

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Technologie
Département : Génie civil
Ref :



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat L.M.D
En Génie Civil
Option
Ingénierie Parasismique des Sols et Structures

Evaluation du risque sismique dans les zones urbaines

Présentée par :
Hamidatou mouloud

Dirigé par : Pr. Sbartaï Baderddine

Soutenue publiquement le

Devant le jury composé de :

Belachia Mouloud
Sbartaï Baderddine
Messast Salah
Assia Harbi
Fabrice Cotton

Professeur
Professeur
Professeur
Directrice de recherche
Professeur

Président
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Invité

Université Skikda
Université Annaba
Université Skikda
CRAAG-Alger
GFZ-Allamagne



Tables des matières

Remerciements	ii
Introduction générale	1

Chapitre 1. Recherche Bibliographiques

1 Introduction.....	6
2 Evaluation de l'aléa sismique.....	7
2.1 Notion de risque sismique et d'aléa sismique.....	7
2.2 La notion d'aléa sismique à différentes échelles.....	8
2.3 Principe de l'analyse de l'aléa sismique.....	9
3 Contexte géologique et sismotectonique de la zone d'étude.....	13
3.1 Mouvement actuel des plaques.....	13
3.2 Contexte géologique de la région d'étude.....	14
3.3 Sismotectonique de la zone d'étude.....	17
4 Aléa sismique du Nord de l'Algérie.....	17
4.1 Les séismes destructeurs les plus récents durant la période instrumentale.....	18
4.2 Intensité maximale observée et calculé.....	18
4.2.1 L'intensité maximale observée (MOI).....	18
4.2.2 L'intensité maximale calculée (MCI).....	20
4.3 Accélération maximale du sol.....	22
5 La méthode de Cornell-McGuire.....	24
5.1 L'estimation de l'aléa sismique probabiliste selon Cornell-McGuire.....	24
5.1.1 Principe.....	24
5.1.2 Identification des lieux d'occurrence des séismes.....	25
5.1.3 Modélisation de la récurrence.....	26
5.2 Le code de calcul CRISIS.....	28
5.2.1 Mode de calcul.....	28
5.2.2 Procédure d'intégration spatiale dans CRISIS.....	29

6	Vulnérabilité sismique des structures.....	30
6.1	Méthode VulnéRAIp.....	31
6.1.1	Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	32
6.1.2	Calcul du dommage.....	33
6.1.3	Champ d'application.....	34
7	Conclusions.....	34
8	Bibliographie.....	35

Chapitre 2. Construction d'un catalogue de sismicité homogène en magnitude de surface, M_s

1	Introduction.....	42
2	Les catalogues sismologiques disponibles en Algérie.....	43
2.1	Source de données sismiques.....	44
3	Homogénéisation du catalogue en magnitude de surface, M_s	46
3.1	Les lois empiriques utilisées pour l'homogénéisation des magnitudes.....	47
3.1.1	Estimation semi empirique de la magnitude.....	47
3.1.2	Relations empiriques entre la magnitude et l'intensité épacentrale.....	47
3.2	Analyse des résultats.....	48
3.2.1	Transformation de magnitude des ondes de volume(m_b)en magnitude de surface (M_s).....	48
3.2.2	Transformation de magnitude locale(M_l)en magnitude de surface (M_s).....	48
3.2.3	Transformation d'intensité (I_0 , I_{MM} , I_{MSK} , I_{EMS}) en magnitude de surface (M_s).....	49
4	Etude du déclustering du catalogue.....	50
4.1	Méthode par cluster.....	51
4.1.1	Principe de la méthode.....	51
4.1.2	Paramétrage de la méthode par cluster.....	52
4.2	Méthode par fenêtrage.....	54
4.2.1	Principe de la méthode.....	54
4.2.2	Comparaison des méthodes par fenêtrage.....	56
4.3	Comparaisons des méthodes.....	57
5	Traitement Statistique du catalogue de sismicité.....	61
5.1	Etude du catalogue de données sismiques.....	61

5.2	Distribution Magnitude-fréquence.....	64
5.3	Analyse de la distribution des séismes en fonction de la magnitude.....	66
6	Détermination des périodes de complétude.....	68
6.1	Méthodes de déterminations des périodes de complétude.....	67
6.1.1	Estimation à partir du nombre cumulé de Séismes.....	67
6.1.2	Méthode de Stepp.....	71
6.2	Conclusions et récurrences sur le catalogue [1357-2014].....	74
7	Conclusion.....	75
8	Bibliographie.....	76

Chapitre 3. Zonage et relation d'atténuation du Nord-Est de l'Algérie

1	Introduction.....	81
2	Le zonage sismotectonique.....	81
2.1	Identification des zones sources dans la région de Constantine.....	82
2.1.1	Zone source de Constantine (Z1).....	82
2.1.2	Zone source Sud Constantinois_Sigus-Temlouka (Z2).....	83
2.1.3	Zone source de Guelma (Z3).....	83
2.1.4	Zone source Nord Constantinois (Z4).....	83
2.1.5	Zone source d'Ain Smara-Mila (Z5).....	83
2.2	Caractéristique des zones sources.....	84
2.2.1	Estimation de la magnitude maximale.....	84
2.2.2	Fréquence et récurrence des séismes dans la région d'étude.....	85
2.2.3	La profondeur sismogéniques des zones sources.....	86
2.2.4	Les paramètres de sismicité.....	87
2.2.5	Estimations des temps de retour des magnitudes.....	87
3	La relation d'atténuation.....	92
3.1	Formule générale.....	93
3.2	Lois d'atténuation usuellement utilisées en Algérie.....	94
3.3	Loi d'atténuation préliminaire pour le centre de l'Algérie.....	99
3.4	Lois d'atténuation usuellement utilisées dans CRISIS.....	100
3.5	L'intérêt d'évaluer l'aléa sismique par la magnitude M_s	100

4 Conclusion.....	101
5 Bibliographie.....	101

Chapitre 4. Évaluation probabiliste du aléa sismique dans la région de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Abstract.....	106
1 Introduction.....	106
2 Overview of the Constantine region.....	108
2.1 Description of the study area.....	108
2.2 Catalogue seismicity of the region.....	108
2.3 Geology and seismotectonics of the region.....	108
2.4 Identification of seismic sources.....	109
2.4.1 The Constantine zone (Z1).....	110
2.4.2 The southern Constantine zone (Sigus-Temlouka) (Z2).....	110
2.4.3 The Guelma zone (Z3).....	110
2.4.4 The northern Constantine zone (Z4).....	110
2.4.5 The Ain Smara-Mila zone (Z5).....	110
3 Probabilistic seismic hazard and catalog of sismicity analysis.....	110
4 Catalogue data preparation.....	111
4.1 Earthquake catalogue homogenization based on the M_s scale.....	111
4.2 Declustering the earthquake catalogue.....	112
4.3 Completeness period.....	113
4.3.1 Estimations based on the cumulative number of earthquakes.....	113
4.3.2 The Stepp method.....	113
4.4 b-value analysis.....	113
5 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).....	115
5.1 Magnitude return time calculations.....	116
5.2 Determination seismicity parameters.....	116
5.2.1 Determination of λ and b values.....	116
5.2.2 Maximum earthquake M_{max} estimation.....	117
5.3 Ground motion attenuation.....	117
5.4 Computing seismic hazards.....	120

5.5 PSHA results and discussion.....120

6 Conclusions.....122

7 References.....123

Chapitre 5. Évaluation déterministe du risque sismique dans la ville de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Abstract.....128

1 Introduction.....129

2 Overview of Constantine city.....130

2.1 Study area.....130

2.2 Seismotectonic context of Constantine region.....130

2.3 Creation of an earthquake scenario for the Constantine city.....132

3 Methodology used for assessment of seismic risk in Constantine.....133

3.1 Peak ground acceleration (PGA) on bedrock.....136

3.2 PGA soil amplification factors (Coeff).....139

3.3 PGA threshold for landslides (Tls).....139

3.4 PGA threshold for liquefaction (Tliq).....139

3.5 PGA thresholds for induced phenomena (Ti).....139

3.6 The method VULNERALP level 1.0.....140

3.6.1 Vulnerability Assessment.....140

3.6.2 Vulnerability index.....140

4 Results and discussion.....141

4.1 Risk Assessment.....141

4.2 Calculation of maximal acceleration (Amax).....143

4.3 Calculation of vibrational acceleration (Avib).....144

4.4 Calculation of intensities (I).....144

4.5 Calculating the coefficients of safety (Fs) of induced effects.....144

4.6 Damage assessment.....145

4.7 Building vulnerability estimates.....145

4.8 Damage evaluation.....145

5 Conclusions.....148

6 References.....148

Discussion générale.....	152
Conclusion générale.....	158
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xvii
Résumé.....	xix

Remerciements

Au nom de Dieu le Clément, le Miséricordieux.

Je remercie Allah le tout-puissant qui m'a donné la force et la volonté de continuer à travailler sérieusement et arriver à finir ce travail, que je dédie à toutes les personnes, dont les noms viennent ci-après.

Ce manuscrit symbolise un travail de plus de 3 ans, et une fin difficile à imaginer. Mais pourtant aujourd'hui je tiens enfin ce graal entre mes mains et je peux remercier les personnes m'ayant accompagnées et soutenues sur ce long chemin plein d'embûches.

*En premier, Je remercie vivement mon directeur de thèse le **Pr Baderddine Sbartai**, grâce à qui j'ai découvert le génie parasismique au cours d'un Master en Ingénierie des Structures Parasismiques au Département de génie civil à l'université de Skikda. Cette étude sur l'évaluation du risque sismique dans les zones urbaines m'a donné le goût de la recherche et l'envie d'entamer une thèse sur l'aléa sismique. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoigné en me proposant ce sujet de thèse, pour ces encouragements permanents, sa rigueur scientifique, son exigence et son suivi qui ont contribué au bon déroulement de cette étude*

*Je remercie Monsieur **Belachia Mouloud** professeur en Génie Civil à l'université de Skikda d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.*

*Je tiens à remercier également Monsieur **Messast Salah** professeur en génie civil à l'université de Skikda, qui a accepté sans retenue d'être parmi les jurys de ma soutenance.*

*J'adresse un grand merci pour Madame **Assia Harbi** directrice de recherche au CRAAG, que j'ai apprécié son encouragement et son amitié et qui a accepté sans retenue d'être membre du jury.*

*Je suis également très reconnaissant envers Monsieur **Fabrice Cotton**, professeur de géophysique à l'université de Potsdam et directeur de Section 2.6: Seismic Hazard and Stress Field au GFZ pour l'intérêt particulier qu'il a porté aux études du risque sismique ainsi que pour toutes les remarques pertinentes qu'il a soulevées durant mon stage au sien du GFZ.*

*Dans le cadre de mon doctorat, j'ai eu l'opportunité de participer à de nombreuses rencontres scientifiques : workshops de sismologie et risque, colloque pluridisciplinaire sur les Risques Naturels, congrès rassemblant l'ensemble des Sciences de la Terre. J'adresse de vifs remerciements à mon directrice de thèse le Pr **Sbartai Baderddine** pour m'avoir donné cette liberté et cette ouverture.*

*Mes pensées vont particulièrement à Mr **AMRANI Azzouz**, Ancienne chef du centre régional du CRAAG, tous appartenant au CRAAG qu'Allah yerrahmo wa youskinho fasiha jijanaho. Que Dieu l'accueille dans son vaste Paradis.*

Mes remerciements vont à tous le personnel du CRAAG, avec qui j'ai passé une agréable période de stage. Je remercie aussi mes collègues pour leurs encouragements, leurs aides et les beaux moments que nous avons passé ensemble pendant les années d'étude.

Enfin, le plus important de tous, je tiens à remercier mes parents, je vous remercie très fort, grâce à vous, Dieu m'a permis d'arriver à ce niveau. Merci pour vos Invocations en ma faveur, merci aussi pour vos encouragements, vos conseils et les conditions que vous m'avez préparé pour bien étudier. Aussi, je remercie toutes mes sœurs.

A toutes et à tous encore une fois, merci.

HAMIDATOU mouloud

Introduction générale

L'Algérie et les régions voisines sont situées dans les limites des plaques tectoniques. Pourtant, l'activité sismique y démontre l'existence de phénomènes géodynamiques récents. Le séisme connu le plus important en Algérie, celui du 10 Octobre 1980, s'est produit dans le Nord de l'Algérie. Il a été destructeur sur tout le territoire Nord-Ouest. Depuis 2003, un réseau sismique moderne a été implanté en Algérie, permettant l'étude des tremblements de terre dans nos régions par la localisation fiable des événements et la détermination des mécanismes au foyer.

Le Nord-Est Algérien est une zone à sismicité modérée. Les séismes destructeurs sont rares mais leur probabilité d'occurrence ne sont pas nulle. Le séisme le plus fort du siècle dernier a atteint une magnitude de 6.0 (séisme de Constantine, 1985) ; les archives historiques recensent par ailleurs plusieurs séismes destructeurs durant les deux derniers siècles. L'estimation de l'aléa sismique en Algérie est par conséquent indispensable. Estimer l'aléa sismique en un site, c'est déterminer le mouvement du sol contre lequel se prémunir. L'estimation de l'aléa sismique est aussi un premier pas vers l'estimation du risque sismique qui intègre également la vulnérabilité des bâtiments. Cette thèse analyse, dans le contexte Constantinois, deux méthodes (probabiliste et déterministe) d'évaluation de cet aléa.

La méthode d'estimation probabiliste de l'aléa sismique est née à la fin des années 60 aux Etats-Unis. Cornell (1968) propose de calculer des taux annuels de dépassement de niveaux du mouvement du sol et d'introduire ces taux dans un processus temporel d'occurrence de Poisson : l'aléa sismique probabiliste est un niveau de mouvement du sol ayant une certaine probabilité d'être dépassé sur une certaine période de temps. Le calcul requiert un découpage de la région étudiée en zones sources sismiques, une description de la sismicité des zones sources et un modèle d'atténuation des mouvements du sol. En 1976, l'USGS (U.S. Geological Survey) publie les premières cartes d'aléa sismique probabiliste pour les Etats-Unis (Algermissen & Perkins, 1976). La même année, McGuire (1976) introduit la dispersion du mouvement sismique dans le calcul. Peu après, les estimations d'aléa sismique des installations nucléaires se sont également orientées vers les méthodes probabilistes (EPRI,

1986, Bernreuter et al. 1989). Les modifications de la méthode concernent ensuite essentiellement la modélisation des zones sources et la récurrence des séismes (e.g. Frankel, 1995) ; le cœur de la méthode, le calcul d'une probabilité de dépassement d'un mouvement du sol à partir d'un modèle d'atténuation. Les avancées résident dans la prise en compte des incertitudes.

La méthode d'analyse déterministe cherche à donner de façon précise la valeur des mouvements sismiques attendus en un site lors d'un tremblement de Terre. Cette évaluation se fait à partir de modèles numérique et théorique, en recherchant le séisme maximal historique vraisemblable. C'est-à-dire le séisme le plus fort qu'engendrait la faille la plus proche. On estime ensuite la valeur du mouvement du sol que provoquerait ce séisme au site d'intérêt en tenant compte des effets de propagation et des effets de sites.

L'alternative à la méthode probabiliste est l'estimation déterministe de l'aléa. Les deux méthodes sont fréquemment opposées. Elles reposent sur des données identiques (catalogues de sismicité, modèle d'atténuation du mouvement du sol et zonage sismotectonique) mais leurs principes de base sont très différents. En déterministe, le mouvement du sol considéré provient d'un scénario magnitude-distance clairement identifié. En probabiliste, les lieux d'occurrence et les fréquences des magnitudes sont modélisés et l'ensemble des scénarios participent au calcul. L'estimation probabiliste est plus complexe, elle fournit non pas un unique niveau du mouvement du sol mais une série de mouvements possibles associés à leur période de retour. Le choix du mouvement à considérer est laissé aux experts, en fonction de la nature de l'installation à dimensionner, de sa durée de vie, et du risque associé.

Les méthodes probabilistes sont arrivées plus tardivement en Algérie : le zonage sismique Réglementaire actuel (en cours de révision dans le règlement parasismique Algérien, 2003) repose sur une méthode probabiliste de l'aléa.

Constantine, appelée aussi « ville des ponts suspendus » avec 870 000 habitants, abrite une zone industrielle construite sur des terrasses alluviales au bord de la rivière « Rhumel ». La ville est sous la menace d'un séisme de magnitude M_w 6 - 6.5 susceptible de se produire sur des failles très proches : celle de « Aïn Smara », par exemple, est située à environ 15 km de la ville ; c'est une faille active, comme le montre le séisme de 1985. L'aléa et le risque sismiques sont donc élevés et préoccupants dans cette région du territoire algérien. Quelles seraient les conséquences d'un tel séisme, ou même de magnitude inférieure, dont l'épicentre serait situé à proximité d'un grand centre urbain comme Constantine? C'est une question à laquelle ce travail s'efforcera de cerner. Dans un contexte de sismicité modérée comme la

notre zone d'étude. Par ailleurs, le bâti algérien possède ses propres spécificités. Il n'est donc pas envisageable d'appliquer directement les méthodes développées dans les pays à forte sismicité (GNDT, 1986; FEMA, 1999). Il faut donc proposer des méthodes alternatives, mais pertinentes, d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Quatre approches ont été développées par la communauté du génie parasismique pour étudier la vulnérabilité des structures de génie civil aux séismes : les relevés post-sismiques (retour d'expérience), les enregistrements de vibrations in situ, les tests de laboratoire et la modélisation numérique.

