magnitude $M_w = 5.8$ et aggravant le bilan;
- 9) l'effet de l'orientation des constructions par rapport à la faille (effet de directivité avéré) ;
- 10) la présence de beaucoup d'étages souples (RDC) ;
- 11) et l'effet topographique dans certains endroits près des escarpements longeant les oueds traversant la ville, etc.

Ces paramètres ont influencé considérablement les dommages effectifs occasionnés dans le bâti de la ville.

Par ailleurs, il n'est guère facile d'identifier, par simple et rapide inspection visuelle, la catégorie adéquate de dommages. En outre, parfois les dommages se trouvent proches de la limite supérieure ou inférieure d'une catégorie voisine. A cet effet, des améliorations de la fiche d'évaluation des dommages développée, et qui est en vigueur depuis le séisme d'El Asnam (1980), seraient à envisager afin de l'actualiser et apporter des éléments rigoureux de discrimination des catégories de dommages et des cas limites.

Évidemment, une caractérisation générale des conditions géotechniques locales du site devrait être effectuée afin de réaliser une évaluation précise des dommages.

Lorsque les dommages sismiques théoriques sont estimés, sous l'hypothèse que la sollicitation sismique correspond au spectre de réponse du règlement parasismique Algérien en vigueur au moment du séisme de Boumerdès, à savoir le RPA 99, les résultats obtenus montrent une légère surestimation par rapport à l'état réel des dommages post-sismiques. Ce biais peut provenir du fait que le spectre réglementaire est un spectre sécuritaire qui tient compte du contexte du bâti Algérien et de ses caractéristiques. En effet, un ensemble de facteurs est considéré afin de garantir des marges de sécurité acceptables par les règles parasismiques. Cependant, la simulation utilisant le spectre des RPA 99 a été faite dans le but de montrer l'utilité de ce dernier en cas d'absence de spectre propre au site étudié. Il est d'ailleurs montré que les résultats obtenus ainsi peuvent s'avérer acceptables.

Une fois la méthodologie mise au point, testée et calibrée sur un séisme réel en Algérie, elle est implantée dans un code informatique permettant le calcul et la génération automatique des dommages. La plateforme intégrée permet ainsi d'analyser toute zone urbaine sujette au risque sismique en vue d'établir une estimation aussi bien prédictive (scénario sismique) que post-sismique (évaluation rapide des dommages).

Evidemment, la précision des résultats théoriques dépend du procédé et de la pertinence du développement des courbes de capacité et de fragilité reflétant au mieux le contexte du bâti Algérien. De futurs travaux peuvent être entrepris dans la perspective d'affiner les diverses étapes et hypothèses adoptées et ainsi garantir des résultats plus précis grâce à l'outil développé.

CHAPITRE 4 :

PREDICTION DE DOMMAGES POUR DE FUTURS SEISMES EN ALGERIE – APPLICATIONS AU CAS DE DEUX CENTRES URBAINS : CONSTANTINE ET BLIDA

4.1. Introduction

La protection d'une ville vis-à-vis des catastrophes sismiques nécessite, dans un premier temps, de modéliser et d'avoir une prévision théorique des conséquences d'un évènement sismique. Il convient, à cet effet, de prédire les dommages structuraux ainsi que les pertes socio-économiques susceptibles de se produire à l'occurrence d'un séisme. Bien évidemment, il est primordial d'anticiper en prédisant rigoureusement les effets potentiels d'un séisme susceptible de se produire. Les résultats estimés constituent les éléments de base pour préparer judicieusement la gestion d'une potentielle situation critique, d'organiser les interventions des secours, d'anticiper et de prendre les mesures adéquates nécessaires pour réduire la vulnérabilité ainsi que les pertes probables et garantir la résilience urbaine.

De ce fait, il devient nécessaire d'adopter et de simuler les scénarios sismiques potentiels [129] susceptibles d'affecter les zones urbaines sujettes au risque sismique. Les autorités concernées escomptent des estimations et des prédictions rigoureuses des dommages et des pertes afin de s'y préparer et de prendre les mesures appropriées, avant (prévention basée sur les résultats des études de vulnérabilité et d'estimation des dommages sismiques), pendant (développement d'un plan d'intervention et de secours) et après (reconstruction et rétablissement) le séisme.

Dans le présent chapitre, nous mettons en application la méthodologie et les concepts développés et décrits dans les chapitres précédents spécifiques au contexte du bâti existant en Algérie. Cette méthodologie a été validée et ses performances discutées dans le cas du bâti de la ville de Boumerdès touchée par le séisme du 21.05.2003. Elle sera, ici, utilisée pour estimer les dommages pouvant résulter de futurs séismes et affecter les zones urbaines potentiellement exposées au risque sismique.

L'outil d'aide à la décision développé à partir de l'automatisation de la méthodologie d'estimation des dommages sismiques intégré au SIG permet, dorénavant, de quantifier les dommages sismiques dans toute zone urbaine. Les perspectives attendues des simulations consistent à identifier les secteurs susceptibles d'être les plus touchés, et à anticiper le niveau d'alerte à déclencher par les organismes concernés et pouvoir ainsi mobiliser les moyens de secours nécessaires. Les avantages résident dans le gain notable de temps pour les interventions afin de minimiser les pertes en vies humaines. En effet, l'expérience des séismes passés en Algérie tels que ceux de Boumerdès, Tipaza, Mascara, à titre d'exemple, a montré que la mise en place des moyens d'intervention adéquats n'a pu se faire judicieusement qu'au retour des premiers enquêteurs, engendrant des pertes de temps avant de pouvoir secourir les blessés.

A cet effet, nous proposons d'appliquer le concept mis au point pour l'estimation des dommages sismiques probables dans deux grands centres urbains d'Algérie, potentiellement exposés au risque sismique :

- Constantine : Il s'agit d'estimer le risque sismique du patrimoine immobilier de la ville (commune) de Constantine, chef-lieu de la Wilaya de Constantine qui représente la capitale de l'est Algérien, avoisinant 29000 constructions.
- Blida : Il s'agit d'estimer les dommages sismiques du bâti du Grand-Blida composé de 04 communes (Blida, Ouled-Yaïch, Béni-Mered et Bouarfa), sur un patrimoine composé d'environ 46000 unités de constructions.

L'estimation des dommages sismiques dans ces deux zones urbaines sera réalisée en utilisant le spectre de réponse élastique du Règlement Parasismique Algérien en vigueur (RPA99/2003), comme sollicitation sismique.

4.2. Estimation des dommages sismiques du bâti existant de la ville Constantine

4.2.1. Aperçu sur la ville de Constantine

La ville de Constantine est située au centre de l'Est Algérien (voir figure 4.1). Elle s'étend sur un plateau rocailleux à plus de 640 m au-dessus du niveau de la mer. De par sa position stratégique, elle constitue un véritable carrefour d'échanges économiques, sociaux et culturels. Elle abrite une population de 434 360 habitants selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2008 [107] sur un total de 943 112 pour l'ensemble des habitants de la Wilaya.

Elle apparaît ainsi comme étant à forte concentration urbaine puisqu'elle héberge 46 % de la population de la wilaya alors que sa superficie ne représente que 8 % (183 km²) de la surface totale de la wilaya (2297 km²). En comparaison avec la densité de la population à l'échelle de la wilaya (410 hab/km²), la ville de Constantine est marquée par une grande concentration de la population (2374 hab/km²). De ce fait, la ville de Constantine requiert une forte attention dans l'objectif d'en assurer le niveau de protection acceptable vis-à-vis des effets d'un séisme potentiellement désastreux. Il convient de souligner que de telles études de risques seront à mener pour l'ensemble des centres urbains et autres zones. Cependant, nous ne citons que le cas des études bien avancées.

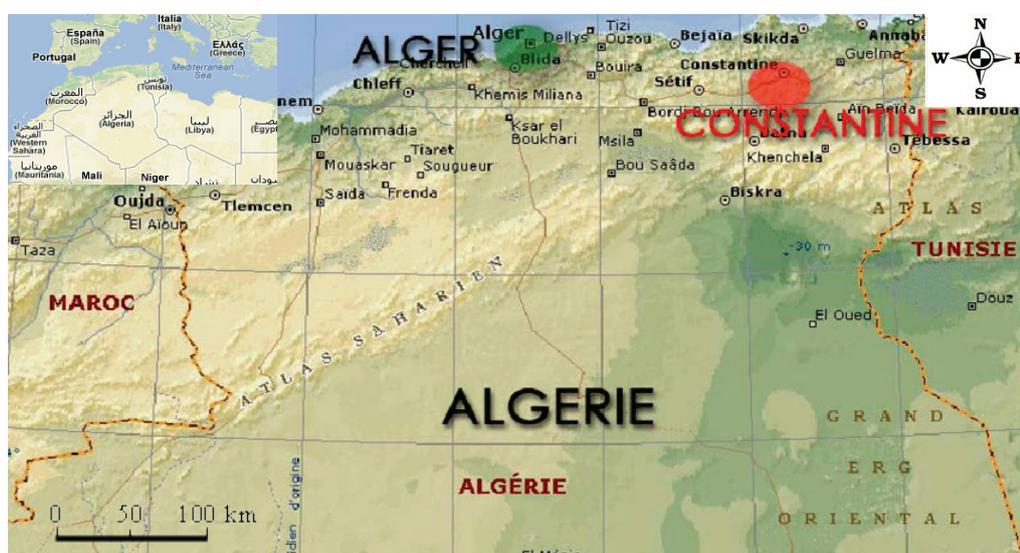


Figure 4.1 : Situation géographique de la ville de Constantine [130]

Malgré les modifications de l'aire de juridiction de la wilaya à chaque découpage administratif, la ville de Constantine a su garder le même statut administratif et le même poids, plus particulièrement dans la région Nord-est du pays.

Au vu de sa situation géographique privilégiée, son poids administratif, économique, scientifique et culturel, en plus d'autres potentialités dont elle dispose, Constantine a toujours connu d'importants flux de population originaire de différentes régions [131].

Constantine est considérée comme une Métropole régionale importante ; l'implantation humaine y est très ancienne et remonte au paléolithique ancien ; mais c'est au 3^{ème} siècle av. J.C. qu'apparaît le nom de CIRTA comme cité des rois Numides [132]. En 203 av. J.C., Massinissa en a fait sa capitale Cirta qui passe sous l'égide romaine

pendant trois siècles. Elle fut détruite en 311 et reconstruite en 313 par Constantin (Empereur Byzantin) dont elle porte le nom depuis [132].

Les Ottomans, à leur tour, s'implantèrent sur la structure territoriale intérieure, devenue pôle Beylical. En 1837, Constantine tombe sous le pouvoir colonial français, mais elle a toujours su garder sa fonction de chef-lieu de Province orientale [132]. Au recouvrement de l'indépendance du pays, Constantine conserve son statut de Grande Métropole de l'Est Algérien aux côtés d'autres grandes villes telles que Annaba.

4.2.2. Evolution urbaine de la ville

La ville de Constantine a connu une évolution urbaine importante durant les différentes périodes de son histoire (voir figure 4.2).

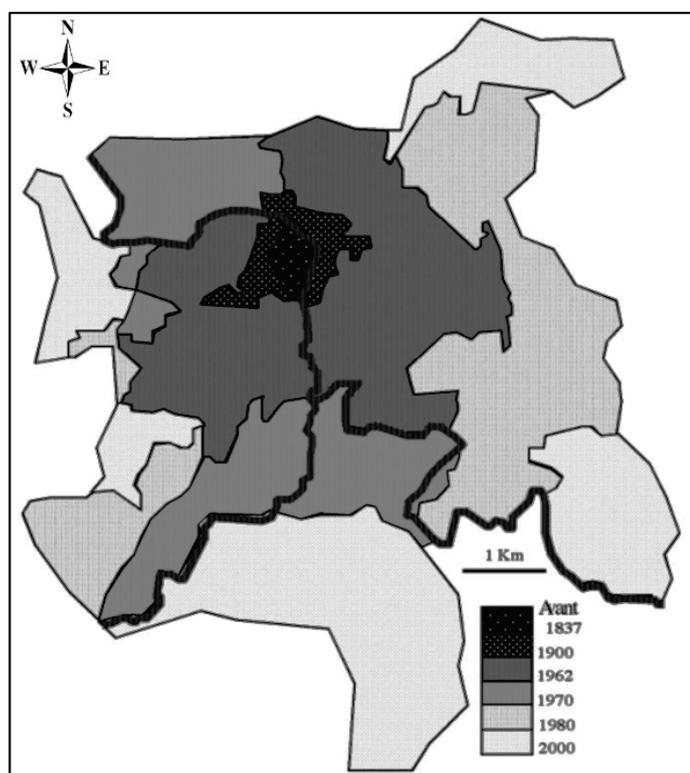


Figure 4.2 : Ville de Constantine. Extension urbaine [131]

Avant la période coloniale, la ville de Constantine se limitait au Rocher avec une superficie ne dépassant pas les 30 ha. La ville était isolée des régions qui l'entourent, sauf à son flanc Ouest, par les gorges profondes de l'oued Rhumel. Elle a vu le passage de plusieurs civilisations dont chacune a été marquée par un développement urbanistique du vieux rocher [131]. Ainsi, il convient de donner un aperçu des diverses périodes d'évolution de l'espace urbain de la ville.

4.2.2.1. Période médiévale sous les Hafsides 1228-1574 [132]

Plusieurs civilisations se sont succédées dans la ville (Fatimides, Almoravides, Almohades, etc.). Cependant, c'est celle des hafsides de 1228 à 1574 qui a laissé le plus de traces. Ils ajoutèrent plusieurs entrées à la ville, ainsi que de nouveaux tracés qui passaient par des constructions importantes telles que des mosquées ou la Casbah. Ces tracés ont servi de repères aux turcs.

4.2.2.2. Période Ottomane 1535-1837 [132]

L'avènement des ottomans est caractérisé par la forte densité urbanistique à partir du tissu relevant de la période Hafside : les quartiers, les mosquées, les placettes et les marchés. Leurs premières interventions concernent la reconstruction du pont d'El Kantara en 1720, dont les pierres venaient de l'amphithéâtre.

La ville était constituée d'un ensemble de maisons, mosquées, palais (palais du Bey), de placettes et marchés, (voir figure 4.3).

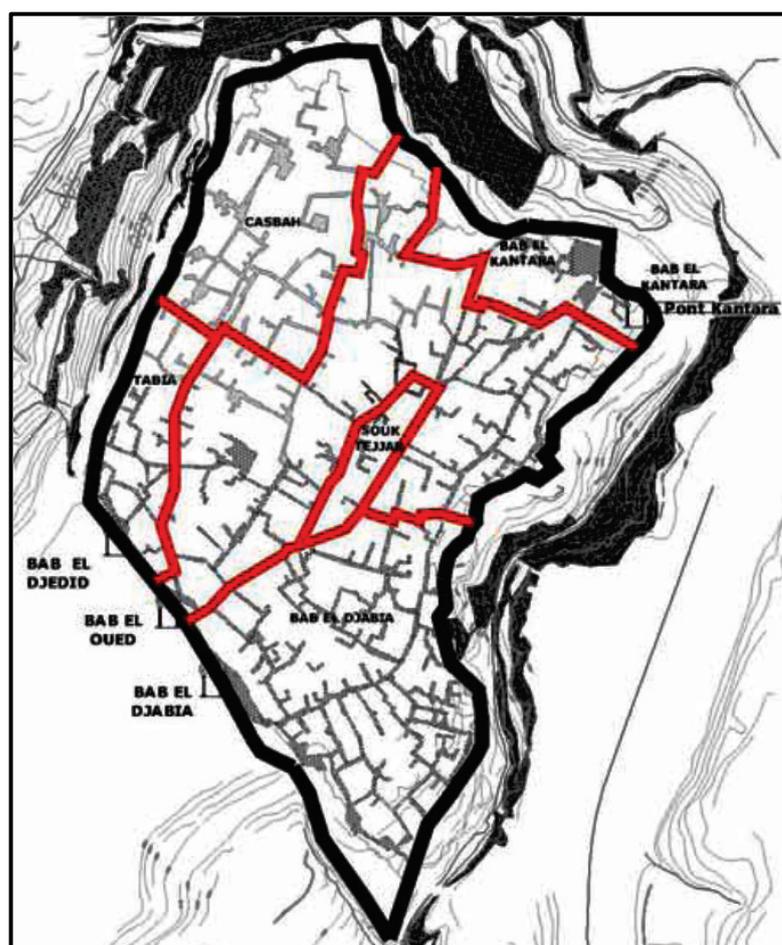


Figure 4.3 : Carte de la ville de Constantine durant l'époque Ottomane [132]

A cette époque, la ville était essentiellement divisée en 4 grands quartiers, à savoir la Casbah au Nord-Est, Tabia au Nord-Ouest, El Kantara au Sud-Est et Souika au Sud. Elle possédait 4 portes : Bab El Oued, Bab El Djedid, Bab El Kantara et Bab El Djabia. Le quartier de la «Casbah» formait un véritable espace clos avec mosquées, magasins et casernes.

4.2.2.3. Période coloniale (1837-1962) [131]

Durant cette période, la ville a connu d'importants bouleversements au niveau du Rocher qui a subi des aménagements notables, ainsi qu'à l'extérieur avec l'apparition de nombreux quartiers, selon les étapes suivantes :

- La première, qui a commencé avec la prise de Constantine en 1837 s'est effectuée en dehors du Rocher sous forme de faubourgs, tels le faubourg de Saint-jean et le Coudiat à l'Ouest et les quartiers d'El-Kantara et du Mansourah à l'Est ;
- Durant une seconde étape (1931 à 1958), l'extension s'est faite avec l'apparition d'autres quartiers comme Sidi Mabrouk au Nord-est. La ville s'est aussi étendue vers la zone Sud-Ouest avec les lotissements de Bellevue et des quartiers à caractère résidentiel ;
- Une troisième étape (après 1959) a donné lieu aux extensions périphériques dans les poches urbaines impropres à l'urbanisation localisées notamment le long des oueds Rhumel et Boumerzoug dans la partie Sud-Est, comme : l'Avenue de Roumanie, Bentellis, Chalet des pins, Les Mûriers, le 4e km. La zone Ouest de la ville a vu l'implantation des quartiers Ameziane et El-Bir, la réalisation des grands immeubles du CILOC ainsi que la cité des platanes.

4.2.2.4. Période post-indépendance [131]

La croissance urbaine de la ville s'est faite lentement durant les premières années du recouvrement de l'indépendance. Le décalage entre une croissance démographique et l'offre de logement a accentué la prolifération de l'habitat précaire et des constructions informelles. En parallèle, les projets de construction de logements entamés pendant les dernières années de la colonisation ont été achevés. Durant cette période, plusieurs étapes ont été réalisées :

- La politique de construction de nouveaux logements urbains s'est matérialisée jusqu'en 1969 par l'application des programmes issus du Plan de Constantine de 1958 à savoir les cités Fadila Saadane, Filali et Benboulaïd, dans la partie Sud-Ouest de la ville ;

- Durant la période qui correspond au premier Plan Quadriennal (1970-1973) où le secteur du logement n'était pas la priorité, la ville a connu la prolifération des bidonvilles et de l'habitat précaire. Cependant, durant cette phase d'urbanisation, la ville a bénéficié d'importantes réalisations dont l'université et le complexe sportif dans la partie Ouest de la ville, la zone industrielle dans la partie Sud-Ouest le long de l'oued Rhummel ;
- La phase 1974-1977 est caractérisée par un urbanisme planifié, dominé par l'implantation des Zones d'Habitations Urbaines Nouvelles (ZHUN). C'est ainsi que se sont créés les quartiers périphériques à l'Est et au Nord de la ville tels que les cités Ziadia, Sakiet Sidi Youcef, Daksi, et celles du 20 août, du 5 juillet, Boudjenana et Boussouf au Sud-Ouest ;
- Durant cette période, la ville de Constantine a bénéficié de 6116 logements sociaux sur un total de 6278 logements programmés ;
- Dans les années 1980, l'urbanisation de Constantine s'est déroulée pratiquement en dehors du périmètre urbain avec le développement des zones nouvelles d'habitat comme Zouaghi au Sud et Bekira au Nord (loin du site initial de Constantine), le lancement de lotissements privés et la multiplication des cités d'habitat précaire.

Par manque de terrains urbanisables dans le périmètre urbain de la ville de Constantine, l'extension s'est déployée, d'abord, vers les petits centres (El-Khroub, Hamma Bouziane, Ain-Smara et Didouche Mourad...) et, par la suite, sur le plateau de Ain El-Bey. Depuis les années 1980, le choix s'est fixé sur la création d'un nouveau pôle de croissance sur le plateau de Ain El Bey avec la naissance de la nouvelle ville de Ali Mendjelli.

Après ce survol historique sur l'évolution du bâti dans la ville, il convient de donner un aperçu sur le contexte sismique de la région.

4.2.3. Sismicité historique de la région Constantinoise

La ville de Constantine, située dans une zone sismique active en Algérie, a connu plusieurs séismes au cours des derniers siècles. Cette sismicité répertoriée montre une activité sismique faible avant 1900, avec des intensités variant entre III et V sur l'échelle MSK [133], tandis que pour la période post 1900, coïncidant avec le début d'instrumentation et des techniques d'enregistrements modernes, au moins 3 séismes modérés à forts ont secoué la région, engendrant des intensités maximales ($I_0 = \text{VIII-IX}$)

sur l'échelle MSK [4, 134]. Le premier s'est produit le 04 août 1908 ($M_s=5.2$), un autre d'une magnitude ($M_s=5.3$) s'est manifesté le 06 août 1947 et plus récemment, le séisme le plus important qui a ébranlé cette ville, est celui du 27 octobre 1985 avec une magnitude ($M_s=5.9$) [6]. Figures 4.4 et 4.5 fournissent les cartes de la sismicité historique et des intensités maximales dans la région Constantinoise [135].

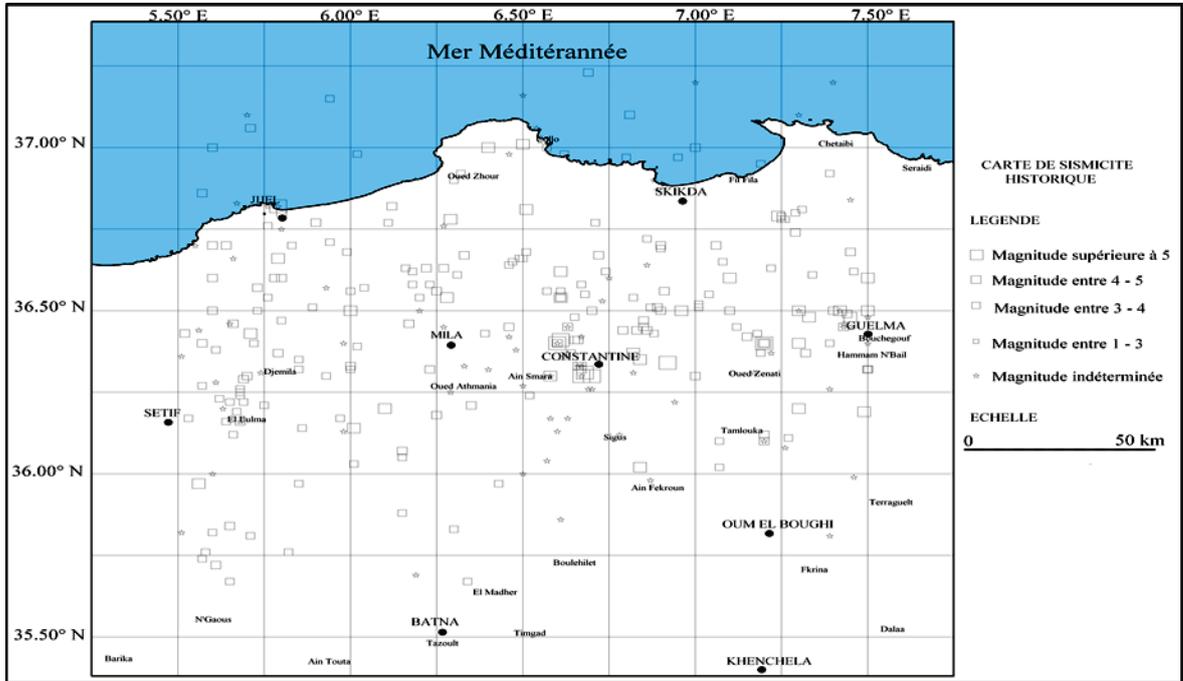


Figure 4.4 : Carte de sismicité historique de la région de Constantine [135]

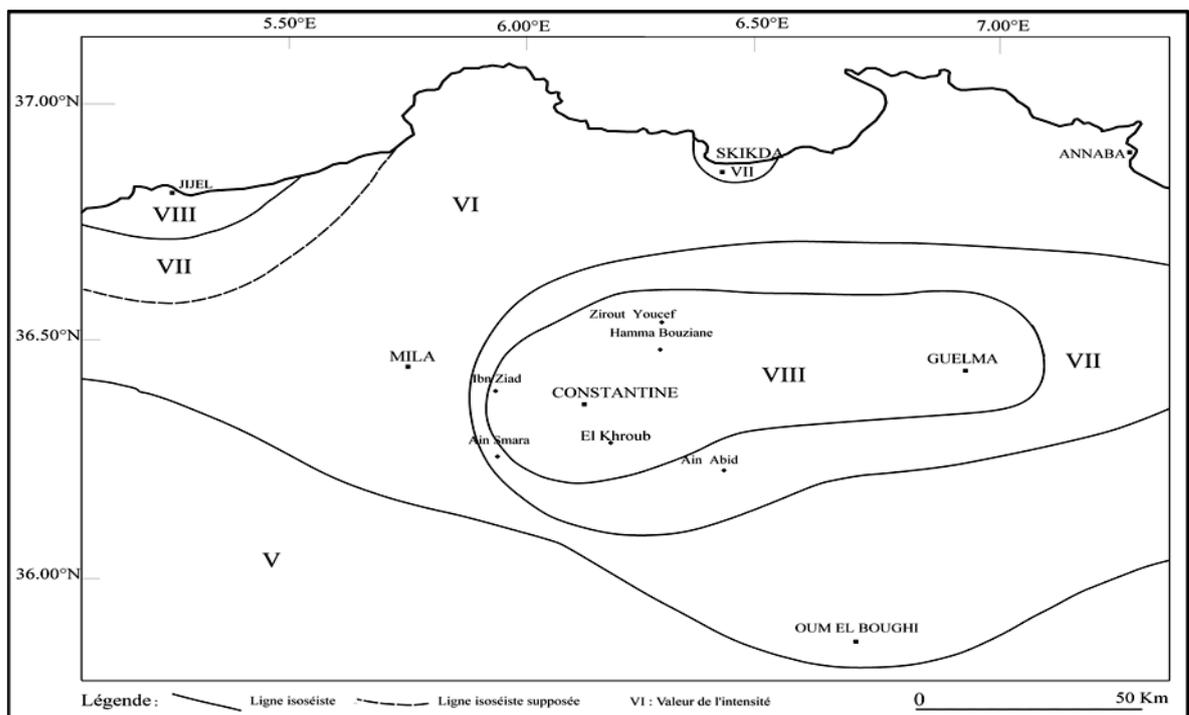


Figure 4.5 : Carte des intensités historiques maximales [135]

4.2.4. Evaluation de l'aléa sismique et sa distribution spatiale dans la zone d'étude

L'évaluation de l'aléa sismique de la zone d'étude constitue une étape principale pour l'estimation des dommages sismiques. En effet, elle permet de quantifier la sismicité de la région et situer les séismes les plus probables à considérer pour le calcul des dommages sismiques.

La région de Constantine est entourée par quatre lignes sources [135, 136] correspondant aux failles actives de Ain-Smara, Sigus, Tamlouka et Front de nappes Constantinois (voir tableau 4.1 et figure 4.6). Les intervalles maximum des magnitudes, donnés dans le tableau 4.1, ont été estimés dans le cadre de l'étude d'aléa sismique de la région de Constantine réalisée par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique (CGS) [136].

Tableau 4.1 : Capacité sismique des failles actives ou supposées actives de la région de Constantine [135]

<i>Faille</i>	<i>Profondeur focale (Km)</i>	<i>Longueur (Km)</i>	<i>Pendage (°)</i>	<i>Mécanisme</i>	<i>Magnitudes maximales (Mw)</i>
Ain Smara (F1)	15	65	85 vers SE 75 vers SE	Décrochement sénestre	7± 0.23
Front de nappes (F2)	15	55	70 vers NW 80 vers NW	Inverse	7± 0.25
Temlouka (F3)	10	25	65 vers NW 75 vers NW	Décrochement sénestre	6.4± 0.23
Sigus (F4)	15	60	--	Inverse	7± 0.25

Parmi ces sources sismiques, la faille d'Ain-Smara, la plus proche de la ville de Constantine, est la mieux identifiée car elle a été étudiée en détails après le séisme du 27 Octobre 1985 [4, 135, 136]. Cette faille comporte quatre segments principaux ou branches SF1-SF4 bien identifiés. Sa branche Nord-Est (SF1), elle-même divisée en 3 sous-segments, a été le siège de ce séisme qui a montré les évidences géologiques de la faille d'Ain Smara ainsi que des ruptures de surface qui ont été observées sur une longueur totale de 4.5 km, apparues dans la région de Kef Tassenga [135, 137].