Le retour d'expérience a permis la calibration de méthodes empiriques d'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle. Elles consistent à partir du relevé de critères structuraux comme le matériau de construction, le nombre d'étages, la forme du toit, etc., à déterminer une notation de la vulnérabilité des structures. Cette note est reliée au dommage pour un séisme d'intensité donnée. Ces approches ont une validité statistique, donc à grande échelle seulement, et permettent une première évaluation de la vulnérabilité mais elles ne font pas réellement le lien avec le mouvement sismique. La simplicité et la quantité des paramètres que doivent relever les inspecteurs peuvent en faire des méthodes relativement coûteuses.

Cette thèse, considérée comme une première étude du genre pour cette région:

- Compilation du catalogue de sismicité et d'étude l'activité sismique de cette région Nord-Est,
- Identifier lorsque c'est possible les principales structures actives,
- Délimiter les différentes zones sources,
- Evaluation de la vulnérabilité sismique des structures dans les zones urbaines,
- Estimation du risque sismique par les deux méthodes probabiliste et déterministe.

La présente thèse comprend de huit (05) chapitres qui peuvent être résumés et évalués comme suit.

Le **chapitre 1** est consacré à la définition de la notion du risque sismique et des différentes méthodes appliquées à travers le monde, puis de cette thèse expose tout d'abord les principes de la méthode de Cornell-McGuire et leur application numérique, en fin à présenter la région Est Algérien en terme de : cadre géographique, géologique et sismotectonique dans la région d'étude et aussi introduction pour poser la problématique et faire une synthèse bibliographique sur le contexte géodynamique régional des deux plaques africaine et eurasiatique. Ont été intégré les résultats de l'Aléa sismique (PGA, MOI et MCI) (Peak

Ground Acceleration, Maximum Observed Intensities et Maximal Calculated Intensities) effectuées dans cette zone.

Le **chapitre 2** est consacré à la construction d'un catalogue de sismicité en magnitude de surface M_s , apparaissant le plus complet et homogène possible, afin de déterminer le comportement de la sismicité générée dans une zone source et par chaque faille.

Le **chapitre 3** représente une délimitation de cinq (05) zones sismogènes de cette région sur la base des données géologiques, tectonique active et les données sismologiques (répartition spatiale de la sismicité, les grands sites urbains et l'analyse statistique de la sismicité).

Le **chapitre 4** représente une étude de risque sismique par la méthode probabiliste dans la région de Constantine Nord-Est de l'Algérie. Cette étude a fait l'objet d'une publication scientifique dans **la revue arabian journal of géosciences**.

Le **chapitre 5** il présente les résultats de l'étude de l'évaluation du risque sismique par la méthode déterministe dans la ville de Constantine. Cette étude a fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue **Natural Hazard**.

La **Discussion générale** : Dans ce chapitre sont critiqués nos résultats obtenus sur L'évaluation du risque sismique dans la région Nord-Est de l'Algérie et l'analyse de la vulnérabilité sismiques des structures à ceux obtenus par les différentes études menées dans le bassin de Constantine et ceci afin de situer nos résultats.

Une **conclusion générale** est introduite pour parachever le présent travail effectué de la thèse de doctorat, commentant, et mettant en valeur les résultats obtenus. Des perspectives en matière d'études et recherches possibles qu'ouvre ce travail sur la zone étudiée ou d'autres zones non encore abordées sont également mises en exergue.

CHAPITRE 1.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre 1. Recherche Bibliographiques

1	Introduction.....	6
2	Evaluation de l'aléa sismique.....	7
2.1	Notion de risque sismique et d'aléa sismique.....	7
2.2	La notion d'aléa sismique à différentes échelles.....	8
2.3	Principe de l'analyse de l'aléa sismique.....	9
3	Contexte géologique et sismotectonique de la zone d'étude.....	13
3.1	Mouvement actuel des plaques.....	13
3.2	Contexte géologique de la région d'étude.....	14
3.3	Sismotectonique de la zone d'étude.....	17
4	Aléa sismique du Nord de l'Algérie.....	17
4.1	Les séismes destructeurs les plus récents durant la période instrumentale.....	18
4.2	Intensité maximale observée et calculé.....	18
4.2.1	L'intensité maximale observée (MOI).....	18
4.2.2	L'intensité maximale calculée (MCI).....	20
4.3	Accélération maximale du sol.....	22
5	La méthode de Cornell-McGuire.....	24
5.1	L'estimation de l'aléa sismique probabiliste selon Cornell-McGuire.....	24
5.1.1	Principe.....	24
5.1.2	Identification des lieux d'occurrence des séismes.....	25
5.1.3	Modélisation de la récurrence.....	26
5.2	Le code de calcul CRISIS.....	28
5.2.1	Mode de calcul.....	28
5.2.2	Procédure d'intégration spatiale dans CRISIS.....	29
6	Vulnérabilité sismique des structures.....	30
6.1	Méthode VulnéRALp.....	31
6.1.1	Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	32
6.1.2	Calcul du dommage.....	33
6.1.3	Champ d'application.....	34
7	Conclusions.....	34
8	Bibliographie.....	35

Chapitre 1. Recherche Bibliographiques

1 Introduction

Les progrès récents acquis à travers le monde de la connaissance et l'évaluation des risques liés aux séismes ont souligné l'importance que revêt l'étude de la sismogenèse, c'est-à-dire celle des conséquences causées et de la nature physique des tremblements de terre et de leurs géologiques. L'efficacité des mesures de protection contre les tremblements de terre est en effet liée au degré de fiabilité avec lequel le phénomène et ses conséquences peuvent être modélisés. Toutes les observations recueillies lors des derniers séismes destructeurs ont montré combien la spécificité des sources sismiques ou celles de certains sites pouvaient prendre en défaut des principes de protection non adaptés à ces spécificités. C'est pourquoi les progrès que l'on est en droit d'attendre en matière de génie sismique exigent que, parallèlement à la multiplication des observations faites sur le terrain lors des séismes destructeurs, l'étude fondamentale des sources sismiques et de leur « fonctionnement » soit encouragée. Il y a cependant beaucoup à faire dans cette voie, et l'on est bien contraint, dans un souci pragmatique, de définir les bases d'une protection en fonction des connaissances du moment, aussi imparfaites soient elles. L'important est alors de s'assurer que toute amélioration sensible des connaissances puisse s'intégrer aisément dans les règles que l'on s'est données. L'application de ces règles suppose que soient définies et cartographiées les zones exposées aux effets des tremblements de terre, effets dont les caractéristiques probables doivent être estimées. C'est ce que l'on désignera sous le terme général d'évaluation de l'aléa sismique. La méthode la plus couramment utilisée consiste à estimer d'une part l'aléa sismique représentant le mouvement du sol à considérer pour la construction parasismique, et d'autre part la vulnérabilité des infrastructures existantes potentiellement exposées à ces mouvements. Cette thèse est consacrée aux premières étapes de l'estimation de l'aléa sismique probabiliste et déterministe correspondant à l'identification des points sources et des sources sismiques. Cette étude a été réalisée dans la partie Nord-Est de Constantine (Algérie),

zone active avec un taux de déformation important (~3-6) et une forte sismicité. Cette région est tout particulièrement intéressante car elle est la cible d'études approfondies depuis près de 20 ans. Ainsi, de nombreux travaux peuvent guider l'étude du risque sismique quant à la localisation des séismes sur les zones sources et les failles et permettre de tester les différentes approches proposées dans la littérature scientifique pour l'estimation du risque sismique par la méthode probabiliste et déterministe.

Les méthodes empiriques d'analyse de la vulnérabilité sont tout d'abord présentées et plus particulièrement la méthode développée à Grenoble dans le cadre du projet VulnéRALp (Guéguen et al. 2007b). Il s'agit d'une méthode fondée sur des techniques existantes mais simplifiée pour son utilisation en contexte de sismicité modérée et explorant des moyens d'obtenir des informations structurales comme les enquêtes auprès de la population et les itinéraires aléatoires dans la ville. La vulnérabilité d'une structure est quantifiée par un indice de vulnérabilité (**IV**).

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu le contexte tectonique, géodynamique et géologique du Nord-Est de l'Algérie en général et le constantinois de façon particulière, puis on va examiner l'aléa sismique du Nord de l'Algérie et les deux approches utilisées actuellement pour l'évaluation du risque sismique, selon le degré de connaissances sismique, sismologique, tectonique et géologique dans les régions considérées. Sur la base de cet état de l'art, les problématiques développées dans cette thèse seront détaillées.

2 Evaluation de l'aléa sismique

2.1 Notion de risque sismique et d'aléa sismique

En s'inspirant de la terminologie préconisée par l'UNESCO, les définitions suivantes, dont l'usage tend à se généraliser, seront retenues.

Le risque sismique **R** (seismic risk) est l'espérance mathématique de pertes au cours d'une période de référence dans une région considérée. Il est proportionnel au nombre de vies humaines et à la valeur des biens exposés, et dépend aussi de l'extension de cette région. Dans un désert parfait il serait nul, quelle que soit la sismicité du désert.

En un site particulier, le risque sismique spécifique ou unitaire **R_i** (specific risk) définit l'espérance mathématique de pertes durant une période de référence, rapportée à une construction (ou un ensemble de constructions de valeur unité). Il peut se décomposer en deux fonctions (dont il représente la convolution), l'aléa sismique et la vulnérabilité :

$$R_i = A_i \times V \quad (1.1)$$

Le risque sismique propre à une région se déduit des risques unitaires pour les divers sites appartenant à cette région, c'est la multiplication par la valeur des constructions présentes (ou projetées) sur chaque site C_i et sommation pour tous les sites :

$$R = \sum_i (R_i \times C_i) \quad (1.2)$$

L'aléa sismique (seismic hazard) est défini en un site donné par la probabilité qu'au cours d'une période de référence (par exemple probabilité annuelle), une secousse sismique atteigne ou dépasse en ce site une certaine intensité (intensité macrosismique ou paramètre du mouvement du sol : accélération maximale, vitesse, etc.). Evaluer l'aléa sismique en un site donné revient donc à calculer la fonction de répartition de ces paramètres en ce site.

La vulnérabilité (vulnerability) d'une construction, (d'une classe de constructions, ou d'une population de constructions) représente le rapport du coût des dommages sur le coût de la construction. Elle est exprimée par un pourcentage et c'est encore une fonction puisqu'elle dépend de l'intensité de la secousse subie. La vulnérabilité est pratiquement nulle pour une intensité macrosismique inférieure à VI et en général égale à 100 % pour une intensité macrosismique égale à XI ou XII. Elle dépend des propriétés des constructions considérées et peut être réduite par l'application de règles de construction parasismique.

Les éléments d'intérêt pour le décideur sont :

- La valeur du risque dans la région considérée,
- La réduction qu'on peut attendre en agissant de façon appropriée sur la vulnérabilité des constructions,
- le coût des mesures à prendre pour réduire la vulnérabilité.

L'évaluation de l'aléa sismique est donc une étape indispensable pour la prise de décision dans tous les processus relevant du génie parasismique.

2.2 La notion d'aléa sismique à différentes échelles

Les objectifs sont de prévoir quand ? (années, décennies, siècles), où et avec quelle importance ? (magnitude, intensité, accélération,...), on peut s'attendre à subir un séisme. Pour la prédiction (ou prévention à court terme) on s'appuie sur l'interprétation des variables considérées comme des précurseurs, dans le domaine de la prévention à moyen et long terme, en se basant principalement sur les enseignements du passé. On fait donc appel aux acquis sur

le niveau de sismicité qui sont recueillis par la sismicité historique et la sismicité instrumentale. A partir de ces seules informations, on a pendant longtemps déterminé l'aléa sismique. Le développement d'approches géologiques (néotectonique et paléosismologie) a permis de compléter les données, en permettant surtout une meilleure localisation des failles responsables de la sismicité, dans un cadre chronologique plus étendu. Ces connaissances sont nécessaires pour délimiter les régions pour lesquelles on définira des règles parasismiques pour la construction d'ouvrages. Cela implique que soient cartographiés au préalable les secteurs qui sont susceptibles d'être exposés aux effets sismiques d'un certain niveau (intensité, mouvements du sol, etc.). La démarche générale conduisant à l'estimation de cette agression sismique est désignée sous le terme (d'évaluation de l'aléa sismique). Elle passe par trois étapes obligées, réalisées à différentes échelles (**tableau 1.1**).

Aléa sismique			
Echelle	Contexte	Eléments examinés	Cartes
Echelle globale	Contexte géodynamique	Caractéristique générales des séismes : localisation, profondeur magnitude maximum	Cartes globales
Echelle régionale	Contexte sismotectonique régional	Caractérisation des sources sismiques (failles actives), lois d'atténuation, définition du mouvement sismique de référence (au rocher)	Zonage sismo-tectonique
Echelle locale	Contexte intra-zone sismotectonique	Caractéristique sismiques, géologiques, géomorphologiques géotechniques: présence ou absence des failles actives, effets de site, effets induits	Cartes de micro-zonage

Tableau 1.1 *Eléments sismotectoniques pris en compte pour l'examen de l'aléa sismique à différentes échelles.*

2.3 Principe de l'analyse de l'aléa sismique

Actuellement, deux grandes familles d'approches pour la détermination de l'aléa sismique sont mises en œuvre : les approches dites de type déterministe (DSHA) et celles dites de type probabiliste (PSHA). L'objectif affiché des approches DSHA est d'identifier les scénarios sismiques qui induisent les mouvements sismiques les plus forts. Ces scénarios sont inspirés de l'étude de séismes ayant déjà eu lieu et répertoriés dans la région d'intérêt. D'un autre côté, l'objectif des approches de type probabiliste est d'identifier tous les scénarios sismiques pouvant contribuer à l'estimation de l'aléa et de pondérer leur contribution au

prorata de leur taux d'occurrence (pour plus de détails voir Reiter, 1990). Dans ce genre de démarche, il est donc possible qu'un scénario historique, bien que pris en compte dans le calcul, ne puisse que très peu contribuer à l'estimation de l'aléa sismique à cause d'une faible probabilité de se reproduire une seconde fois. Ces dernières années, l'estimation de l'aléa sismique est plus fréquemment réalisée à partir d'approches probabilistes (e.g. Cornell, 1968 ; Kramer, 1996 ; Clément et al. 2004). La méthode PSHA offre un cadre dans lequel les incertitudes identifiées sont quantifiées et propagées dans le calcul dans le but d'aboutir à une estimation de l'aléa sismique les intégrant formellement. Cette approche est actuellement la plus plébiscitée par la communauté scientifique (e.g. Tselentis & Danciu, 2010a ; Stucchi et al. 2011 ; Working Group on California Earthquake Probabilities ou WGCEP 2003 et 2008) bien qu'il existe quelques réserves dues à sa complexité intrinsèque et à la mise en cause de sa pertinence (Stein, 2012 ; Wang, 2010). Si l'approche DHSa est de moins en moins utilisée, il faut noter qu'en France l'autorité de sûreté nucléaire française la préconise pour définir sa règle fondamentale de sûreté relative aux installations nucléaires de base (RFS n°2001-01). Cependant, les approches probabilistes n'étant admises principalement que pour apprécier les incertitudes des niveaux sismiques retenus (Clément et al. 2004 ; Scotti et al. 2013).

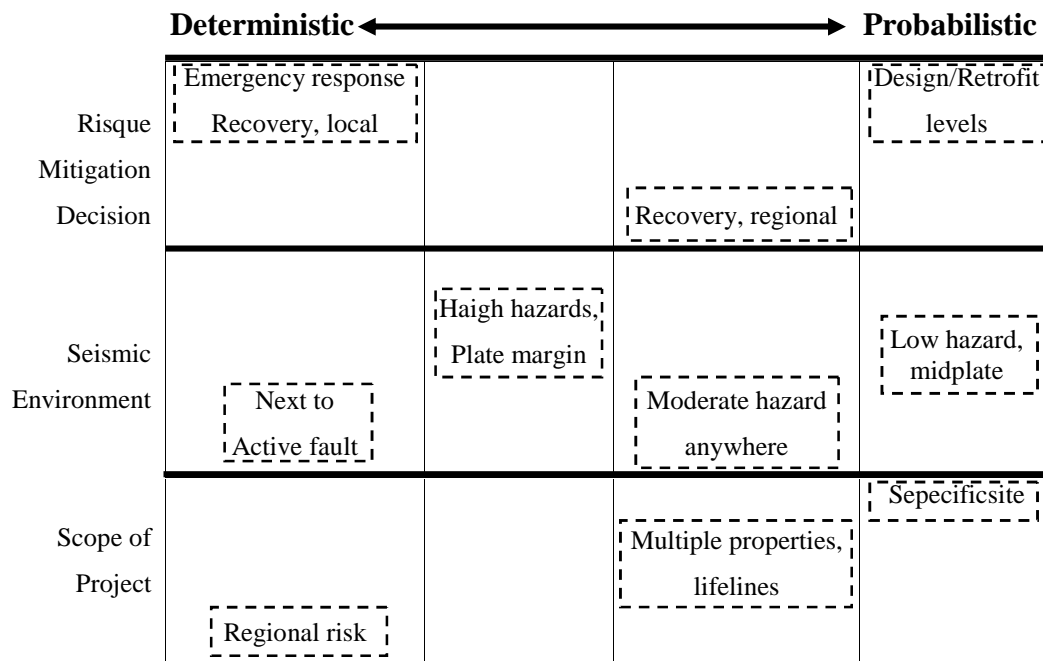


Figure 1.1 Domaines d'utilisation des méthodes probabilistes et déterministes pour le calcul de l'aléa sismique suivant la région étudiée (Mc-Guire, 2001).

L'approche DHSA est largement utilisée aux Etats-Unis afin d'estimer le mouvement possible du sol pour les bâtiments et ponts de Californie et aussi au Japon pour les centrales nucléaires. McGuire (2001) estime que les deux approches ne sont pas antagonistes. Leur mise en œuvre dépendant plutôt des différents facteurs propres à l'étude tels que le niveau sismique du site en question ou l'objectif de protection visé.

Par exemple, une centrale nucléaire doit être conçue pour résister à un événement sismique majeur, un hôpital doit pouvoir continuer à fonctionner après un séisme, à l'inverse une maison doit seulement être prévue pour résister suffisamment afin de permettre de sauver les personnes, mais son intégrité et sa fonctionnalité suite à un séisme ne doivent pas forcément être assurées (fig. 1.1).

Deux approches sont généralement suivies pour l'évaluation du risque sismique, il s'agit de l'approche déterministe et de l'approche probabiliste. L'objectif de cette thèse est de développer l'approche PSHA et DSHA pour la région de Constantine à partir de la sismicité de magnitude modérée bien connue grâce à l'existence depuis de nombreuses années de réseaux sismologiques (CRAAG) permanents dans cette zone. La mise en place des deux approches pour définir l'aléa sismique nécessite la détermination de plusieurs étapes.

L'analyse probabiliste de l'aléa sismique ou Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) fournit un cadre dans lequel, les incertitudes liées à la localisation, la magnitude et la récurrence sismique peuvent être identifiées, quantifiées et combinées de manière rationnelle pour donner une image plus complète de l'aléa sismique (Kramer, 1996). Dans une telle analyse, l'aléa sismique est évalué pour des séismes présentant une probabilité de 10 %, 5% ou 2% de survenir dans une durée de 50 ans. Dans ces trois cas, les mouvements du sol déterminés correspondent respectivement à un temps de retour de 475 ans, de 975 ans et de 2475 ans.

Dans une telle analyse, la protection envisagée n'est pas totale et elle s'applique à la majorité des ouvrages courants. La ruine de ces structures ne présentera de conséquences que sur leurs environnements immédiats. Cette analyse peut être réalisée en quatre étapes (fig. 1.2 ; e.g. Reiter, 1990 ; Kramer, 1996) :

- la première étape consiste à définir des zones sources correspondant aux zones pouvant générer de la sismicité.
- la seconde étape concerne la modélisation du taux moyen de récurrence des séismes en fonction de leur magnitude pour chacune des zones sources.

- la troisième étape est consacrée à l'estimation du mouvement du sol que chaque source sismique est capable de dépasser.
- la quatrième et dernière étape correspond à la détermination d'un paramètre de dépassement du mouvement du sol, qui sera considéré pour les études du risque sismique.

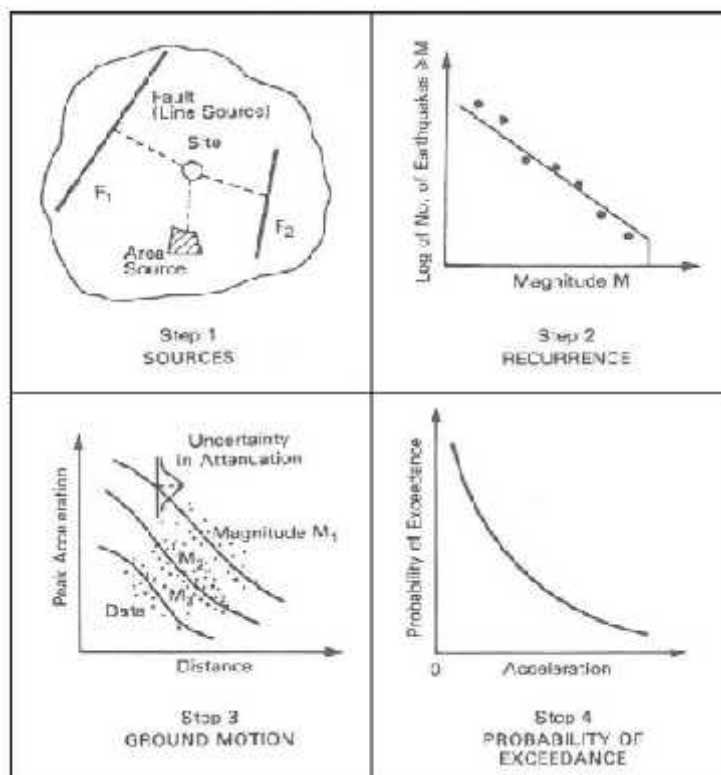


Figure 1.2 Détail des 4 étapes nécessaires à la définition de l'aléa sismique selon l'approche PSHA (Reiter, 1990).

L'analyse déterministe de l'aléa sismique (*Deterministic Seismic Hazard Analysis [DSHA]*) implique le choix d'un événement sismique particulier pour évaluer les mouvements du sol si le choix envisagé correspond à l'événement le plus violent pouvant arriver dans une région, la protection est alors totale. De pareilles situations sont obligatoires aux ouvrages spéciaux (centrale nucléaire, barrage, etc.), car leurs ruines entraîneraient des victimes sur des étendues beaucoup plus vastes que leur emprise. Cette analyse peut être réalisée en quatre étapes :

- identification et caractérisation de toutes les sources sismiques pouvant causer des dommages importants aux sites ;

- pour chacune des sources, déterminer la distance (la plus courte) au site. Cette distance correspond à l'épicentre ou l'hypocentre du séisme considéré ;
- choisir, pour chaque source, un séisme de référence en terme de magnitude et d'intensité (l'aléa sismique est déterminé par la source donnant le plus fort mouvement ;
- faire l'évaluation de l'aléa en utilisant des relations d'atténuation appropriées.

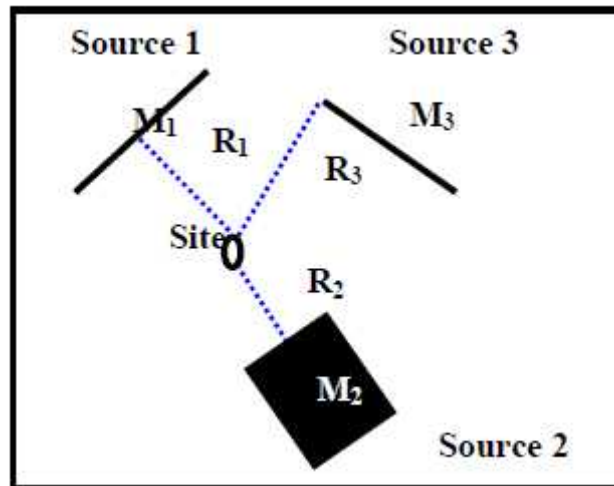


Figure 1.3 Présentation schématique de l'approche déterministe.

3 Cadre géodynamique de la méditerranée

3.1 Mouvement actuel des plaques

La complexité géologique passée semble se prolonger dans le présent comme l'atteste la diversité des régimes de déformation dans cette région, incluant par exemple des structures en compression comme les Dinarides ou les Maghrébines, de l'extension dans le cœur des Apennins et du décrochement dans les Alpes occidentales (fig. 1.4) Nocquet, (2002). Par ailleurs, l'existence de blocs rigides (plaque adriatique, bloc Corso-Sarde, bloc Ibérique) indépendant des deux grandes plaques tectoniques et la présence de phénomènes géodynamiques régionaux contribuent à modifier significativement le champ de déformation lié à la convergence de l'Afrique vers l'Eurasie. Outre le fait que dans cette zone de frontière de plaques, où coexistent donc des régimes de déformation distensif et compressif, la vitesse de mouvement des plaques n'y est pas uniforme. C'est ce que montre J.M. Nocquet (2002) à partir de l'analyse de données géodésiques et sismotectoniques.

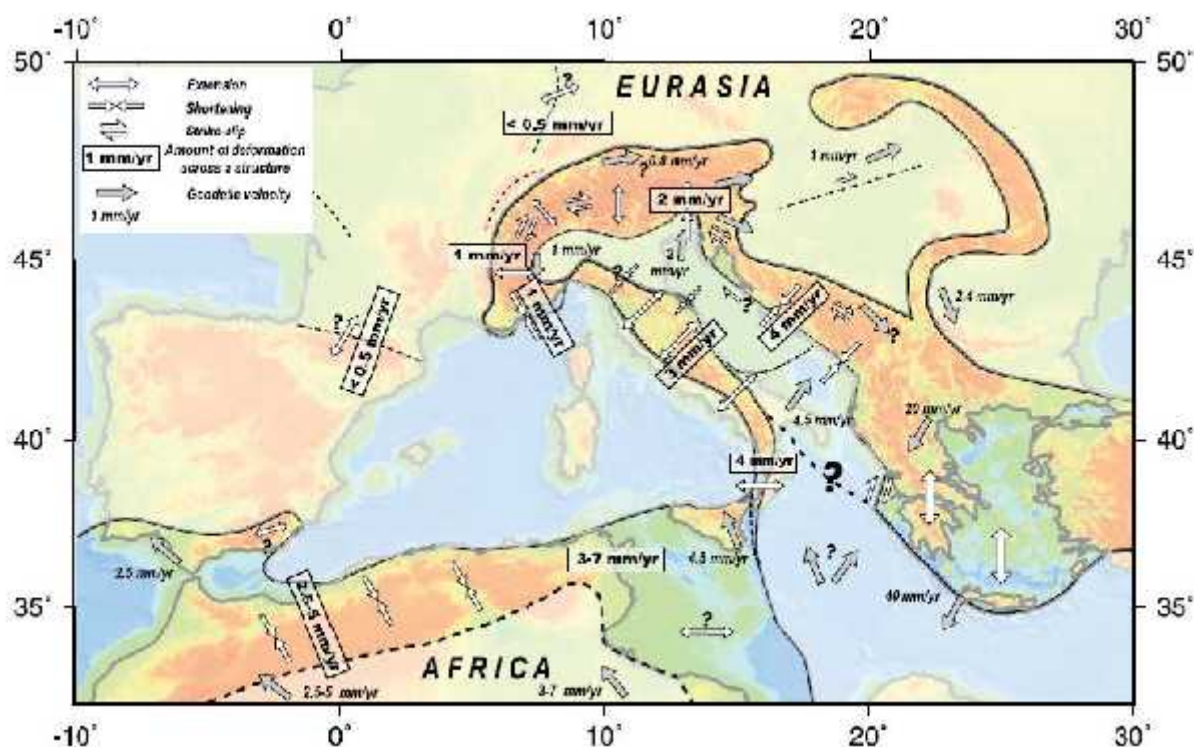


Figure 1.4 Synthèse cinématique en Europe-Méditerranée occidentale et centrale (d'après Nocquet, 2002).

3.2 Contexte géologique de la région d'étude

La région de Constantine fait partie des zones externes des Maghrébides durant Delga, (1971), domaine allochtone, caractérisé par les nappes de charriages essentiellement à vergence sud, mises en places après une orogénèse Alpines. La carte de Constantine (fig 1.5) et de sa périphérie montre quatre grands ensembles géologiques distincts : L'anté-nappes, les nappes de charriages, le Néogène post-nappes et le Quaternaire (Bougdal, 2007).

- a) L'anté-nappes sont des terrains plus anciens (Crétacé moyen), essentiellement composés de calcaires massifs, très épais. Elle affleure localement au Nord de la ville, et forme en particulier « Le Rocher » sur lequel est construite l'ancienne ville.
- b) Les nappes de charriages sont des terrains allochtones à leurs tours et sont deux types :
 - Les marno-calcaires et pélites, affleurent largement le long des limites orientales de la ville : quartiers de Djebel Ouahch, Berda, Sarkina et Gammaas, correspond essentiellement au faciès marneux à boules Jaunes. Il forme également tout les talus

Rive droite du Rhummel, où le faciès pélitique est prédominant.

- La nappe des flyschs massyliens, occupe des espaces plus réduits. Elle se présente sous forme de Klippes Nord-Est et au Sud-Est.

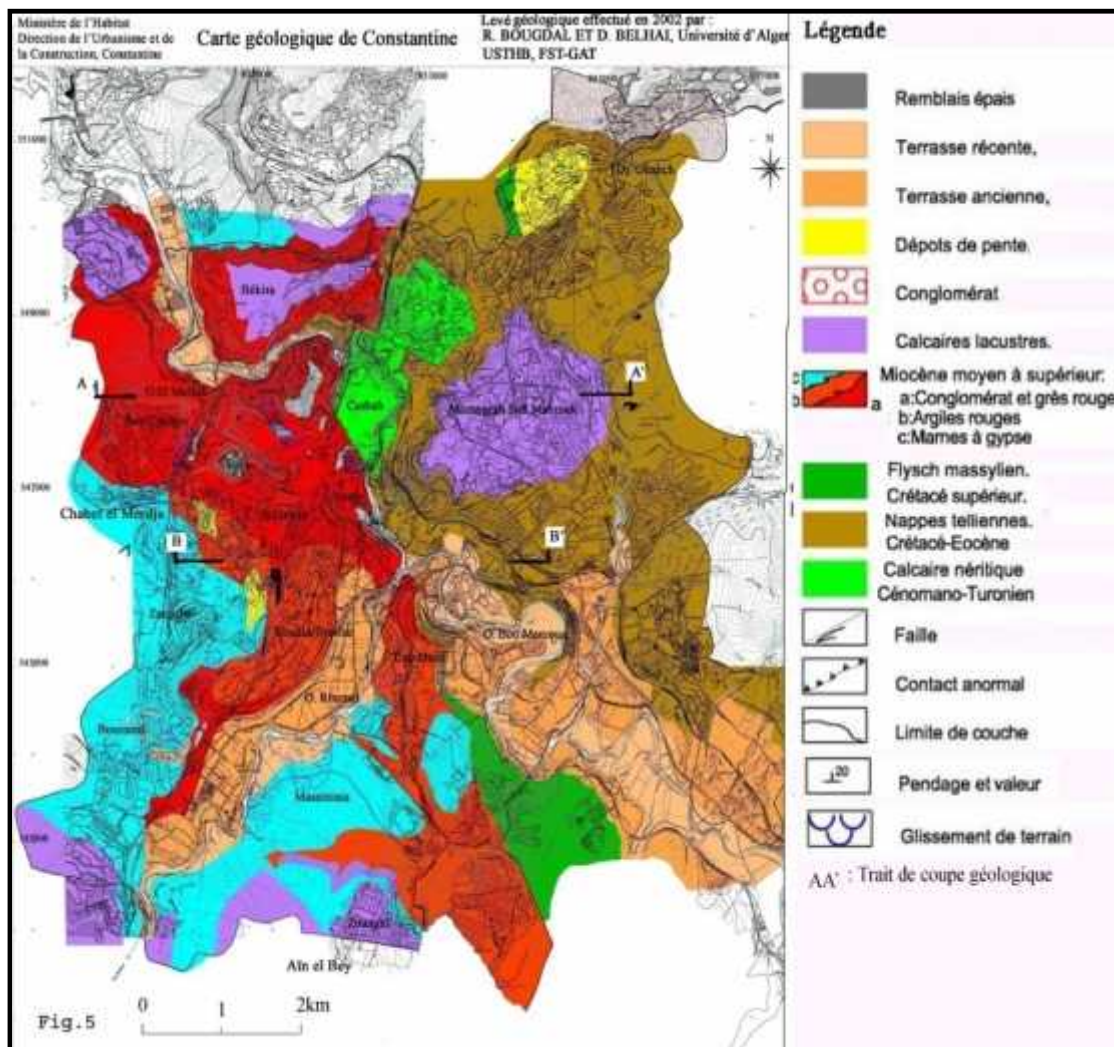


Figure 1.5 Carte géologiques de la zone d'étude. AA' et BB' sont des coupes géologiques (Bougdal, 2007).

c) Le Néogènes post-nappes sont des terrains conglomératiques, argileux et marneux, miocènes, et sont les plus développées dans la ville de Constantine et sa banlieue. La répartition de ces différents faciès sur le terrain n'est pas aisée dans la mesure où de fréquents passages latéraux les caractérisent. Cependant, selon Bougdal, (2007), nous pouvons avancer les observations suivantes :

2. Le faciès franchement conglomératique, rouge, très épais (100 m) est reconnu dans

les quartiers de Bélouizdad, Kitouni, Bardo.

3. Ce conglomérat passe vers le sud (latitude de Ciloc, la mosquée E. Abdelkader, Belle vue) à un faciès progressivement argileux, rouge.