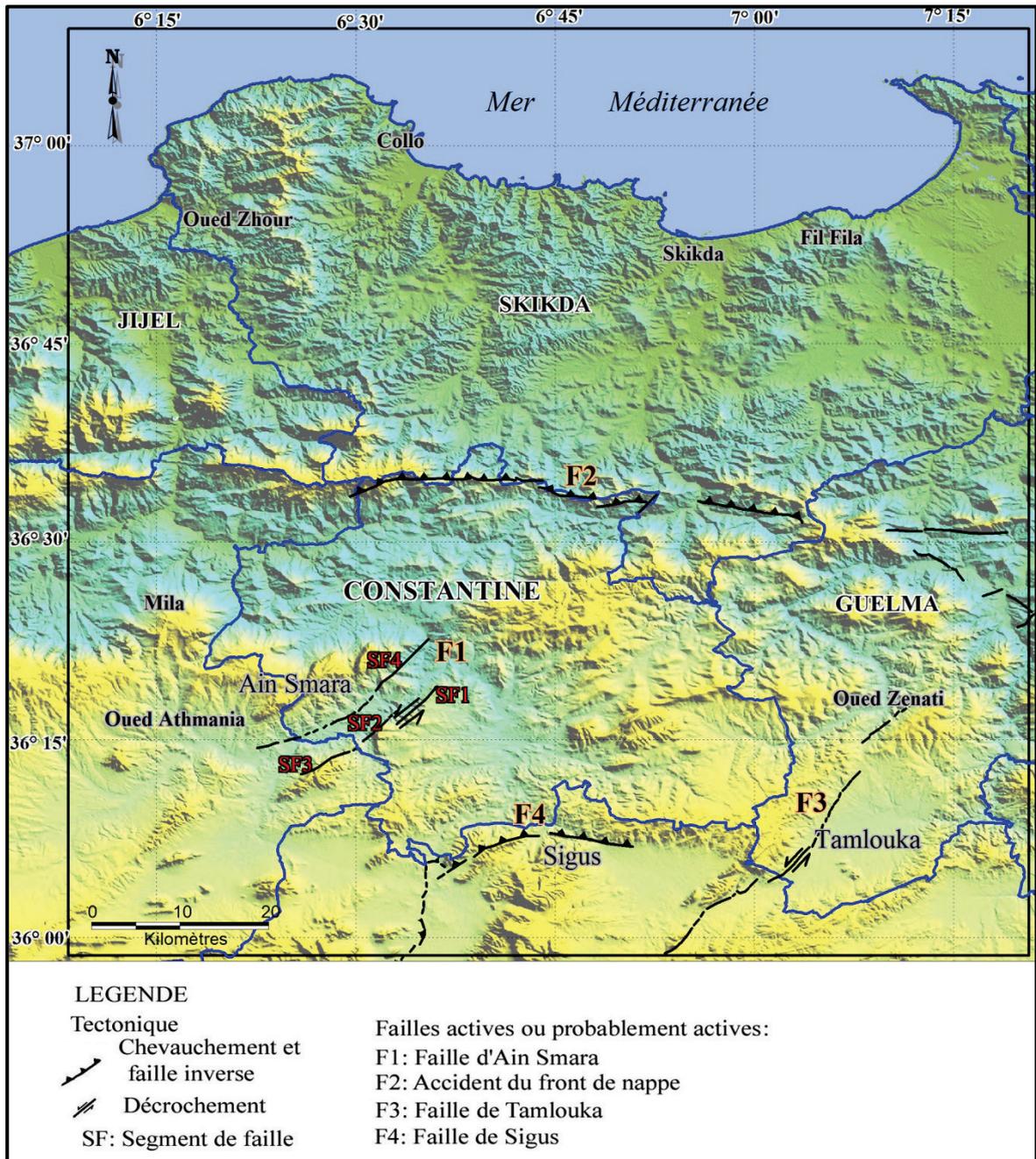


Figure 4.6 : Carte des failles actives dans la région de Constantine [138, 135, 136]

Sur la base des répliques ayant succédé à ce séisme, la partie active de la faille d'Ain-Smara s'est avérée être d'une longueur de 36 kms [4] (voir figure 4.7), tandis que la longueur totale de cette faille est de 65 kms [138]. La plupart des séismes enregistrés dans cette région est liée à cette faille. De ce fait, il apparaît qu'elle constitue la première menace sismique pour la ville de Constantine et de ses environs.

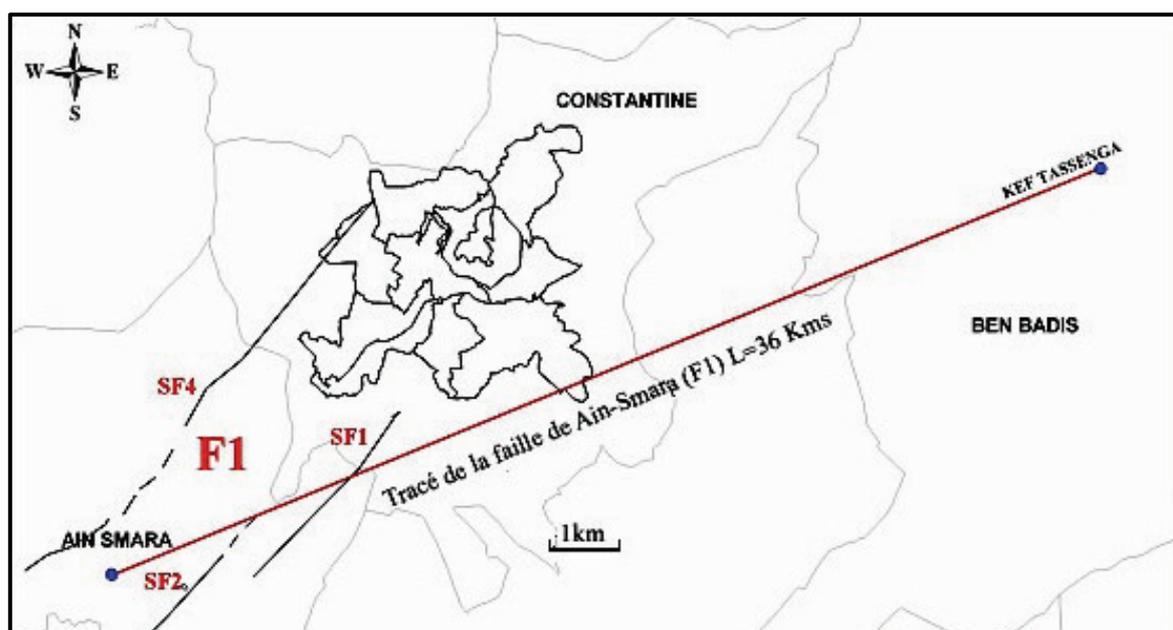


Figure 4.7 : Représentation de la faille d'Ain-Smara et de la ville de Constantine [4] – SF: Segment de faille

4.2.5. Cadre géologique et géotechnique de la ville de Constantine

L'étude géologique de la ville de Constantine et de sa périphérie met en évidence une série litho-stratigraphique variée, composée d'un substratum calcaire et marno-calcaire, d'âge crétacé, de l'unité néritique constantinoise et d'une couverture post-nappes mio-pliocène et quaternaire, argilo-conglomératique (voir figure 4.8). Les formations argilo-conglomératiques néogènes, qui forment la grande partie de la zone étudiée, sont fracturées et extrêmement sensibles en présence d'eau, ce qui les rend propices aux glissements de terrain [139].

D'après les études établies par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), dans le cadre du microzonage sismique de la Wilaya de Constantine [139], l'analyse et l'interprétation des paramètres géotechniques, issus des essais physico-mécaniques réalisés sur les formations géologiques de notre zone d'étude, montre que :

- Le rocher de Constantine présente, dans l'ensemble, de bonnes caractéristiques géotechniques et constitue une assise rocheuse très résistante.
- Les formations mio-pliocènes présentent une très grande hétérogénéité de faciès ; cette hétérogénéité affecte aussi les caractéristiques géotechniques. Elles occupent de grandes étendues et sont constituées de terrains argilo-marneux, relativement peu denses, décomprimées, très sensibles à la présence d'eau (altérées) et par conséquent propices aux phénomènes de mouvements de terrains (glissements de terrains) (voir figure 4.8).

- Les formations quaternaires (alluvions récentes, anciennes et actuelles) des vallées des oueds Rhumel et Boumerzoug ont de faibles caractéristiques géotechniques (remaniés, compressibles, consolidés, etc.) et sont sources de potentiels liquéfaction et tassements.

En ce qui concerne le phénomène de glissement de terrains dans la ville de Constantine, on peut constater, selon la littérature, que le premier glissement identifié dans la ville date de 1910 et ce risque spécifique est devenu plus significatif durant la période 1972 à 1995 [140]. Du fait que ce phénomène menace la stabilité du sol ainsi que les constructions du site urbain de la ville de Constantine en cas de séisme potentiel, la présente étude tient compte de ce phénomène dans le calcul des dommages sismiques du bâti. Plusieurs études et investigations ont été entreprises pour identifier les zones sujettes à ce risque [141, 142, 140, 143 et 139] (voir figure 4.8).

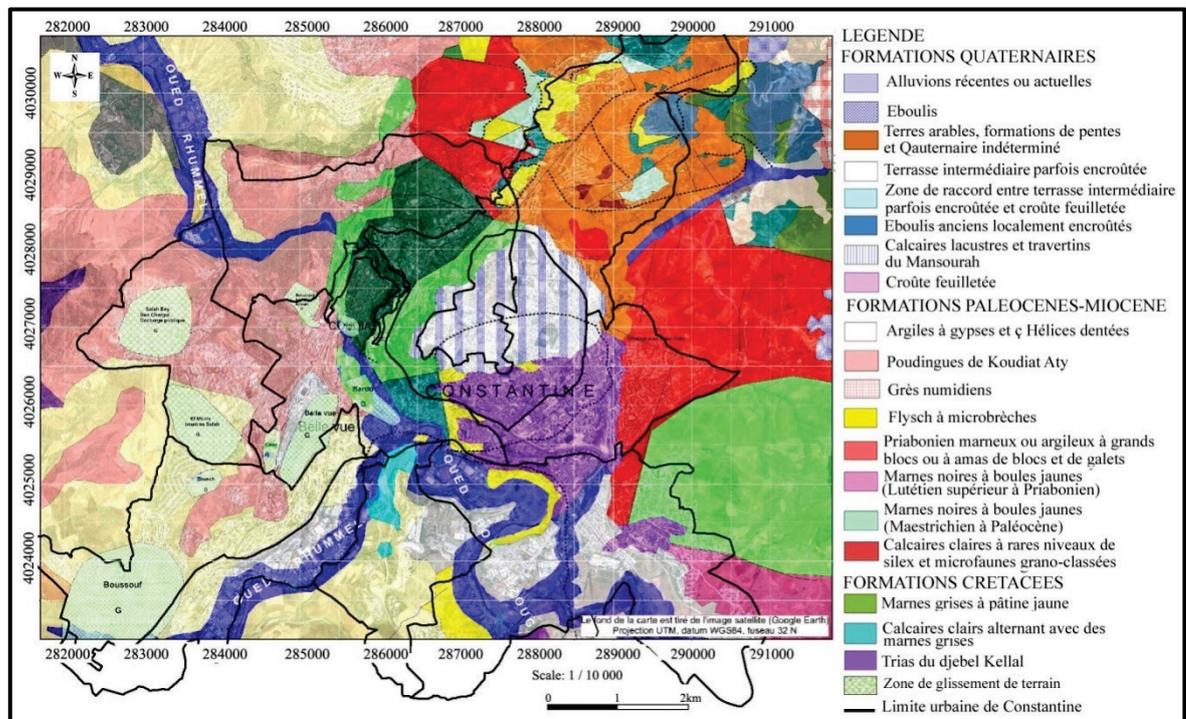


Figure 4.8 : a) carte géologique et géotechnique de la ville de Constantine [139] ; b) Carte des glissements de terrains de la ville de Constantine [139, 140]

En outre, compte tenu des études géophysiques réalisées sur les différents sites de la zone urbaine de la ville de Constantine [139], la classification du sol de chaque zone (district), selon les Règles Parasismiques Algériennes en vigueur (RPA 99/2003) [99], est illustrée dans la figure 4.9.

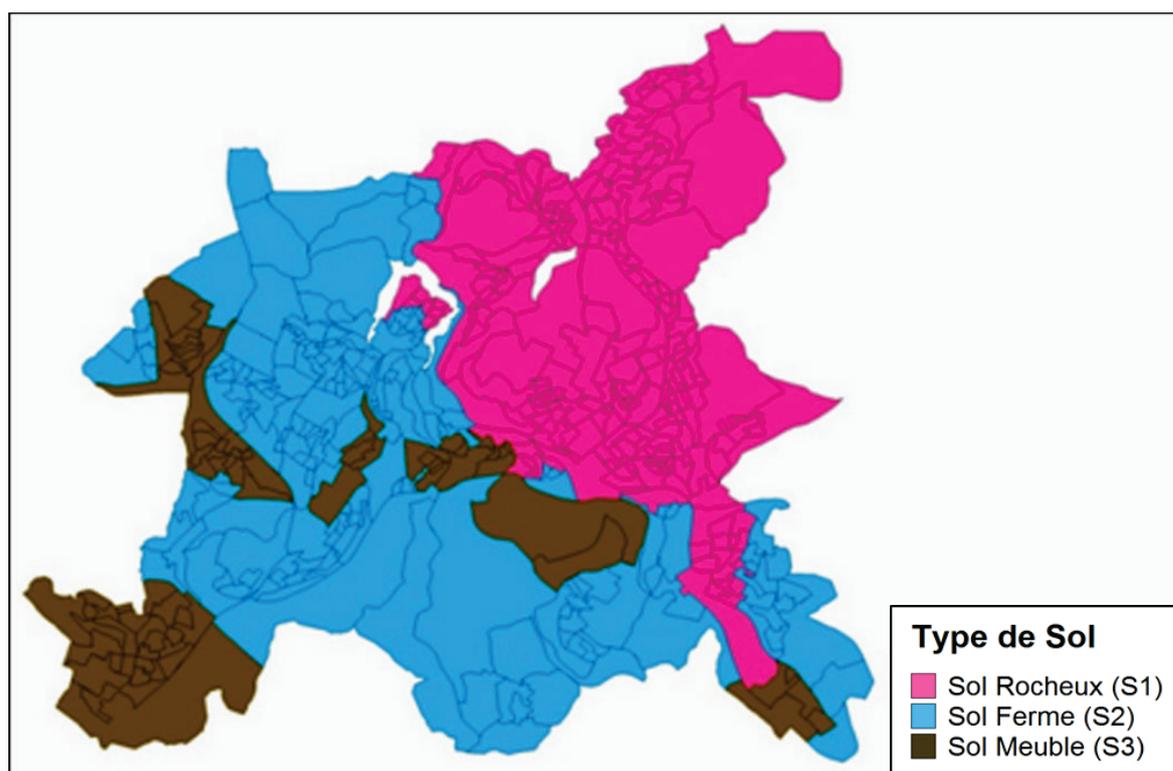


Figure 4.9 : Classification des sols du site urbain de la ville de Constantine selon le RPA 99/2003 [96]

La ville de Constantine, construite sur une topographie accidentée, peut présenter un risque additionnel découlant de l'effet topographique. En effet, ce phénomène peut jouer un rôle important dans la modification et l'amplification du signal sismique. L'amplification sismique due à l'irrégularité topographique est un grand souci pour l'évaluation du risque sismique dans beaucoup de villes construites sur des collines et des pentes [144]. Plusieurs recherches, consacrées à ce sujet, concluent que le mouvement au sol est amplifié au sommet des crêtes et des pentes ou talus [145, 146, 147]. Les techniques numériques et expérimentales appliquées pour explorer l'impact de la topographie sur l'amplification sismique sont limitées aux collines et aux crêtes. L'estimation du réel impact régional de la réponse sismique à l'effet topographique dépend fortement de la précision des données topographiques régionales (Modèle Numérique du Terrain, MNT) [148].

Ainsi, il y a une interaction directe entre l'amplification topographique et le potentiel de stabilité des pentes. Cette amplification est souvent à l'origine des glissements de terrains [146] ; de ce fait, elle doit être prise en considération dans l'analyse des stabilités de pente.

Dans ce cadre, des études spécifiques devraient être réalisées, pour la ville de Constantine, afin de tenir compte de cette interaction complexe. Il convient de préciser que la méthodologie d'estimation des dommages sismiques mise au point dans ce travail peut prendre en considération ce phénomène. Cependant, la présente étude ne tient pas compte des effets topographiques, bien qu'ils puissent engendrer des dommages sismiques plus sévères.

Par ailleurs, le spectre de réponse élastique décrit dans les règles parasismiques algériennes [99], pris comme sollicitation sismique dans le présent chapitre, surestime légèrement les dommages. En effet, il s'avère être un spectre sécuritaire qui accorde la priorité à la sécurité et la protection des personnes et des constructions, bâtiments, car un ensemble de facteurs sont considérés afin de garantir des marges de sécurité acceptables, comme cela a été mis en évidence au chapitre précédent. Ces constatations s'appliquent plus particulièrement au cas des sols S1, S2 et S3 [19], qui correspondent, d'ailleurs, à la classification du sol du site urbain de la ville de Constantine (voir figure 4.9).

4.2.6. Inventaire et mise en place de la base de données du bâti de la ville de Constantine

4.2.6.1. Procédure d'inventaire et mise en place de la base de données du bâti

Afin d'appliquer la méthodologie d'estimation des dommages sismiques au bâti de la ville Constantine, nous avons élaboré la base de données pour ce bâti en procédant à un inventaire extensif des constructions de la zone d'étude, réalisé entre Juin 2009 et Juin 2010 par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique. Cet inventaire a été réalisé en utilisant la fiche d'enquête présentée précédemment (voir section 2.3.2.1). Les données recueillies ont été stockées dans une base de données numérique (voir section 2.3.2.1), afin de lier et digitaliser les entités numérisées de chaque construction aux entités correspondantes sur la plateforme SIG réalisée pour les besoins de l'étude, comme montré dans la figure 2.13.

L'inventaire a concerné initialement 30706 constructions. Cependant, pour l'illustration rapportée dans le présent chapitre de notre étude, nous avons retenu 28486 unités pour réaliser notre base de données. Les 2220 constructions éliminées représentent des chalets (maisons provisoires) faites de panneaux sandwich réalisés après le séisme de 1985 dont la méthodologie ne prend pas en charge ce type de structure. De plus, ils ont été détruits et les locataires relogés juste après l'opération d'inventaire.

4.2.6.2. Analyse et classification du bâti de la ville de Constantine

L'inventaire du bâti et sa classification représentent une étape préliminaire cruciale dans le processus d'estimation des dommages sismiques. Ainsi, la classification de la base de données du bâti réalisée respecte la procédure de la méthodologie développée précédemment (voir sections 2.2.2 et 2.2.3), comme illustré dans le tableau 4.2 et la figure 4.10 ci-dessous.

Tableau 4.2 : Répartition des constructions selon leurs typologies

Typologie	Nombre de constructions par typologie	Nombre de constructions par système de contreventement	Pourcentage (%)
RC1-L	15620	20201	70.9
RC1-M	4565		
RC1-H	16		
RC2-L	220	1801	6.3
RC2-M	1473		
RC2-H	108		
S-L	1568	1574	5.5
S-M	6		
S-H	0		
URM-L	4008	4910	17.3
URM-M	902		

L'analyse de cette base de données du bâti de la ville de Constantine montre que :

- les constructions en maçonnerie représentent un pourcentage d'environ 17%, soit 4910 constructions. Elles sont localisées dans la partie de l'ancienne ville (vieux rocher) ainsi que dans les sites qui l'entourent, essentiellement construites pendant la période coloniale (avant 1962).
- les constructions en béton armé sont prédominantes avec 22002 unités, représentant un peu plus de 77% de l'ensemble du bâti recensé. Elles se répartissent entre portiques et voiles (20201 unités soit 70.9%, et 1801 unités soit 6.3%, respectivement) (voir figure 3.10). Ces systèmes constructifs correspondent au fait que l'extension de la ville extra rocher s'est faite en utilisant cette technique adoptée en Algérie à partir de 1930 [41], ainsi que de la forte urbanisation post-indépendance qui s'étend jusqu'aux extrémités de la ville, essentiellement durant la période "1970-1990".

- les structures en charpente métallique représentent environ 6% (1574 unités). Elles se concentrent surtout dans la zone industrielle sous forme de hangars et de petits bâtiments industriels, ainsi que quelques autres hangars dans des lycées et institutions éducatives. Les structures en bois sont presque inexistantes.

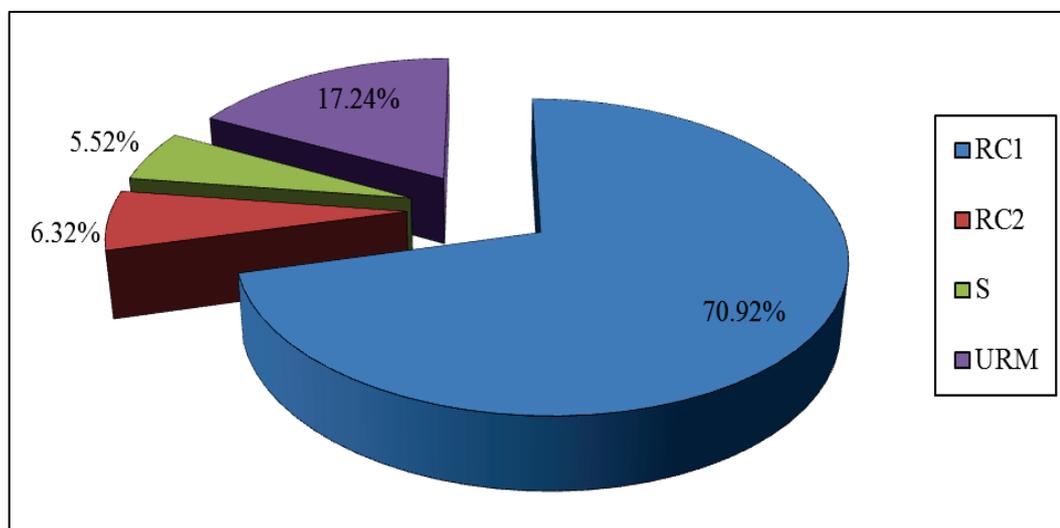


Figure 4.10 : Répartition du bâti de la ville de Constantine selon la structure de contreventement

Le nombre de constructions réalisées entre 1980 et 2003 (13212 unités soit 46.4%) avoisine celui des constructions datant d'avant 1980 (13753 unités soit 48.3%). Cela est essentiellement dû à la forte urbanisation à partir des années quatre-vingt. Ce pourcentage est beaucoup plus faible pour la période post 2003 (1521 ; 5.3%), car cette période est assez courte, entre 2004 et la date du recensement, à laquelle s'ajoute le manque de terrains de construction dans la zone d'étude.

La majeure partie des constructions, soit 89%, est à usage d'habitation. En deuxième position viennent les établissements scolaires et universitaires avec 1068 constructions, représentant 3.68%. Le reste des bâtiments est réparti, respectivement entre ceux à usages hospitalier, commercial, industriel, administratif et socioculturel (mosquées, maisons de jeunes, salles de sport). Ces structures sont réparties en trois catégories selon le nombre d'étages :

- la majeure partie, soit environ 75%, est de basse hauteur (1 à 3 étages) ;
- les constructions de moyenne hauteur (4 à 7 étages) occupent plus de 24% de l'ensemble du bâti de la ville de Constantine ;

- les constructions de grande hauteur (8 étages et plus) dont le nombre est faible (124 unités soit 0.44%) représentent les immeubles d'habitations.

4.2.7. Estimation des dommages sismiques du bâti

4.2.7.1. Effet de site et accélération sismique

Dans le présent travail, l'estimation des dommages sismiques du bâti pour la ville de Constantine a été réalisée en considérant la faille d'Ain-Smara comme source sismique défavorable (voir figure 4.7). Le choix de cette faille, comme expliqué précédemment, est qu'elle soit la plus proche du site urbain de la ville de Constantine et la plus active, constituant ainsi la plus importante menace sismique pour cette zone [96].

L'estimation de l'accélération maximale du sol (PGA) au rocher a été établie en utilisant la loi d'atténuation d'AMBRASEYS et al. [120] représentée par l'équation 3.3 (voir section 3.5.1), avec l'hypothèse d'une magnitude $M_w=7$ et une distance épacentrale moyenne de 4 kms.

Par conséquent, la valeur moyenne de l'accélération maximum du sol au rocher estimée dans la ville de Constantine est de **0.45g**.

Du fait de l'absence d'études pouvant quantifier les effets de sites (amplification du sol) dans la ville de Constantine, cette valeur d'accélération ($A=0.45$) sera prise pour toute la zone d'étude et pour tous les types de sol.

4.2.7.2. Définition du spectre de réponse du site

La prédiction des dommages sismiques du bâti de la ville de Constantine est réalisée en adoptant, comme signal sismique, le spectre de réponse élastique ($\xi = 5\%$) réglementaire adopté par les Règles Parasismiques Algériennes en vigueur [99], donné par la formulation 4.1 (voir section 2.2.1).

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \frac{Q}{R} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases} \quad (4.1)$$

Où, A représente l'accélération maximale du site au rocher ($A=0.45g$).

Le code informatique développé et présenté, au chapitre 2, génère automatiquement les spectres de réponses élastiques ($\xi=5\%$) de la zone d'étude sous format ADRS. Pour ce faire, il est tenu compte des diverses classes du sol, illustrées dans la figure 4.9, (voir tableau 3.6) ainsi que de la valeur d'accélération calculée pour le site au rocher ($A=0.45g$).

4.2.7.3. Calcul et génération des cartes de dommages sismiques sur SIG

Pour le scénario sismique considéré, 28486 constructions sont considérées et classées selon les typologies définies dans la méthodologie (voir tableau 4.2).

Le calcul et la génération des cartes de dommages sismiques sur plateforme SIG du bâti de la ville de Constantine sont réalisés automatiquement par le code informatique dédié. Les résultats de ce scénario sismique sont illustrés dans les tableaux 4.3 et 4.4 ainsi que les figures 4.11 et 4.12.

Tableau 4.3 : Probabilités de dommages par type et par catégorie de dommages

Type	Probabilité de dommages (%)				
	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
RC1	2.8	18.5	56.3	17.1	5.3
RC2	0.2	28.3	52.3	14.5	4.7
S	0.1	18.5	57.3	17.6	6.5
URM	0.0	0.4	42.4	27.7	29.5

Tableau 4.4 : Probabilités de dommages selon les périodes de construction réglementaires

Période	Probabilité de dommages (%)				
	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
Pré-Code	0.2	2.3	58.5	24.0	15.0
Bas-Code	4.1	32.2	42.5%	12.9	8.3
Code-Modéré	2.0	16.1	46.1%	23.9	11.9
Haut-Code	0.1	13.1	63.4	20.7	2.7

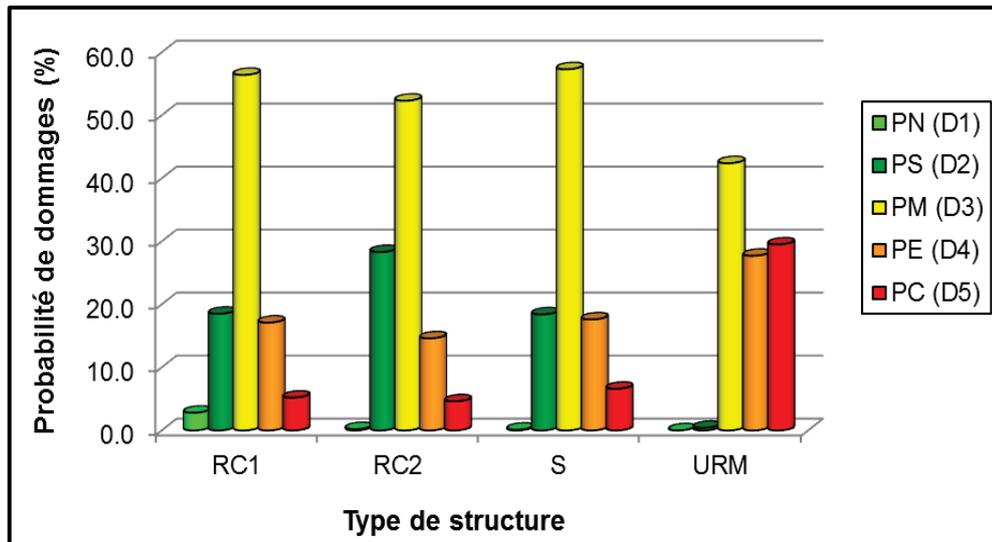


Figure 4.11 : Dommages estimés pour les constructions de la ville de Constantine selon le type structurel

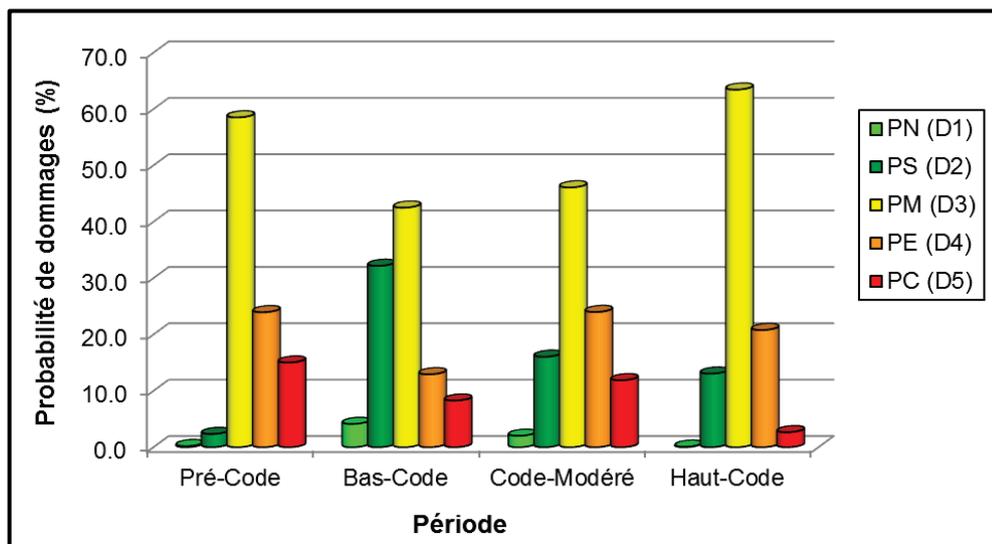


Figure 4.12 : Dommages estimés pour le bâti de la ville de Constantine selon le règlement en vigueur lors de sa construction

Les dommages sismiques obtenus pour le site urbain de la ville de Constantine sont donnés à titre indicatif. La distribution spatiale de ces dommages est illustrée, sur la carte donnée en figure 4.13, pour chaque subdivision urbaine. En fait, la ville a été subdivisée en 10 secteurs regroupant 496 districts, en respectant le découpage adopté durant le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2008 [107]. Les probabilités de dommages sismiques dans les 10 secteurs ainsi que le taux d'endommagement calculé en considérant uniquement les catégories de dommages "Important (E)" et "Sévère (C)" sont donnés dans le tableau 4.5. Les cartes de dommages sur SIG correspondantes, montrées par

les figures 4.13 et 4.14 sont générées automatiquement par le code informatique afin d'identifier les districts pouvant souffrir les dommages les plus graves ainsi que les secteurs ayant les taux de dommages les plus élevés (D4 et D5).