Le faciès franchement marneux à gypse, occupe la zone centrale d'un synclinal de oued El-Mallah (quartiers de Boudraa, Zaouche et Boussouf) et plus au sud, le versant rive gauche du Rhummel.

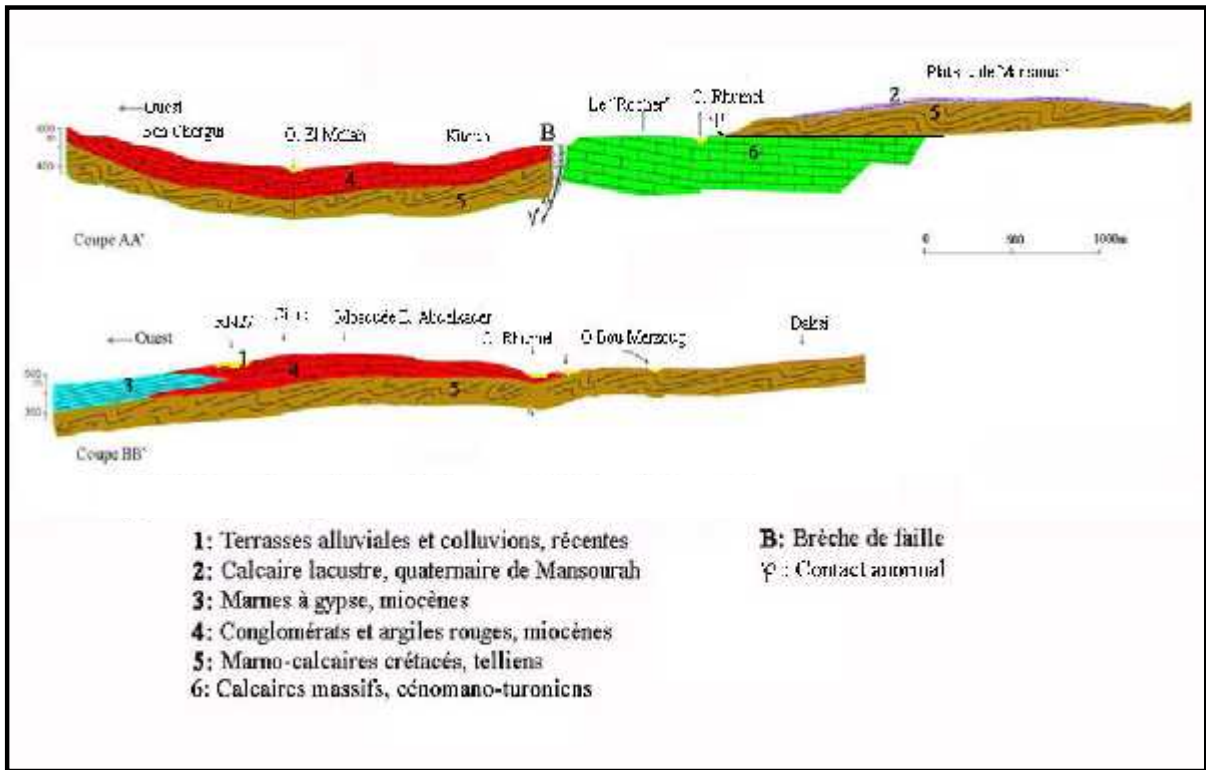


Figure 1.6 Coupes géologiques AA' et BB' (Bougdal, 2006).

d) Les formations Quaternaires :

1. Le Quaternaire ancien est représenté par deux types de formations : les conglomérats grossiers du Djebel Ouahch et les calcaires lacustres à bases sablo-conglomératiques.

Les conglomérats grossiers affleurent à l'extrémité N-E du secteur étudié. Ils sont très épais (plus de 100 m).

Le calcaire lacustre est largement distribué sur les plateaux de Mansourah-Sidi mabrouk, au centre, Salah Bey, plus au N-O et les crêtes surélevées d'Ain el Bey au sud.

2. Les terrasses alluviales sont distribuées essentiellement sur les rives des oueds Rhummel et Boumerzoug. Elles sont étagées et la plus ancienne est surélevée sur près de 20 à 25m par rapport à la côte du lit mineur voisin.

3.3 Sismotectonique de la zone d'étude

Dans l'Est algérien en générale et dans la région de Constantine en particulier, la sismicité est faible à modéré ($M < 6$) mais marquée toutefois par de rares secousses suffisamment fortes pour être destructrices, si l'on tient compte de la vulnérabilité du bâti et la nature des formations sédimentaires, généralement marneuses. Les catalogues de la sismicité historique ne rapportent pas en effet l'existence de séismes de fortes magnitudes (Harbi et al. **1999**; Harbi et al. **2003**; Harbi et al. **2010**), à l'exception de trois évènements sismiques d'intensité maximale VIII MSK . Il s'agit du séisme du 4 Aout 1908 avec un $M_s = 5.2$, celui du 6 aout 1947 avec un $M_s = 5$ et le dernier en date du 27 octobre 1985 avec un M_s de 5.9. Il semblerait, si l'on tient compte de la localisation des épacentres des trois séismes, compte tenu de l'erreur de localisation, que ces séismes ont la même source sismique et ont une période de retour de 39 ans (Bounif et al. **1987**; Bounif, **1990**; Deschamps, **1991**). Parmi ces évènements, le séisme du 27/10/1985 sur lequel existent des données bibliographiques assez précises a été relativement bien étudié.

4 Aléa sismique du Nord de l'Algérie

Les premières cartes d'aléa sismique en Algérie sont constituées de cartes macrosismiques. La plus ancienne carte d'aléa sismique connue en Algérie est la carte des intensités macrosismiques réalisée par Perrey, (**1847**). En 1973, Roussel a réalisé une carte des intensités maximales observées dans laquelle 05 zones ont été définies: X, IX, VIII, VII et VI. Dans le cadre de l'élaboration du premier règlement parasismique algérien, une étude a été réalisée en 1978 (Mortgat & Shah, **1978**) où le catalogue utilisé couvre la période de 1790-1975. Récemment Bezzeghoud et al. (**1996**) ont publié une mise à jour de toutes ces cartes à partir d'un catalogue de la sismicité algérienne compilé pour la période de 1365- 1992. Dans cette carte, 07 zones ont été définies, il s'agit des zones aux intensités de X-XI, X, IX, VIII, VII, VI, et V.

Aussi, d'autres études plus détaillées ont été réalisées par des organismes : à Chlef WCC, (**1984**), à Alger SWAN, (**1998**) et à Mascara CGS, (**1999**). Ainsi que par des universitaires et

chercheurs algériens et étrangers pour l'évaluation de l'aléa sismique en Algérie par l'application des méthodes déterministes et probabilistes (Benouar & al. **1996**; Aoudia & al. **2000** ; Bouhadad, **2000**; Bouhadad & Laouami, **2002** ; Hamdache & al. (**1998-2006**), Bouhadad (**2002-2004**), Ayadi (**2002-2003**), Aoudia (**2000**), Benouar (**1994, 1996 et 2002**), Harbi (**2004**), Boughacha (**2004**), Laouami & al. (**2006**) Farsi & al. (**2007**), Bensaïbi & al. (**2007**). Hamidatou et al. (2016-2017)).

Pour notre zone d'étude, la wilaya de Constantine, les résultats d'une étude du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique C.G.S pour la société EEG SIMECSOL ont été utilisés dans le présent travail.

Enfin dans le rapport final (Etude des glissements de terrain a travers la ville de Constantine - étude de l'alea sismique- rapport final), ils sont arrivés à la conclusion suivante : « En comparant ces résultats à ceux obtenus dans d'autres études, on s'aperçoit que comparativement aux résultats de Morgat et Shah (**1978**), dont les résultats ont servi pour l'élaboration de la carte de zonage sismique réglementaire de l'Algérie. A la base des règles RPA 81,88 et 99 (CGS, **2000**) les résultats obtenus dans cette étude donnent des valeurs de l'accélération plus élevées ». Le code RPA **2003** donne pour Constantine une accélération de 0.25g.

4.1 Les séismes destructeurs les plus récents durant la période instrumentale

L'Algérie a été frappée au cours de son histoire par de nombreux séismes destructeurs. Parmi les plus récents ceux du 24 juin 1910 à Aumale (Ms=6.6), du 09 septembre 1954 à Orléanville (Ms=6.7), du 10 Octobre 1980 à El Asnam (Ms=7.3), du 25 Octobre 1985 à Constantine (Ms=6.0), du 29 octobre 1989 à Tipaza (Mont Chenoua) (Mw=6.0), du 22 décembre 1999 à Ain Temouchent (Mw=5.7) et du 21 Mai 2003 de Boumerdes (Mw=6.8). Ces événements sismiques qui ont générés des effets désastreux ont montré la vulnérabilité de notre pays face au risque sismique en raison d'une grande concentration démographique et industrielle existante dans le nord de l'Algérie.

4.2 Intensité maximale

4.2.1 L'intensité maximale observée (MOI)

Un autre moyen d'avoir une vue de la répartition du risque sismique en Algérie est la distribution des intensités maximales observées (MOI). La première carte dessinée par Roussel (1973b) (fig. 1.7) utilise les données disponibles pour la période 1716-1970 montre trois grandes régions :

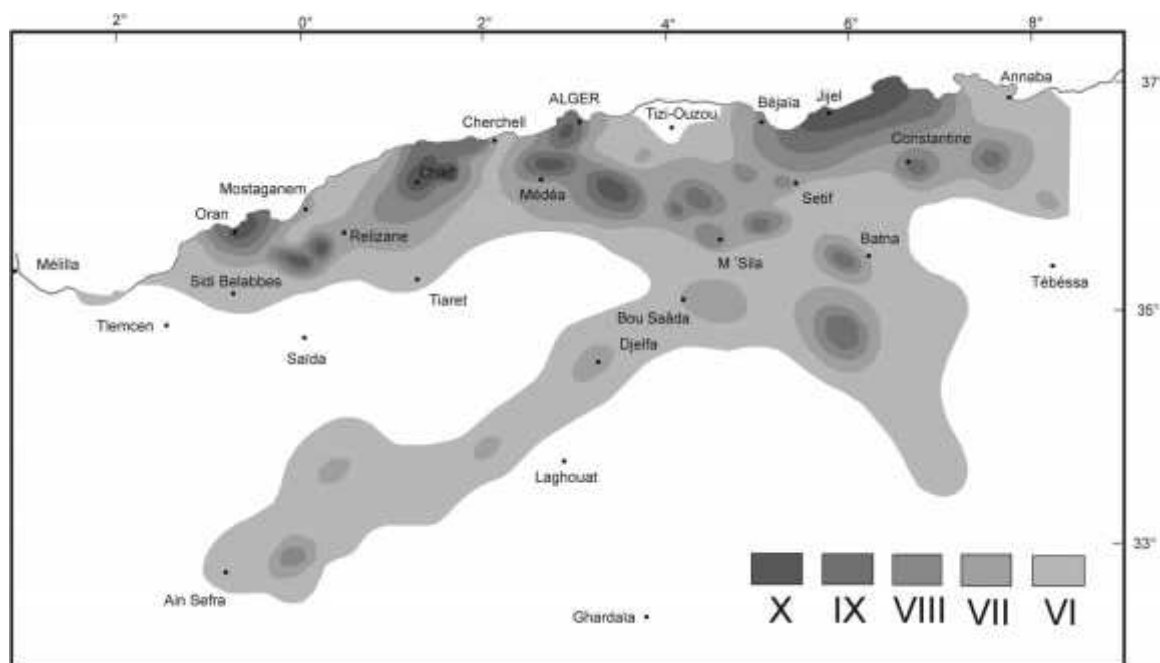


Figure 1.7 Carte des intensités maximales observées Roussel, (1973b).

- La partie Nord de l'Algérie, qui semble être la zone la plus active avec l'intensité maximale observée de X degré.
- La partie Nord de la flexure Sud atlasique qui présente une sismicité très faible à l'exception des régions de Biskra et de Batna où peu d'événements avec une intensité IX ont été observés.
- Les Hauts Plateaux avec une faible activité sismique: les intensités observées sont inférieures VI degré.

La compilation de la sismicité couvrant la période 1970-1990, en particulier les trois principaux événements de El Asnam (10/10/1980, Ms = 7.3), Constantine (27/10/1985, Ms = 6.0) et Mont-Chenoua-Tipaza (29/10/1989 Ms = 6,0), a permis à Bezzeghoud et al. (1996) de mettre à jour la carte de Roussel, (1973b) (fig. 1.8). La carte du MOI montre des changements notables induits par l'activité de 1970 à 1990 où l'apparence des quatre régions a été remarquée:

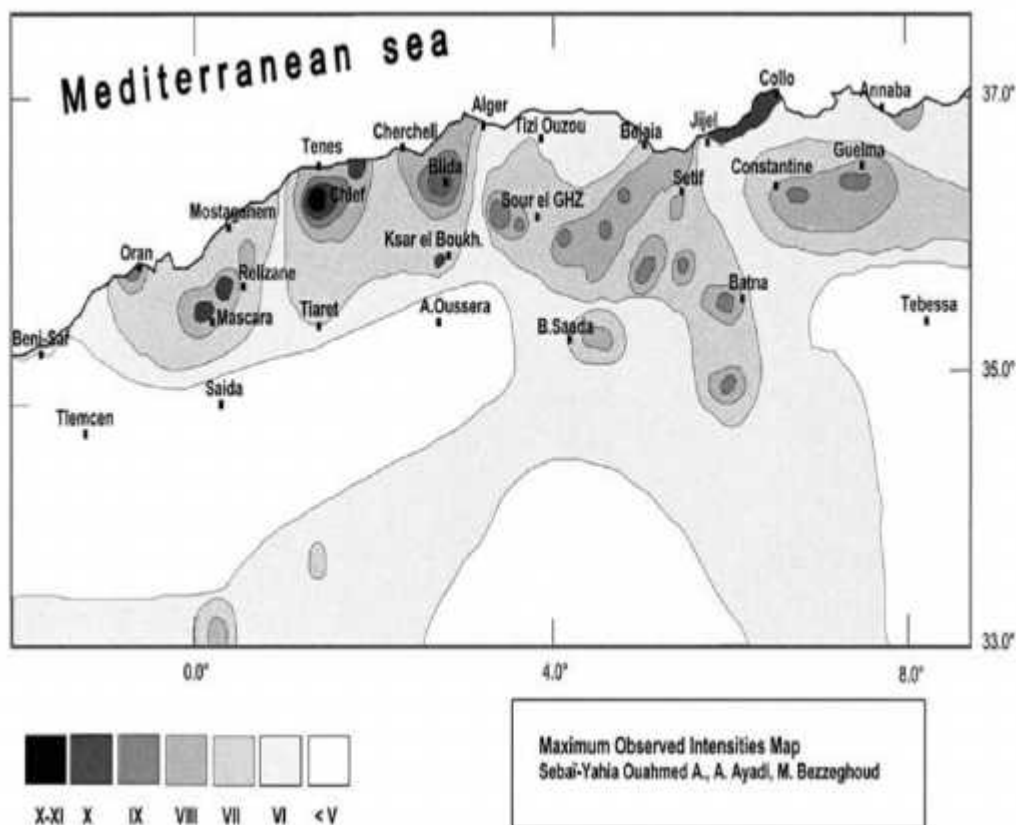


Figure 1.8 Carte des intensités maximales observées Bezzeghoud et al. (1996).

- La première à l'Est, autour de Constantine, Guelma et Souk Ahras.
 - La deuxième comprend une partie de la chaîne Bibans-Babors, les Aurès et la région d'El Hodna.
 - La troisième région comprend les régions d'Alger, Cherchell et El Asnam avec une extension vers le sud du Massif Ouarsenis.
 - La dernière, la région d'Oran, notamment Oran, Relizane et Sidi Bel-Abbès.
- Toutes ces zones sont entourées par la courbe d'intensité de degré VII.

4.2.2 L'intensité maximale calculée (MCI)

Une nouvelle approche dans l'évaluation des Intensités consiste à présenter les Intensités maximales calculées. Cette nouvelle approche possède un avantage pour la cartographie des risques, car elle tient compte de la contribution de tous les événements sismiques. Les résultats dépendent fortement de la fiabilité des événements contenus dans le catalogue des séismes (localisation, l'intensité et la profondeur, la validité de la loi d'atténuation et de l'exhaustivité de la sismicité).

La Figure 1.9 représente donc la carte des intensités maximales calculées (MCI) pour la période 1716-2000 établis par Boughacha et al. (2004).

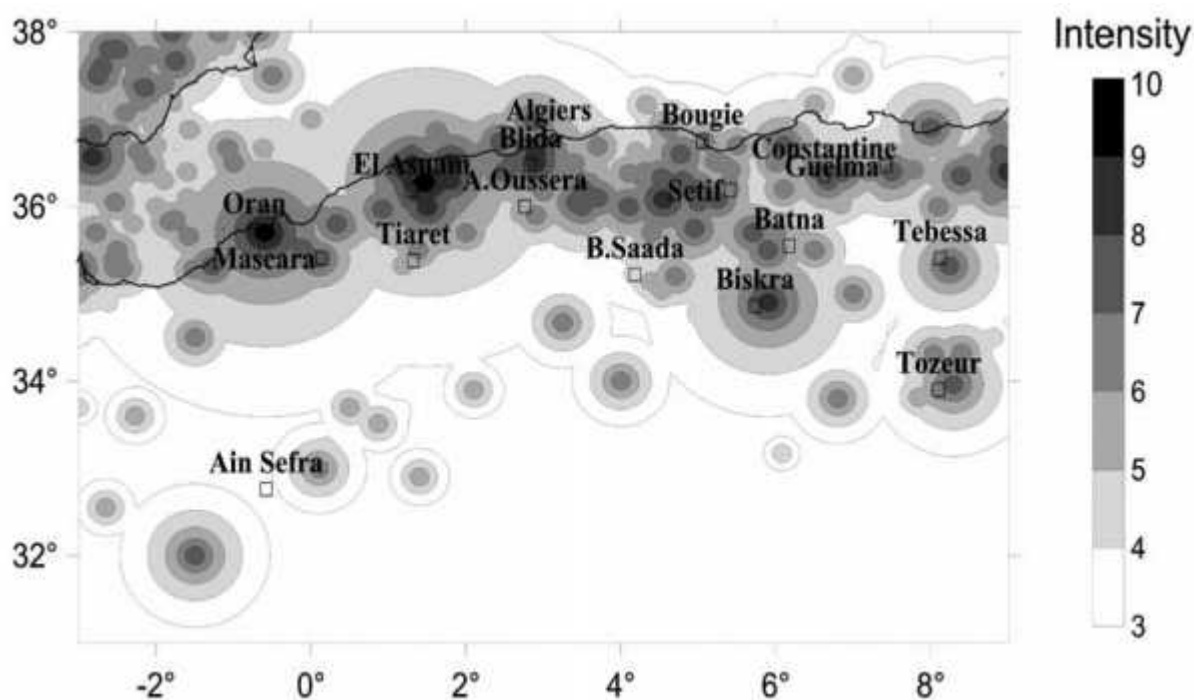


Figure 1.9 Carte des intensités maximales calculées (MCI) Boughacha et al. (2004).

Selon cette carte, les intensités maximales calculées sont situées à El Asnam (10/10/1980, $I_0 = X$), Oran (10/09/1790, $I_0 = X$), Alger (02/03/1716, $I_0 = IX$), Biskra (16/11/1869, $I_0 = IX$) et Constantine (27/10/1985, $I_0 = VIII$).

Cette carte de MCI pourrait être un moyen possible d'évaluer l'aléa sismique dans le Nord de l'Algérie en l'absence d'études probabilistes basées sur une base de données de mouvement fort (réseau des accéléromètres).

La comparaison de la carte MOI de Roussel (1973b), la carte MOI modifiée par Bezzeghoud et al. (1996), et la carte MCI de Boughacha et al. (2004), montre que la tendance générale des intensités maximales observées ou calculées est vérifiée par ces trois cartes. La carte MCI pourrait représenter les informations les plus précises sur la répartition spatiale de l'intensité maximale en tout point de la région, ce qui permet d'identifier les zones sujettes aux séismes. D'autre part, il pourrait s'agir d'un document requis dans la conception de structures dans des zones sismiques, afin d'assurer une résistance aux séismes adaptée à des travaux de génie civil.

4.3 Accélération maximale du sol

Les séismes destructeurs qui se sont produits en Algérie du Nord indiquent l'importance de l'évaluation de l'aléa sismique afin d'établir un zonage de cette région. Les premières études d'Aléa sismique du Nord de l'Algérie ont été réalisées par WCC (Woodward-Clyde Consultants) en 1984 après l'occurrence du séisme d'El Asnam de 1980.

Plus récemment, Hamadache et al. (2006), à travers de nombreuses publications, ont réalisé l'étude de cet aléa par des modèles probabilistes.

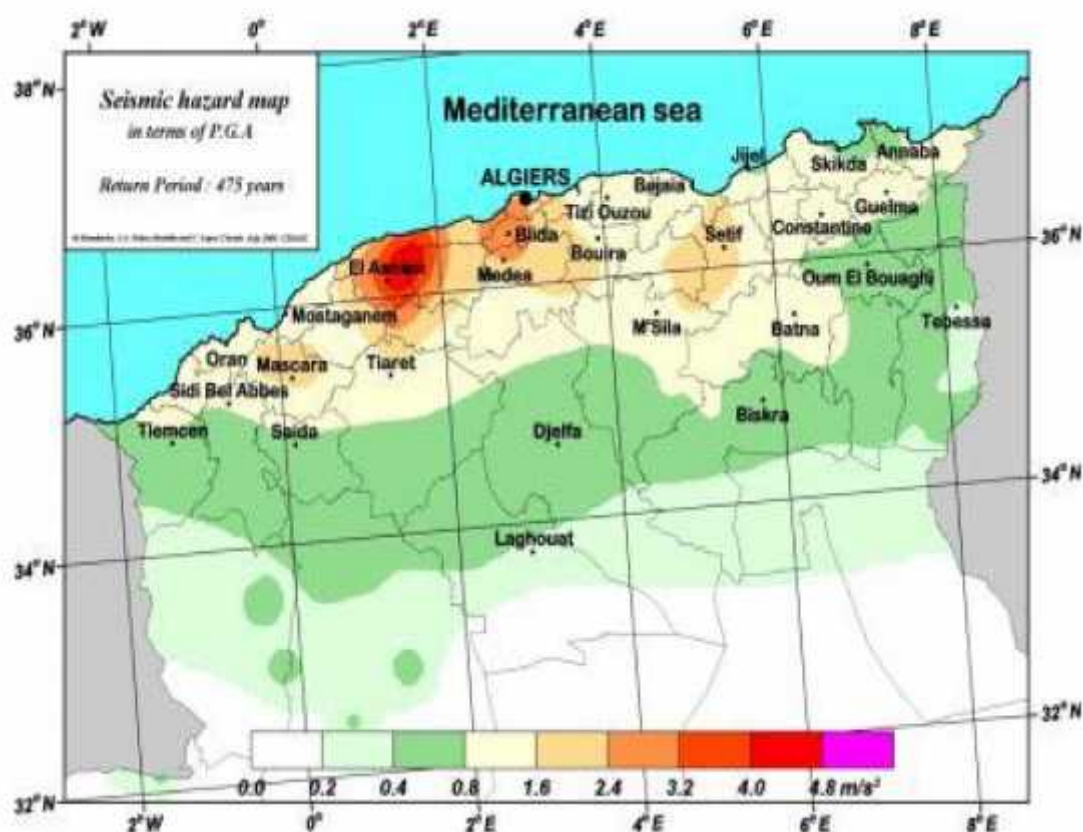


Figure 1.10 PGA moyenne avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (Période de retour 475 années) (Hamadache et al. 2006).

La Figure 1.10 représente la carte de l'aléa sismique en termes de PGA (Peak Ground Acceleration) avec 10% de probabilité de dépassement en 50 ans pour une période de retour 475 années (réalisée par Hamadache et al. 2006). Cette carte révèle que les valeurs les plus élevées sont concentrées dans la partie centrale de l'Atlas tellien. Au voisinage des événements majeurs tel que celui du 09 Septembre 1954 (M=6.8) ou encore du 10 Octobre 1980 (M=7.3),

l'accélération maximale du sol (PGA), très élevée, atteint 0.5g. Vers le Sud, une décroissance constante de l'accélération du sol.

La Figure 1.11 représente la carte de l'aléa sismique en termes de PGA (Peak Ground Acceleration) avec 10% de probabilité de dépassement en 50 ans pour une période de retour 475 années (réalisée par Pelaez et al. 2005).

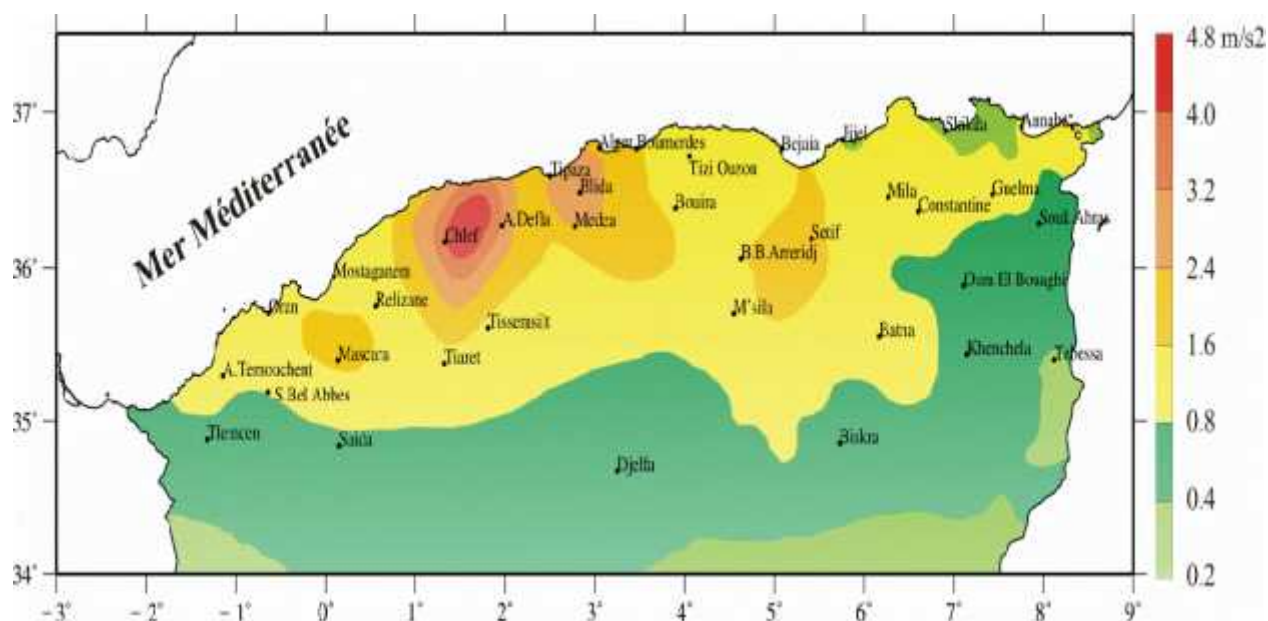


Figure 1.11 PGA moyenne avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (Période de retour 475 années) Pelaez et al. (2005 modifié).

A partir de cette carte on observe que les valeurs les plus élevées de l'aléa sismique se trouvent dans la partie centrale de l'Atlas Tellien, c'est-à-dire la zone la plus active dans la région. En particulier, dans les régions de Chlef et la partie occidentale de Aïn Defla, puisque le PGA moyen estimé est supérieur à 0.24 g, et atteint 0.48 g dans la zone où les deux séismes d'El Asnam de 1954 et de 1980 se sont produits. Les régions de Blida et d'Alger à risque sismique élevé puisque le PGA moyen estimé est supérieur à 2.4 m/s², soit 0.24 g. Une valeur de PGA de l'ordre de 1.6 m/s² est observée dans une zone comprise entre les deux précédentes zones, la région de Sétif et la région de Mascara. La reste de l'Atlas Tellien est inclus dans une zone à risque sismique modéré (PGA supérieur à 0.8 m/s², ou 0.08 g). Au sud de l'Atlas Tellien, les Hauts Plateaux, l'Atlas Saharien et la plate-forme Saharienne sont inclus dans une zone à faible risque sismique puisque le PGA est inférieure à 0.8 m/s². Ceci est en

accord avec la sismicité observée durant les 300 dernières années et les caractéristiques tectoniques dans la région.

5. La méthode de Cornell-McGuire

5.1 Estimation de l'aléa sismique probabiliste selon la méthode de "Cornell-McGuire"

5.1.1 Principe

Estimer l'aléa sismique probabiliste en un site, c'est déterminer les taux annuels d'occurrence de paramètres du mouvement du sol. Le paramètre du mouvement du sol le plus utilisé dans les études probabilistes est le pic d'accélération mais la vitesse, le déplacement peuvent également caractériser le mouvement.

Trois étapes préliminaires sont nécessaires :

- Identifier les zones sources dans la région d'étude,
- Dans chaque zone source, modéliser une courbe de récurrence à partir du catalogue de sismicité, cette courbe de récurrence décrit les magnitudes possibles et leurs taux annuels d'occurrence,
- Choisir une relation d'atténuation du mouvement du sol adaptée à la région d'étude ; pour un scénario donné (magnitude et distance) elle fournit une fonction de densité de probabilité de l'accélération engendrée au site.

Pour une accélération cible donnée A^* , le taux annuel de dépassement de cette accélération cible (λ_{A^*}) est calculé comme suit :

$$\lambda_{A^*} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \int_{m=M_{mi}}^{M_{mi}^i} \int_r P\left[A > \frac{A^*}{m}, r\right] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad (1.3)$$

Où

- λ_i est le taux annuel de séismes de magnitude supérieure ou égale à la magnitude minimale choisie M_{mi} , pour la zone source i ,
- $f_{M_i}(m)$ et $f_{R_i}(r)$ sont les fonctions de densité de probabilité en magnitude et distance de la source i , où elles sont supposées indépendantes,
- $P[A > A^*/m, r]$ est la probabilité qu'un séisme de magnitude m à la distance r du site engendre une accélération supérieure à A^* , cette probabilité est calculée à partir de la relation d'atténuation,

- N est le nombre de zones sources.

Les taux annuels de dépassement d'une série d'accélération cibles sont calculés et une courbe d'aléa est obtenue au site (fig. 1.12).

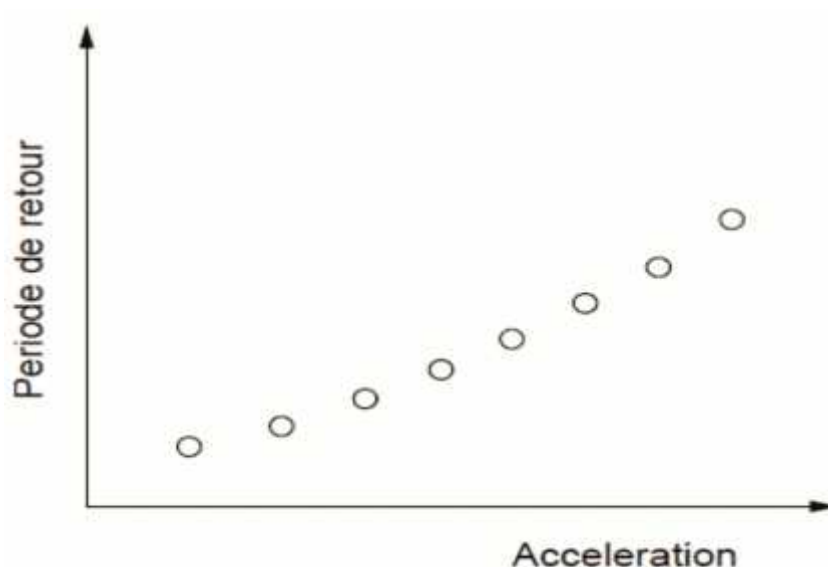


Figure 1.12 Courbe d'aléa : périodes de retour des accélérations.

La période de retour est l'inverse du taux annuel. Cependant, en pratique on se réfère souvent à la période de retour plutôt qu'au taux annuel (il est plus facile de parler d'une période de retour de 10000 ans plutôt que d'un taux annuel de 0.0001). Les résultats des estimations probabilistes se présentent en général en terme d'accélération correspondant à des périodes de retour précises (100, 500, 1000 ans...) ; ces accélérations s'obtiennent par interpolation à partir de la courbe d'aléa.

5.1.2 Identification des lieux d'occurrence des séismes

Selon la connaissance de la tectonique active de la région étudiée, les zones sources peuvent être de deux types (fig. 1.13). Dans les régions à forte sismicité, les séismes se produisent fréquemment, leur distribution en surface et en profondeur délimite les failles qui les génèrent. Les zones sources sont alors des bandes étroites délimitant ces failles. Dans les régions à sismicité modérée, la sismicité est diffuse et les failles responsables des séismes sont très mal identifiées. Les zones sources sont alors des aires larges, homogènes du point de vue de différents critères (épaisseur de croûte, mécanismes au foyer, champ de contrainte,

distribution de la sismicité...). En pratique, les zones sources sont des polygones, il n'y a pas de formulation analytique pour les fonctions de densité de probabilité en distance ($f_{R_i}(r)$, équation 1.3). Les zones sources sont par la suite subdivisées en sous-zones pour lesquelles l'hypothèse de source ponctuelle est possible (distance source-site suffisamment grande par rapport à la taille de la sous-zone).

Les courbes de récurrence sont modélisées à l'intérieur de chaque zone source. Les scénarios magnitude-distance sont assimilés à des points sources et les hypocentres sont supposés uniformément distribués dans chaque zone, à la profondeur moyenne déterminée pour la zone.