Tableau 4.5 : Probabilités de dommages de chaque secteur de la ville de Constantine

Catégorie de dommage Nom du secteur	N (D1) (%)	S (D2) (%)	M (D3) (%)	E (D4) (%)	C (D5) (%)	Taux de dommages cumulés "D4 et D5" (%)
Sidi M'cid	3.8	24.3	47.8	16.2	7.9	24.1
Martyrs	2.2	16.2	55.1	18.7	7.8	26.5
Boussouf	0.5	21.3	55.5	17.3	5.4	22.7
Rocher-vieille ville	0.7	5.6	53.2	23.7	16.8	40.5
Université	0.8	8.9	64.2	19.5	6.6	26.1
Djebel el Ouahch	2.7	21.0	57.0	14.6	4.7	19.3
El Mansourah-SMK	1.6	11.5	51.8	20.7	14.4	35.1
Daksi	1.2	9.8	59.9	19.7	9.4	29.1
Gammass	39	25.6	48.9	15.6	6.0	21.6
Zone Industrielle	2.1	20.9	52.2	18.0	6.8	24.8
Toute la ville	2.0	16.0	53.7	18.8	9.5	28.3

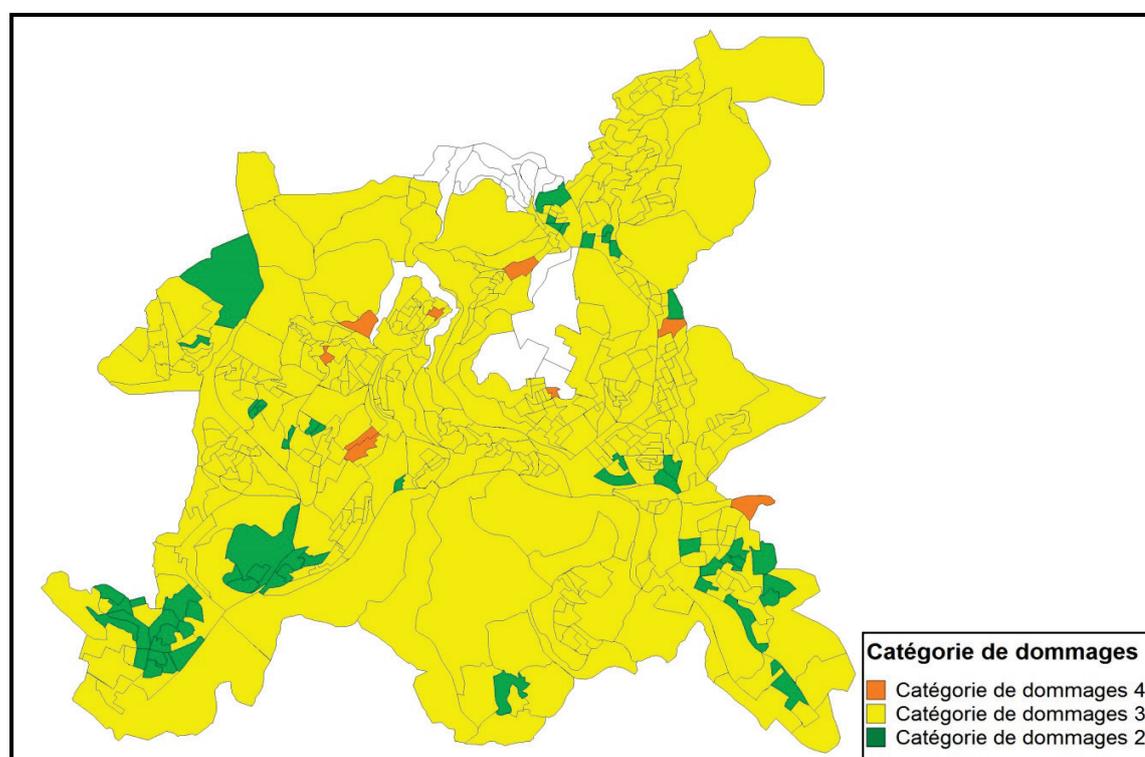


Figure 4.13 : Classification des districts de la ville de Constantine selon le degré de dommages moyen prépondérant

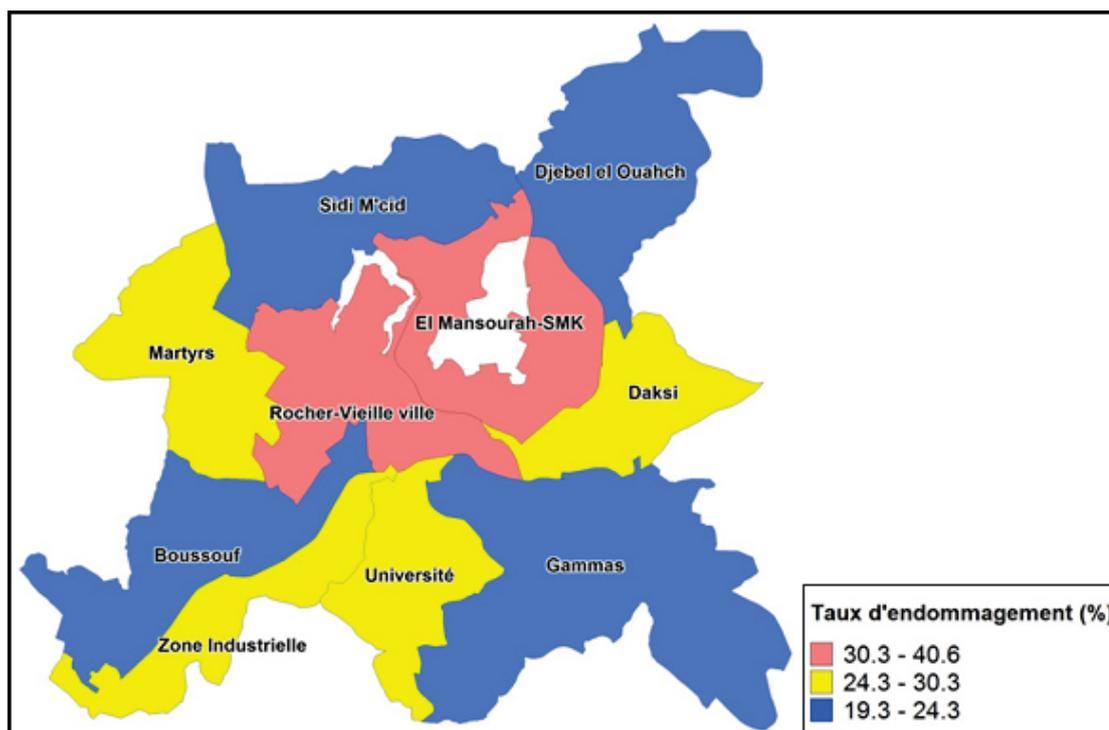


Figure 4.14 : Taux d'endommagement par secteur de la ville de Constantine

4.2.7.4. Analyse des dommages et discussion

Les résultats de ce scénario sismique du site urbain de la ville de Constantine font ressortir que le taux d'endommagement probable avoisine les 28% pour toute la zone étudiée en termes de bâti

Les dommages les plus élevés sont concentrés essentiellement dans le secteur de la vieille ville du côté des districts de la Casbah, Coudiat et Belle Vue ainsi que dans le secteur d'EL Mansourah-Sidi Mabrouk, où il y a une concentration importante en population et de vieux bâti. Ces dommages sont également dus aux conditions défavorables du sol en plus du risque de glissement de terrains dans certains endroits. Ces conditions peuvent modifier la nature du sol de ces secteurs, dont ceux des martyrs, Boussouf, université, zone industrielle et la partie urbanisée de Sidi-M'cid où un pourcentage d'endommagement probable significatif peut être enregistré.

Cette simulation des dommages sismiques probables du bâti et les cartes de dommages générées fournissent une évaluation prédictive des dommages attendus en cas d'occurrence d'un séisme potentiel proche de la ville de Constantine. Ces prévisions théoriques sont importantes pour l'élaboration d'un plan de gestion de secours approprié. Elles peuvent également être utiles aux autorités dans les premières heures post événement sismique afin de focaliser et consacrer les principaux efforts aux zones identifiées comme étant potentiellement les plus affectées.

4.3. Estimation des dommages sismiques du bâti existant : cas du Grand-Blida

4.3.1. Aperçu sur le Grand-Blida

Le Grand-Blida, constitué des quatre communes de Blida, Ouled-Yaïch, Béni-Mered et Bouarfa, représente la plus grande conurbation de la Wilaya de Blida (voir figure 4.15), située au Nord Centre de l'Algérie, il s'étend sur la plaine de la Mitidja à plus de 260 m au-dessus du niveau de la mer.

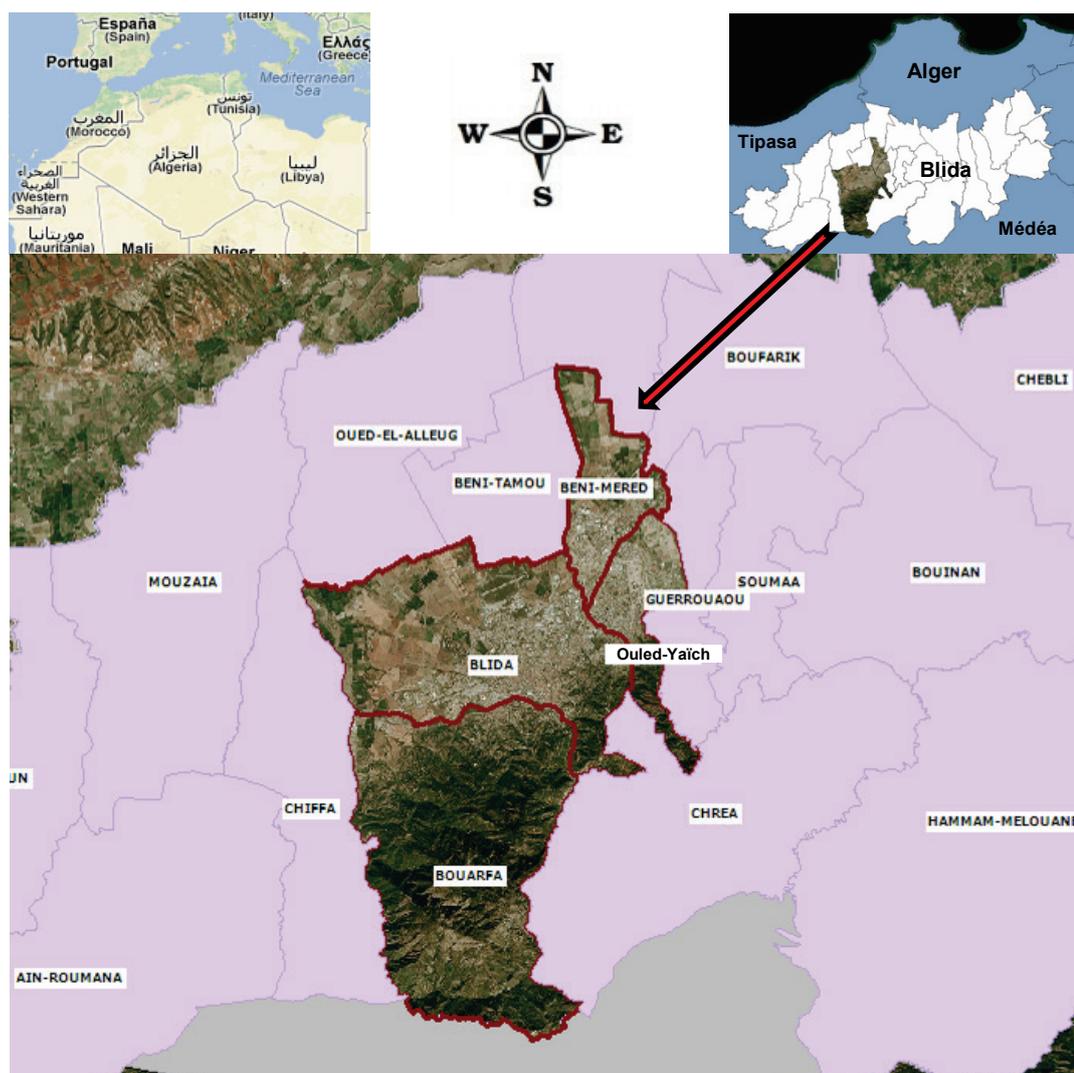


Figure 4.15 : Situation géographique du Grand-Blida «communes : Blida, Ouled-Yaïch, Beni-Mered et Bouarfa»

Le Grand Blida abrite une population de 321 485 habitants sur un ensemble de 1 002 935 habitants pour toute la wilaya, soit 32% de l'ensemble de la population de la Wilaya de Blida [107].

En comparaison avec la densité de population à l'échelle de la wilaya (720.36 hab/km²), le Grand Blida est marqué par une grande concentration de population (1390.21 hab/km²).

Malgré les modifications et évolutions de la wilaya à chaque découpage administratif, la ville de Blida a gardé le même statut administratif et le même poids, plus particulièrement le Grand Blida.

Au vu de sa situation géographique privilégiée, Blida constitue un carrefour d'échange et de liaison entre l'Ouest et le Sud du pays avec Alger la capitale. Elle représente un pôle administratif, militaire, économique et scientifique important, en plus d'autres potentialités dont elle dispose. Pour cela, Blida a toujours connu d'importants flux de population originaire de différentes régions du pays.

4.3.2. Historique du Grand-Blida

4.3.2.1. Origine de la ville de Blida

La création de Blida remonte à la première moitié du XVI^{ème} siècle. D'après le COLONEL TRUMELET [149], avant sa création dans le territoire actuel de la ville n'existaient que deux petits villages (Hadjer Sidi Ali et Ouled-Soltane) issus des tribus berbères environnantes, dont les plus importantes d'entre elles étaient les Beni-Khelil dans la plaine (au Nord) et les Béni-Salah dans la montagne (au sud).

Blida a été initialement nommée El-Boulaida (petite ville) en 1535 par le marabout Sidi Ahmed El Kébir venu d'Andalousie en 1519, fils de « Abd El-Qaoui » sultan à cette époque de la région de Tiaret, au confluent de l'oued Tabèrkachent appelé aujourd'hui Oued Sidi El Kébir. En 1533, elle accueillit les populations musulmanes d'Andalousie, chassées d'Espagne à l'avènement de la Reconquista, qui s'installèrent à Châabet ar-Romane (ravin des grenades) au sud du village de Ouled-Soltane (site du futur Blida) avec l'autorisation du régime ottoman de l'époque, représenté par le pacha d'Alger Kheir al-Dîne, dit Barberousse. Avec ces réfugiés et les autochtones, vu sa fine expérience, il a introduit la technique de l'irrigation, la culture des vergers et la maîtrise des torrents descendus de l'Atlas Blidéen tout proche des gorges de la Chiffa. Blida fut une ville garnison représentant le pouvoir turc dans la plaine de la Mitidja et un relais important entre Alger et le Titteri.

La première installation urbaine réalisée était la mosquée de Sidi El-Kébir qui existe encore. Par la suite, d'autres mosquées furent construites, ainsi qu'un certain nombre de bâtiments administratifs dont la Houkouma où le gouverneur turc rendait la justice, et installa le siège du cadî, des bureaux, etc.

Son site, en position de commandement au débouché du plus important axe de communication Nord - Sud a rapidement conféré à la cité une importance stratégique majeure. Sa région, la plus propice à l'agriculture de tout le nord de l'Algérie actuelle a favorisé le développement d'une agriculture prospère. A cette époque, El-Blida (petite ville en arabe) est ceinte par un rempart, composé de murs en pisé et des murs aveugles des maisons périphériques [150] percé de 7 portes (voir figure 4.16) [151].

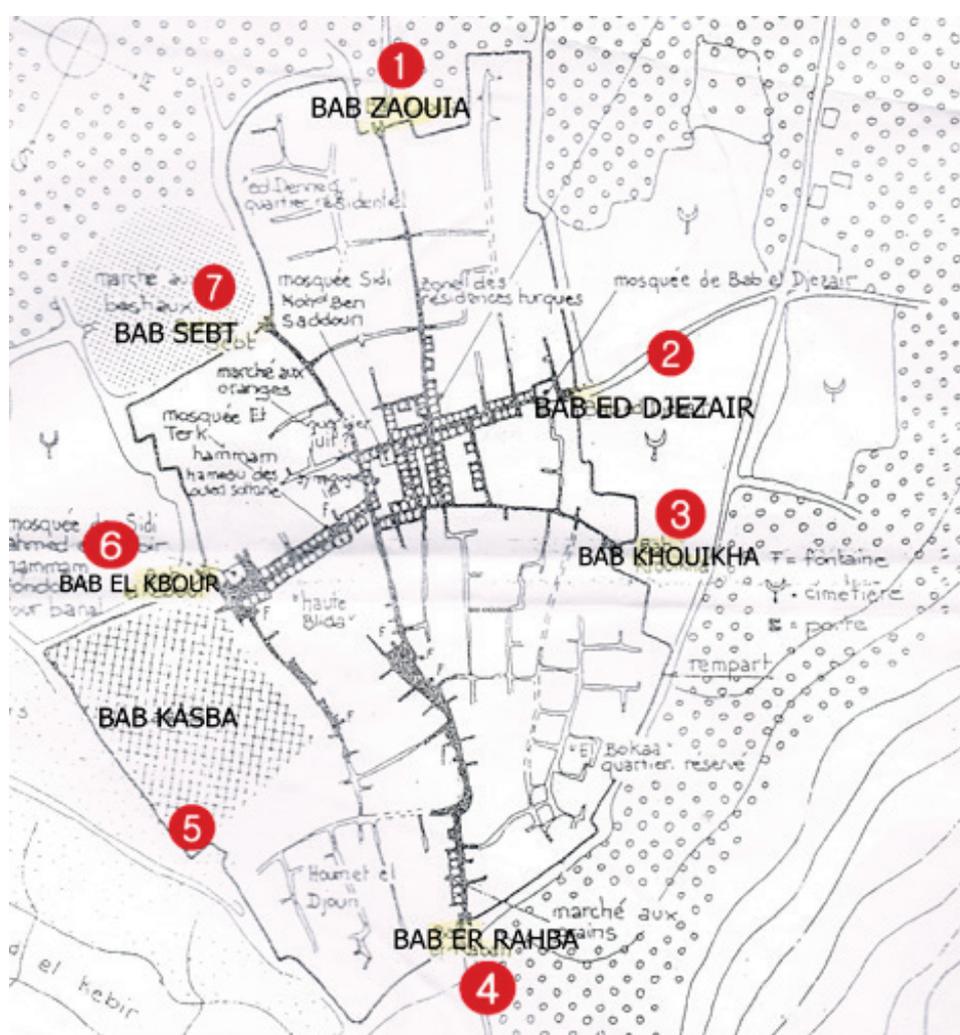


Figure 4.16 : a). Plan de la ville dans la période précoloniale [152] ; b). Sept portes de la ville de Blida [151]

4.3.2.2. Aperçu sur Bouarfa et Ouled-Yaïch et Béni-Mered

Avant la période coloniale Française, les autres sites de l'actuel Grand-Blida n'étaient que de petits villages. Le plus ancien parmi ces hameaux est « Bou-Arfa » qui tire son nom de l'oued à sa proximité, créé et habité bien avant l'époque turque. Il est situé en face de Blida, mais de l'autre côté de l'oued el-Kebir et devint chef-lieu de l'actuel commune en 1956. Le village d'Ouled-Yaïch, situé dans la plaine, mais tout près des monts de l'Atlas, a été habité par la tribu Yaïch installée dans ce site par Sid-Ahmed El-Kebir. Puis la création officielle du village a été faite durant la période coloniale, le 12 septembre 1844 par le comte Guyot Directeur de la colonisation [153], l'administration coloniale ayant créé à 500 m plus au sud le village de Dalmatie. Ses activités sont purement agricoles. Le découpage administratif de 1984 donna le statut de Commune à Ouled-Yaïch. Il en est de même pour Béni-Mered qui, avant la colonisation, était un petit village à vocation purement agricole, puis devint chef-lieu de commune en 1873 et donna lieu à la réalisation d'importantes installations militaires. Elle fût rattachée, en 1963, à la commune de Blida avant de prendre le statut de commune en 1984.

4.3.3. Survol de l'évolution urbaine du Grand-Blida

Initialement, la ville fut construite sur le cône de déjection de l'oued *El Kebir*, en retrait de la plaine inondable, sur un terrain sec et perméable, propice à la construction. C'est cette caractéristique qui a favorisé le développement de la ville en forme d'éventail [150].

4.3.3.1. La période Ottomane (1535-1830)

Après l'installation du marabout Sidi-Ahmed El Kébir près de l'Oued Taberkachent, dans les hauteurs de l'actuel endroit portant son nom, avec la construction de sa Zaouia et après l'arrivée des populations chassées d'Espagne, en 1535, la ville a érigé des bases sur le cône de déjection de l'oued *El Kebir*, en retrait de la plaine inondable, sur un terrain sec et perméable, propice à la construction, ayant dévié le cours de l'Oued du Nord à l'ouest et en utilisant astucieusement la pente pour concevoir des canaux d'irrigation (bombement du cône de déjection), qui devinrent les axes structurants des voies. La ville en éventail s'est étendue vers le Nord [150], avec l'apparition du premier rempart de 3 à 4 m de haut et les premières portes: Bab Errahba, Bab El Sebt, Bab Khouikha, les cimetières et les marchés à l'extérieur du rempart. Cela a été suivi un peu plus tard, par l'extension des murs avec l'apparition d'autres portes: Bab El Dzair, Bab El

k'bour, Bab Ezzaouia, puis la construction d'une casbah, dans le sud-ouest de la ville, l'actuel quartier de Douiret. La densification s'est développée autour de l'intersection des deux axes structurant de la ville, la rue de Bab El Dzair à Bab El k'bour (Est –Ouest), et la rue de Bab Essebt à Bab Errahba (Nord –Sud).

Le 02 mars 1825, la ville a connu un séisme dévastateur qui en détruisit une grande partie. Ce séisme fit 7000 morts dans toute la région et d'après le COLONEL TRUMELET, 3000 Blidéens ont péri durant cette catastrophe [149]. La nouvelle ville «Blad ELDJADIDA » a été reconstruite à deux Kilomètres au nord de l'ancienne ville [154].

4.3.3.2. La période coloniale (1830-1962)

Cette période a été à l'origine de la structuration urbaine actuelle de la ville. Avant l'occupation de Blida, les villages d'Ouled-Yaïch et de Béni-Mered étaient déjà tombés sous l'emprise avec des casernes militaires et des camps implantés entre 1836 et 1838 [154].

L'instauration officielle du régime colonial dans la ville de Blida ne s'est proclamée qu'en 1842, mais la ville était sous contrôle des colons depuis le 07 Février 1839. Cela a permis la mise en place de plusieurs installations militaires, qui vont avoir une grande influence par la suite sur l'espace urbain actuel. A partir de cette date, les colons ont procédé à la construction d'un hôpital militaire (actuel hôpital Frantz Fanon), l'hôtel de ville, ainsi que 2 tribunaux et un commissariat de police, puis une poste, des écoles, un collège colonial, un service de ponts et chaussées, etc. L'emprise générale définitive sur la ville s'est faite en 1842, et les colons ont pris la ville comme une base militaire pour se propager vers d'autres villes et régions avec le début de réalisation des maisons de style Européen [154].

Durant la période s'étalant entre 1842 et 1866, la ville a connu la restructuration des espaces urbains, en superposant une nouvelle trame sur l'ancienne trame labyrinthique, avec le changement des camps militaires (Joinville, Montpensier, Dalmatie) en zones d'habitations et la construction de nouvelles infrastructures religieuses, culturelles et de loisirs, (église, théâtre, banque, cafétérias, la place d'arme, etc.). Il est à noter que les infrastructures militaires constituaient la moitié de la superficie de la ville [154].

Entre 1866 et 1916, la ville verra le développement des quartiers à l'extérieur des murs près des portes, sur des parcours qui mènent vers la cité Bois Sacré de la porte Bizot.

Au Sud, le long de la vallée de l'Oued Sidi El Kébir, se crée un quartier industriel renfermant des minoteries et semouleries près de Bab Errahba, ainsi que le quartier de la gare (l'actuel Boulevard Amara Youcef) [154].

Entre 1916 et 1930, l'extension de la ville continue très rapidement vers le nord, le long des canaux d'irrigations de l'époque Turque, qui ont joué un rôle majeur dans l'urbanisation de la ville. Cette période, en 1926, a vu la démolition du rempart et son remplacement par des boulevards qui entourent la ville intra-muros. Cela a favorisé l'extension d'urbanisation, surtout sur la périphérie de la vieille ville [154].

A partir de 1930 et jusqu'à l'indépendance en 1962, la ville a connu une croissance très rapide, avec la construction de l'hôpital militaire psychiatrique de Joinville en 1932 et la propagation des constructions vers les parties inférieures de la montagne et vers Ouled-Yaïch (Dalmatie) à l'Est. Notons que la construction des infrastructures militaires a empêché la croissance urbaine vers l'Ouest, où étaient implantés les casernes et installations militaires dans le Sud-Ouest, l'hôpital militaire et l'aéroport militaire au Nord-Ouest [154]. Durant cette période, les plus fortes poussées d'urbanisme eurent lieu avec la construction des immeubles collectifs (Type HLM comme le quartier de Montpensier, actuel Ben-Boulaid, cité des Bananiers, cité l'Armaf et l'immeuble du faubourg à Bizot), ainsi que l'habitat pavillonnaire de type villas du style Européen ou des maisons du style arabo-musulman de basses hauteurs (RDC) [150].

4.3.3.3. Période Post-indépendance

Dans la courte période ayant suivi le recouvrement de l'indépendance, il y eut un ralentissement de l'urbanisation de la ville, sauf les projets qui étaient déjà en chantier ainsi que les constructions de villas individuelles. Les Plans Quadriennaux à partir de 1970 et puis celui (1974-1977) ont vu une relance urbaine. En 1975, sont apparues de grandes opérations de logements de type collectif (ZUHN) comme les cités du 1^{er} Mai à d'Ouled-Yaïch, 1140 logements à Sidi Abdelkader et 1360 logements à Sidi Yakoub, ainsi que le développement des équipements publics : écoles, collèges, polycliniques, mosquées, marchés, etc. [150]. Dès 1987, on note une croissance rapide et ample engendrant l'établissement des instruments d'urbanisme et de planification (PDAU-POS- PUD, etc.), [154]. Le développement de la ville s'est fait au travers de :

- La densification du bâti existant dans les secteurs déjà urbanisés ;

- L'extension de la ville sur des terrains agricoles et dans les zones non constructibles ainsi que sur des terrains en pente accidentée, avec des auto-constructions n'ayant point fait l'objet de conception ou dimensionnement selon une quelconque norme de calcul en vigueur (cas du quartier de Ben-Achour), voir figures 4.17 et 4.18.



Figures 4.17 et 4.18 : Auto-constructions dans le Grand-Blida

L'urbanisation récente dans le périmètre du Grand-Blida a occupé de vastes superficies avec la création de zones industrielles totalisant 246 ha et les assises de l'université et de la ferme expérimentale (242 ha).

Cette forme urbaine a donné lieu à ce qu'on appelle aujourd'hui la conurbation du Grand-Blida (communes de Blida, Ouled-Yaïch, Bouarfa et Beni-Mered) et qui va faire l'objet, dans ce travail, d'une étude d'estimation des dommages sismiques pouvant se produire en cas d'occurrence d'un séisme probable.

4.3.4. Sismicité historique de la région de Blida

La sismicité historique et instrumentale (voir figure 4.19) montre que la région de Blida est située dans une zone de sismicité très active [155, 156]. La région a connu de forts séismes durant les derniers siècles engendrant des intensités comprises entre X et XI [157]. Ceux qui ont sévèrement touché la ville de Blida et ses environs [155] sont ceux du 3 février 1716, 17 mars 1756, 16 mai 1760 et celui, le plus important, qui s'est produit le 02 Mars 1825 engendrant la destruction quasi-totale de l'ancienne ville de Blida avec 3000 morts en ville et environ 7000 morts dans toute la région touchée par ce séisme. Il convient aussi de citer le séisme du 02 Janvier 1867 qui a complètement détruit le village de Mouzaïa. Durant la période instrumentale, le plus fort séisme enregistré dans la région de

Blida est celui du 07 novembre 1959, avec une magnitude $M_s=5.6$. D'après ces séismes passés, l'intensité maximale moyenne dans la région de Blida est évaluée entre VIII et X, comme illustré dans la figure 4.20 [158].

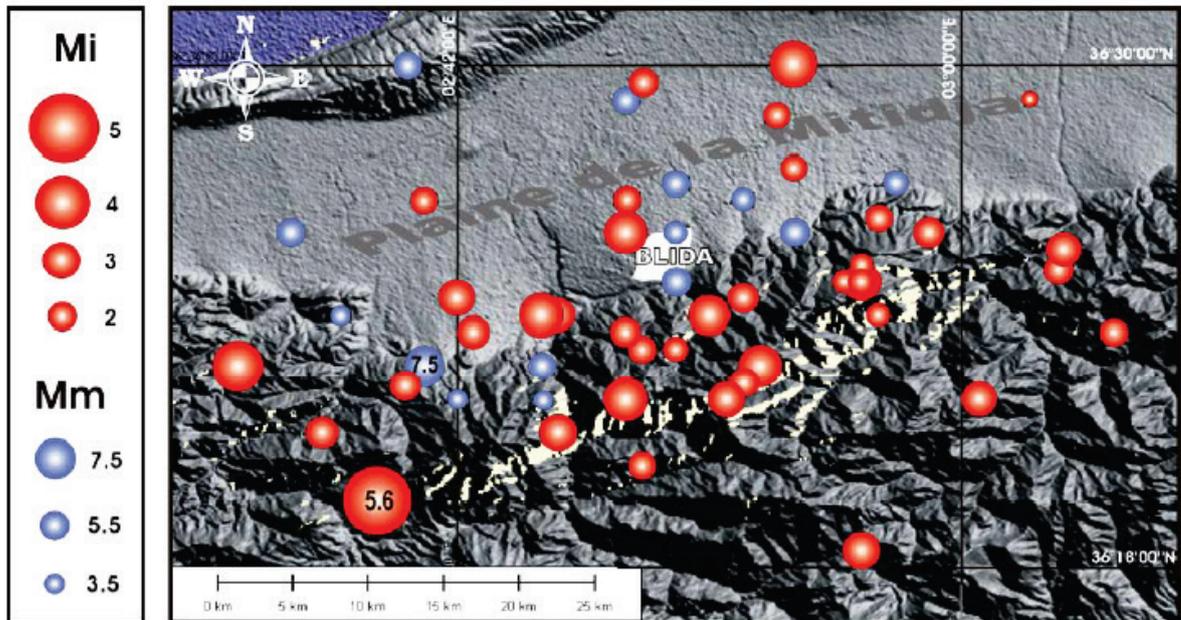


Figure 4.19 : Sismicité historique et instrumentale dans la région de Blida, entre 1825 et 2005. a) Magnitudes instrumentales « Mi » (cercles rouges) ; b) Magnitudes macrosismiques « Mm » (cercles bleus). [159]

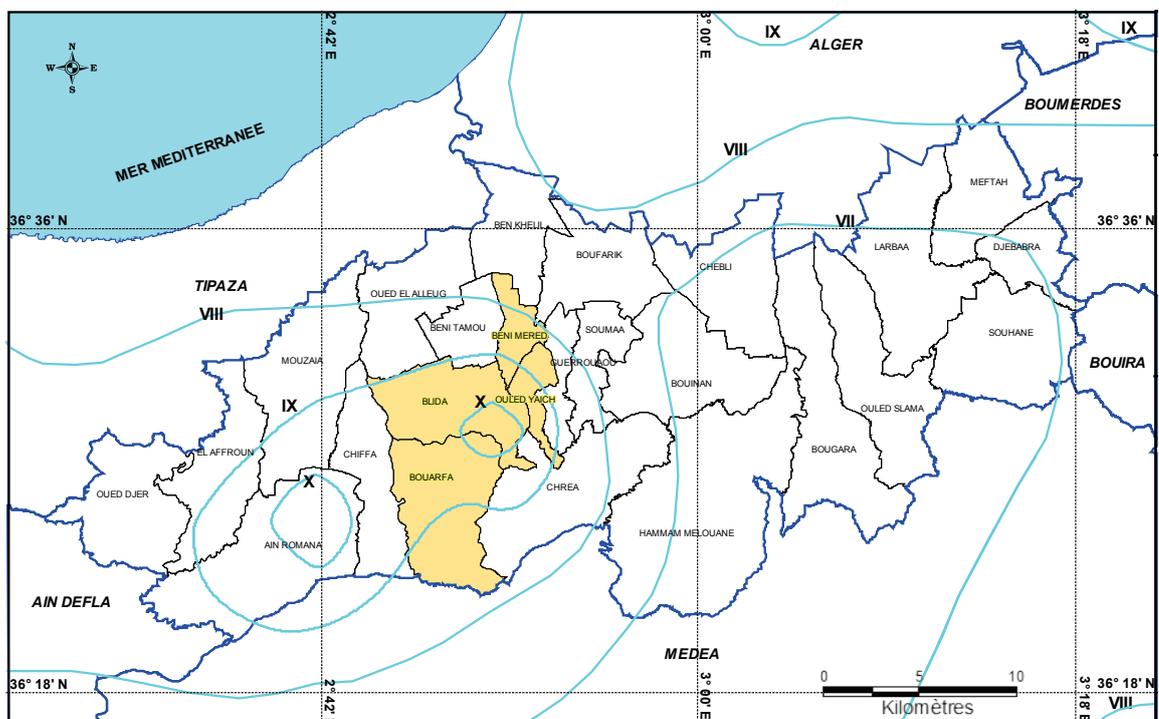


Figure 4.20 : Carte des intensités maximales de la région de Blida [158, 160]

4.3.5. Evaluation de l'aléa sismique dans la région de Blida

La région de Blida, dont la sismicité est jugée active, est entourée par un ensemble de failles actives. Elle est essentiellement entourée par les failles suivantes : faille du Sahel, faille de Menaceur, faille Sud Mitidja, faille de Blida et la faille de Khemis El Khechna, comme illustrées dans la figure 4.21 [112, 161]. Les intervalles de valeurs maximales des magnitudes de ces failles, données dans le tableau 4.6, ont été estimés dans le cadre de l'étude d'estimation d'aléa sismique probabiliste de la région d'Alger réalisée par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique (CGS) [126, 160].

Tableau 4.6 : Caractéristiques sismiques des failles actives et supposées actives de la région de Blida [126, 160]

<i>Faille</i>	<i>Longueur (Km)</i>	<i>Pendage (°)</i>	<i>Mécanisme</i>	<i>Profondeur (Km)</i>	<i>Magnitudes maximales (Mw)</i>
Sahel (F1)	70	45 vers N	Inverse	10	6.75
Menaceur (F2)	46	90 vers N-O	Décrochement Séneestre	10	6.75
Sud Mitidja (F3)	50	45 vers S	Inverse	10	6.75
Blida (F4)	45	55 vers SE	Inverse	10	6.75
Khemis El Khechna (F5)	58	55 vers SE	Inverse	10	6.75 - 7.0

D'après l'analyse des modèles de failles actives de la région de Blida, il apparaît que la source sismique la plus menaçante pour le Grand Blida est la faille de Blida qui traverse les communes de Bouarfa, Blida et Ouled-Yaïch entre l'Atlas et la plaine. Cette faille s'étend du Sud de la chaîne d'El Affroun vers l'Est sur environ 45 Km [160]. Les études menées par BOUDIAF [155] montrent que la section orientale de la faille (segment Ouled Yaïch-Bouinan) est plus évidente sur les photographies aériennes. Ce segment de 20 km de longueur [161, 160] aurait été à l'origine du séisme dévastateur du 02 Mars 1825 suivi par une réplique importante causant la ruine de la ville de Blida et de ses environs [155]. D'autres séismes plus récents ont été produits par ce segment, comme ceux localisés à Blida les 20 juillet 1975 ($M_s=4.9$), 11 février 1986 ($M_s=4.1$), 29 décembre 1981 et de Hammam Melouane du 4 septembre 1978 ($M_s=4.3$) [155] et probablement celui du 17 Juillet 2013, $M_w=5.1$ [162]. Les magnitudes maximales des séismes probables qui peuvent être générés par la faille de Blida varient entre $M_w=6.5$ et $M_w=7.0$ avec une probabilité dominante de 40% pour une magnitude $M_w=6.75$ [160]. Cela montre l'importance du rôle que jouerait cette faille dans la sismicité de la zone d'étude.

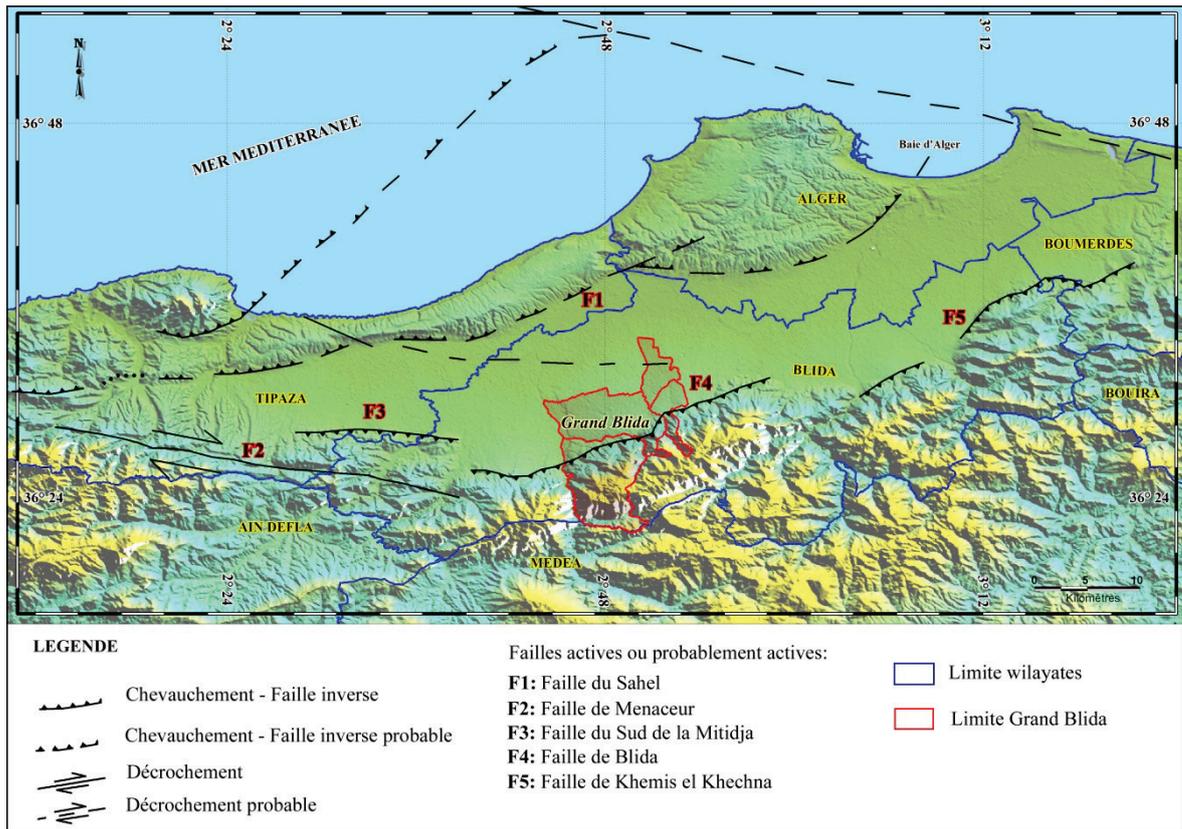


Figure 4.21 : Failles actives ou supposées actives dans la région de Blida [112]

4.3.6. Cadre géologique et géotechnique du Grand Blida

Le périmètre du Grand Blida est situé, dans sa majeure partie, sur la plaine du bassin de la Mitidja (commune de Béni-Mered et les Parties Nord des communes de Blida et d'Ouled-Yaïch), tandis que l'autre partie, constituée par la commune de Bouarfa ainsi que les parties Sud des communes de Blida et d'Ouled-Yaïch, surplombe le piémont et les montagnes de l'Atlas Blidéen (voir figure 4.21).

Le Grand Blida est caractérisé par des formations géologiques hétérogènes, illustrées dans la figure 4.22 et qui sont détaillées dans ce qui suit [160] :

La commune de Blida est située entre trois zones de formations distinctes. Sa majeure partie, correspondant à 68% de sa superficie, est implantée sur la zone de la plaine de la Mitidja. Elle est caractérisée par des couches de sédiments alluvionnaires du quaternaire, à savoir, les alluvions actuelles (sables et graviers), alluvions récentes (limon argilo sableux) et alluvions anciennes (limons caillouteux). Pour la zone du piémont qui occupe la partie Sud-Est sur environ 25% de sa superficie, on distingue des formations lithologiques tendres constituées de marnes du carténien, des marnes bleuâtres du sénonien

et des argiles à lits de quartzites. La partie d'extrême Sud de la commune, située dans les monts de l'Atlas Blidéen à une altitude dépassant les 600 mètres, est constituée essentiellement de schistes du silurien, avec des lambeaux d'argiles schisteuses du crétacé.

La commune d'Ouled-Yaïch est caractérisée par des dépôts quaternaires occupant la partie Nord, formés essentiellement d'alluvions actuelles et anciennes. Tandis que la partie Sud située en zone montagneuse est caractérisée par des formations géologiques d'âge miocène et éocène (Tertiaire), des couches de schistes, quartzites, marnes, calcaires et une série d'argiles grises feuilletées (Crétacé) ainsi que des calcaires compacts et des schistes du Jurassique.

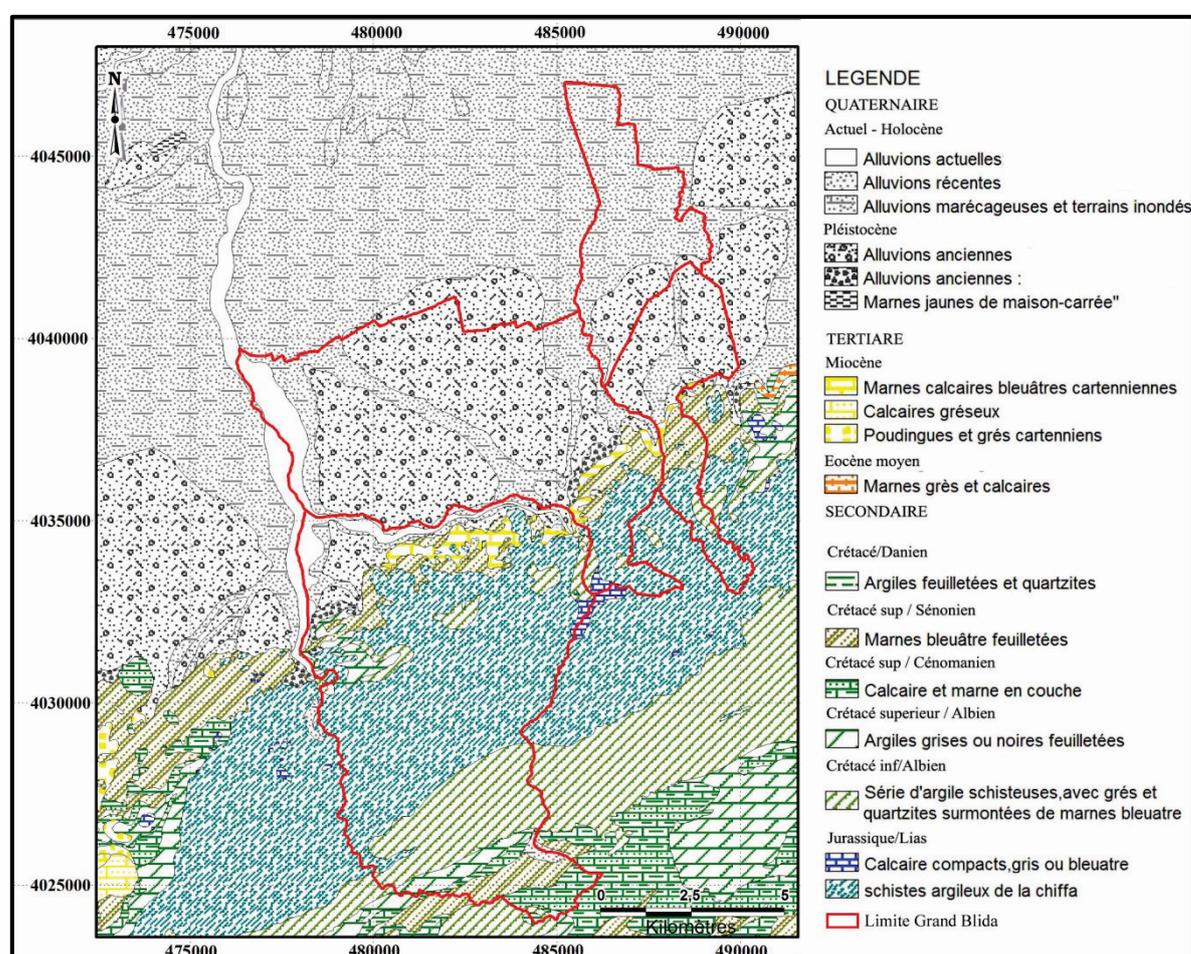


Figure 4.22 : Carte géologique de la région du Grand-Blida [160]

Pour la commune de Bouarfa, dont le site urbain se situe essentiellement dans la petite partie Nord sur la zone de la plaine, elle est caractérisée par des dépôts de sédiments alluvionnaires du quaternaire, des alluvions actuelles (sables et graviers), alluvions récentes (limon argilo sableux) et des alluvions anciennes (limons caillouteux). La zone du piémont est composée de formations tertiaires (marnes carténiennes) et crétacé (calcaires

et marnes du Sénonien). Cependant, la majeure partie, occupée par cette commune s'implante sur la zone montagneuse de l'Atlas Blidéen au Sud d'une altitude élevée et est constituée essentiellement de schistes du silurien et des lambeaux d'argiles schisteuses du crétacé.

Quant à elle, la commune de Beni-Mered est située en plein bassin de la Mitidja et est caractérisée par des formations alluvionnaires récentes et anciennes du quaternaire (dépôts limoneux et caillouteux).

Compte tenu aussi des investigations géotechniques rentrant dans le cadre de l'étude de microzonage sismique de la Wilaya de Blida menée par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), la classification du sol de chaque zone (district) du site urbain du Grand Blida, selon les Règles Parasismiques Algériennes en vigueur (RPA 99/2003) [99] est illustrée dans la figure 4.23.

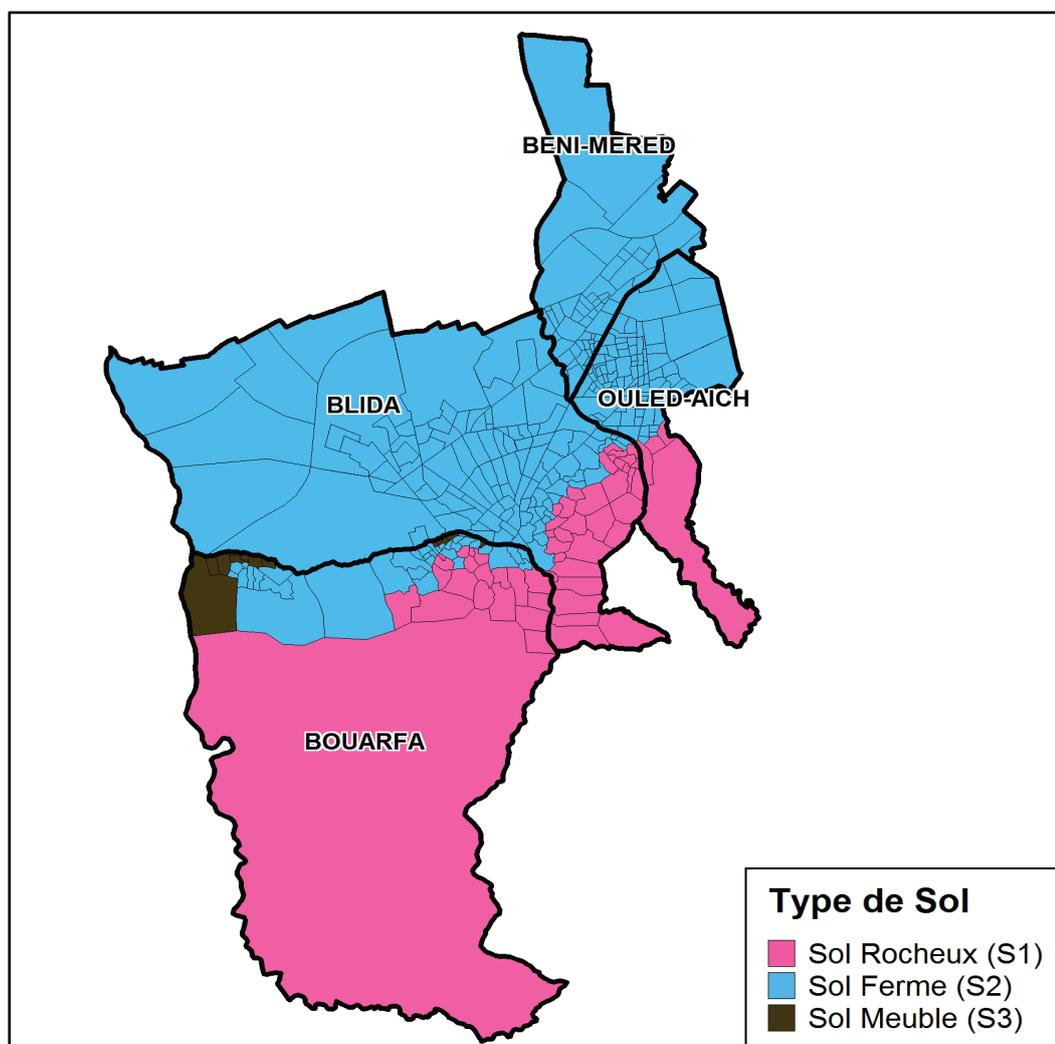


Figure 4.23 : Classification des sols du site urbain du Grand Blida selon le RPA 99/2003

4.3.7. Inventaire et mise en place d'une base de données du bâti du Grand Blida

4.3.7.1. Inventaire du bâti

Pour constituer la banque de données concernant le tissu urbain dans le périmètre du Grand Blida, un inventaire exhaustif et systématique a été réalisé pour l'ensemble des constructions se trouvant dans la zone d'étude (voir figure 4.15). Cette zone a été subdivisée en districts selon le découpage élaboré lors du Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2008 [107]. L'inventaire réalisé durant la période (Janvier 2012 et Novembre 2012) rentre dans le cadre de l'étude de vulnérabilité et d'évaluation du risque sismique de Blida mené par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). Cette opération a été réalisée en utilisant la fiche d'enquête et d'évaluation du bâti, illustrée précédemment (voir section 2.3.2.1).

Pour appuyer l'opération d'inventaire du bâti, des images satellites récentes de très haute résolution à 50 cm de précision de la zone d'étude ont été acquises et utilisées (voir figure 4.15). Elles ont permis d'avoir une cartographie récente et actualisée de la zone d'étude, les plans type POS, PDAU ou aux photos aériennes étant plus anciens. En outre, cette technique est plus rapide que les levés directs sur terrain qui bien que pouvant donner des résultats plus précis (en termes de géométrie) sont lourds à mettre en œuvre. Ces images de très haute qualité ont été prises par le satellite Geo-Eye avec une précision de 50 cm, respectivement le 02 Août 2009 à 10:52 GMT (po_773407_0000000) pour les communes de Blida et Bouarfa et le 08 Janvier 2012 pour les communes d'Ouled-Yaïch et Béni-Mered ainsi qu'une actualisation de la commune de Blida à 10:38 GMT (po_902114_0000000). Une fois les données recueillies, elles ont été numérisées et stockées dans la base de données (voir section 2.3.2.1). Chaque fiche représentant une construction inventoriée, de la base de données réalisée, a été reliée à l'entité cartographique correspondante, digitalisée sur la plateforme SIG comme illustré dans la figure 2.13 ainsi que par la figure 4.24 ci-dessous.

Le nombre total de constructions, du périmètre urbain du Grand Blida, consignées et digitalisées dans la base de données est de l'ordre de 46332 unités.



Figure 4.24 : Exemple de digitalisation du bâti du Grand-Blida sous plateforme SIG en utilisant l'image satellite haute résolution Geo-Eye (po_902114_0000000)

4.3.7.2. Analyse et classification des constructions du Grand-Blida

Sur les 46332 unités de constructions inventoriées, nous avons retenu 45742 unités dont les typologies sont prises en charge par la méthode mise au point. En effet, il y a 506 (soit environ 1% de l'ensemble des constructions) unités représentant des constructions précaires des bidonvilles, situées essentiellement à la localité de Sidi-Aïssa dans la commune de Ouled-Yaïch, à la cité Driouèche à Bouarfa et quelques autres constructions à Oued Sidi-El Kebir à Blida, qui sont représentées par des baraques réalisées avec des matériaux médiocres (parpaings, tôles de Zinc, etc.) avec des toitures en éternit, sans aucun chaînage. Quelques autres constructions de l'ordre de 84 unités sont en bois sous forme de chalets ou hangars à usages d'habitation, administratif ou industriel.

A partir de la base de données du bâti réalisée, nous avons classé les constructions selon la procédure de la méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti mise au point dans le cadre de ce travail. Cette classification est illustrée dans le tableau 4.7 et la figure 4.25 ci-après.

Tableau 4.7 : Répartition des constructions du Grand-Blida selon leurs typologies

Typologie	Nombre de constructions par typologie	Nombre de constructions par système de contreventement	Pourcentage (%)
RC1-L	28146	30152	65.9
RC1-M	1955		
RC1-H	51		
RC2-L	1722	3178	7.0
RC2-M	1348		
RC2-H	108		
S-L	1138	1140	2.5
S-M	2		
S-H	--		
URM-L	11167	11272	24.6
URM-M	105		

L'analyse de cette base de données du bâti du Grand Blida fait ressortir que :

- Le type de structure prédominant est celui en béton armé représentant presque les trois quarts (soit 73% ; 33330 unités) de l'ensemble du patrimoine immobilier recensé. Ce patrimoine est réparti entre constructions en portiques (30152 unités ; 65.9%) et structures en voiles représentant environ 7%, soit 3178 unités (voir figure 4.25). La prédominance de ce type de structure dans le Grand-Blida est due essentiellement à la croissance urbaine de la ville de Blida pré-indépendance qui été fortement densifiée après l'indépendance, essentiellement à partir de 1975 avec la réalisation de nombreuses cités d'habitations adoptant ce type de structure.
- les constructions en maçonnerie réalisées essentiellement pendant les périodes Ottomane (quartiers de Ouled-Soltane et Douiret) et coloniale (centres villes des quatre communes du Grand-Blida) représentent un vieux patrimoine assez important, d'environ 25% (soit 11272 unités) de l'ensemble des constructions du Grand-Blida. La commune de Blida, à elle seule, renferme environ 62% de ce type de construction du territoire du Grand-Blida.
- les structures en charpente métallique représentent environ 2.5% (soit 1140 unités), concentrées essentiellement dans les zones industrielles (Benboulaid, Ouled-Yaïch et Béni-Mered) sous forme de hangars et de petits bâtiments industriels, ainsi que sous

forme de structures sportives, ou constructions à usages d'habitations, scolaire et administratif.

Le nombre des constructions réalisées se répartit comme suit :

- Pré-code : leur nombre est de l'ordre de 13575 soit environ 30% de l'ensemble des constructions.
- Bas-code : Ce nombre est plus important pour celles réalisées en Bas-code (16066 ; 35.1), cela s'explique essentiellement par la forte urbanisation durant cette 2^{ème} période dans le Grand Blida qui a connu la réalisation de nombreux projets dans tous les secteurs.
- Moyen-code : Malgré la courte durée de la 3^{ème} période du Moyen-code « 2000-2003 », où une très forte urbanisation représentant près 20% (soit 8788 unités) est constatée. Cela a été favorisé par le retour de la sécurité après la décennie difficile vécue avec l'extension du Grand Blida surtout sur des terres de nature agricole.
- Haut-code : Durant la 4^{ème} et dernière période Haut-code, post-2003, la cadence d'urbanisation a légèrement diminué (7313 unités ; 16%), car en dehors des projets de réalisation des logements publics, le foncier se fait rare et cher, ce qui a favorisé la réalisation des immeubles de grandes hauteurs surtout par les privés. La majeure partie de ces constructions du Grand Blida est à usage d'habitation, soit 84%.

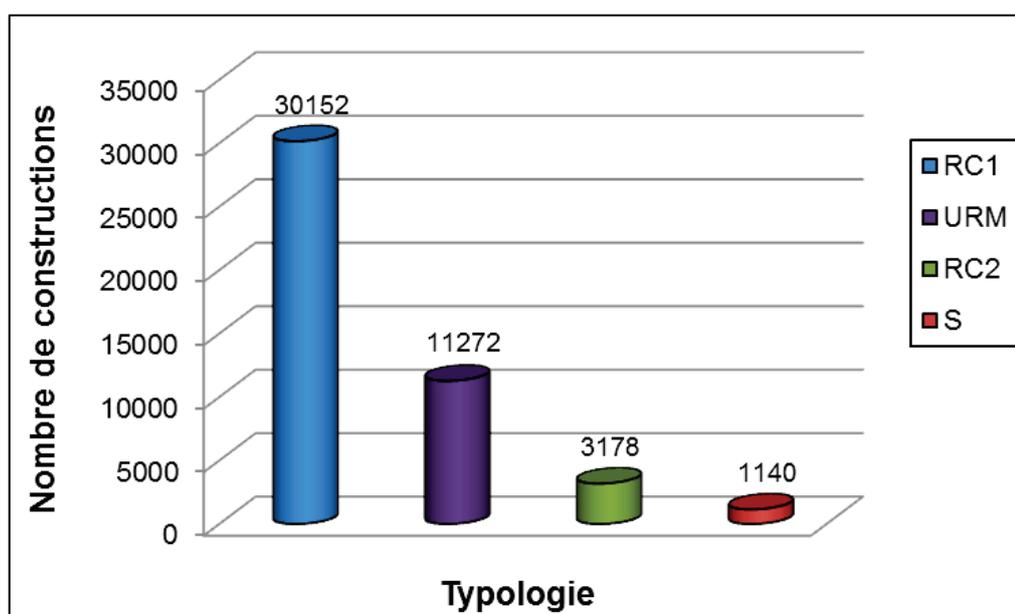


Figure 4.25 : Répartition du bâti du Grand-Blida selon le type de structure

4.3.8. Estimation des dommages sismiques du bâti

4.3.8.1. Estimation de l'accélération maximale au sol (PGA)

Afin d'estimer la valeur de l'accélération maximale au sol (PGA) à prendre dans les calculs des dommages sismiques du bâti du Grand-Blida, nous avons pris comme scénario probable, la faille de Blida (voir figure 4.21). Le choix de cette hypothèse est justifié par le fait que le tracé de cette faille passe sous trois communes du Grand-Blida en surplombant le piémont (Bouarfâ, Blida et Ouled-Yaïch). Elle apparaît comme la plus menaçante en comparaison des autres failles environnantes. Sa magnitude probable est estimée comme étant $M_w=6.75$ (voir tableau 4.6).

L'accélération maximale du sol (PGA) au rocher dans le périmètre du Grand-Blida a été calculée en utilisant la loi d'atténuation d'AMBRASEYS et al. [119] donnée par l'équation 3.3. Sa valeur est de l'ordre de $A=0.5g$.

La valeur de l'accélération moyenne calculée coïncide bien avec les valeurs d'iso-accélération maximale, pour une période de retour de 500 ans, réalisées dans le cadre de l'étude d'estimation d'aléa sismique probabiliste de la région d'Alger [126] et qui donne des valeurs des PGA estimées dans le Grand-Blida de l'ordre de $0.5g$, comme illustrée dans la figure 4.26.