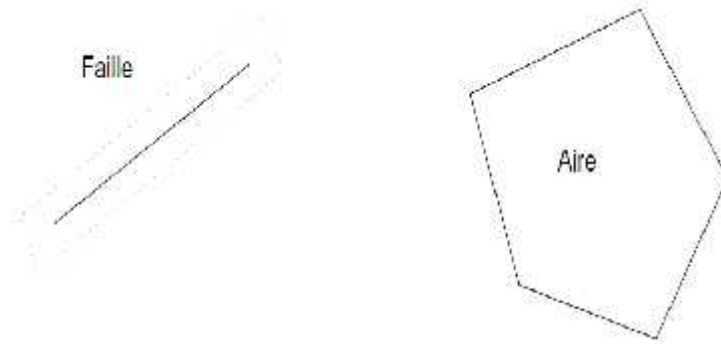


Figure 1.13 Deux types de zones sources, les failles dans les régions caractérisées par une activité sismique importante, les aires géographiques larges dans les régions de sismicité modérée.

5.1.3 Modélisation de la récurrence

Dans chaque zone source, une loi de récurrence est modélisée à partir du catalogue de sismicité de la zone. Cette loi de récurrence fournit pour une magnitude M le nombre annuel de séismes de magnitude supérieure ou égale à M , où λ_M le modèle de l'exponentielle tronquée est le plus fréquemment utilisé (représentation graphique sur la fig. 1.14) :

$$\lambda_M = \lambda_{M_m} \frac{e^{\beta(M-M_m)} - e^{-\beta(M_m - M_m)}}{1 - e^{-\beta(M_m - M_m)}} \quad (1.4)$$

Il est basé sur l'observation de la décroissance exponentielle du nombre de séismes en fonction de la magnitude (Gutenberg & Richter 1944). Il est caractérisé par trois paramètres : la magnitude minimale M_{min} , le coefficient de la décroissance exponentielle et la magnitude maximale M_{max} . Les taux des magnitudes supérieures à M_{max} sont nuls. Les fonctions de densité cumulée et de densité de probabilité correspondantes sont comme suit :

$$F_M(m) = P \left[M < \frac{m}{M_m} \leq m \quad M_m \right] = \frac{1 - e^{-\beta(m-M_m)}}{1 - e^{-\beta(M_{\max} - M_m)}} \quad (1.5)$$

$$\text{Et } f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-M_m)}}{1 - e^{-\beta(M_{\max} - M_m)}} \quad (1.6)$$

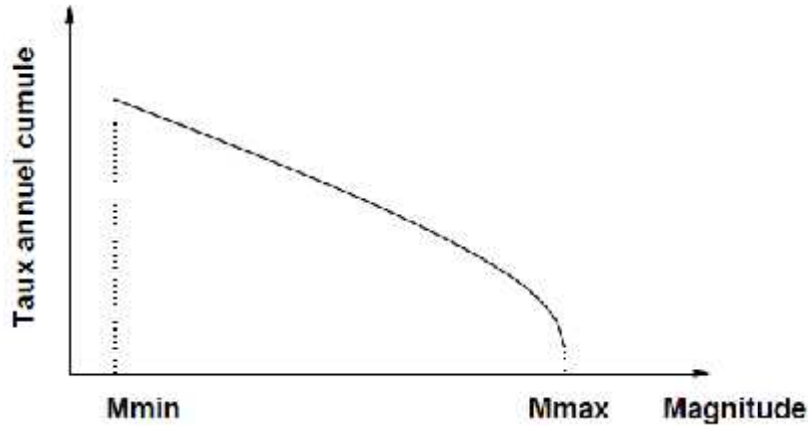


Figure 1.14 Courbe de récurrence: modèle de l'exponentielle tronquée.

La formulation initiale de Gutenberg & Richter (1944) comporte deux paramètres :

$$\ln N = a - bM$$

Où N est le nombre de séismes, M la magnitude, a est le logarithme du nombre de séismes de magnitude 0 et b est la pente de la droite (appelée «b-value»). N peut être le nombre de séismes, le nombre cumulé de séismes ou encore le nombre annuel cumulé. L'équation peut se formuler comme suit :

$$\lambda_M = e^{a-bM}$$

avec $a = a_0 + bM_0$ et $\beta = b \ln 10$.

En pratique, un catalogue de sismicité est complet à partir d'une magnitude dite magnitude de coupure M_C : tous les séismes de magnitude supérieure ou égale à M_C sont reportés de manière exhaustive dans le catalogue. Au final, les magnitudes sont utilisées à partir d'une magnitude minimale M_0 , supérieure ou égale à la magnitude de coupure ; par conséquent il est plus pratique d'exprimer le taux annuel sous la forme :

$$\lambda_M = \lambda_{M_0} e^{-\beta(M-M_0)} \quad (1.7)$$

Avec $\lambda_{M_0} = e^{\alpha - \beta M_0}$

Les deux paramètres de sismicité λ_{M_0} et β sont calculés à partir du catalogue de sismicité de chaque zone source. Un troisième paramètre est finalement introduit afin de fournir une borne maximale aux magnitudes pouvant se produire dans la zone source, c'est la magnitude maximale M_{max} , qui peut être obtenue pour $M_0 = M_{min}$.

Il importe de bien distinguer les magnitudes M_0 et M_{min} :

- M_0 est la magnitude minimale utilisée pour calculer les paramètres de sismicité λ_{M_0} , β et
- M_{min} la magnitude minimale prise en compte dans le calcul probabiliste.

L'intervalle de magnitude qui va contribuer à l'aléa est déterminé par les choix de M_{min} et M_{max} .

5.2 Le code de calcul CRISIS

5.2.1 Mode de calcul

Pour une accélération cible A , le code CRISIS nous permet de calculer le taux annuel d'occurrence d'une accélération supérieure à A (taux annuel de dépassement), et les intégrales en magnitude et distance de l'équation 1.8 sont discrétisées :

$$\lambda_A = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{m=M_{min}}^{M_{max}} \sum_r P \left[A > \frac{A}{m}, r \right] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) \quad (1.8)$$

Les informations suivantes sont fournies en entrée du programme CRISIS :

- les coordonnées du site,
- la magnitude minimale M_{min} et les taux de sismicité associés de chaque zone source i : $\lambda_i = \lambda_i(M - M_{min})$,
- les magnitudes maximales M_{max} ,
- les pentes des lois de récurrence β_i ,
- les sommets des polygones qui délimitent les zones sources,
- les paramètres qui contrôlent les discrétisations en magnitude (m) et en distance ($F_{min}, R_{min}, D_{max}$),
- les coefficients de la relation d'atténuation,
- les accélérations cibles et les périodes de retour d'intérêt.

Le programme CRISIS calcule λ_A :

- en subdivisant chaque zone source en sous-zones afin d'obtenir les f_{R_i} ,
- en calculant les f_{M_i} à partir de β , M_m et M_m (modèle d'exponentielle tronquée),
- en calculant $P[A > A / m, r]$ à partir de la relation d'atténuation pour toutes les combinaisons (m, r) (équation 1.8),

Le code permet d'introduire des incertitudes sur les paramètres de sismicité et sur la magnitude maximale et de tenir compte de ces incertitudes dans le calcul. Cette option n'a pas été utilisée dans cette étude, nous avons opté de faire varier ces paramètres à l'extérieur du code de calcul probabiliste, afin de pouvoir quantifier la variabilité engendrée sur les estimations d'aléa.

5.2.2 Procédure d'intégration spatiale dans CRISIS

Chaque source sismique est ici représentée sous forme d'une surface polygonale en 3D (la surface est définie par des points de coordonnées (longitude, latitude et profondeurs)). La source sera subdivisée en sous-éléments de forme triangulaire dont la taille dépendra de la distance entre le sous-élément et le point de calcul de l'aléa. Une fois partagée en sous-sources, CRISIS assimile la sismicité associée à ce sous-élément comme une source ponctuelle. L'intégration spatiale d'une source est alors remplacée par la somme des contributions de chaque sous-source ponctuelle.

Deux paramètres permettent de limiter la subdivision de la source :

- la taille minimale du triangle (valeur par défaut 11 km) ;
- le rapport distance minimale/taille du triangle (valeur par défaut 3 km).

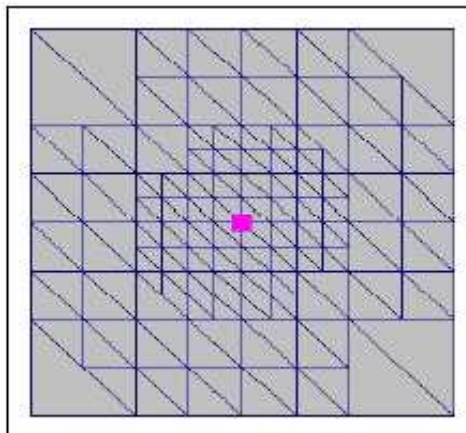


Figure 1.14 Découpage des sources en sous-éléments triangulaires dans CRISIS (2007).

Autour d'un point de calcul donné, le nombre de sous-éléments sera élevé avec des petites surfaces à courte distance. La taille des sous-éléments sera de plus en plus grande lorsque la distance augmente. La figure 1.14 montre un exemple de subdivision pour une source carrée et un point de calcul situé au centre de la source.

6. Vulnérabilité sismique des structures

Les méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle fondées sur les inspections visuelles ont été développées dans des pays à forte sismicité, aux Etats-Unis par la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1988, 1999, 2002, 2003) et en Italie par le Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) (Benedetti et Petrini, 1984; GNDT, 1986) dans les années 1980. D'autres pays comme le Japon (Otani, 2000), la Turquie (Yakut et al. 2006), le Canada (Onur et al. 2005; Ventura et al. 2005), la Belgique (Jongmans et Plumier, 2000), l'Espagne (Roca et al. 2006), le Portugal ou encore la Suisse ont utilisé ou adapté ces méthodes pour estimer la vulnérabilité de leurs régions les plus sismiques. Dans le cadre du projet européen Risk-UE (2003) coordonné par le BRGM, une méthode adaptée au contexte européen a été élaborée et appliquée à 7 villes, dont la ville de Nice. Une étude bibliographique (Combescure et al. 2005) réalisée par un groupe de travail de l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS) a déterminé les approches qui pouvaient être retenues en France. Le projet VulnéRALp (Guéguen, 2004; Guéguen et al. 2007b) « Vulnérabilité Sismique à l'échelle d'une ville Rhône-Alpine - Application à Grenoble », dont les principaux résultats sont présentés ici, propose une adaptation des méthodes italiennes au contexte français.

Dans la plupart des méthodes, les bâtiments sont préalablement classés selon une typologie. Ces méthodes se fondent sur l'observation des caractéristiques structurales des bâtiments pour leur attribuer un indice de vulnérabilité (*IV*). Différents niveaux de précision d'analyse sont généralement prévus, selon les informations disponibles, qui conduisent à une qualité variable de l'estimation de la vulnérabilité. Ces méthodes proposent une relation reliant l'indice de vulnérabilité à une échelle de dommage pour un mouvement sismique donné, un scénario probable ou un séisme historique, par exemple.

Les paramètres pertinents, les coefficients qui leurs sont attribués dans le calcul de l'indice de vulnérabilité (*IV*) et le lien entre *IV* et dommage sont déterminés à partir du retour d'expérience réalisé par des experts lors de missions post-sismiques. Malheureusement, le

mouvement du sol qui a généré les dégâts observés n'est généralement pas connu car il n'a pas été enregistré. Il est donc généralement représenté par l'intensité macrosismique estimée elle-même à partir des dégâts. Cette incohérence est une des limitations de ces méthodes. Par ailleurs, les relations entre paramètres structuraux et dommages sont estimées de manière statistique. Ces méthodes permettent donc d'avoir une vision statistique, à l'échelle d'une ville par exemple, et n'ont pas d'intérêt pour un bâtiment isolé.

6.1 Méthode VulnéRALp

Cette méthode qualitative a été élaborée par le LCPC/LGIT (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées/ Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de l'université Joseph Fourier-Observatoire de Grenoble) dans le cadre du projet VULNERALP et par l'AFPS dans le cadre du groupe de travail « vulnérabilité du bâti existant : approche d'ensemble ». Sur la base de l'identification, via des fiches de relevés, de critères architecturaux et constructifs, cette approche permet d'attribuer un indice de vulnérabilité global à la construction étudiée. Les pondérations de facteurs de vulnérabilité employée se basent essentiellement sur les travaux développés par le GNDT (Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti) italien. L'objectif de la méthode est de définir des priorités d'analyses ou d'actions parmi un ensemble de bâtiments à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Elle est à ce titre qualifiée par les 52 auteurs de « premier dégrossissage statistique ». Elle ne vise pas à définir les actions de réhabilitation proprement dites. Il s'agit d'une méthode « à étages » ou « gigogne » permettant de mettre en œuvre différents niveaux d'analyse de plus en plus précis et impliquant une mobilisation progressive des moyens. A l'heure actuelle, 4 niveaux d'analyse, tous compatibles entre eux, ont été développés :

- Le premier niveau, le plus rudimentaire, appelé 0, se base uniquement sur la typologie des bâtiments rencontrés en référence à la typologie EMS 98. Il permet un rapide screening des niveaux probables de dommages pour une typologie présente dans la ville. Ce niveau mobilise des données issues de la bibliographie, des photos aériennes ou de base de données relatives au bâti (INSEE par exemple).
- Le second niveau, assez sommaire, appelé 1.0, est un questionnaire assorti d'un guide informatif qui peut être renseigné par les gestionnaires de parc eux-mêmes. Sur cette base est alors estimé un indice de vulnérabilité, assorti d'une grande marge d'incertitude. Les informations nécessaires sont d'ordre qualitatif et géométrique :

matériau de construction, âge, terrain d'implantation, nombre d'étages, régularité géométrique, toiture.

- Le troisième niveau, plus précis et appelé 1.1, met en œuvre des fiches un peu plus détaillées renseignées par un technicien dûment formé après inspection visuelle extérieure. Les informations complémentaires ainsi obtenues permettent d'affiner l'estimation de l'indice de vulnérabilité : réduction de la marge d'incertitude.
- Le quatrième niveau, appelé 2.0, nécessite l'intervention d'un ingénieur spécialiste en bâtiment pour acquérir des informations sur la structure elle-même par inspection extérieure et intérieure et consultation des plans de construction. La fiche est plus détaillée que la précédente. Elle permet notamment d'identifier le système de contreventement structural mobilisable pour la résistance aux séismes, les contributions des éléments non structuraux extérieurs et intérieurs et surtout d'identifier d'éventuels défauts structuraux visibles.

Une méthode empirique simplifiée fondée sur la méthode italienne a été développée dans le cadre du projet de la région Rhône-Alpes VulneRALp (VULNERabilité sismique à l'échelle d'une ville Rhône-Alpine - Application à Grenoble). La typologie italienne est, en effet, tout à fait compatible avec le bâti du Sud-Est de la France. Une typologie spécifique à la ville a néanmoins été réalisée. Cette méthode a été constituée pour être une analyse de niveau 1.0, moins détaillée que le niveau 1 du GNDT (1986) et réalisable par inspections visuelles rapides par des inspecteurs n'ayant pas de connaissances particulières en génie civil. En particulier, la population a été interrogée sur la nature du bâti qu'elle occupe. Son but est de permettre ainsi un « inventaire sismique » du bâti à grande échelle et fondé sur le relevé simple et rapide de paramètres.

6.1.1 Calcul de l'indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité global de l'ouvrage est obtenu pour chaque niveau d'analyse en agrégeant les indices de vulnérabilité partiels des facteurs de vulnérabilité étudiés, pondérés par leurs coefficients. A cet indice de vulnérabilité global variant entre 0 et 100 est associé une marge d'erreur appelée « intervalle ». En fonction des indices de vulnérabilité globaux obtenus au niveau inférieur, il est décidé de la nécessité ou non d'appliquer, sur certains secteurs ou ensemble de bâtiments, le niveau supérieur d'analyse de la méthode Vulnéralp.