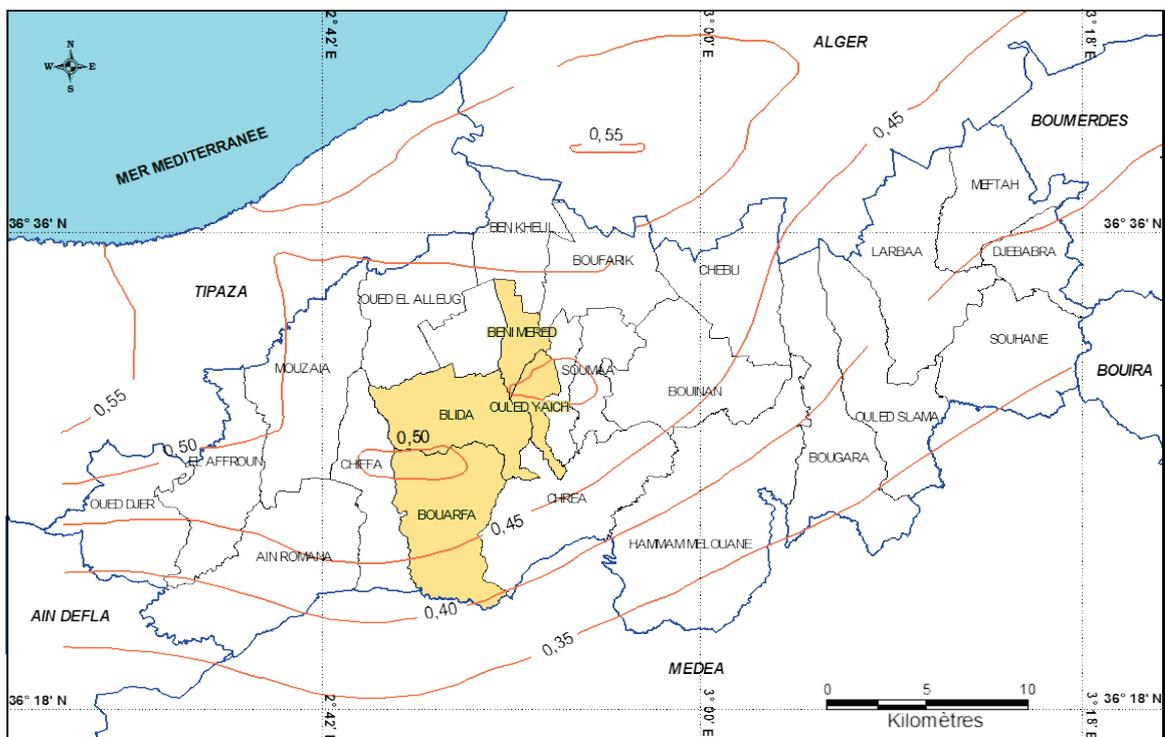


Figure 4.26 : Carte des iso-accélérationnelles maximales pour les périodes de retour de 500 ans dans la région de Blida [126, 160]

4.3.8.2. Effet de sites et amplification du Sol

Pour l'effet de site dans le Grand-Blida, nous nous basons sur les investigations géophysiques réalisées dans le cadre des travaux de doctorat en cours de Madame Bouchlough (Chercheur au CGS) [163]. En effet, ces investigations reposent sur une campagne de mesures de bruit de fonds (méthode des rapports spectraux H/V) réalisées dans le périmètre du Grand-Blida. Pour cela, plus de 700 points de mesures H/V ont été réalisés en subdivisant le périmètre de l'étude en mailles de 500 mètres de côté, comme montré dans la figure 4.27.

A travers cette étude, il est possible de quantifier les effets de site lithologiques dans le cas d'un scénario sismique. Cela permet de définir les valeurs des accélérations maximales vibratoires « Avib » dans les couches en surface pour la zone d'étude.

Les études menées par SAAD Aiham [164] montrent qu'en cas de présence d'un phénomène d'effet de site, le calcul des valeurs des accélérations vibratoires se fait en introduisant des coefficients multiplicateurs appliqués à l'accélération sismique maximale « A_{max} ». Ces valeurs sont données dans le tableau 4.8 pour une zone de forte sismicité (Magnitude supérieure à 5.5) [165] :

Tableau 4.8 : Coefficients multiplicateurs proposés par l'EC-8 en fonction du type de sol [165]

Classe de sol	Description stratigraphique simplifiée	$V_{s,30}$ (m/s)	Classification RPA	Coefficient multiplicateur
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type	≥ 800	S ₁	1.00
B	Dépôts de sables très denses, graviers ou argile très raide	360-800	S ₂	1.20
C	Dépôts de sables denses ou moyennement denses, de graviers ou d'argile raide	180-360	S ₃	1.15
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne ou d'argiles molles à fermes	<180	S ₄	1.35

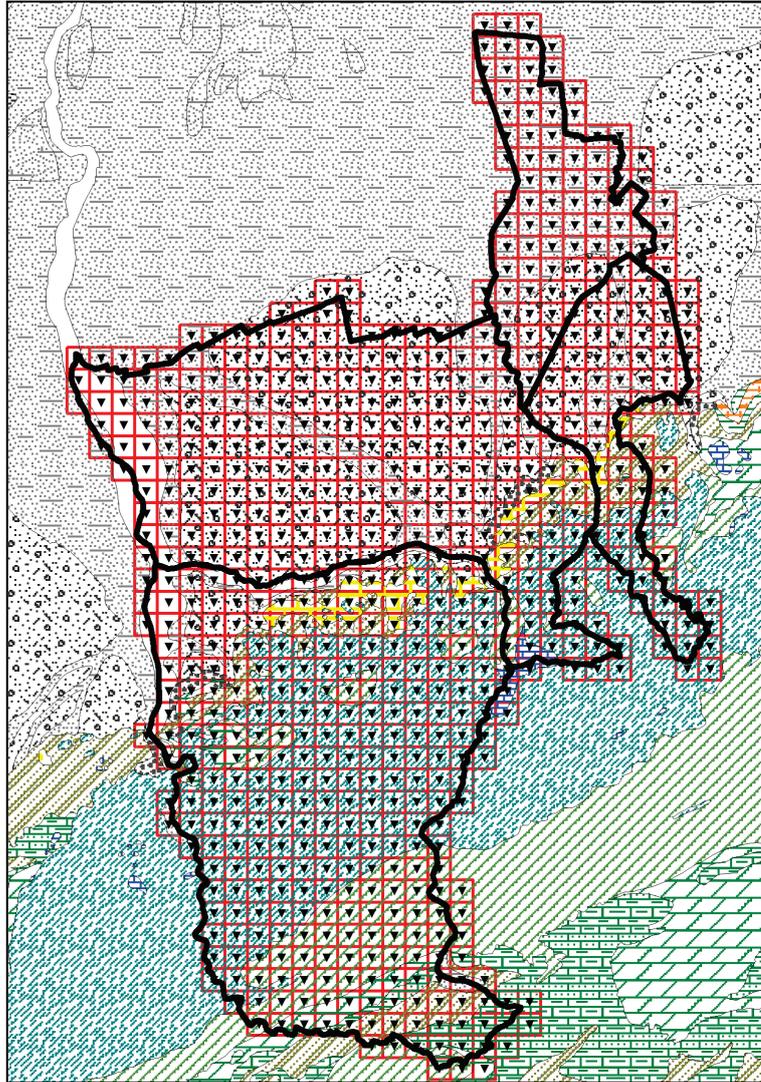


Figure 4.27 : Positions des mesures H/V dans le Grand-Blida (triangles noirs inversés)
[164]

a. Analyse des mesures H/V réalisées dans le Grand-Blida

L'analyse des rapports spectraux H/V calculés pour l'ensemble des enregistrements du bruit de fond sismique dans le périmètre du Grand-Blida montre que les courbes H/V peuvent être classées en deux types:

- Les courbes H/V du type 1, (voir figure 4.28a), montrent un pic d'amplitude supérieure à 2.5 qui satisfait les recommandations établies dans le cadre du projet SESAME (Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations) réalisé en 2004 [166] ainsi que les études menées par BONNEFOY-CLAUDET et al. [167].
- Les courbes H/V du type 2 (voir figure 4.28b) ne montrent pas de pic supérieur à 2.5. Ces courbes sont localisées essentiellement dans les parties de l'atlas Blidéen.

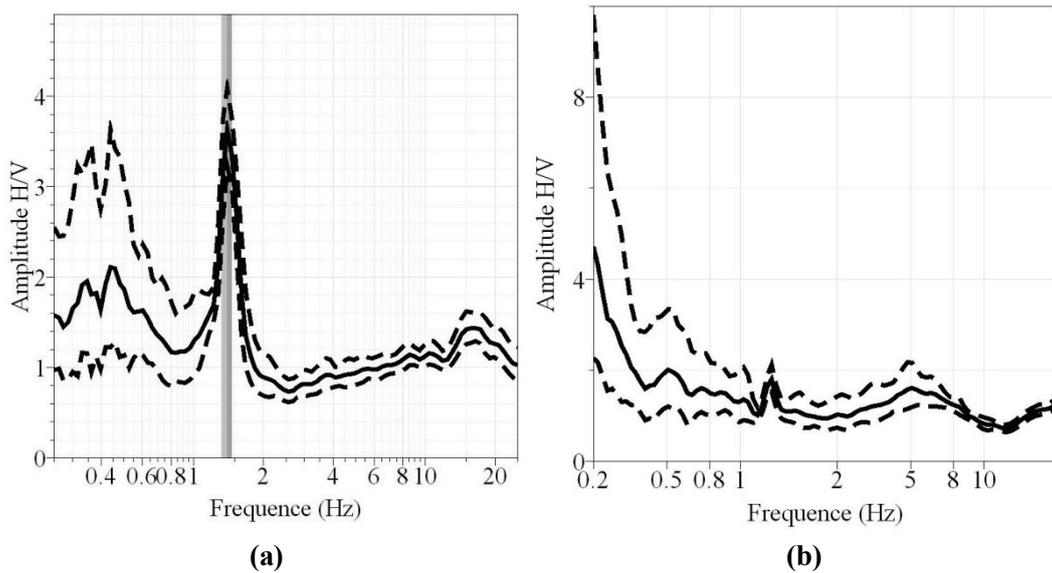


Figure 4.28 : Types de de courbes H/V observées dans le Grand-Blida [163]: a) courbe du type 1- b) courbe du type 2

A partir de ces analyses, les différents sites du Grand Blida, qui sont caractérisés par des courbes du type 1, sont propices à l'effet de site. Ces sites sont caractérisés par les types de sol S2 et S3 (voir figure 4.23), tandis que les sites, se trouvant sur des sols de type S1, ne présentent pas d'effets de sites.

L'accélération $A=0.5g$, estimée précédemment dans le Grand-Blida, doit être amplifiée dans les zones présentant des effets de sites en fonction de la classification du sol (voir figure 4.23). L'intervalle des coefficients multiplicateurs à adopter selon le tableau 4.8 varie entre 1 et 1.2.

4.3.8.3. Définition du spectre de réponse du site urbain du Grand-Blida

L'estimation des dommages sismiques du bâti du Grand-Blida est réalisée en utilisant trois variantes du spectre de réponse élastique ($\xi=5\%$) réglementaire adopté par les Règles Parasismiques Algériennes en vigueur, RPA 99/2003 [99], donné par l'équation 2 pour les différents types de sols caractérisant le périmètre d'étude (voir tableau 3.6). Etant donné que le facteur d'accélération « A », dans la formulation du spectre du règlement parasismique Algérien, RPA99/2003 [99], est déjà affecté par un coefficient multiplicateur de « 1.25 » qui couvre l'intervalle des coefficients multiplicateurs discutés précédemment, la valeur de l'accélération maximale, estimée pour les différents types de sol du périmètre de l'étude, sera prise égale à **0.5g**.

4.3.8.4. Calcul et génération des cartes de dommages sismiques sur SIG

Le code informatique, développé dans ce travail, a permis le calcul automatique des dommages sismiques pour l'ensemble des 45742 unités de constructions considérées dans le Grand-Blida, ainsi que la génération des cartes de dommages dans la plateforme SIG. Les probabilités de dommages sismiques estimées sont résumées dans les tableaux 4.9 et 4.10 ainsi que dans les figures 4.29 et 4.30 ci-après.

Tableau 4.9 : Probabilités de dommages par type et par catégorie de dommages

Type	Probabilité de dommages (%)				
	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
RC1	1.5	13.5	57.1	22.2	5.7
RC2	0.2	17.5	64.4	15.0	2.9
S	6.3	32.1	40.1	17.2	4.3
URM	0.0	0.1	38.5%	28.1	33.3

Tableau 4.10 : Probabilités de dommages selon les périodes de construction règlementaires

Période	Probabilité de dommages (%)				
	PN (D1)	PS (D2)	PM (D3)	PE (D4)	PC (D5)
Pré-Code	0.9	3.9	42.1	27.0	26.1
Bas-Code	2.5	23.5	46.0	20.9	7.1
Code-Modéré	0.1	4.7	65.7	22.9	6.6
Haut-Code	0.1	3.6	70.7	20.7	5.0

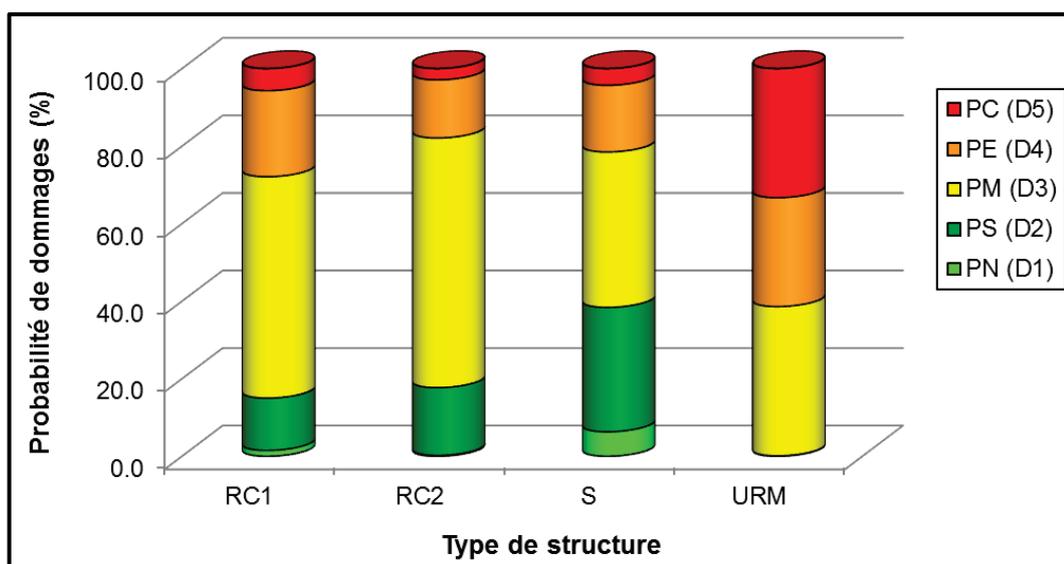


Figure 4.29 : Probabilités de dommages théoriques du bâti du Grand Blida selon le type de structure

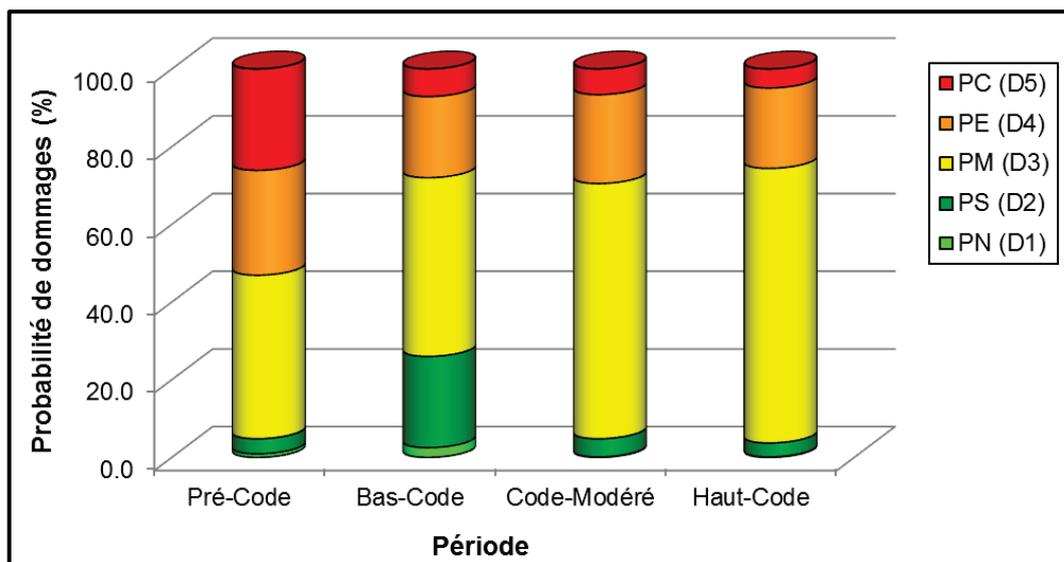


Figure 4.30 : Probabilités de dommages théoriques du bâti du Grand Blida selon l'actualisation de la conception parasismique

Les résultats des dommages sismiques dans le périmètre urbain du Grand-Blida (Communes de Blida, Ouled-Yaïch, Bouarfâ et Beni-Mered) sont donnés à titre indicatif, selon l'inventaire du bâti réalisé à cet effet. Afin de mieux faire ressortir les zones qui seraient les plus endommagées dans le cas du séisme adopté comme référence, le périmètre du Grand-Blida a été subdivisé en 32 secteurs urbains regroupant 373 districts adoptés lors du découpage du dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2008 [107]. La commune de Blida a été découpée en 14 secteurs urbains, les communes d'Ouled-Yaïch et de Bouarfâ divisées en 07 secteurs chacune et 04 secteurs dans la commune de Béni-Mered. Le code informatique, mis en place dans le cadre du présent travail, a permis de calculer les probabilités de dommages sismiques du bâti et de générer automatiquement les cartes correspondantes sur une plateforme SIG.

Les résultats présentés dans le tableau 4.11 et la figure 4.31 montrent le taux d'endommagement probable, dans les secteurs urbains définis, en considérant uniquement les catégories de dommages "Important (E)" et "Sévère (C)", c.à.d. (D4+D5).

Tableau 4.11 : Probabilités de dommages de chaque secteur du Grand-Blida

ID	Nom du secteur	Probabilité de dommage					Taux de dommages cumulés "D4 et D5" (%)
		N (D1) (%)	S (D2) (%)	M (D3) (%)	E (D4) (%)	C (D5) (%)	
Commune de Blida							
BL1	Blida-Centre	1.0	6.5	48.9	25.3	18.4	43.6
BL2	Bab Errahba-Sidi Yakoub	1.2	7.7	50.4	25.1	15.6	40.7
BL3	Bab Ezzaouia	1.2	9.2	51.3	24.0	14.4	38.4
BL4	Dardara - Sidi El Kebir	0.8	8.1	47.1	24.9	19.1	44.0
BL5	Ouled Soltane - Douiret	0.9	5.5	44.5	26.3	22.7	49.0
BL6	Kritli Mokhtar	1.3	10.4	50.7	23.7	13.9	37.6
BL7	Zone Industrielle Benboulaid	2.6	14.5	48.4	22.4	12.1	34.5
BL8	Benboulaid-Bounaama	1.1	11.9	54.9	21.9	10.3	32.2
BL9	Sidi AEK-Bananiers	1.1	11.5	57.3	22.1	8.1	30.2
BL10	Zabana	1.0	8.7	59.3	22.4	8.7	31.0
BL11	Ben Achour-H'malit	1.5	13.8	47.3	23.8	13.6	37.4
BL12	Yousfi AEK	1.1	7.9	51.0	24.3	15.7	40.0
BL13	Route de Chr�ea - Agba El Hamra	1.0	13.7	49.8	22.8	12.6	35.4
BL14	Maramane	0.5	5.6	56.0	24.6	13.4	37.9
Commune de Bouarfa							
BO1	Mimeche	0.8	8.1	53.3	24.3	13.5	37.8
BO2	Bouarfa-Centre	1.4	12.6	50.6	23.6	11.8	35.4
BO3	Terre rouge-Aouaouda	1.3	11.5	48.2	24.2	14.8	39.0
BO4	Route Sidi El Kebir	0.5	10.7	46.6	24.0	18.2	42.2
BO5	Baba Moussa-Hamlili	0.7	9.8	47.3	24.4	17.8	42.2
BO6	Sidi El Djoudi	0.8	10.9	53.2	23.2	11.9	35.1
BO7	Cité Drioueche-Taberente	0.5	4.9	53.0	24.9	16.7	41.6
Commune de Beni-Mered							
BM1	Beni Mered-Centre	1.1	9.9	55.2	22.9	10.9	33.8
BM2	Diar El Bahri	1.1	9.9	53.8	23.8	11.5	35.3
BM3	Kritli-Cité musulmane	0.8	7.9	64.8	20.2	6.3	26.5
BM4	Khazrouna	1.9	19.6	47.1	21.9	9.6	31.5

Commune d'Ouled-Yaïch							
OY1	Touaress	0.9	8.8	51.7	23.8	14.8	38.6
OY2	Dalmatie (Centre O.Y)	1.6	12.5	51.2	23.7	10.9	34.6
OY3	Benamour - Douar O.Y	1.4	12.1	51.8	23.3	11.5	34.8
OY4	Z.I. Ouled-Yaich	2.3	15.6	54.0	21.5	6.6	28.1
OY5	Université-Cités	1.0	21.4	54.9	17.0	5.6	22.7
OY6	1er Mai - 400 logements	0.9	28.8	48.9	16.3	5.1	21.4
OY7	Kef el h'mam - Cité espagnole	1.0	9.4	60.8	21.9	6.9	28.8
Le Grand-Blida		1.1	10.9	52.6	23.1	12.3	35.4

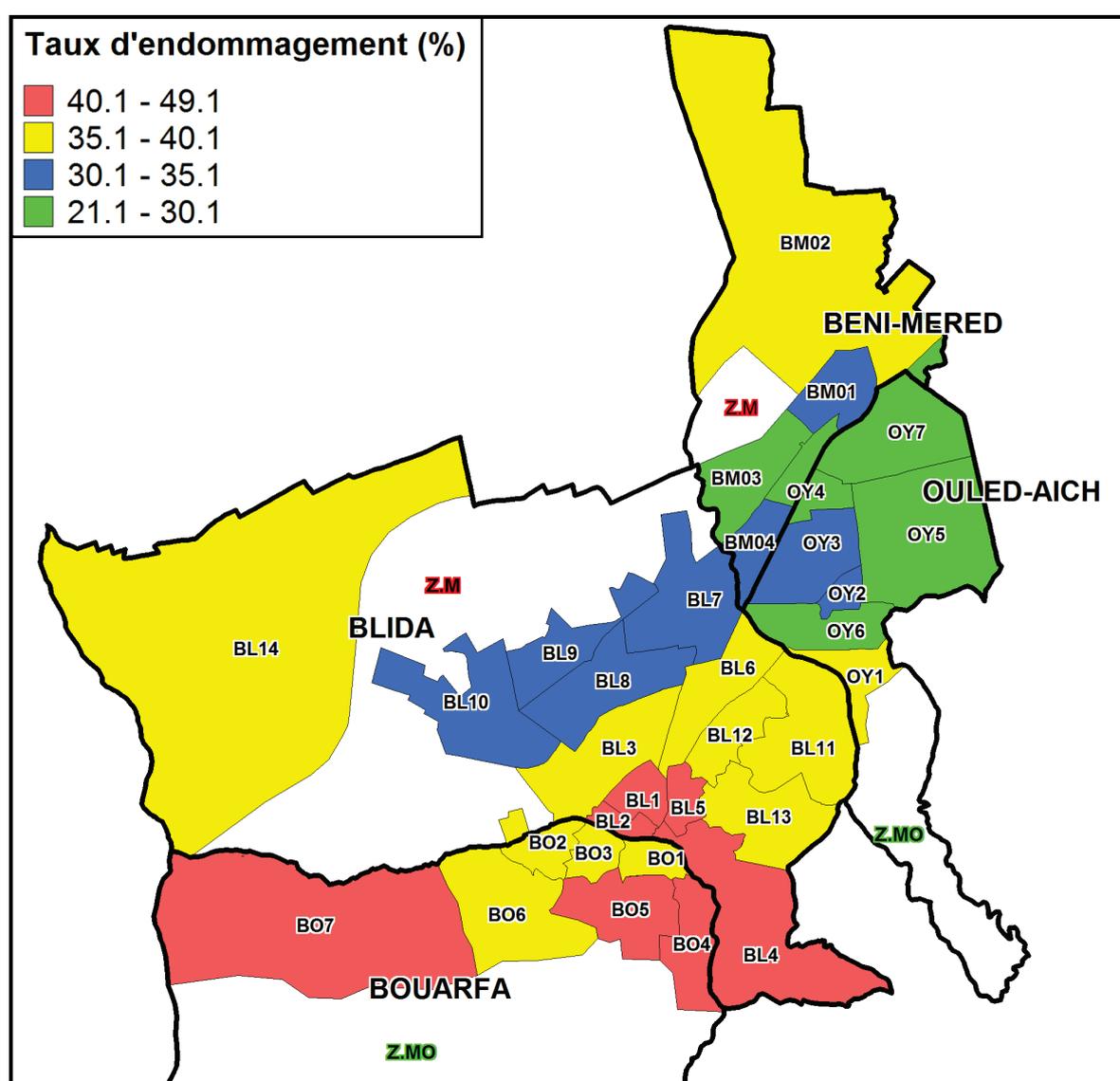


Figure 4.31 : Taux d'endommagement par secteur du Grand-Blida- **Z.M.** : Zone Militaire ; **Z.MO.** : Zone Montagneuse

4.3.8.5. Analyse et discussion des dommages

L'analyse des résultats de l'estimation des dommages sismiques du bâti existant dans le périmètre urbain du Grand-Blida, abritant une grande concentration de population, fournit un taux d'endommagement moyen probable de l'ordre de 35%. Ce taux varie d'un secteur à un autre selon les typologies.

Les communes de Blida et de Bouarfa qui constituent les plus vieilles agglomérations du Grand-Blida, contenant un patrimoine urbain ancien et vétuste, sont les plus menacées, les taux de dommages correspondant y étant les plus élevés. Dans la commune de Blida, les dommages potentiels peuvent se produire d'une manière sensible du côté des secteurs de Douiret-Ouled Soltane et Dardara-Sidi El Kebir majoritairement constitués de constructions en maçonnerie non-chainées datant des époques ottomane et coloniale, ainsi que du côté du centre-ville, Bab Er-rahba-Sidi Yakoub. A Bouarfa, les dommages les plus importants sont concentrés dans les hauteurs, dans les secteurs de la route de Sidi-El Kebir et de Baba Moussa-Hamlili composés de vieilles constructions réalisées sans aucune norme de calcul de structure, ainsi que du côté du secteur Cité Driouèche-Taberente renfermant un grand nombre d'auto-constructions érigées sans calcul de structure. De plus, un grand nombre de constructions est bâti sur des sols défavorables. Ces dommages probables diminuent d'intensité dans les communes d'Ouled-Yaïch et Beni Mered où les dommages se situent essentiellement dans les zones renfermant de vieilles constructions en maçonnerie, le centre d'Ouled-Yaïch (Dalmatie) et l'ancien Douar, Diar El-Bahri ainsi que du côté de Touaress longeant l'Oued Beni-Azza renfermant des constructions vétustes. Les autres secteurs sont constitués essentiellement de cités publiques réalisées pendant les différentes périodes post-indépendance en systèmes RC1 et RC2 répondant aux normes de calcul de structures.

Ces prévisions de dommages probables dans le Grand-Blida permettent de faire ressortir sur les cartes de dommages les zones qui peuvent être les plus touchées dans l'hypothèse du séisme de scénario adopté comme référence dans cette étude.

4.4. CONCLUSION

Dans le présent chapitre, nous avons appliqué la méthodologie d'estimation des dommages sismiques du bâti existant en Algérie, dans le cas de deux grands centres urbains d'Algérie, potentiellement exposés au risque sismique. En effet, ces scénarios sismiques ont été réalisés dans les sites urbains de la ville de Constantine et du Grand-Blida regroupant les quatre communes de Blida, Ouled-Yaïch, Bouarfa et Beni-Mered. Les inventaires exhaustifs élaborés par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie-parasismique (CGS) ont concerné environ 29,000 unités et 47,000 unités, respectivement dans les deux cas d'études. Ces constructions ont été classées selon les prescriptions de la méthode mise au point.

L'automatisation du concept mis au point, dans le code informatique développé à cet effet, a permis d'une part, le traitement et la classification automatique des constructions inventoriées selon les prescriptions établies par la méthodologie, et d'autre part, le calcul rapide des dommages sismiques prédictifs probables ainsi que leur distribution spatiale au moyen de la génération automatique des cartes de dommages sur une plateforme Système d'Information Géographique (SIG).

Les résultats de ces deux scénarios sismiques réalisés dans la ville de Constantine et dans le Grand-Blida, donnés à titres indicatifs, font ressortir que les taux d'endommagement (D4 et D5) sont de l'ordre de 28% et 35%, respectivement. Ces dommages traduisent la concentration d'un vieux patrimoine urbain dans ces deux sites urbains ainsi que les conditions du sol défavorables, en plus de la proximité de l'épicentre, particulièrement pour le Grand-Blida.

Du fait d'absence d'études plus détaillées afin de réaliser des spectres de réponse des sites étudiés, nous avons utilisé le spectre de réponse conventionnel du code parasismique Algérien en vigueur (RPA99/2003) en tant que signal sismique. En effet, ce spectre surestime légèrement le niveau d'aléa sismique puisque ce code de conception privilégie la sécurité. Cette sollicitation sismique peut alors avoir comme conséquence de légères surestimations des dommages théoriques prévus.

Les présentes simulations permettent de prédire les dommages que subiraient les bâtis des centres urbains, Constantine et Blida, si survenaient le séisme réputé comme étant le plus probable et sévère, spécifique à chacune de ces villes.

Les résultats théoriques obtenus constituent des éléments pertinents et quantifiés pour la préparation et l'élaboration d'une gestion de réduction de catastrophe avec des plans de secours.

Par ailleurs, dans les toutes premières heures et journées suivant l'occurrence d'un séisme, les autorités pourraient se fonder, si ce séisme avait des caractéristiques proches de celles du séisme hypothétique ayant servi de référence aux simulations, sur ces prédictions quantitatives afin de focaliser leur attention vers les zones attendues comme étant les plus affectées. En outre, les images satellites et les réseaux sociaux peuvent servir à corroborer rapidement les prévisions théoriques et contribuer à l'actualisation des prévisions. Dès survenue d'un séisme, il convient de procéder, en outre, à la validation et calibrage continuels de la méthodologie.

La procédure théorique élaborée constitue un outil d'aide à la décision de par son évaluation rapide et la localisation des dommages qui seraient enregistrés dans les constructions et équipements existants.

Elle permettrait d'identifier les zones les plus touchées, d'aider les décideurs à émettre le niveau d'alerte à déclencher, et prendre les mesures de secours adéquates permettant de gagner du temps dans les interventions et minimiser les éventuels impacts en vies humaines.