La méthode VulnéRALp 1.0 repose sur le relevé de sept paramètres par bâtiment étudié :

- Le matériau de construction (maçonnerie, béton armé, bois, acier, terre)
- L'époque de construction (avant 1945, de 1945 à 1970, de 1970 à 2000 ou après 2000)
- La régularité en élévation (oui ou non)
- La position du bâtiment (dans une pente ou non) et la qualité du sol de fondation (rocher ou sédiments)
- La position du bâtiment dans l'îlot (isolé, en extrémité, en travée ou en coin)
- La régularité en plan (oui ou non)
- La forme du toit (terrasse ou en pente)

Hormis la position du bâtiment, qui provient des travaux de Jongmans et Plumier (2000), ces critères sont ceux définis dans la méthode du GNDT (1986). La position du bâtiment permet de moduler la valeur de la régularité en plan. Le choix est volontairement limité à une réponse binaire (oui ou non) de manière à limiter les choix possibles et à éviter les erreurs d'interprétation. Lorsque les valeurs des critères de la méthode du GNDT étaient plus détaillées, ils ont été regroupés. Un score médian I_i^M et des valeurs minimale I_i^m et maximale I_i^m peuvent alors être calculés sur ce principe pour chaque critère. L'indice de vulnérabilité médian de chaque bâtiment I^M et ses bornes inférieure I^m et supérieure I^m , sont alors calculés par la formule :

$$I = \sum_{i=0}^n I_i W_i \quad (1.9)$$

6.1.2 Calcul du dommage

A partir de l'indice de vulnérabilité global obtenu, un niveau de dommages attendu peut être déterminé. La correspondance a été définie par le GNDT où le niveau d'endommagement se calcule par croisement de la vulnérabilité du bâtiment et des intensités sismiques par la formule de Giovinazi et Lagomarsino :

$$D = 0.5 + 0.4 a \quad (0.5 (I_E - 1) + 0.0 I) \quad (1.1)$$

L'intensité sismique est calculée par la formule de Geoter (2002) :

$$I = 3.9 u (A) + 1.7 \quad (1.1)$$

Où

Avib : c'est l'accélération vibratoire et

I : est l'intensité macrosismique et IV l'indice de vulnérabilité

Le résultat obtenu (l'endommagement) s'exprime en degrés (échelle des dommages EMS 98), selon la correspondance suivante :

Degré 1 (dégât léger) Endommagement de 0 à 0,2 ;

Degré 2 (dégât modéré) Endommagement de 0,21 à 0,4 ;

Degré 3 (dégât important) Endommagement de 0,41 à 0,6 ;

Degré 4 (dégât très important) Endommagement de 0,61 à 0,8 ;

Degré 5 (dégât destruction) Endommagement de 0,81 à 1 ;

6.1.3 Champ d'application

Cette méthode a été établie pour être mise en œuvre soit à l'échelle d'une ville ou à l'échelle d'un groupe de bâtiments (quartier ou bâtiments de classe C d'une ville par exemple). Son application à l'échelle d'une ville a pour but de donner des éléments de vulnérabilité d'ensemble qui pourront servir lors de l'élaboration de stratégies de réduction de vulnérabilité, de plans de sauvegarde ou de scénarii de crise sismique. A l'échelle d'un groupe de bâtiments, elle permet de hiérarchiser les bâtiments les plus sensibles en cas de séisme. Ces classements pourront servir de base pour déterminer des priorités de diagnostics complémentaires et des études de renforcement du bâti en vue d'une réduction de la vulnérabilité. Elle s'applique à toutes les typologies de bâtiments : maçonnerie, Béton Armé, structure métallique, bois, Terre...

7 Conclusions

A travers l'analyse de ces différentes cartes de sismo-tectonique et de l'Aléa sismique, on peut considérer que la région Nord-Est, plus précisément la zone englobant la région de Constantine que la marge algérienne est caractérisée par le plus grand nombre d'évènements sismiques modérés à parfois forts. Ce niveau de sismicité est lié aux nombreuses structures actives qui jalonnent cette région et qui sont en général de direction perpendiculaire à la direction de convergence des deux plaques tectoniques Africaine et Eurasiatique. Cette convergence causée par l'expansion océanique au niveau de la dorsale médio-atlantique est responsable de la déformation observée autour de la Méditerranée et par conséquent des reliefs observés de part et d'autre des rives de la mer Méditerranée.

Nous avons présenté, ci-dessus, les processus d'évaluation de l'aléa sismique, en un site considéré, pour les deux approches déterministe et probabiliste ainsi que l'estimation de la

magnitude maximale générée par une source sismique selon ses données sismiques (approche déterministe) ou selon son activité sismique (approche probabiliste), et l'évaluation de la vulnérabilité, permet de déterminer, pour une structure, le risque qu'elle a de subir des dommages de degré au moins 1 pour un scénario donné. L'application pour Constantine a été permise, pour une évaluation à l'échelle de la ville.

La distribution de la sismicité dans cette région est compatible non seulement avec les caractéristiques tectoniques dans la région mais aussi avec les différentes cartes de l'Aléa sismique (figs. 1.9 et 1.10). Effectivement, les valeurs d'Aléa importantes témoignent ainsi des zones où se sont produits les grands séismes destructeurs du pays (ex : le séisme d'Orléanville en 1954, le séisme d'El Asnam en 1980, le séisme de Constantine en 1985, le séisme de Tipaza en 1989, d'Ain Temouchent en 1999 et celui Zemmouri 2003). En revanche, le reste de la région Nord ne semble pas être marqué par des niveaux d'Aléas élevés. Ceci pourrait s'expliquer par la nature du catalogue de sismicité qui est représentatif uniquement de la sismicité récente mais également par la nature de la déformation de la région Est.

8 Bibliographie

- Aoudia, A., Vaccari, F., Suhadolc, P., Meghraoui, M., 2000.** *Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. J Of seismology* 4:79–98.
- Ayadi, A., 2003,** *Strong Algerian earthquake strikes near capital city. Eos* 84(50):16.
- Ayadi, A., Ousadou, F., Bourouis, S., Benhallou, H., 2002.** *Sismotectonique et calme sismique de la région Oranie (Algérie occidentale): Le tremblement de terre de Mascara du 18 Août th 1994 Mw = 5.7, MS = 6,0. J Seismol* 6:13–23.
- Benedetti, D. et Petrini, V., 1984.** *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. L'Industria delle Costruzioni,* 18:66–78.
- Benouar, D., 1993.** *The seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century, PhD-Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medecine. Univ, London, 712 pp.*
- Benouar, D., 1994.** *Magnitude-intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes. Earthq Eng Struct Dyn* 23:717–727.
- Benouar, D., 1996.** *Seismic hazard evaluation at Algiers using Benouar's earthquake catalogue. Nat Hazards* 13:119–131.
- Bensaïbi, M., Tadjer, K., Brahim Mezazigh, B., 2007.** *Scénario catastrophe de la ville de Blida. 7th National Conference AFPS Ecole Centrale Paris.*

- Bezzechoud, M., Ayadi, A., Sebai, A., Ait Messaoud, A., Mokrane, A and Benhallou, H., 1996.** *Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum observed intensities (MOI), Avances en Geofisica y Geodesia 1, ano 1, , Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente, Instituto Geografico National España, 107-114.*
- Bougdal, R., 2007.** *Urbanisation et mouvements de versants dans le contexte géologique et géotechnique des bassins néogènes d'Algérie du Nord. PhD thesis. USTHB, Algiers, p 185.*
- Bougdal, R., Belhai, D., Antoine, P., 2006.** *Géologie de la ville de Constantine et de ses environs. Bull. Serv. Géol. de l'Algérie, Vol.18, n° 2.*
- Boughacha, M.S., Ouyed, M., Ayadi, A and Benhallou, H., 2004.** *Seismicity and seismic hazard mapping of northern Algeria: Map of Maximum Calculated Intensities (MCI), J. Seismol. 8, 1–10.*
- Bouhadad, Y., 2001.** *The Murdjadjo, Western Algeria, fault-related fold: implications for seismic hazard. J Seismol 5:541–558.*
- Bouhadad, Y., Laouami, N., 2002.** *Earthquake hazard assessment in the Oran region (Northwest Algeria). Nat Hazards 26:227–243.*
- Bouhadad, Y., Laouami, N., Bensalem, R., Larbes, S., 1998.** *Seismic hazard estimation in the central Tell Atlas of Algeria (Algiers-kabylia). Pro. 11th ECEE, Balkma, Rotterdam.*
- Bounif, M.A., 1990.** *Etude sismotectoniques en Algérie du nord : contribution à l'étude d'un tronçon de la chaine tellienne à partir des répliques du séisme de Constantine du 27/10/1985. Mémoire de Magister, USTHB, Alger, 155p.*
- Bounif, M.A., Haessler, H and Meghraoui, M., 1987.** *The Constantine (northeast Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study. Earth and Planetary Science Letters, 451-460.*
- Clément, C., Scotti, O., Bonilla, L., Baize, S. & Beauval, C., 2004.** *Zoning versus faulting models in PSHA for moderate seismicity regions: preliminary results for the Tricastin nuclear site, France. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 45(3), 187–204.*
- Combescure, D., Guéguen, P. et Lebrun, B., 2005.** *Vulnérabilité sismique du bâti existant : approche d'ensemble. Rapport technique, Association Française de Génie Parasismique (AFPS).*
- Cornell, C.A., 1968.** *Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 58(5), 1583.*

- Deschamps, A., Bezzeghoud, M and Bounif, A., 1991.** *Seismological study of the Constantine (Algeria) earthquake (27 October 1985), in Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibro-Maghrebian Region, edited by J. Mezcua and A. Udias., Monografia n°8, Instituto Geografico National, Madrid, p 163-173.*
- Durand D.M., 1969.** *Mise au point sur la structure du Nord-Est de la berberie. Bull. Serv. Carte Géol., Agérie, N. S., 39 : 89-131.*
- EMS-European Macroseismic Scale., 1998.** *Conseil de l'Europe. Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. G. Grunthal Editor*
- Farsi, M., Belazougui, M., 2007.** *Microzonage du risque sismique de la wilaya d'Alger», 7th National Conference AFPS Ecole Centrale Paris.*
- FEMA., 1988.** *Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards : Supporting documentation (FEMA155). Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.*
- FEMA., 1999.** *HAZUS Earthquake loss estimation methodology. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.*
- FEMA., 2002.** *Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards : a handbook (FEMA154). Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.*
- FEMA., 2003.** *HAZUS-MH MRI Advanced Engineering Building Module. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.*
- Geoter., 2002.** *Revision du zonage sismique de la France, Etude probabiliste, rapport no. GTR/MATE/0701- 150 synthèse, p 39.*
- Girardin, N., Hatzfeld, D and Guiraud, R., 1977.** *La sismicité du Nord de l'Algérie, C.R. somm. Soc. Géol. Fr., fasc. 2, pp. 95-100.*
- GNDT., 1986.** *Instruzioni per la Compilazione de lla Sceda di Relivamento Esposizione Vulnerabilità Sismica Degli Edifici. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Regione Emilia Romagna y Regione Toscana, Italy. In Italian.*
- Guéguen, P. et Vassail,T., 2004.** *VULNERALP - Typologie de l'agglomération grenobloise. Rapport technique, Conseil Régional Rhône-Alpes.*
- Guéguen, P., 2004.** *Evaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville Rhône Alpine Application à Grenoble. Rapport technique, Conseil Régional Rhône-Alpes.*
- Guéguen, P., Michel, C. et Le Corre, L., 2007b.** *A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). Bulletin of Earthquake Engineering, 5(3):467–490.*

- Guéguen, P., Michel, C. et Le Corre, L., 2007b.** *A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France).* *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3):467–490.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F., 1944.** *Frequency of earthquakes in California,* *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34 :185–188.
- Hamdache, M., 1998a.** *Seismic hazard assessment for the main seismogenic zones in North Algeria.* *Pure Appl Geophys* 152:281– 314.
- Hamdache, M., 1998b.** *Seismic hazard estimation in northern Algeria.* *Nat Hazards* 18:119–144.
- Hamdache, M., Bezzeghoud, M., Mokrane, M., 1998.** *Estimation of seismic hazard parameters in the northern part of Algeria.* *Pure Appl Geophys* 151:101–117.
- Hamdache, M., Retief, S.J.P., 2001.** *Site-specific seismic hazard estimation in the main seismogenic zones of north algeria.* *Pure appl. GEOPHYS.*158, 1677_1690.
- Hamidatou, M., Sbartai, B., 2016.** *Deterministic assessment of seismic risk in Constantine city. Northeast Algeria Nat Hazards.* doi:[10.1007/s11069-016-2693-2](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2693-2).
- Hamidatou, M., Sbartai, B., 2017.** *Probabilistic seismic hazard assessment in the Constantine region, Northeast of Algeria.* *Arab J Geosci.* DOI [10.1007/s12517-017-2876-5](https://doi.org/10.1007/s12517-017-2876-5).
- Harbi, A., Maouch, S., and Benhallou, Hadj., 2003.** *Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria Part II: 20th century seismicity and seismotectonics analysis.* *Journal of Seismology* 7: 221–234.
- Harbi, A., Maouche, S., Ayadi A., 1999.** *Neotectonics and associate seismicity in the Eastern Tellian Atlas of Algeria.* *J Seismol* 3:95–104.
- Harbi, A., Maouche, S., Ayadi, A., Benouar, D., Panza, G.F., Benhallou, H., 2004** *Seismicity and tectonic structures in the site of Algiers and its surroundings: a step towards microzonation.* *PAGEOPH* 161: 949–967.
- Harbi, A., Peresan, A., Panza G., 2010.** *Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue.* *Nat Hazards* 54:725–747.
- Hatzfeld, D., 1978.** *Etude sismotectonique de la zone de collision Ibéro-Maghrébine, Thèse de Doctorat d'état, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 281 pp.*
- Jongmans, D. et Plumier, A., 2000.** *Etude pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège (4 km²).* *Rapport technique, Université de Liège.*
- Jongmans, D. et Plumier, A., 2000.** *Etude pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège (4 km²).* *Rapport technique, Université de Liège.*

- Kramer, S.L., 1996.** *Geotechnical Earthquake Engineering. Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.*
- Lagomarsino, S. et Giovinazzi, S., 2006.** *Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, 4 :415–443.*
- Laouami, N., Slimania, A., Bouhadada, Y., Chatelaina, J.L., Noura, A., 2006.** *Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. Soil Dyn Earthq Eng 26:991–1003.*
- McGuire, R. 2001.** *Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21(5), 377–384.*
- Meghraoui, M. Bounif A., 1986.** *Le séisme de Constantine du 27 octobre 1985 : ruptures de surfaces et aspect sismotectonique. 6ème sémin. Nat. Sci. Terre, USTHB, Alger. Résumés, p.82.*
- Mortgat, C.P., Shah, H.C., 1978.** *Seismic hazard analysis of Algeria, technical report, the John A. Blume Earthquake Engineering Center, California, pp. 97.*
- Nocquet, J.M., 2002.** *Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par géodésie spatiale. Thèse de Doctorat. Université de Nice Sophia-Antipolis, UFR Sciences.*
- Onur, T., Ventura, C. et Liam Finn, W.D., 2005.** *Regional seismic risk in British Columbia - damage and loss distribution in Victoria and Vancouver. Canadian Journal of Civil Engineering, 32 :361–371.*
- Otani, S., 2000.** *Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 2(2) :47–56.*
- Pelàez, J.A., Hamdache, M., Pezcasado C., 2005.** *Updating the probabilistic seismic hazard values of northern Algeria with the 21 May 2003 $M = 6.8$ Algiers earthquake included. Pure Appl Geophys 162(2005):2163–2177.*
- Reiter, L., 1990.** *Earthquake hazard analysis : Issues and Insights. Columbia press, New York, 254pp.*
- Risk-UE., 2001.** *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP1: European distinctive features, inventory database and typology. European Project.*
- Risk-UE., 2003.** *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings. European project.*

- Roussel, J., 1973b.** *Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie (1716- 1970). Extrait du Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord. Tome 64 (1973)-Fascicules 3 et 4. Imp. SNED-Alger, 211-228.*
- Scotti, O., Clement, C. & Baumont, D., 2013.** *Seismic hazard for design and verification of nuclear installations in France: regulatory context, debated issues and ongoing developments. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. DOI 10.4430/bgta0080.*
- Stein, S., Geller, R.J. & Liu, M., 2012.** *Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it. Tectonophysics 562-563, 1–25.*
- Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G.M. & Boschi, E., 2011.** *Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. Bulletin of the Seismological Society of America 101(4), 1885–1911.*
- Tselentis, G. & Danciu, L., 2010a.** *Probabilistic seismic hazard assessment in Greece–Part 1: Engineering ground motion parameters. Natural Hazards and Earth System Sciences 10, 25–39.*
- Wang, Z., 2010.** *Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives. Pure and Applied Geophysics, 130.*
- WGCEP-Working Group on California Earthquake Probabilities., 2003.** *Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002–2031, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 03–214.*
- WGCEP-Working Group on California Earthquake Probabilities., 2008.** *The uniform California earthquake rupture forecast, version 2 (UCERF 2), U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2007-1437, 104 pp., <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1437/> (last accessed January 2012).*
- Yakut, A., Ozcebe, G. et M. S., 2006.** *Yucemen. Seismic vulnerability assessment using regional empirical data. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(10) :1187–1202.*

CHAPITRE 2.

***CONSTRUCTION D'UN CATALOGUE DE
SISMICITE HOMOGENE EN
MAGNITUDE DE SURFACE, M_S***

Chapitre 2.

Construction d'un catalogue de sismicité homogène en magnitude de surface, M_s

1	Introduction.....	42
2	Les catalogues sismologiques disponibles en Algérie.....	43
2.1	Source de données sismiques.....	44
3	Homogénéisation du catalogue en magnitude de surface, M_s	46
3.1	Les lois empiriques utilisées pour l'homogénéisation des magnitudes.....	47
3.1.1	Estimation semi empirique de la magnitude.....	47
3.1.2	Relations empiriques entre la magnitude et l'intensité épacentrale.....	47
3.2	Analyse des résultats.....	48
3.2.1	Transformation de magnitude des ondes de volume(m_b)en magnitude de surface (M_s).....	48
3.2.2	Transformation de magnitude locale(M_l)en magnitude de surface (M_s).....	48
3.2.3	Transformation d'intensité (I_0 , I_{MM} , I_{MSK} , I_{EMS}) en magnitude de surface (M_s).....	49
4	Etude du déclustering du catalogue.....	50
4.1	Méthode par cluster.....	51
4.1.1	Principe de la méthode.....	51
4.1.2	Paramétrage de la méthode par cluster.....	52
4.2	Méthode par fenêtrage.....	54
4.2.1	Principe de la méthode.....	54
4.2.2	Comparaison des méthodes par fenêtrage.....	56
4.3	Comparaisons des méthodes.....	57
5	Traitement Statistique du catalogue de sismicité.....	61
5.1	Etude du catalogue de données sismiques.....	61
5.2	Distribution Magnitude-fréquence.....	64
5.3	Analyse de la distribution des séismes en fonction de la magnitude.....	66
6	Détermination des périodes de complétude.....	68
6.1	Méthodes de déterminations des périodes de complétude.....	67
6.1.1	Estimation à partir du nombre cumulé de Séismes.....	67
6.1.2	Méthode de Stepp.....	71
6.2	Conclusions et récurrences sur le catalogue [1357-2014].....	74
7	Conclusion.....	75
8	Bibliographie.....	76

Chapitre 2.