CONCLUSIONS

Conclusion générale

La vulnérabilité des milieux urbains vis à vis des aléas naturels constitue un défi scientifique important à l'échelle mondiale. D'un point de vue sismique, l'analyse et la quantification de cette vulnérabilité, essentiellement du bâti existant, détermine le degré du risque sismique menaçant ces environnements urbains. Cela, nécessite la mise en place de stratégies et d'outils adéquats permettant de réduire ce risque sismique.

L'objectif principal, de la présente thèse, est la mise au point d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique et d'outil d'aide à la décision pour le bâti Algérien. Ainsi, ce travail a été élaboré selon les aspects ci-dessous.

En premier lieu, nous avons mis l'accent sur la compréhension du risque sismique qui menace de plus en plus les environnements urbains à travers le monde entier, et en particulier ceux d'Algérie exposés à ce risque.

La quantification du risque sismique passe par une analyse appropriée de la vulnérabilité sismique du bâti existant, qui signifie l'estimation de son degré d'endommagement vis-à-vis des événements sismiques et de déterminer l'état des constructions représentant plus de risque. A cet effet, des méthodologies et des modèles appropriés d'estimation des dommages sismiques du bâti existant ont été développés permettant une estimation de l'état de résistance de ce bâti, d'une façon globale. Ces méthodologies ont connu un développement important après l'intensification des pertes sismiques qui n'ont pas arrêté de s'accroître ces trois dernières décennies. Elles constituent, donc, un élément indispensable pour une meilleure prévention et protection face à un risque sismique potentiel, car elles permettent une évaluation rationnelle du risque sismique et la fourniture d'un support substantiel aux pouvoirs publics et décideurs pour la prise des mesures préventives adéquates qui peuvent aider à réduire et minimiser les impacts d'un événement majeur.

L'estimation de ce risque sismique est abordé, dans ce travail, par la mise au point d'une approche d'estimation des dommages sismiques selon le contexte du bâti existant en Algérie dans une échelle à 05 degrés de dommages : négligeable, léger, modéré, important,

sévère ou complet. Celle-ci a été inspirée de la méthode HAZUS (Hazard-United States) qui utilise la technique du spectre de capacité. Les courbes de capacité et de fragilité y afférentes ont été adaptées aux typologies correspondantes du contexte du bâti Algérien.

Pour cela, nous avons adopté les types de constructions les plus utilisées en Algérie et qui sont définis dans le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/Version 2003), en se basant sur la nature du contreventement, le nombre d'étages ainsi que la période de construction. Nous avons, donc, adopté 04 catégories de systèmes de contreventement, à savoir, les structures en portiques (poteaux-poutres) en béton armé (jusqu'à 8 étages ou plus), les structures en voiles en béton armé (jusqu'à 8 étages ou plus), les structures métalliques (jusqu'à 8 étages ou plus), ainsi que les structures en maçonnerie (jusqu'à 3 étages ou plus).

Cette méthode a été mise dans une plateforme informatique développée à cet effet intégrant un système d'information géographique (SIG), ce qui facilite le calcul et le traitement rapide de l'ensemble des données avec la génération de cartes de dommages thématiques permettant d'identifier les constructions et les zones les plus endommagées.

Le modèle d'estimation de dommages sismiques élaboré se présente comme un outil d'aide à la décision qui constitue un apport dans le domaine de la planification urbaine et de la gestion de crise en Algérie. Il sert à l'estimation prédictive des dommages sismiques qui peuvent se produire dans une zone urbaine exposée au risque sismique, à travers la réalisation d'un scénario sismique probable, ce qui permettra aux décideurs et aux pouvoirs publics de prendre les mesures préventives adéquates dans la gestion du risque sismique, d'analyser le système urbain et de proposer les plans d'action les plus efficaces, pour une réduction du risque sismique ; il permet d'effectuer une évaluation des dommages post-sismiques, en temps réel dans les quelques instants qui suivent un séisme (estimation post-sismique rapide) dans une zone urbaine touchée, une fois l'épicentre identifié et la magnitude connue, ce qui aiderait à déterminer le niveau d'alerte à déclencher afin de pouvoir mobiliser les moyens de secours nécessaires avec un gain de temps considérable dans l'intervention et le sauvetage des vies humaines.

La méthodologie, ainsi mise au point dans ce travail, a été testée et validée avec le cas du site urbain de la ville (commune) de Boumerdès fortement secouée par le séisme du 21 Mai 2003 de magnitude $M_w = 6.8$. Cette calibration a touché un parc immobilier d'environ 3700 constructions. Les dommages observés et recensés sur ces constructions

ont été comparés aux dommages théoriques estimés par cette méthodologie. Cela a été réalisé en envisageant deux modèles d'aléas sismiques. Dans un premier temps, le spectre de réponse du site construit à partir des enregistrements accélérométriques obtenus durant le choc principal de la secousse a été considéré, et dans un deuxième temps, en adoptant le spectre des règles parasismiques algériennes en vigueur lors de l'occurrence du séisme, le RPA 99. Les résultats de ces scénariis montrent que les dommages réels et théoriques sont proches dans la plupart des cas avec des écarts admissibles

Toutefois, les résultats dérivés à partir du spectre règlementaire montrent une légère surestimation par rapport à l'état réel des dommages post-sismiques qui peut être justifiée par le fait que ce spectre est sécuritaire et tient compte du contexte du bâti Algérien et de ses caractéristiques : un ensemble de facteurs sont considérés afin de garantir des marges de sécurité acceptables par les règles parasismiques. Cette simulation utilisant le spectre des RPA 99 a été faite dans le but de montrer l'utilité de ce dernier qui peut être utilisé en l'absence du spectre propre au site étudié, avec des résultats admissibles.

Enfin, l'outil d'aide à la décision mis au point et validé a été appliqué pour l'estimation des dommages sismiques probables dans deux grands centres urbains d'Algérie, potentiellement exposés au risque sismique, à savoir, la ville de Constantine, ainsi que le Grand-Blida composé de 04 communes (Blida, Ouled-Yaïch, Béni-Mered et Bouarfa).

Perspectives

La précision des résultats théoriques dépend du procédé et de la pertinence du développement des courbes de capacité et de fragilité afin de refléter au mieux le contexte du bâti Algérien.

Dans ce cadre, de futurs travaux peuvent être entrepris dans la perspective d'affiner les diverses étapes et hypothèses adoptées afin de garantir des résultats plus précis avec l'outil développé, grâce :

- Développement des courbes de capacité et de fragilité théoriques ;
- Calibration de ces courbes avec des tests sur des spécimens réels au laboratoire du CGS, afin de refléter au mieux le contexte du bâti Algérien.

APPENDICE A : SYSTEMES D'ALERTE SISMIQUE PRECOCE, D'ALARME SISMIQUE ET DE REPONSE SISMIQUE RAPIDE

A.1. Introduction

Les tremblements de terre sont des évènements naturels imprévisibles ; ni le moment ni le lieu d'occurrence ne peuvent être prédits avec précision dans l'état actuel des connaissances. Ce sont, par ailleurs, des phénomènes de très courte durée dont les effets directs sont quasiment instantanés.

Ils ne sont pas les seuls phénomènes naturels pouvant engendrer des situations catastrophiques [168], tels :

- Les avalanches ;
- Les écroulements massifs de falaises (ou de glaciers) ;
- Certains glissements de terrain rapides dont certains en contexte sous-marins ;
- Les tsunamis ;
- Les éruptions de volcans ;
- Les chutes de débris ou corps célestes massifs ;
- Les inondations et crues dans certains contextes géographiques ou urbains, etc.

Des singularités et phénomènes d'origine anthropique peuvent aussi déclencher des situations désastreuses : montrer des caractères similaires (ruptures de barrages et digues hydrauliques, explosions et incendies chimiques accidentelles, ruptures d'alimentations d'installations électriques, etc.).

L'avancée technologique dans le domaine de l'instrumentation et des télécommunications permet l'utilisation de systèmes de réponse rapide et d'alerte précoce lors d'évènements sismiques. Durant les grands tremblements de terre, de tels systèmes sont capables d'avertir avec quelques secondes ou dizaines de secondes l'arrivée des secousses majeures et de permettre ensuite une estimation rapide de dommages afin d'orienter les secours [25].

En effet, les systèmes d'alerte précoce, d'alarme et de réponse rapide pourraient être d'un grand apport pour la réduction des pertes en vies, bien que ce demeure un défi

scientifique, technologique et humain dans le cas des tremblements de terre car le temps de la pré-alerte est de l'ordre de quelques secondes.

Par ailleurs, les recherches en matière de prévision des tremblements de terre n'ont pas encore pu relever le défi de la prévision précise de l'instant, position et magnitude des séismes imminents, afin d'évacuer, à temps, les zones menacées [169].

Le système d'alerte sismique précoce dans les zones urbaines et industrielles permet l'arrêt d'urgence des systèmes susceptibles d'endommagement, tels les centrales électriques, les moyens de transports, les centres de calcul et les systèmes de téléphonie, ainsi que les équipements et industries critiques.

Les systèmes d'alerte sismique précoce et de réponse sismique rapide peuvent constituer des contributions cruciales pour minimiser la perte des vies et des biens, ainsi que pour orienter efficacement les opérations de secours [26, 27, 28, 29]

La mise en œuvre des systèmes d'alerte sismique précoce urbains a été encouragée par les Nations Unies - International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) et par l'USGS (United States Geological Survey) – ANSS (Advanced National Seismic System).

L'idée de base d'un système d'alerte sismique précoce pour San Francisco, en Californie, a été proposée par Cooper dès 1868 [26]. Une approche moderne d'un système d'alerte sismique précoce pour un réseau d'alerte sismique automatisé a été proposée par HEATON en 1985 [170].

Actuellement, dans certains pays comme le Mexique, la Roumanie, la Californie (Etats-Unis), le Japon, Taiwan, l'Italie, la Turquie et la Grèce, de tels systèmes sont utilisés pour les ouvrages de Génie Civil ou pour la planification [25].

Les *Systèmes de Réponse Rapide* sont des systèmes qui sont conçus pour fournir des informations rapides, suite à un événement sismique, comme la distribution de la secousse sismique majeure (cartes d'aléas), les dommages dans les constructions et le nombre probable des victimes.

Ces informations obtenues à l'aide de ces *Systèmes de Réponse Rapide*, permettent le déploiement rapide et efficace des secours. Ainsi l'intervention rapide du corps médical peut sauver des vies humaines, des autres services publics comme ceux chargés des réseaux du gaz, de l'électricité, de l'eau, etc. peuvent faire éviter des risques secondaires.

L'une des premières priorités dans la protection contre les tremblements de terre

concerne la préservation et protection des vies humaines et des biens. A cet effet, il convient de distinguer diverses phases concernant les événements sismiques [169] :

Quelques années avant un tremblement de terre :

Mesures à prendre : Les mesures de protection et anticipation concerne les conception et renforcement parasismique des bâtiments et des équipements, préparation des plans de secours, élaborer des programmes de préparation de la population, installation des systèmes d'alerte sismique précoce, d'alarme sismique et de réponse sismique rapide.

Quelques secondes avant un tremblement de terre : Système de sécurité : *systèmes d'alerte sismique précoce*. L'alerte déclenchée par ce système dans un intervalle de temps inférieur à 90 secondes permet l'évacuation des bâtiments, l'arrêt des systèmes critiques (telles les installations chimiques), l'arrêt ou déviation des transports, etc. Notons que très peu de gens peuvent être évacués pendant des temps d'alerte préalable de moins de 30 secondes. Cependant, les équipements critiques peuvent être mis hors danger.

Pendant un tremblement de terre :

Système de sécurité : *systèmes d'alarme sismique*. L'alarme déclenchée par ce système fournit le signal d'arrêt des systèmes critiques. Des signaux d'alarme peuvent être utilisés pour l'arrêt d'urgence ou déviation des moyens de transport, mise en fonctionnement adapté ou arrêt des installations industrielles vulnérables ou sources d'effets en cascade.

Immédiatement après un tremblement de terre :

Système de sécurité : *systèmes de réponse sismique rapide*. Ces systèmes permettent de donner une première estimation des dommages et leur répartition spatiale à travers la génération des cartes des dommages dans les quelques secondes suivant l'occurrence d'un séisme. Il s'agit, en effet, de localiser les zones endommagées pour faciliter et optimiser les opérations de secours.

A.2. Concept des différents systèmes

Les systèmes d'alerte sismique précoce, d'alarme sismique et de réponse sismique rapide présentent des caractéristiques spécifiques.

A.2.1. Système d'alerte sismique précoce

Le système d'alerte sismique précoce est le plus sophistiqué des trois systèmes cités. Il nécessite des stations sismiques qui peuvent fournir les intensités spectrales et les

pics d'accélération du sol (PGA), en temps réel, près de la source sismique et une communication continue entre les stations sismiques et la station de traitement centrale [25].

Les systèmes d'alerte sismique précoce utilisent la caractéristique des ondes sismiques pour leur lente propagation par rapport aux ondes électromagnétiques qui sont utilisées pour la transmission de données des secousses et la communication de l'alerte. Le temps maximum de la pré-alerte dans les zones où les failles sont bien définies peut être de l'ordre de 60 à 80 secondes (Mexico). Dans d'autres zones près des failles actives ou lorsque les failles ne sont pas connues, le temps d'alerte peut-être très court, moins d'une dizaine de secondes.

Un Système d'alerte précoce prévient une zone urbaine (ou installations) de l'imminence d'une secousse majeure avant l'arrivée de sa phase la plus destructrice, dans un laps de temps allant de quelques secondes ou dizaines de secondes. Cela permet de déclencher automatiquement les actions appropriées telles l'arrêt des ordinateurs, du courant électrique, des équipements de haute précision, des centrales d'énergie, l'interruption des oléoducs, des équipements de grande énergie et de distribution de gaz, des opérations dans les aéroports, des équipements de fabrication. Il permet aussi d'alerter les salles d'opérations des hôpitaux, d'ouvrir les portes de stations d'incendies, la mise en marche les générateurs de secours, l'interruption des canalisations d'eau, etc. [171, 172].

Un système d'alerte sismique précoce comprend les quatre composants suivants :

1. un réseau de surveillance composé de divers capteurs,
2. un lien de communication en temps réel qui transmet les données des capteurs à un ordinateur,
3. un service de traitement qui convertit les données en information, et
4. un système qui communique l'alerte.

Le système d'alerte précoce peut également être utilisé comme un système d'alarme ou un système de réponse rapide s'il existe des stations sismiques situées dans certains bâtiments critiques distribués uniformément dans une zone urbaine. Généralement un tel système se compose d'un certain nombre de stations sismiques situées près d'une zone de source potentielle. Mais pour les équipements vulnérables présentant un grand risque tels que les centrales nucléaires situées dans des zones de source sismique qui ne sont pas

connues exactement, un nombre suffisant d'instruments doit être placée tout autour dans un rayon de 30 à 60 km afin d'avoir un temps d'alerte suffisant [24].

Les systèmes d'alerte sismique précoce peuvent donner une estimation rapide des paramètres principaux d'un séisme (épicentre, magnitude, temps de début de la secousse, mécanisme au foyer et amplitude de la secousse du sol), pouvant nécessiter environ une minute suite à l'occurrence du séisme [173].

Les algorithmes d'alerte précoce basés sur l'identification de modèles (Réseau de neurones) ont été développés par Dr. MAREN BÖSE à l'Université de Karlsruhe [174]. Dans cette méthodologie, les modèles sismiques sont définis par la forme et le contenu fréquentiel de parties d'accélérogrammes qui sont disponibles, à chaque pas de temps. De ces derniers, les paramètres qui ont rapport aux dommages sismiques, tels que le pic d'accélération au sol (PGA), le pic de vitesse au sol (PGV) et la réponse des amplitudes spectrales à certaines périodes, sont estimés en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA). La technique d'identification de modèle est combinée avec un système basé sur les règles additionnelles afin de détecter des contradictions entre les estimations de mouvement au sol et les mesures. Cette combinaison fournit un système fiable et précis pour l'alerte précoce qui est requise de par son important impact social et économique.

A.2.2. Système d'alarme sismique

Dans le cas d'un système d'alarme sismique, les stations sismiques (instruments de mouvements forts) sont situées dans les bâtiments ou les équipements comme par exemple dans une centrale nucléaire. Une communication permanente est nécessaire entre la station sismique et la station d'alarme. Ces systèmes sont utilisés pour les zones urbaines, les trains à grande vitesse, les routes, les systèmes de distribution de gaz, les centrales nucléaires, les plateformes et équipements d'industrie pétrochimique en mer, les canalisations, les équipements industriels (machines), les stations de radio et unités de secours, les centres de télécommunications, les équipements de production d'électricité, etc.

A.2.3. Système de réponse sismique rapide

Les systèmes de réponse sismique rapide donnent une estimation rapide des cartes d'aléas sismiques, de localisation des zones touchées, de sévérité des dommages ainsi que de distribution géographique des victimes dans ces zones urbaines juste après un tremblement de terre.

L'objectif des systèmes de réponse sismique rapide est de fournir [25] :

- Des informations fiables pour la caractérisation précise et efficace de la secousse et les dommages (cartes d'aléa, de dommages et de victimes) pour la réponse rapide ;
- Des enregistrements des mouvements des structures pour l'analyse de leurs performances post-sismiques ;
- Une Base de données pour les améliorations à long terme du microzonage sismique, des dispositions sismiques des codes de bâtiments et guides de construction ;
- Des données sismologiques pour améliorer la compréhension de la génération des séismes à la source et la propagation des ondes sismiques.

Les méthodologies du système de réponse sismique rapide courantes ont différentes approches pour mesurer et estimer le mouvement du sol dans la zone du séisme, afin d'estimer les cartes d'intensités et de dommages. Les premières approches utilisent les paramètres de source sismiques (Hypocentre, magnitude, intensité) afin d'évaluer le niveau de la secousse et le potentiel de dommages

La deuxième approche utilise les paramètres d'ingénierie directs tels que les cartes de pic d'accélération au sol (PGA), de pic de vitesse au sol (PGV), des spectres de déplacements (SD) pour calculer les dommages potentiels. Pour un système de réponse sismique rapide, un grand nombre de stations sismiques est nécessaire. Ces stations qui sont uniformément réparties sur une zone urbaine, peuvent ne pas avoir une communication continue avec la station centrale. Après le déclenchement par un séisme, les stations émettent des messages électroniques (SMS, e-mail, etc.) vers la station centrale quelques secondes après la fin du séisme. Les messages envoyés peuvent contenir des informations sur le pic d'accélération au sol et l'intensité spectrale, qui peuvent servir de base pour la préparation automatique des cartes de dommages.

Ces systèmes de réponse sismique rapide sont principalement dédiés aux zones urbaines, unités de secours, centres de télécommunication, équipements de production d'électricité, etc.

A.3. Aperçu sur les systèmes d'alerte, d'alarme et de réponse sismique rapide existants

A.3.1. Système d'Alerte Sismique de la Ville de Mexico

En 1985, un tremblement de terre de magnitude $M = 8.1$ dans la région de *Michoacán*, à environ 320 kilomètres à l'ouest de la ville Mexico, a causé de très lourds dommages à la ville. Comme un fort tremblement de terre est attendu dans la lacune de

Guerrero (Guerrero Gap), à environ 300 km au sud-ouest de Mexico, un système d'alerte sismique précoce public (SAS) a été conçu avec l'aide des autorités gouvernementales de la ville de Mexico ; il est opérationnel depuis Août 1991 [26, 29]. Le système d'alerte sismique de Mexico se compose de quatre parties, à savoir : un système de détection sismique, un système de télécommunication double, un système de commande central et un système d'alerte radio pour les utilisateurs (voir figure A.1). Le système détecteur de séisme se compose de 12 stations numériques d'enregistrement de mouvements forts qui s'étend le long de 300 km sur la côte de *Guerrero*, disposées à des distances de 25 km entre elles (voir figure A.2). Chaque détecteur traite continuellement l'activité sismique locale qui se produit dans un rayon de couverture de 100 km autour de chaque station.

Le système de télécommunication double se compose d'une station de relais par radio centrale VHF, située près d'Acapulco, et de trois stations de relais par radio UHF situées entre la côte de Guerrero et la ville de Mexico. Deux secondes sont nécessaires à l'information envoyée par une des stations sur la côte de Guerrero pour atteindre Mexico. Le système de commande central reçoit continuellement les informations sur l'état opérationnel des stations de champs et des stations de relais de communication, ainsi que la détection réelle d'un séisme en cours.

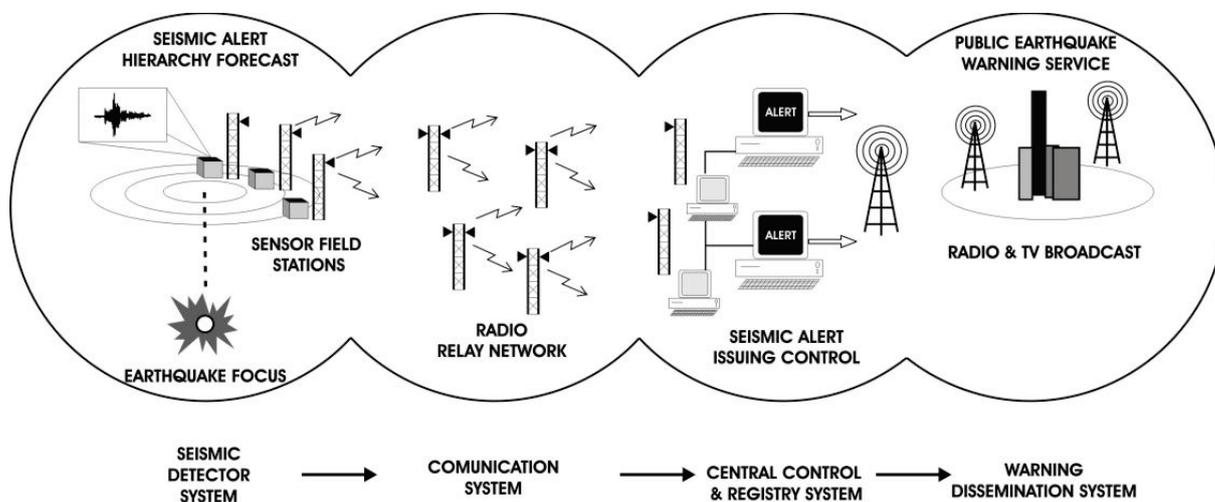


Figure A.1 : Système d'Alerte Sismique de la ville de Mexico [29]

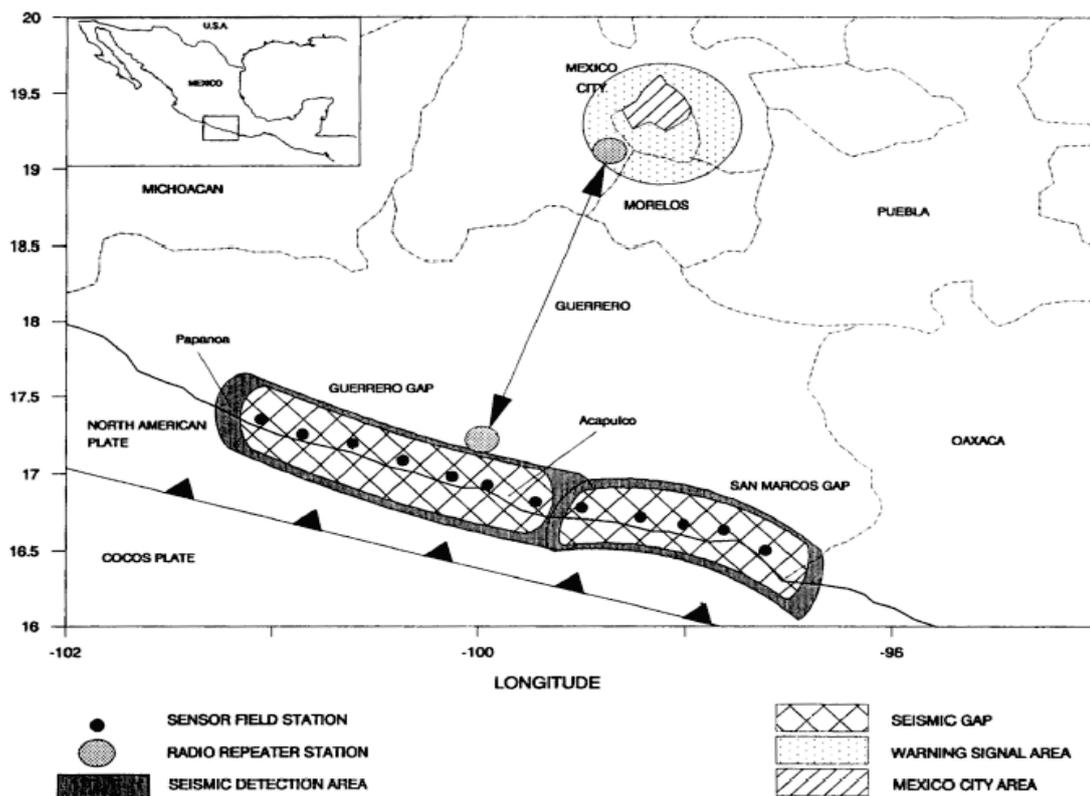


Figure A.2 : Disposition des stations numériques d'enregistrement de mouvements forts le long de Guerrero [25]

L'information reçue depuis les stations est traitée automatiquement pour déterminer la magnitude et est utilisée dans la décision de lancer une éventuelle alerte à la population.

Le système est capable de générer des signaux d'alerte à environ 60 secondes en moyenne avant l'arrivée des premières ondes "S" à Mexico, quand il détecte des séismes majeurs survenus à 280 km plus loin, à Guerrero. Le SAS a été programmé pour lancer un signal d'alerte générale lorsque la magnitude estimée d'un séisme est forte ($M > 6$), et de lancer un autre signal restreint si cette magnitude est modérée ($5 < M < 6$).

A ce jour, le plus grand événement sismique détecté par le SAS est celui du tremblement de terre d'Opala avec une magnitude de 7.3 survenu le 14 septembre 1995. Dans un essai en situation réelle qui a vérifié le système entier, le SAS a été activé et un signal d'alerte général a été lancé à Mexico, 72 secondes avant l'arrivée des effets de la secousse majeure [29].

Le signal d'alerte sismique du SAS a été transmis par l'intermédiaire des stations de la radio locale permettant le fonctionnement des alertes audio et le déclenchement des procédures de prévention conçues dans chaque école publique dans le programme de

réduction du risque sismique appliqué par le Secrétariat de l'Education Publique dans la vallée de Mexico, depuis septembre 1985 [175]. Jusqu'à ce jour, ce système a détecté avec succès plusieurs séismes avec des magnitudes de 4 à 7.4 et sert plus de 240 bâtiments publics et privés à Mexico qui reçoivent les signaux d'alertes sismiques à travers le récepteur radio [29].

A.3.2. Système UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System) au Japon

UrEDAS est le seul système d'alarme d'ondes-P en temps réel en utilisation pratique dans le monde [176]. A la fin des années 1950, la compagnie nationale japonaise des chemins de fer "Japanese National Railways" a commencé l'installation de sismomètres d'alarmes simples le long des lignes ferroviaires. Plus tard, avec le début de l'opération du train rapide "Bullet train" en 1964, le système d'alarme a été amélioré par l'installation des sismomètres disposés à des intervalles de 20 km le long des lignes. Les stations lancent une alerte à chaque fois que le niveau d'accélération horizontale au sol réglé à (40 gal) est dépassé [177]. Les trains se trouvant dans le voisinage des stations d'alarme sont automatiquement ralentis ou arrêtés afin d'éviter les déraillements. Le système *UrEDAS* utilisé pour des chemins de fer au Japon se compose de 30 instruments de mouvement fort.

La caractéristique principale du système est l'alarme rapide utilisant l'information des données des ondes-P. Les systèmes pour différents chemins de fer sont opérationnels depuis 1983 [178]. *UrEDAS* détecte les mouvements des ondes-P, estime l'azimut d'épicentre et la magnitude, calcule la distance épacentrale et la profondeur du foyer en l'espace d'environ 3 (trois) secondes et permet de lancer l'alarme aux endroits qui peuvent être endommagés. Ce système est non seulement utile pour les chemins de fer mais également pour les centrales nucléaires, etc.

Il y a actuellement un autre type d'*UrEDAS* appelé "*Compact UrEDAS*" dont la fonction est d'évaluer si le séisme devrait s'avérer destructif ou non, et de lancer l'alarme, lorsque nécessaire, dans un rayon de 20 à 200 km, [176].

A.3.3. Système SIGNAL (Seismic Information Gathering and Network Alert System) au Japon

Le système de réponse en temps réel SIGNAL a été développé par Tokyo Gas [25]. Ce système permet une estimation rapide et précise des dommages des canalisations du gaz. Dans ce système, les dommages sont calculés en utilisant les données du système d'information géographique (topographie, sol, canalisations, et nombre de clients) et les

données en temps réel mesurées par les capteurs sismiques. Il a été rendu opérationnel en 1994, et amélioré par la suite grâce à un réseau plus dense.

A.3.4. Système d'Alarme sismique pour le Réacteur Nucléaire d'Ignalina en Lituanie

Le système se compose de deux parties, la première concerne l'alarme sismique (Seismic Alert System, SAS) et l'autre la surveillance sismique (Seismic Monitoring System "SMS"). Le SAS est conçu pour détecter les tremblements de terre majeurs et pour lancer une alarme avant l'arrivée des ondes de cisaillement pouvant menacer le réacteur. Six stations SAS sont installées à une distance de 30 km de la centrale nucléaire formant une rangée, comme une "barrière" sismique. Un tremblement de terre ayant un épocentre en dehors de la barrière est détecté environ 4 secondes avant qu'il ne "soit ressenti" par le réacteur qui pourrait être mis à l'arrêt avant l'arrivée du « séisme » [24].

A.3.5. Systèmes de Réponse Sismique Rapide et d'Alerte Sismique Précoce d'Istanbul

Ce système a été développé et mis en fonction par l'université de Bogazici avec l'aide du gouvernorat d'Istanbul, du quartier général des premières forces armées et de la municipalité métropolitaine d'Istanbul. La construction du système a été réalisée par *Geo-Sig* (<http://www.geosig.com>) et le consortium Electrowatt-Ekono (www.ewe.ch). Les communications sont fournies par le fournisseur de service d'ARIA GSM (<http://www.aria.com.tr>) [179].

Le système comprend les composants suivants [180] :

- Système de surveillance composé de divers capteurs,
- Liaison de communication (hors connexion pour la réponse rapide ou en connexion pour l'alerte précoce) qui transmet les données à partir des capteurs aux ordinateurs ;
- Equipements de traitements de données ;
- Système de communication des informations de réponse rapide et d'alerte précoce.

Ce système est composé de deux parties dédiées à la réponse sismique rapide ou l'alerte sismique précoce, respectivement.

A.3.5.1. Système de réponse sismique rapide

Dans la partie réponse du système pour Istanbul, le positionnement des instruments est effectué en utilisant les résultats d'estimation du risque et d'aléa sismique déterministe et en considérant [25] :

- Une grande probabilité de secousse (courte et longue période) ;
- Une grande probabilité de dommages (cartes de distribution de dommages) et
- Une grande probabilité de victimes humaines (cartes de distribution des victimes humaines).

Les instruments de mouvements forts, espacés d'environ 2 à 3 km, sont généralement placés au rez-de-chaussée des bâtiments à petite et moyenne hauteur de manière que le mouvement enregistré corresponde à celui sur le sol dans les zones environnantes. Pour la communication des données des stations de réponse rapide au centre de traitement des données et pour le contrôle des instruments, un système de communication GSM fiable est utilisé. Régulièrement, les stations de réponse rapide sont interrogées pour en contrôler l'état de fonctionnement. Une fois déclenchée, chaque station traite les données de mouvements forts fournis par trois canaux pour obtenir les accélérations spectrales à des périodes spécifiques, les pics d'accélération et de vitesse au sol filtrés à 12Hz, et envoient ensuite ces paramètres sous forme de messages courts SMS toutes les 20sec directement au centre de données principal à travers le système de communication 'GSM'. Les cartes d'aléa, de dommages et de distribution du nombre des victimes sont générées automatiquement aux centres de données après le séisme et sont communiquées aux utilisateurs dans un délai de 5 minutes.

A.3.5.2. Système d'alerte sismique précoce

Dans la partie d'alerte précoce du système, dix stations de mouvements forts ont été implantées en zone proche à la grande faille de Marmara en mode "en ligne". Une télémétrie continue des données entre ces stations et le centre de données principal est réalisée avec un système de modem radio de spectre de diffusion numérique. Vu la complexité du mécanisme de rupture de la faille et les courtes distances qui sont considérées par rapport à cette faille, un algorithme d'alerte précoce simple et puissant est mis en application. Les accélérations filtrées passe-bande et la vitesse cumulative absolue (VCA) (voir figure A.3) sont comparées avec les niveaux de seuils fixés. Quand une accélération ou VCA (sur n'importe quel canal) dans une station donnée excède les valeurs de seuils fixés, elle est considérée comme une alerte. S'il y a des alertes dans 2 ou 3 stations différentes dans un intervalle de temps spécifié, une alarme est déclenchée. Les informations d'alerte précoce, comportant trois niveaux d'alerte, sont communiquées aux systèmes d'arrêt automatique des équipements, qui décident alors de l'action appropriée sur la base du niveau d'alerte.

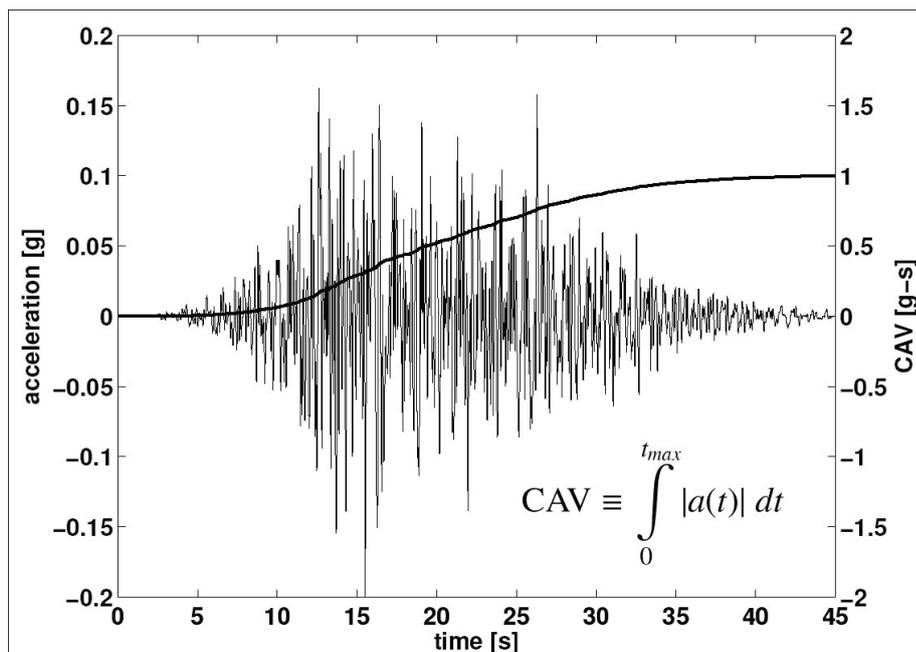


Figure A.3 : Vitesse Cumulative Absolue [25]

A.3.6 Systèmes de Reportage Sismique et d'Alerte Sismique Précoce de Taiwan

Le système de reportage sismique rapide et d'alerte sismique précoce de Taiwan utilise un réseau d'accélérographes de mouvements forts en temps réel. Il se compose, actuellement, de 86 stations de mouvements forts distribuées à travers tout le territoire de Taiwan, soit sur une superficie de (100 km x 300 km) contrôlée par le bureau météorologique central. Le système de reportage rapide peut donner des informations dans une minute après l'occurrence du séisme. Les informations concernent l'épicentre, la magnitude et les cartes d'aléa de la région de Taiwan. L'estimation de dommages rapide du système est encore en développement.

La partie d'alerte précoce du système réalise le temps de reportage sismique autour de 20 secondes. Elle donne une alerte sismique précoce pour les zones métropolitaines localisées à plus de cent kilomètres de l'épicentre [25].

A.3.7. Systèmes de Réponse Sismique Rapide en Californie (Etats Unis d'Amérique)

Plusieurs systèmes de réponse sismique rapide ont été développés en Californie depuis le début des années 1980 pour faire face au risque sismique. Parmi les systèmes les plus connus, il y a.

A.3.7.1. Les systèmes de notifications rapides CUBE et REDI

Les systèmes de notifications rapides ont été utilisés par l'USGS (United States Geological Survey) en Californie depuis le début des années 1980. En 1990, l'institut de Technologie de la Californie (Caltech) et le bureau de l'USGS à Pasadena ont lancé le projet CUBE (Caltech USGS Broadcast Earthquakes) [26]. Ce système fournit, en temps réel, les paramètres d'un séisme tels la magnitude, l'épicentre et le temps de début de la secousse et les rend disponibles sur une page électronique en utilisant un système d'information géographique (SIG) afin de fournir une sismicité continue de la région concernée [26].

En 1993, l'université de Berkeley et le bureau de l'USGS à Menlo ont développé un système connu sous le nom de REDI (Rapid Earthquake Data Integration Project) pour annoncer les données du séisme dans le nord de la Californie [26].

A.3.7.2. Outil d'estimation rapide de dommages post-sismique rapide 'EPEDAT'

Après identification de la magnitude et de l'épicentre du séisme à partir du système CUBE, l'outil d'estimation rapide de dommages post-sismique (Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool 'EPEDAT') [181] utilise les données liées à la faille et la sismicité pour faire coïncider la source sismogénique la plus probable. Les modèles d'amplification de mouvement du sol sont alors utilisés pour estimer les modèles d'intensités prévus dans la zone affectée. Ces intensités sont alors reportées sur des fichiers de données numériques contenant un inventaire global des bâtiments et des réseaux vitaux de la région. En se basant sur les modèles d'estimation de dommages sismiques ainsi que sur les modèles d'intensités calculés, les dommages des constructions, des réseaux vitaux ainsi que des victimes sont estimés pour la zone touchée.

A.3.7.3 Systèmes développés par le CISN (The California Integrated Seismic Network)

Après les séismes majeurs de de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994) durant lesquels ont été enregistré beaucoup de retard dans l'intervention des services de secours, d'estimation rapide de la magnitude et de la position exacte de l'épicentre, un nouveau système appelé TriNet a été développé par trois organismes, le CGS (California Geological Survey), le Caltech (California Institute of Technology) et l'USGS (United States Geological Survey). Le principe de base est que les réseaux de mouvements forts peuvent être utilisés pour fournir des cartes en temps réel des mouvements du sol [171]. Le système

TriNet avait une avance significative par rapport aux anciens systèmes analogiques, et a rendu possible la diffusion de la magnitude et de l'épicentre sur une page numérique rendue disponible à divers utilisateurs. Ce système a ensuite évolué et a été développé pour fournir et diffuser sur Internet, en temps réel pour les régions touchées par un séisme, des cartes d'aléa (ShakeMap) grâce à l'utilisation d'un SIG. Ces cartes constituent un support pertinent pour les responsables et les organismes de secours permettant d'orienter et d'organiser des interventions de secours rapides et efficaces. Une autre avance pour ce système résidait dans le développement d'une interface ShakeMap/HAZUS permettant, à partir de la connaissance de la magnitude et la localisation de l'épicentre, de fournir des données utiles, précises et rapides en temps réel aux organismes appropriés pour gérer la crise.

Actuellement, une version d'information en temps réel, appelée CISNDisplay (voir figure A.4), plus performante est mise en application (voir figure A.4). C'est une application sur web utilisant un SIG qui promet de devenir un véhicule pour la distribution d'informations sismiques en temps réel de sources multiples [171]. Ces données incluent la magnitude, la position et le mécanisme au foyer, les cartes d'aléa, des pics d'accélération au sol (PGA), des pics de vitesses au sol (PGV) ainsi que l'estimation des pertes par le modèle d'estimation des dommages sismiques HAZUS.

La figure ci-après représente l'interface du CISNDisplay après le séisme de Médéa (M = 4) en date du 27 Mai 2007 pris comme exemple.

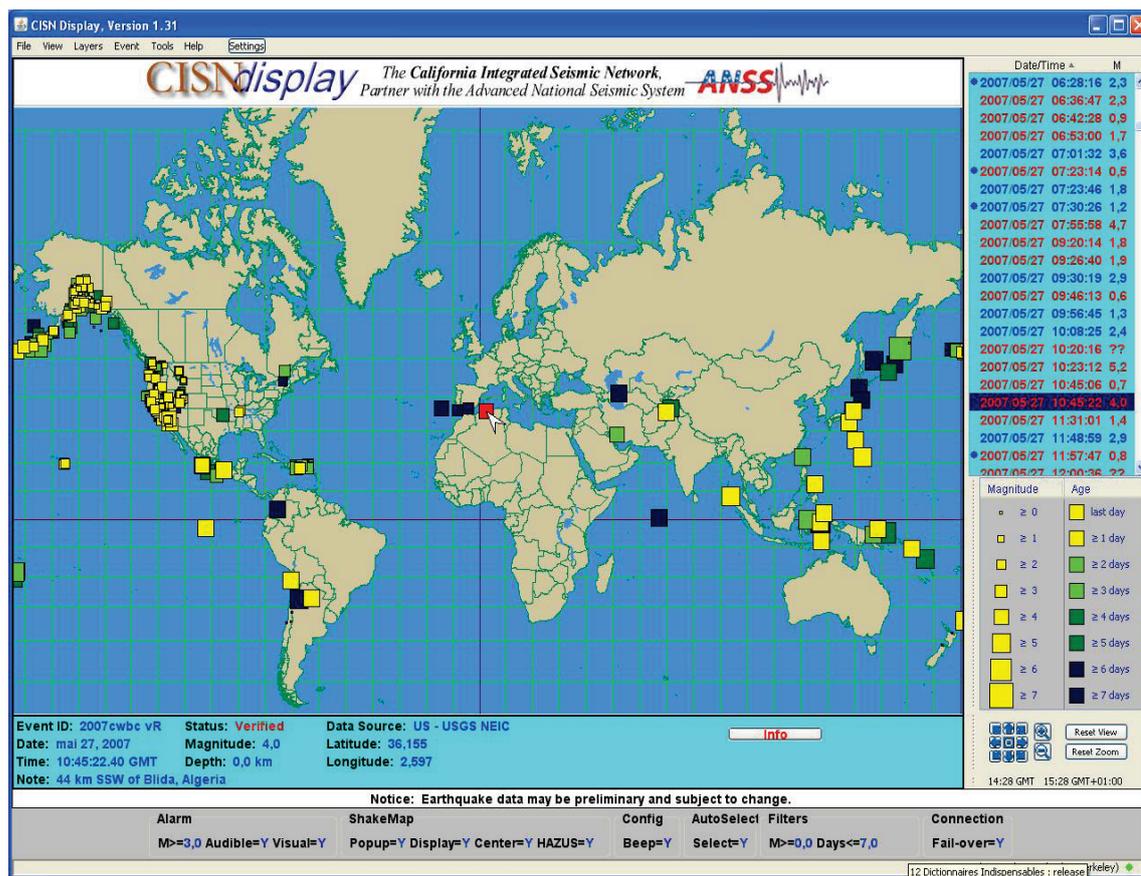


Figure A.4 : Interface du CISNDisplay (après le séisme de Médéa du 27 Mai 2007, M=4)

A.3.7.4. Intégration d'autres technologies d'information en temps réel

En plus des technologies décrites ci-avant, d'autres données de réseaux du système GPS (Global Positioning Satellite System) et de télédétection sont également disponibles en temps réel, suite à un séisme majeur. Ces technologies peuvent compléter les données sismiques et mouvements forts en fournissant des mesures de déplacements statiques et dynamiques et des images de changements topographiques et de dommages. Le tendance actuelle consiste à mettre en place des systèmes intégrés interactifs d'aide à la décision en temps réel qui combinent l'information disponible, via de multiples réseaux, et communiquent cette information aux organismes de secours dans des formats utilisables pour la gestion des secours. Ces systèmes interactifs d'aide à la décision fournissent des informations précises sur l'ampleur des dommages et les zones les plus touchées permettant d'activer judicieusement les secours notamment.

A.4. Conclusion

Dans cette recherche, il a été montré que l'avance technologique dans le domaine de l'instrumentation et de la télécommunication sismique permet l'implémentation des systèmes d'alerte sismique précoce, d'alarme sismique et de réponse sismique rapide en temps réel. Ces systèmes sont capables de déclencher des alertes et alarmes quelques secondes à quelques dizaines de secondes avant l'arrivée des secousses majeures et permettent d'estimer rapidement les dommages afin d'orienter et de diriger les secours pouvant éviter les situations catastrophiques.

Les systèmes d'alerte sismique précoce ont comme objectif de déclencher l'alerter pour une zone urbaine ou des équipements stratégiques quelques secondes avant l'arrivée d'un séisme majeur, et peuvent donner l'estimation en temps réel des paramètres de la source (sismologie en temps réel) tels la position de l'épicentre et la magnitude. Pour leur part, les systèmes d'alarme sismique ont comme finalité d'être utilisables pour l'arrêt des installations critiques, telles les centrales énergétiques, lors d'un séisme. En complément, les systèmes de réponse sismique rapide sont des systèmes post-sismiques permettant de donner une estimation des dommages de la zone touchée à travers la réalisation des cartes d'aléas, de dommages et de victimes qui serviront à bien diriger et ajuster les opérations des secours dans le but de minimiser la perte en vies humaines ou matérielles.

Il y a plusieurs systèmes d'alerte sismique précoce, d'alarme et de réponse rapide conçus à travers plusieurs pays. Ces systèmes adaptés au contexte algérien pourraient s'avérer bénéfiques en matière de réduction des pertes humaines et économiques lors d'un évènement sismique.

**APPENDICE B : VALEURS DES PARAMETRES DEFINISSANT LES COURBES
DE CAPACITE ET DE FRAGILITE ADOPTÉES POUR LES TYPOLOGIES DU
BATI EXISTANT EN ALGERIE**

Tableau B.1 : Valeurs des paramètres définissant les courbes de fragilité

Pré-Code								
Typologie	DEPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Dommages Léger		Dommages Modérés		Dommages Importants		Dommages Complètes	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
RC1-B	1.09	1.19	2.18	1.15	5.49	1.15	12.80	0.92
RC1-M	1.83	0.90	3.66	0.86	9.14	0.90	21.34	0.96
RC1-H	2.64	0.73	5.26	0.75	13.16	0.90	30.73	0.95
RC2-B	1.47	1.11	2.79	1.09	7.21	1.07	18.29	0.93
RC2-M	2.44	0.86	4.65	0.83	12.04	0.80	30.48	0.98
RC2-H	3.51	0.73	6.71	0.75	17.32	0.92	43.89	0.97
S-B	1.32	1.20	2.64	1.11	6.58	1.08	15.37	0.95
S-M	2.18	0.85	4.39	0.83	10.97	0.94	25.60	0.99
S-H	3.18	0.72	6.86	0.75	17.12	0.92	39.93	0.96
URM-B	0.81	1.15	1.65	1.19	4.11	1.20	9.60	1.18
URM-M	1.27	0.99	2.57	0.97	6.40	0.90	14.94	0.88

Bas-Code								
Typologie	DEPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Dommages Léger		Dommages Modérés		Dommages Importants		Dommages Complètes	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
RC1-B	1.37	1.09	2.74	1.07	6.86	1.08	16.00	0.91
RC1-M	2.29	0.85	4.57	0.83	11.43	0.79	26.67	0.98
RC1-H	3.30	0.71	6.58	0.74	16.46	0.90	38.40	0.97
RC2-B	1.83	1.04	3.48	1.02	9.02	0.99	22.86	0.95
RC2-M	3.05	0.82	5.82	0.81	15.04	0.81	38.10	0.99
RC2-H	4.39	0.68	8.38	0.73	21.67	0.84	54.86	0.95
S-B	2.74	0.96	4.39	0.89	10.97	0.86	27.43	0.98
S-M	4.57	0.70	7.31	0.73	18.29	0.85	45.72	0.98
S-H	7.13	0.66	11.40	0.67	28.52	0.74	71.32	0.92
URM-B	1.04	0.99	2.06	1.05	5.15	1.10	12.01	1.08
URM-M	1.60	0.91	3.20	0.92	8.00	0.87	18.67	0.91

Code-Modéré								
Typologie	DEPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Dommage Léger		Dommage Modéré		Dommage Important		Dommage Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
RC1-B	1.72	1.00	3.44	1.00	8.57	1.01	20.0	0.90
RC1-M	2.87	0.80	5.70	0.80	14.29	0.69	33.33	1.00
RC1-H	4.13	0.69	8.23	0.73	20.58	0.90	45.98	0.99
RC2-B	1.83	0.91	3.86	0.97	10.59	1.03	27.43	0.87
RC2-M	3.05	0.81	6.43	0.77	17.65	0.73	45.72	0.91
RC2-H	4.39	0.66	9.25	0.68	25.40	0.70	65.84	0.87
S-B	2.74	0.93	4.75	0.92	12.80	0.93	32.92	0.93
S-M	4.57	0.70	7.92	0.69	21.34	0.69	54.86	0.89
S-H	7.13	0.66	12.37	0.64	33.27	0.69	85.60	0.80

Haut-Code								
Typologie	DEPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Dommage Léger		Dommage Modéré		Dommage Important		Dommage Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
RC1-B	1.72	0.92	4.32	0.93	10.71	0.94	25.00	0.89
RC1-M	2.87	0.75	7.11	0.77	17.79	0.60	41.65	1.02
RC1-H	4.13	0.67	10.23	0.72	25.73	0.90	59.95	1.01
RC2-B	1.83	0.81	4.57	0.84	13.72	0.93	36.58	0.92
RC2-M	3.05	0.74	7.62	0.77	22.86	0.68	60.96	0.77
RC2-H	4.39	0.68	10.97	0.65	32.92	0.66	87.78	0.75
S-B	2.74	0.81	5.49	0.89	16.46	0.94	43.89	0.83
S-M	4.57	0.67	9.14	0.67	27.43	0.68	73.15	0.79
S-H	7.13	0.63	14.27	0.63	42.80	0.64	114.12	0.71

Tableau B.2 : Valeurs des paramètres définissant les courbes de capacité

Niveau du Code	Typologie	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
		S _{dy} (cm)	S _{ay} (g)	S _{du} (cm)	S _{au} (g)
Pré-Code	RC1-B	0.30	0.100	3.43	0.225
	RC1-M	0.66	0.083	4.95	0.188
	RC1-H	1.88	0.063	10.49	0.143
	RC2-B	0.30	0.100	4.57	0.250
	RC2-M	0.66	0.083	6.6	0.208
	RC2-H	1.88	0.063	13.98	0.159
	S-B	0.30	0.100	3.05	0.200
	S-M	0.86	0.083	5.77	0.167
	S-H	2.77	0.063	13.84	0.127
	URM-B	0.61	0.200	6.10	0.400
	URM-M	0.69	0.111	4.60	0.222
Bas-Code	RC1-B	0.30	0.100	3.43	0.225
	RC1-M	0.66	0.083	4.95	0.188
	RC1-H	1.88	0.063	10.49	0.143
	RC2-B	0.30	0.100	3.81	0.250
	RC2-M	0.66	0.083	5.48	0.208
	RC2-H	1.88	0.063	11.66	0.159
	S-B	0.41	0.100	3.99	0.200
	S-M	1.55	0.083	10.26	0.167
	S-H	4.93	0.063	24.59	0.127
	URM-B	0.61	0.200	6.10	0.400
	URM-M	0.69	0.111	4.60	0.222
Code-Modéré	RC1-B	0.61	0.200	6.86	0.450
	RC1-M	1.32	0.167	9.86	0.375
	RC1-H	3.73	0.127	20.87	0.286
	RC2-B	0.61	0.200	9.14	0.500
	RC2-M	1.32	0.167	13.18	0.417
	RC2-H	3.73	0.127	27.99	0.317
	S-B	0.79	0.200	9.55	0.400
	S-M	3.07	0.167	24.64	0.333
	S-H	9.83	0.127	59.03	0.254
Haut-Code	RC1-B	1.22	0.400	18.25	0.890
	RC1-M	2.64	0.333	29.13	0.750
	RC1-H	7.46	0.254	55.51	0.571
	RC2-B	1.22	0.400	24.36	1.000
	RC2-M	2.64	0.333	35.13	0.833
	RC2-H	7.46	0.254	74.59	0.635
	S-B	1.60	0.400	25.45	0.800
	S-M	6.17	0.333	65.74	0.667
	S-H	19.69	0.254	157.4	0.508

APPENDICE C : LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

μ_D : dommage moyen

I : Intensité sismique

I_v : Indice de vulnérabilité

PGA : Accélération maximale au sol (Peak Ground Acceleration)

PGV : Vitesse maximale au sol (Peak Ground Velocity)

PF₁ : facteur de participation modal du mode fondamental

α_1 : Coefficient de masse modal du mode fondamental

ϕ_{i1} : Amplitude du premier mode au niveau i

V : Effort tranchant à la base

W : Poids de la structure

Δ_{Toit} : Déplacement au sommet de la structure

S_a : Accélération spectrale

S_d : Déplacement spectral

ω : pulsation ($2\pi/T$)

$\bar{S}_{d,ds}$: est la valeur moyenne du déplacement spectral

$\Phi(\cdot)$: Fonction de répartition de distribution normale standardisée

MMI : Modified Mercalli Intensity

A : Coefficient d'accélération (g) ;

ξ : Pourcentage d'amortissement critique ;

R : Coefficient de comportement de la structure ;

T₁ et T₂ : Limites inférieures et supérieures de l'intervalle des périodes définissant la branche de l'accélération spectrale constante.

Q : Facteur de qualité.

η : Facteur de correction d'amortissement

ξ_{eff} : Amortissement effectif

ξ_0 : Amortissement hystérétique

ξ_{eq} : Amortissement équivalent

V_s : Vitesse de cisaillement

M_w : Magnitude de moment

H/V : mesure de bruit de fond

REFERENCES

1. CTC: Contrôle Technique de la Construction, "Rapport Général sur le séisme d'El Asnam du 10 Octobre, 1980", (1981), Algérie.
2. Bertero, V., Shah, H. El-Asnam, "Algeria Earthquake of October 10, 1980. A Reconnaissance and Engineering Report", Report EERI, (January 1983).
3. Boughacha, M.S., Ouyed, M., Ayadi, A., Benhallou, H., "Seismicity and seismic hazard mapping of northern Algeria: Map of Maximum Calculated Intensities (MCI)", *Journal of Seismology*, V.8, (2004), 1-10.
4. Bounif, A., Haessler, H., Meghraoui, M., "The Constantine (northeast Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study", *Earth and Planetary Science Letters*, V. 85, (1987), 451-460.
5. Deschamps, A., Bezzeghoud, M., Bounif, M.A., "Seismological study of the Constantine (Algeria) earthquake (27 October 1985)", In: J. Mezcua and A. Udías (eds.), *Seismicity and seismic risk of the Ibero-Maghrebian region*, I.G.N Publication 8, (1991), 163–173.
6. Ousadou, F., Dorbath, L., Dorbath, C., Bounif, M.A, Benhallou, H., "The Constantine (Algeria) seismic sequence of 27 October 1985: a new rupture model from aftershock relocation, focal mechanisms, and stress tensors", *Journal of Seismology*, V.17, n° 2, (2013), 207-222.
7. Farsi, M.N, Belazougui, M., "The Mont Chenoua (Algeria) Earthquake of October 29th 1989; Damage assesement and Distribution". *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, (1992), Madrid, Spain.
8. Hamdache, M., "Seismic Hazard Estimation in Northern Algeria, *Natural Hazards*", V.18, (1998), 119–144.
9. Bounif, A., Bezzeghoud, M., Dorbath, L., Legrand, D., Deschamps, A., Rivera, L., Benhallou, H., "Seismic source study of the 1989, October 29, Chenoua (Algeria) earthquake from aftershocks, broad-band and strong ground motion records". *Annals of Geophysics*, V.46, n° 4, (2003), 625-646.
10. Bezzeghoud, M., Buforn, E., "Study of the Athusemas (26/05/94) and Mascara (18/08/94) earthquakes and seismotectonics of the region", *Annals of Geophysics*, EGS, The Hague, (6–10 May 1996), Part I, V.14, n° 88.
11. Ayadi, A., Ousadou-Ayadi, F., Bourouis, S., Benhallou, H., "Seismotectonics and seismic quietness of the Oranie region (Western Algeria): The Mascara earthquake of August 18th 1994, $M_w = 5.7$, $M_s = 6.0$ ", *Journal of Seismology* V.6, (2002), 13-23.
12. Yelles-Chaouche, A.K., Djellit, H., Derder, M., Abtout, A., Bourouis, S., "The Ain Benian Fault: A new active coastal fault revealed by the Algiers September 4, 1996 earthquake", *IASPE*, (August 18–28 1997), Thessaloniki, Greece.
13. CGS: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, "Séisme de Ain Témouchent du 22 Décembre 1999 ($M_w=5,7$)", *Rapport Final*, (2000)., Algérie

14. Yelles-Chaouche, A., Djellit, H., Beldjoudi, H., Bezzeghoud, M., Buforn, E., “The Ain Temouchent (Algeria) Earthquake of December 22nd, 1999”, *Pure and Applied Geophysics*, V.161, (2004), 607-621.
15. Belabbès, S., Meghraoui, M., Çakir, Z., Bouhadad, Y., “InSAR analysis of a blind thrust rupture and related active folding: the 1999 Ain Temouchent earthquake (Mw 5.7, Algeria) case study”, *Journal of Seismology*, V.13, (2009), 421–432.
16. Bouhadad, Y., Nour, A., Laouami, N., Belhai, D., “The Beni-Ourtilane-Tachaouaft fault and Seismotectonic aspects of the Babors region (NE of Algeria)”, *Journal of Seismology*, V. 7, (2003), 79–88.
17. Belazougui, M., “Boumerdès Algeria earthquake of May 21, 2003: damage analysis and behavior of beam-column reinforced concrete structures”, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, (12-17 October 2008), Beijing, China.
18. Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Kibboua, A. and Mehani, Y., “The Effects of Building Characteristics and Site Conditions on the Damage Distribution in Boumerdès after the 2003 Algeria Earthquake”, *Earthquake Spectra*, V. 28, n°.1, (2012), 185–216.
19. Boukri, M., Farsi, M.N, Mébarki, A., Belazougui, M., “Development of an integrated approach for Algerian building seismic damage assessment”. *Structural Engineering and Mechanics*, V.47, n° 4, (2013), 471-493.
20. Hamdache, M., Peláez, J.A., Talbi, A., López Casado, C., “A Unified Catalog of Main Earthquakes for Northern Algeria from A.D. 856 to 2008”, *Seismological Research Letters*, V. 81, n° 5, (2010), 732-739.
21. OMS: Organisation mondiale de la santé, site-web: <http://www.who.int/hac/techguidance/ems/earthquakes/fr/>.
22. Federal Emergency Management Agency, FEMA, “HAZUS99: Earthquake Loss Estimation Methodology”, Technical Manual, (2002), Washington, DC, United States.
23. UNISDR: United Nations International Strategy for Disaster Reduction web-site.
24. Wieland, M., Griesser, L., and C. Kuendig., “Seismic Early Warning System for a Nuclear Power Plant”. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, (January 31-February 4, 2000), Auckland, New Zealand,
25. Erdik, M., “Urban Earthquake Rapid Response And Early Warning Systems, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology”, Keynote Address K4, (3-8 September 2006), Geneva, Switzerland.
26. Kanamori, H., Hauksson, E. and Heaton, T., “Real-Time Seismology and Earthquake Hazard Mitigation”, *Nature*, V. 390, (1997), Macmillan Publishers Ltd.
27. Teng, T.L., Wu, Y. M., Shin, T.C., Tsai, Y.B., and Lee, W.H.K., “One minute after: strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude”, *Bulletin of American Society of Seismology*, V. 87, (1997), 1209-1219.
28. Allen, R. and Kanamori, H., “The Potential for Earthquake Early Warning in South California”, *Science*, 300, (2003), 786-789.
29. Espinoza-Aranda, J., Cuélar, A., and Rodriguez, F.H., Frontana, B., Ibarolla, G., Islas, R., Garcia, A., “The seismic alert system of Mexico (SASMEX): Progress and its

- current applications”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V.31, (2011), 154-162.
30. Barbat, A.H., Lagomarsino, S. and Pujades, L.G., “Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings”, Chapter 6, *Assessing And Managing Earthquake Risk*, (2006), Springer.
 31. Coburn A. and Spence R., “Earthquake Protection”, John Wiley and Sons, (1992), 355p.
 32. Coburn, A., and Spence, R., “Earthquake Protection”. Second Edition, John Wiley and Sons, (2002), 420 p.
 33. Cardona, O. D. and Barbat, A. H., “El riesgosísmico y suprevención, Calidad Siderúrgica”, (2000), Madrid, Spain.
 34. Federal Emergency Management Agency, FEMA, HAZUS MH-5: “Earthquake Loss Estimation Methodology”, Technical and user’s Manual, (2004), Washington, DC, United States.
 35. Bendimerad, F., “Disaster Risk Reduction and Sustainable Development”, Natural Disaster Risk Management Program, World Bank Institute Distance Learning, (2003).
 36. Federal Emergency Management Agency, “FEMA-176: NEHRP Handbook for the seismic evaluation of existing buildings”, Report, (1989), Washington, DC, United States.
 37. Kramer, S. L., “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice-Hall, Inc, (1996), USA, 653 p.
 38. Risquemajeurs.fr (site-web) : Information sur les risques majeurs, Ministère de l’Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, France.
 39. Cagnan, Z., Demircioglu, M.B., Durukal, E., Erdik, M., Hancilar, U., Harmandar, E., Sesetyan, K., Tuzun, C., Yenidogan, C., Zulfikar, A.C., “Development of ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) Methodology: Vulnerability Relationships”, Network of Research Infrastructures for European Seismology, Report, (2009).
 40. Benedetti, D., Benzoni, G. and Parisi, M. A., “Seismic Vulnerability and Risk Evaluation for Old Urban Nuclei” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V.16, (1988), 183-201.
 41. Boukri, M., “Détermination de l’indice de vulnérabilité des constructions en maçonnerie de la ville d’Alger”, Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab, Blida, (2003), Algérie.
 42. Saeidi, A., “La vulnérabilité des ouvrages soumis aux aléas mouvements de terrains: développement d’un simulateur de dommages”, Thèse de Doctorat en Génie civil, Université de Nancy, (2010), France.
 43. Mébarki, A., Boukri, M., Laribi, A., Farsi, M.N., Belazougui, M., Kharchi, F., “Seismic vulnerability: theory and application to Algerian buildings”. *Journal of Seismology*, V. 18, n° 2, (2013), 331-343.
 44. Boukri, M. and Bensaïbi, M., “Vulnerability index of Algiers masonry buildings”, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, (12-17 October, 2008), Beijing, China, paper 09-01-0118.

45. Marulanda, M. C., Barbat, A.H., Cardona, O. D., Mora, M. G., “Design and Implementation of a Collective Insurance Program based on Cross Subsidies for Recovery of Low Income Homeowners”, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, (24-28 September 2012), Lisbon, Portugal.
46. Crowley, H., Colombi, M., Crempien, J., Erduran, E., Lopez, M., Liu, H., Mayfield, M. Milanesi, M., “Global Earthquake Model 1 (GEM1)”, Seismic Risk Report, (October 2010).
47. D’Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T, Crowley, H., Silva, V., “Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of low/mid-rise Buildings”, Report produced in the context of the Vulnerability Global Component project, (February 2014).
48. Seneviratna, G. D., and H. Krawinkler, “Strength and Displacement Demands for Seismic Design of Structural Walls”, Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, (1994), Chicago, Illinois, United States.
49. Moehle, J. P., “Displacement-Based Design of RC Structures Subjected to Earthquakes”, Earthquake Spectra, EERI, V. 8, n° 3, (1992), 403-428.
50. Chiroiu, L., "Développement des courbes de capacité pour une typologie standardisée des structures. Application à l’estimation de dommages", 6^{ème} colloque national en génie parasismique, (2003), AFPS, Paris.
51. Applied Technology Council, ATC-40., “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, V. 1, (1996), Redwood City, California, USA.
52. Kircher, Charles A., Aladdin A. Nassar, Onder Kustu and William T. Holmes, “Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation,” Earthquake Spectra, V.13, n° 4, (1997), (Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute).
53. Rossetto T., Elnashai A., “Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data”, Engineering Structures, V.25, n° 10, (2003), 1241-1263.
54. Charvet, I., Ioannou, I., Rossetto, T., Suppasri, A., Imamura, F., “Empirical fragility assessment of buildings affected by the 2011 Great East Japan tsunami using improved statistical models”, Natural Hazards, (2014), DOI 10.1007/s11069-014-1118-3.
55. Global Earthquake Model web-site, <http://www.globalquakemodel.org>.
56. Whitman R.V., Reed U.W., Hong S.T., “Earthquake damage probability matrices”, Proceedings of 5th World Conference on Earthquake Engineering, (1973), Rome, Italy.
57. Braga, F., Dolce, M. and Liberatore, D., “Influence of different assumptions on the maximum likelihood estimation of the macroseismic intensities”. Proceedings of the 4th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, (1983), Florence.
58. Giovinazzi, S., Lagomarsimo, S., “Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings”, Bulletin of Earthquake Engineering, V. 4, n° 4, (2006), 415-443.
59. Applied Technology Council, ATC-13, “Earthquake damage evaluation data for California”, (1985), Redwood City, California, USA.

60. Milutinovic, Z. V. and Trendafiloski, G. S., "RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns", WP4 : Vulnerability of current buildings, (2003).
61. Anagnos, T., Rojahn C. and Kiremidjian, A., "NCEER-ATC: joint study on fragility of buildings", Report NCEER-95-0003, National Center for Earthquake Engineering Research, (1995), Buffalo, New York, USA.
62. Chavez, M. and García-Rubio, L., "Seismic vulnerability of the metropolitan zone of Guadalajara, Mexico". Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation, (1995), Nice, 1, 33-40.
63. Bustamante, G., Chatelain, J. L., Fernández, J., Valverde, J., Yepes, H., Tucker, B., Villacis, C., Yamada, T. and Kaneko, F., "An example in Quito, Ecuador, of the use of seismic microzoning for risk reduction in developing countries", Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation, (1995), Nice, 1, 683-690.
64. Ahmad N., H. Crowley, R. Pinho., "Analytical Fragility Functions for Reinforced Concrete and Masonry Buildings and Buildings Aggregates of Euro-Mediterranean Regions – UPAV methodology". Internal Report, Syner-G Project 2009/2012, (2011).
65. Kostov M., E. Vaseva, A. Kaneva, N. Koleva, G. Varbanov, D. Stefanov, E. Darvarova, D. Solakov, S. Simeonova & L. Cristoskov., "Application to Sofia. Report RISK-UEWP13", (2004).
66. Clotaire, M., Guéguen, P., "Analyse de vulnérabilité sismique à grande échelle par utilisation des propriétés dynamiques expérimentales des bâtiments", 7^{ème} Colloque National AFPS, (2007), Ecole Centrale Paris, France.
67. Valencia David, N., "Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis-à-vis des séismes et inondations", Thèse de Doctorat en Génie civil, (2006), Université Paris-Est, Marne-La-Vallée, France.
68. Mébarki, A., Valencia David, N., Salagnac, J. L. and Barroca, B., Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risk and resilience at urban scale, Natural Hazards and Earth System Sciences, V. 12, (2012), 1799–1809.
69. Mathur, V.K., Agrawal, S.K., and Chourasia, A., "Microzonation Studies as Impacted by Recent Earthquakes in India", World Congress on Natural Disaster Mitigation, The Institution of Engineers (I), (2004), New Delhi, India.
70. Charles, S., "History of Risk Model Development", Open-source catastrophe risk modeling: How can we do it better? Workshop, (2005), California, United States.
71. Clark, K., "The Use of Computer Modelling in Estimating and Managing Future Catastrophe Losses". The Geneva Papers on Risk and Insurance, V. 27, n° 2, (2002), 15p.
72. Van Westen, C. J. and Hofstee, P., "The role of remote sensing and GIS in risk mapping and damage assessment for disaster in urban areas", Second Forum catastrophe mitigation: natural disasters, impact, mitigation, tools, (2001), 442-450, Leipzig, Germany.
73. Chiroiu, L., Michel-Kerjan, E., "Modélisation de dommages consécutifs aux séismes. Extension à d'autres risques naturels", 6^{ème} colloque national en génie parasismique, AFPS, (2003), Paris.

74. Okasaki, K. and Radius Team., “Radius Initiative for IDNDR-How to Reduce Urban Seismic Risk”, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, (2000), Auckland, New Zealand.
75. Federal Emergency Management Agency, FEMA-366, “HAZUS99: Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States”, (2000), Washington, DC, United States.
76. Frolova, N. “GIS-Based EXTREMUM System Application for Risk Assessment in Earthquake Prone Areas, Analysis and Synthesis of Loss Estimations and Risk Assessment Methodologies for Prediction and Prevention of Catastrophes”, Workshop on Open-Source Risk Software, (2007), California, United States.
77. Chiroiu, L., “Modélisation de dommages consécutifs aux séismes. extension a d’autres risques naturels”, Thèse de Doctorat en Géographie, (2004), Université Paris 7 – Denis Diderot, France.
78. Tyagunov, S., Grünthal, G., Wahlström, R., Stempniewski, L. and Zschau, J., “Seismic risk mapping for Germany”, Natural Hazards and Earth Science System, V.6, (2006), 573–586.
79. Yeh, C. H., Loh, C. H., and Tsai, K. C., "Overview of Taiwan Earthquake Loss Estimation System", Natural Hazards, V.37, n° 1-2, (2006), 23-37.
80. National Institute of Building Sciences, NIBS web-site, “Multi-Hazard Risk Assessment/HAZUS”, (2012), Washington, DC, United States.
81. Freeman, S.A., “Review of the Development of the Capacity Spectrum Method”, Journal of Earthquake Technology, Vol. 41, No. 1, Paper No. 438, (March 2004), 1-13.
82. Freeman, S.A., Nicoletti, J.P. and Tyrell, J.V., “Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk - A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington”, Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering, (1975), Berkeley, U.S.A, 113-122.
83. Mahaney, James A., Terrence F. Paret, Bryan E. Kehoe, and Sigmund A. Freeman., “The Capacity Spectrum Method for Evaluating Structural Response during the Loma Prieta Earthquake”. Proceedings of the 1993 United States National Earthquake Conference, V. 2, (1993), Memphis, Tennessee, USA, 501-510.
84. Fajfar, P., “Capacity Spectrum Methods Based on Inelastic Demand Spectra”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, V.28, (1999), 979–993.
85. Chopra, A. K. and Goël, R.K., “Capacity Demand Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum”, Earthquake Spectra, V.15, n° 4, (1999), 637-656.
86. Belmouden Y., Lestuzzi P., "Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en suisse", Rapport de recherche, (2006), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
87. Freeman, S.A., “Development and Use of Capacity Spectrum Method”, 6th National Conference on Earthquake Engineering, (1998), Washington, USA.
88. Chopra, A. K. and Goël, R.K. “Evaluation of NSP to Estimate Seismic Deformation: SDF Systems”. Journal of Structural Engineering, V.126, n° 4, (2000), 482–490.
89. OYO Corporation, RADIUS Methodology, Report IDNDR, (August, 2000).

90. Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P. and the RISK-UE Team., "The European RISK-UE Project: an Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios", Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, (2004), Vancouver, B.C., Canada.
91. Cardona, O. D., Ordaz, M. G., einso, E., Yamin, N. e., Barbat, A.H., "CAPRA - Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness", Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, (September 24-28, 2012), Lisbon, Portugal.
92. Denégré, J., Salge, F., "Les systèmes d'information géographique", (1996), Paris, PUF (Coll. « Que sais-je?, no 3122), 128 p, (ISBN 2-13-047932-4).
93. Gueesoum, N., "Etude géologique des minéralisations aurifères de la partie orientale du terrane de Laouni (Hoggar Central)", (2012), Mémoire de Magister, USTHB, Alger.
94. Paegelow., "Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective". Habilitation à diriger de recherches, (2004), Université de Toulouse. Tome I. 211p.
95. Steinberg, J., "Cartographie, Systèmes d'information Géographique et télédétection", Armand Colin, (2003), 159 p.
96. Boukri, M., Farsi M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., Amellal, O., Mezazigh, B., Guessoum, N., Bourenane, H. and Benhamouche, A., "Seismic risk and damage prediction: case of the buildings in Constantine city (Algeria)", Bulletin of Earthquake Engineering, Springer, DOI 10.1007/s10518-014-9594-0.
97. Jerez S., Mébarki, A., "Seismic Assessment of Framed Buildings: A Pseudo-Adaptive Uncoupled Modal Response Analysis", Journal of Earthquake Engineering, World Scientific Publishing Co., V.15, n° 7, (2011), 1015-1035.
98. Whitman, R. V., Reed J. W. and Hong S. T., "Earthquake damage probability matrices", 5th European Conference on Earthquake Engineering, (1974), Rome, 2531.
99. Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, "Règles Parasismiques Algériennes, RPA99/2003", DTR-BC 2.48, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, (2004), Algérie.
100. Newmark, N. M., and W. J. Hall., "Earthquake Spectra and Design", EERI Monograph Series, (1982), Earthquake Engineering Research Institute ~ Oakland, California, USA.
101. CGS: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, "Etude statistique sur les constructions endommagées suite au séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003", Rapport, (2003).
102. Meslem, A., and Yamazaki, F., "Accurate Evaluation of Building Damage in the 2003 Boumerdès, Algeria Earthquake from Quickbird Satellite Images", Journal of Earthquake and Tsunami, V. 5, n°1, (2011), 1-18.
103. Grünthal, G., and Levret, A.: European Macroseismic Scale 1998, "Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie", V.19, (2001), 103p., Luxembourg.

104. Cochrane, S. W. and Schaad, W.H., "Assessment of Earthquake Vulnerability of Buildings", Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, (1992), Madrid, Spain.
105. Mébarki, A., Valencia, N., Salagnac, J. L. and Barroca, B., "Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risk and resilience at urban scale", Natural Hazards and Earth System Sciences, doi:10.5194/nhess, V. 12, (2012), 1799-2012.
106. Bounif, A., Dorbath, C., Ayadi, A., Meghraoui, M., Beldjoudi, H., Laouami, N., Frogneux, M., Slimani, A., Kharroubi, A., Ousadou, F., Chikh, M., Harbi, A., Larbes, S. and Maouche, S., "The 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) earthquake Mw 6.8: Relocation and aftershock sequence analysis", Geophysics Research Letters, V. 31, (2004), L19606.
107. ONS: Office National Office des Statistiques, Recensement général de la Population et de l'habitat, (2008), Algérie.
108. CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, "Etude de microzonage sismique des sites urbains de la wilaya de Boumerdès", Rapport, (2009), Algérie.
109. Bourenane, H., "Utilisation de l'analyse statistique dans l'interprétation des paramètres géotechniques ; Application à l'étude de microzonage sismique de la région de Boumerdès", Mémoire de Magister, (2010), Université des Sciences et Technologies Houari Boumediène, USTHB, Algérie.
110. Farsi M.N., Bourenane, H., Ait-Benamar, D., Boukri, M., Saadi., S, Benzineh, S., "Analyse des effets de site et des dommages dans deux communes de la région de Boumerdès : Boumerdès et Zemmouri", Projet National de Recherche (5/4311/3282), (2013), Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, CGS, Algérie.
111. Guillier, B., Machane, D., Oubaiche, E., Chatelain, J. L., Ait Meziane, Y., Ben Salem, R., Dunand, F., Guéguen, P., Hadid, M., Hellel, M., Kibboua, A., Laouami, N., Mezouer, N., Nour, A., et Remas, A., "Résultats préliminaires sur les fréquences fondamentales et les amplifications de sols obtenus par l'étude du bruit de fond, sur la ville de Boumerdès, Algérie", Mémoire du service géologique d'Algérie, n° 12, (2004), 103-114.
112. Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., Bracene, R. "La tectonique active de la région nord-algérienne", C. R. Geoscience 338, (2006), 129-139.
113. Yelles, A., Domzig, A., Déverchère, J., Bracène, R., De Lépinay, B. M., Strzeczynski, P., Bertrand, G., Boudiaf, A., Winter, T., Kherroubi, A., Le Roy, P., Djellit, H., "Plio-Quaternary reactivation of the Neogene margin off NW Algiers, Algeria: The Khayr al Dinbank", Tectonophysics, (2009), Elsevier, doi:10.1016/j.tecto.2008.11.030.
114. Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Chatelain, J. L., and Nour, A., "Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion records of the 2003 Boumerdès (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code", Soil Dynamics and Earthquake Engineering., n° 26, (2006), 993-1003.

115. Dunand, F., "Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil", Thèse de doctorat, (2005), Université Joseph Fourier, Grenoble I, France.
116. Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, "Règles Parasismiques Algériennes, RPA99", DTR-BC 2.48, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, (2000), Algérie.
117. Farsi, M., Bard, P.Y., "Estimation des périodes propres de bâtiments et vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de Grenoble", *Revue Française de Génie Civil*, V. 8, n° 2, (Mars 2004), 149–179.
118. Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Laouami, N. and Benkaci, N., "Site-response characteristics evaluated from strong motion records of the 2003 Boumerdès, Algeria earthquake", *Earthquake Spectra*, V. 26, n°3, (2010), 803–823.
119. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. and Smith, P. M., "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V.3, (2005), Springer, 1–53.
120. Joyner, W. B. and Boore, D. M., "Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake". *Bulletin of the Seismological Society of America*, V.71, (1981), 2011–2038.
121. Ambraseys, N.N. and Bommer, J.J., "The attenuation of ground accelerations in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V.20, n° 12, (1991), 1179–1202.
122. Sadigh, K., Chang, C.Y., Abrahamson, N.A., Chiou, S.J., Power, M.S., "Specification of long-period ground motions: Updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factors for near-fault effects", Pages 59–70 of: *Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, (1993), USA.
123. Ambraseys, N.N., "The prediction of earthquake peak ground motion in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V. 24, (1995), 467–490.
124. Mébarki, A., "A comparative study of different PGA attenuation and error models: Case of 1999 Chi-Chi earthquake", *Tectonophysics*, V. 466, n° 3-4, (2009), 300–306.
125. Benouar, D., "Materials for the investigation of the seismicity of Algeria and Adjacent Regions During the Twentieth Century", *Annali Di Geofisica*, V.37, n°4, (1994), July 1994, 402p.
126. CGS: Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, "Estimation de l'aléa probabiliste de la région d'Alger", *Rapport*, (1998), Algérie.
127. Hellel, M., Chatelain, J. L., Guillier, B., Machane, D., Ben Salem, R., Oubaiche, E., and Haddoum, H., "Heavier Damages without Site Effects and Site Effects with Lighter Damages: Boumerdès City (Algeria) after the May 2003 Earthquake", *Seismological Research Letters*, V. 81, n°1, (2010), 37-43.
128. Dunand, F., Ait Meziane, Y., Guéguen, P., Chatelain, J. L., Guillier, B., Ben Salem, R., Hadid, M., Hellel, M., Kibboua, A., Laouami, N., Machane, D., Mezouer, N., Nour,

- A., Oubaiche, E., et Remas, A., "Utilisation du bruit de fond pour l'analyse des dommages des bâtiments de Boumerdès suite au séisme du 21 Mai 2003", Mémoire du service géologique d'Algérie, n° 1, (2004), 177-191.
129. Veludo, I., Teves-Costa, P., Bard P.Y., "Damage seismic scenarios for Angra do Heroismo, Azores (Portugal)", *Bulletin of Earthquake Engineering*, V.11, (2013), 423-453.
130. Microsoft Encarta Encyclopedia 2008, Microsoft Corporation. United States, (2007).
131. Boussouf, R., Constantine : D'une ville attractive à une ville répulsive, Laboratoire d'Aménagement du territoire, Université de Constantine, (2002), Algérie,
132. Rezoug, T., "Restructuration du Quartier De La Souika de la Medina de Constantine", Mémoire de fin d'étude, (2009), Université SAAD DAHLAB de Blida, Institut d'Architecture.
133. Harbi., A., "Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents actifs dans le Nord Est algérien", Mémoire de Magister, (2001), Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.
134. Harbi, A., Peresan, A., Panza, G.F., "Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue". *Natural Hazards*, V.54, (2010), 725–747.
135. CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, "Etude d'aléa sismique de la région de Constantine", Rapport, (2011a), Algérie.
136. Bouhadad, Y., "Probabilistic seismic hazard assessment in eastern Algeria". *Proceedings of the Workshop Seismicity patterns in the Euro-Med region*, (2009), Luxembourg, 89-94.
137. Bounif, A. and Dorbath, C., "Three dimensional velocity structure and relocated aftershocks for the 1985 Constantine, Algeria (Ms = 5.9) earthquake", *Annali Di Geofisica*, V.41, n°1, (April 1998), 93-104.
138. Vila. J. M., "La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens", Thèse de Doctorat d'Etat, (1980), Université. Paris VI, 2 tomes, 665p.
139. CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, "Etude de microzonage sismique des sites urbains de la wilaya de Constantine", Rapport, (2011b), Algérie.
140. Machane, D., Bouhadad, Y., Cheikhlounis, G., Chatelain, J.L., Oubaiche, E.H., Abbes, K., Guillier, B., Bensalem, R., "Examples of geomorphologic and geological hazards in Algeria". *Natural Hazards*, V.45, n°2, (2008), 295-308.
141. Benaissa, A., Cordary, D., Giraud, A., "Mouvements de terrains dans la zone urbaine de Constantine (Algérie)". *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, V. 40, (1989), 85-90.
142. Benaissa, A., Bellouche, M.A., "Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie)". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, V.57, n° 3, (1999), 301– 310.

143. Guemache, M.A., Chatelain, J.L., Machane, D., Benahmed, S., Djadia, L., "Failure of landslide stabilization measures: The Sidi Rached viaduct case (Constantine, Algeria)", *Journal of African Earth Sciences*, V.59, n° 4-5, (2011), 349-358.
144. Pagliaroli, A., Lanzo, G., D'Elia, B., "Numerical Evaluation of Topographic Effects at the Nicastro Ridge in Southern Italy", *Journal of Earthquake Engineering*, V.15, n° 3, (2011), 404-432.
145. Athanasopoulos, G.A, Pelekis, P.C, Leonidou E.A., "Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, V.18, (1999), 135-149.
146. Sepulveda, S.A., Murphy, W., Jibson, R.W., Petley, D.N., "Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California", *Engineering Geology*, V. 80, (2005), 336–348.
147. Bourdeau, C., Havenith, H.B., "Site effects modelling applied to the slope affected by the Suusamyr earthquake (Kyrgyzstan, 1992)". *Engineering Geology*, V. 97, (2008), 126–145.
148. Shafique, M., Van der Meijde, M., Kerle, N., Van der Meer, F., "Impact of DEM source and resolution on topographic seismic amplification". *Int J Appl Earth Obs*, V.13, (2011), 420–427.
149. Trumelet, C., Blida, *Récits selon Légende, la Tradition et l'Histoire*, (1887).
150. Benelhadj-Saïd, Z., "Méthodes et outils pour la réduction de la vulnérabilité sismique à Blida : Étude pluridisciplinaire basée sur l'analyse des enjeux urbains et le bruit de fond sismique", Thèse de Doctorat, (2010), Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
151. Documents et Récits des autochtones de la ville de Blida.
152. Deluz-Labruyère, J., "Urbanisation en Algérie : Blida, Processus et Formes", (1988), Editions Maison de l'Orient Méditerranéen et Office des Publications Universitaires d'Algérie, Lyon – Alger.
153. Blida n'est pas un village ; c'est une ville dès le temps de sa création au XVI^e siècle, "alger-roi.fr/Alger//plaine_mitidja/.../pdf/blida.pdf".
154. Mémoires de fin d'études, Institut d'Architecture, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie.
155. Boudiaf, D., "Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Grande Kabylie (Algérie)", Thèse de Doctorat, (1996), Université Montpellier II, Science et Techniques du Languedoc, 274p.
156. Harbi, A., "Evaluation de l'Aléa Sismique en Algérie du Nord par la Modélisation de l'Input Sismique dans les Zones Urbaines et l'Etablissement d'un Catalogue". Thèse Doctorat, (2005), Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.
157. Roussel, J., "L'activité sismique en Algérie de 1951 à 1970 inclus". Extrait du *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, V.64, n°3-4, (1973), 185-210, Alger.

158. Bezzeghoud, M., Ayadi, A., Sebai, A., Ait Messaoud, A., Mokrane, A. and Benhallou, H., "Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI)", *Avances en Geofisica y Geodesia* 1, ano 1, (1996), Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente, Instituto Geografico National España, pp.107-114.
159. CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, "Étude géologique, géophysiques et géotechniques des piémonts Est et Ouest de la ville de Blida", Rapport, (2005), Algérie.
160. CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, "Etude de vulnérabilité et d'évaluation du risque sismique de la ville de Blida", Rapport, (2013), Algérie.
161. Geomatrix Consultants and ME2i, "Analyse probabiliste de l'aléa sismique de la Wilaya d'Alger", Final Report, (2006), Algérie.
162. CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, (2013), site web, www.craag.dz.
163. BOUCHLOUH, A., Thèse de doctorat en géophysique (en cours), Université des Sciences et Technologies Houari Boumediène, USTHB, Algérie.
164. Saad, A., "Aléa et scénario de risque sismique dans la vallée de la Tinée", Master Recherche Génie Civil, (2006), Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, France.
165. The Institution of Structural Engineers, "Manual for the seismic design of steel and concrete buildings to Eurocode 8", (May, 2010).
166. SESAME, "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation", European research project WP12-Deliverable D23.12, (December 2008).
167. Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., BARD, P-Y., Cornou, C., Ohrnberger, M., Wathélet, M., "Robustness of the H/V ratio peak frequency to estimate 1d resonance frequency", Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, (30 August-1 September 2006), Grenoble, France, Paper Number: 85.
168. Bonnin, J., "Vers des "Systèmes d'alerte précoce : matériaux collectés à partir du cas des séismes" Document de réflexion pour la réunion du Groupe de travail Système d'Alerte Précoce, (2006), Institut Physique du Globe, Strasbourg, France.
169. Wieland, M., "Earthquake Alarm, Rapid Response and Early Warning Systems: Low Cost Systems for Seismic Risk Reduction", *Global Blueprints for Change*, (2001), Zurich, Switzerland.
170. Heaton, T.H., "A model for seismic computerized alert network", *Science*, V.228, (1985), 987- 990.
171. Goltz, J.D., Eisner, R. K., "Real-Time Emergency Management Decision Support, The California Integrated Seismic Network (CISN)", Personal Report, (2003).
172. Harben, P.E., "Earthquake Alert System Feasibility Study", (1991), Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-LR-109625.

173. Wu, Y. M. Shin, T. C., and Tsai, Y. B., "Quick and Reliable Determination of Magnitude for Seismic Early Warning", *Bull. Seism. Soc. Am*, V.88, (1998), 1254-1259.
174. Böse M., M. Erdik, F. Wenzel, "Artificial Neural Networks for Earthquake Early-Warning", *Proceedings AGU2003 Abstracts*, (2003).
175. Espinosa-Aranda, J., Jiménez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M., and Maldonado, S., "Mexico City seismic alert system", *Seismological Research Letters*, V. 66, (1995), 42-53.
176. Nakamura Y., "UrEDAS, Urgent Earthquake Detection and Alarm System, Now and Future", *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*, (August 1-6, 2004), Vancouver, B.C., Canada.
177. Nakamura, Y., "Earthquake alarm system for Japan Railways", *Japanese Railway Engineering*, V.28, n° 4, (1989), 3-7.
178. Nakamura Y., "Real-time Information Systems for Hazards Mitigation", *Proceedings of the 11th World Conf. on Earthquake Engineering*, (June 1996), Acapulco, Mexico.
179. Mert, A., Alçik, H., Erdik, M., Gül, M., Özel, O., Fahjan, Y., "Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, (August 1-6, 2004), Vancouver, B.C., Canada.
180. Erdik, M., Fahjan Y., Ozel O., Alcik H., Mert A., and Gul M., "Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System". *Bulletin of Earthquake Engineering*, V.1, n° 1, (2003), 157-163.
181. Eguchi, R. T., EERI, M., Goltz, J. D., "Real-Time Loss Estimation as an Emergency Response Decision Support System: The Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool (EPEDAT)", *Earthquake Spectra*, V. 13, n° 4, (1997), 815-832.

REFERENCES SCIENTIFIQUES DU DOCTORANT EN RELATION AVEC LA THESE

Publications dans des revues scientifiques:

❖ Base de données Thomson and Reuters :

Boukri, M., Farsi M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., Amellal, O., Mezazigh, B., Guessoum, N., Bourenane, H. and Benhamouche, A., (2014), “Seismic risk and damage prediction: case of the buildings in Constantine city (Algeria)”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Springer, V. 12, n 6, pp 2683-2704. DOI 10.1007/s10518-014-9594-0.

Boukri, M., Farsi, M.N., Mébarki, A., Belazougui, M. (2013), “Development of an integrated approach for Algerian building seismic damage assessment”. *Structural Engineering and Mechanics*, V. 47, n 4, pp 471-493, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2013.47.4.471>.

Mébarki, A., Boukri, M., Laribi, A., Farsi, M.N., Belazougui, M., Kharchi, F. (2013), “Seismic vulnerability: theory and application to Algerian buildings”. *Journal of Seismology*, Springer, V. 18, n 2, pp 331-343.

❖ Base de Données Scopus :

Boukri, M., Farsi, M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., (2014) “*Earthquake Damage Assessment: Theoretical Framework and Application to the Algerian building Case*”, *WIT Transaction on Information and Communication Technology*, V. 47, pp 153-164. Doi:10.2495/RISK140141

Publications dans des conférences internationales :

Boukri, M., Farsi M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., Amellal, O., Mezazigh, B., Guessoum, N., (2014), “Earthquake loss estimation of existing buildings: Case of Constantine City (Algeria)”, *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, paper 0857.

Boukri, M., Farsi, M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., (2014) “Estimation de dommages sismiques : Mise au point d'une approche appliquée au contexte du bâti existant en Algérie” *Journée Internationale Technique et Scientifique « Diagnostic, Expertise du bâti existant et le retour d'expérience »*, (25 Février 2014), Alger.

Boukri, M., Farsi, M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., (2013) “Earthquake Damage Assessment: Theoretical Framework and Application to the Algerian building Case”, *Proceedings of the The 5th International Conference on Safety and Security Engineering*, Rome, Italy.

Boukri, M., Farsi, M.N., Mébarki, A., Belazougui, M., Jerez, S. (2012) “Development of a seismic damage assessment methodology for building in Algeria”, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, paper 0692.

Boukri, M. and Bensaïbi, M. (2008), “Vulnerability index of Algiers masonry buildings”, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, paper 09-01-0118.