Construction d'un catalogue de sismicité homogène en magnitude de surface, M_s

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'analyser l'activité sismique et le traitement statistique du catalogue de sismicité de la région Nord-est entre 1357 et 2014. Notre recherche est une contribution à l'amélioration de la gestion du risque sismique en évaluant l'aléa sismique dans la région du constantinois. A cet effet, nous avons évalué la sismicité historique en collectant les informations macrosismiques et instrumentales ainsi que la distribution géographique des séismes dans la région. Deux types de données sont disponibles pour décrire la sismicité dans le Nord-est de l'Algérie, les données historiques et les données instrumentales. La base de données instrumentales CRAAG (1992-2017) rassemble des informations sur des séismes s'étant produits dans les derniers 25 ans, tandis que le catalogue instrumental du ISC (International Seismological Centre 1900-2014) couvre les derniers 100 ans, et les données historiques Harbi (2008). Les séismes historiques sont décrits en termes d'intensités et les séismes instrumentaux en termes de magnitudes. Un catalogue de sismicité doit être constitué avec une seule mesure caractérisant tous les événements sismiques.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la construction du catalogue homogène en magnitude de moment (M_s) qui sera utilisé pour la suite de l'étude. L'objectif final de l'étude est de proposer différents modèles d'occurrences de tremblement de terre qui puissent être injectés dans un calcul probabiliste de l'aléa sismique (dit PSHA : « Probabilistic Seismic Hazard Assessment »). Le modèle classiquement utilisé considère que l'occurrence des séismes suit un processus de Poisson. Ce processus (d'intensité) est un processus de comptage d'occurrences qui vérifie les conditions suivantes :

- Les nombres d'occurrences dans des intervalles de temps disjoints sont indépendants les uns des autres.

- La probabilité d'une occurrence dans un petit intervalle de temps est proportionnelle à la longueur de cet intervalle, le coefficient de proportionnalité étant
- La probabilité qu'il y ait plus d'une occurrence dans un petit intervalle de temps est négligeable.

Ces deux dernières conditions forment la propriété dite des « événements rares ». Afin de satisfaire ces conditions il est nécessaire de « déclusterer » le catalogue, c.à.d d'identifier les séismes principaux indépendants et de retirer les séismes considérés comme précurseurs ou répliques de ces séismes principaux. Ce chapitre analyse les méthodes de « declustering » les plus couramment utilisées dans les études PSHA et quantifie l'impact de ces traitements sur l'estimation des propriétés statistiques de la sismicité. La dernière partie du chapitre est consacrée à la détermination du temps de complétude qui caractérise, pour notre catalogue, le moment à partir duquel il est complet pour une gamme de magnitudes donnée. Cette notion de complétude est primordiale lors de la réalisation d'études statistiques de la sismicité.

Les zones les plus actives en Algérie sont situées au Nord d'Algérie. Pour estimer l'aléa sismique sur le territoire de Constantine, dans cette étude, la fenêtre géographique choisie s'étend entre 4° E et 8° E en longitude et entre 34° N et 38° N en latitude.

2 Les catalogues sismologiques disponibles en Algérie

A l'échelle locale, le réseau sismologique mis en place par le CRAAG assure actuellement une bonne couverture du territoire Algérien en fournissant une magnitude M_l , depuis 1992 jusqu'à ce jour, par l'implantation des stations sismologiques qui couvrent tout le Nord de l'Algérie. Différents catalogues de sismicité Algérienne couvrent différentes périodes de temps mais incomplets en terme de localisation, de magnitude et d'intensité (tab.2.1).

A l'échelle nationale, la sismicité en Algérie est reportée dans différents catalogues disponibles en libre accès sur internet. Ces catalogues sont construits par différentes institutions à partir de leur propre réseau sismologique. Ces réseaux possèdent des couvertures spatiale et temporelle différentes, une magnitude de coupure différente qui évolue aussi dans le temps et souvent ne calculent pas le même type de magnitude (magnitude locale, de durée, de moment, etc.). Afin d'étudier au mieux le comportement sismique du rift de Corinthe dans le passé, il est nécessaire de définir quel catalogue est le mieux adapté à cette région.

Auteur	Année de publication	Période couverte	Limite de zone d'étude
Rothé	1950	1716-1949	Toute l'Algérie
Grandjean	1954	1940-1950	Toute l'Algérie
Benhallou	1985	1790 à 1984.	Toute l'Algérie
Mokrane et al	1994	1365-1992	Toute l'Algérie
Benouar	1994	1900 à 1990	Toute la région du Maghreb
Cassado	2000		Toute la région de l'Ibéro-Maghrébine
CRAAG	2002	1992 à 2001	Toute l'Algérie
Harbi et al	2008	1850 à 2008	4°E-9.5°E, 22°N-38°N
Grunthal et al	2012		Nord de l'Algérie
Hamidatou et al	2017	1357 à 2014	4°E-8°E, 34°N-38°N

Tableau 2.1 Les différents catalogues de sismicité Algérienne.

2.1 Source de données sismiques

Le catalogue de données est un élément indispensable pour l'estimation des paramètres de l'aléa sismique dans une région donnée. Le catalogue de Harbi (2008) à été mis à jour pour la période (2009-2014). Ce catalogue couvre la partie de l'Est Algérien [4°E-9°E, 34°N-38°N] pour la période 1850-2008. L'auteur utilise comme principales sources d'informations les données introduites par Benouar (1994) et le CRAAG (1994) ainsi que le catalogue de Hée (1950). Dans le cas de notre étude, pour le but d'identifier l'activité sismique des zones qui appartiennent au cercle de rayon de 100 Km, son centre est la région de Constantine. Pour la constitution de notre catalogue, nous nous sommes intéressés aux catalogues et à sources suivants:

- **CRAAG, (1994)** : Ce catalogue est le premier établi par le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (C.R.A.A.G). Ce dernier traite de la sismicité de l'Algérie pour la période 1365-1992. Il utilise comme source principale les données :

-De l'IMPGA (Institut de. Météorologie et de Physique de Globe de l'Algérie),

-Le BCIS (Bureau Central International de Séismologie, France),

-Le catalogue de Benhallou (1985).

L'anomalie majeure de ce catalogue est la non spécification du type de la magnitude.

- **Benouar (1994)**: Ce catalogue couvre toute la région du Maghreb dont la période s'étend de 1900 à 1990. Il a utilisé plusieurs sources pour compiler le catalogue, on peut citer principalement les données du catalogue :

-De Mezcua et Solares (1983), (1900-1983),

-Bureau Central International de Sismologie (BCIS 1950-1963),

-International seismological Centre (ISC, 1918-1982) et celui

-De Benhallou et al, 1971 (1951-1970)

- **Mokrane et al (1994)** : Sous le titre de « Les séismes en Algérie de 1365 à 1992 », ce catalogue est une publication du CRAAG en 1994, qui traite de la sismicité de l'Algérie de 1365 jusqu'à 1992, en donnant comme informations :

-Date : l'année, le mois, le jour.

-Heure : l'heure, la minute, la seconde (si c'est disponible).

-Localisation : latitude et longitude (instrumentale si c'est disponible sinon macarosismique).

-La profondeur donnée en Km

- **CRAAG, 2002** : C'est le deuxième catalogue établi par le C.R.A.A.G. Celui-ci traite de la sismicité de l'Algérie pour la période 1992-2001. Notons que le type de magnitude est spécifié dans ce catalogue (M_l , m_b).

- **Yelles et al (2002)** : Sous le titre « les séismes en Algérie de 1992-2002 », ce catalogue a été publié par le CRAAG en 2002, et fournit les informations suivantes :

-Date : l'année, le mois, le jour.

-Heure : l'heure, la minute et la seconde.

-Localisation instrumentale et localisation macrosismique si c'est disponible.

-Magnitude : le CRAAG donne une magnitude locale M_l tandis qu'une autre magnitude est fournie par l'IGN (m_b), elle n'est pas toujours reportée.

-L'intensité (MM).

-La profondeur en Km

-La référence.

- **Harbi (2008)** : Ce catalogue couvre la région Est Algérien [4° E- 9° E, 33° N- 38° N] pour la période de 1850-2006. L'auteur utilise comme principale source d'information les données introduites par Benhallou (1985) et CRAAG (1994) ainsi que le catalogue de Hée (1950).

-Date : l'année, le mois, le jour.

-Heure : l'heure, la minute, la seconde (si c'est disponible).

-Localisation : latitude et longitude (instrumentale si c'est disponible sinon macarosismique).

-La profondeur donnée en Km.

- **ISC (2014)** : Une autre source de compilation utilisée pour établir le catalogue de sismicité, cette fois-ci est accomplie sur la base du catalogue d'International

seismological Centre (ISC). Ce dernier couvre la région du Nord de l'Algérie et ce pour la période de 1850-2014.

Dans notre étude, le catalogue brut contient 7007 événements. Il couvre la période entre 1357 et Juin 2014. La magnitude minimale est à $M=1.5$. Pour les séismes instrumentaux et historiques. La carte de sismicité est donnée sur la fig.2.1 où la magnitude minimale est fixée à $M=3.5$, c'est-à-dire que le catalogue sera constitué uniquement de séismes de magnitude supérieure à 3.5.

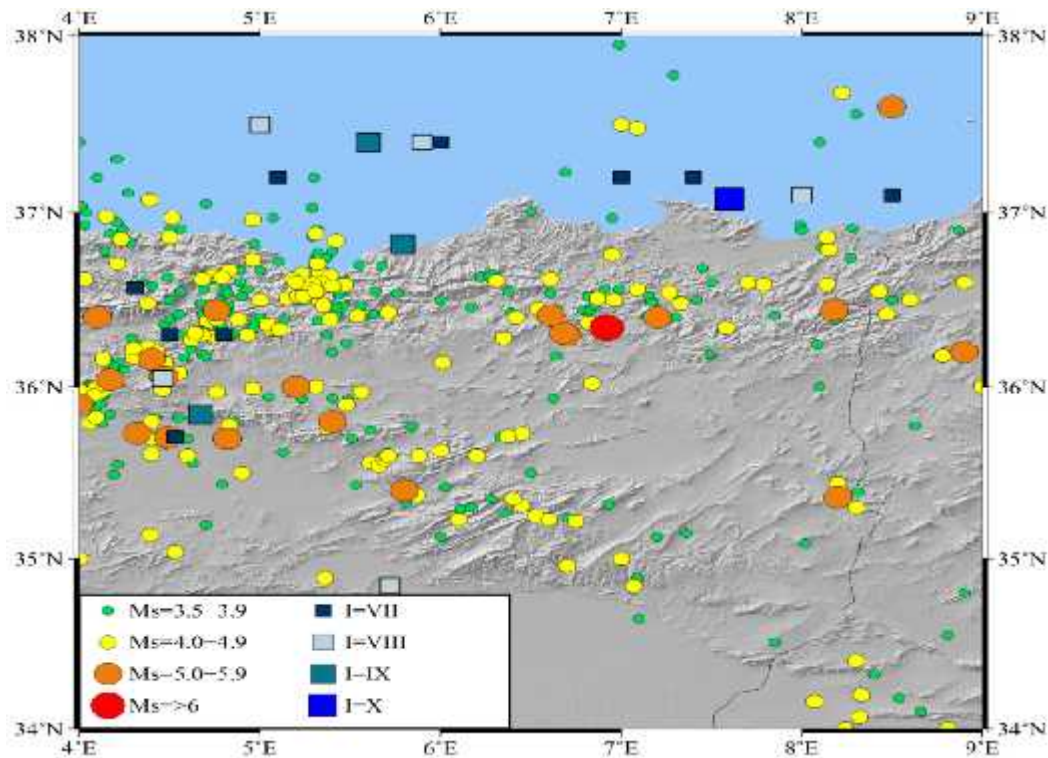


Figure 2.1 Sismicité de l'Est de L'Algérie de 1886-2014.

3 Homogénéisation du catalogue en magnitude de surface, M_s

Le catalogue de sismicité est un élément indispensable pour l'estimation des paramètres de l'aléa sismique dans une région donnée. Ce catalogue résulte souvent de la concaténation de différents ensembles de données, qui n'adoptent pas en général la même échelle de magnitude. La magnitude M_s , souvent utilisée dans l'ingénierie sismologique, a été choisie afin d'homogénéiser le catalogue de sismicité utilisé pour le calcul probabiliste de l'aléa sismique. Cette homogénéisation de la magnitude permettra plus facilement l'analyse et le contrôle du catalogue obtenu ainsi qu'une meilleure utilisation dans l'évaluation de l'aléa

sismique. Nous avons exploité les travaux de Benhallou (1985), Bellalem (2007), Harbi (2006) et Grunthal et al. (2012) pour la région Nord de l'Algérie; les travaux de Casado (2000) et de Benouar (1994) pour la région Ibéro-Maghrébine sur des catalogues distincts, afin d'obtenir un catalogue de sismicité le plus homogène possible.

3.1 Les lois empiriques utilisées pour l'homogénéisation des magnitudes

3.1.1 Estimation semi empirique de la magnitude

La loi communément utilisée pour corréler les différentes échelles de magnitude a été proposée par Ambraseys (1990). Elle est donnée par la forme linéaire suivante :

$$M_1 = a + b M_2 + \sigma P \quad (2.1)$$

Où

a et b : deux paramètres de la régression linéaire ;

M_1 et M_2 : les deux échelles de magnitude à corréler ;

σ est l'écart type ;

P prend la valeur 0 pour 50% des valeurs, et 1 pour 84% des valeurs.

3.1.2 Relations empiriques entre la magnitude et l'intensité épacentrale

Il est possible d'estimer la magnitude à partir des données historiques. L'élaboration des relations empiriques entre la magnitude et l'intensité est abordée par différents auteurs (Gutenberg et Richter, 1956; Karnik, 1969 ; Ambraseys et Melville, 1982) et pour différentes régions dans le monde. Pour obtenir une relation linéaire entre la magnitude et l'intensité, les auteurs utilisent la forme linéaire suivante :

$$M = a + b I_0 + \sigma P \quad (2.2)$$

Ou bien sous la forme quadratique suivante :

$$M = a + b I_0 + c I_0^2 + \sigma P \quad (2.3)$$

Où

a , b et c sont des paramètres d'ajustement,

I_0 est l'intensité épacentrale,

M est la magnitude,

est l'écart type et P prend la valeur 0 ou 1.

P prend la valeur 0 pour 50% des valeurs, et 1 pour 84% des valeurs.

3.2 Analyse des résultats

3.2.1 Transformation des magnitudes des ondes de volume (m_b) en magnitude de surface (M_s)

L'expression linéaire donnée par Casado (2000) pour relier les magnitudes M_s et m_b pour la région Ibéro-Maghrebine est la suivante :

$$M_s = -3.4 + 1.6 m_b + 0.4 P \quad (2.4)$$

Ou

P : prend la valeur 0 pour 50 % des valeurs et 1 pour 84 % des valeurs.

La forme linéaire proposée par Benouar (1994) pour la région du Maghreb est :

$$M_s = 0.4 + 0.8 m_b \quad (2.5)$$

L'écart type de la régression est égal à 0.48.

La relation linéaire que nous avons calculée par une régression au sens des moindres carrés sur les données du catalogue de Harbi (2006) est :

$$M_s = 0.3 + 0.8 m_b \quad (2.6)$$

La forme linéaire proposée par Benhallou (1985) est :

$$M_s = 1.1 m_b - 0.9 \quad (2.7)$$

Notre relation linéaire calculée par une régression en sens de moindre carré est :

$$M_s = 0.6 + 1.6 m_b \quad (2.8)$$

3.2.2 Transformation de magnitude locale (M_l) en magnitude de surface (M_s)

La relation proposée par Benouar (1994) est la suivante :

$$M_s = 1.4 + 0.7 M_l \quad (2.9)$$

Tandis que celle de Faouzi (2007) est :

$$M_s = 1.1 M_l - 0.5 \quad (2.10)$$

Notre relation linéaire calculée par une régression en sens de moindre carré est :

$$M_s = 2.5 + 0.4 M_l \quad (2.1)$$

3.2.3 Transformation d'intensité ($I_0, I_{MM}, I_{MSK}, I_{EMS}$) en magnitude de surface (M_s)

Harbi et al. (2001) a établi une relation empirique entre M_s et I_0 pour le Nord-Est Algérien à partir de 28 paires (I_0, M_s), elle est donnée sous la forme :

$$M_s = 0.2 I_0 + 3.2 \quad (2.1)$$

La relation 2.13 établie par Benouar et al. (1994), utilise 262 paires de (I_0, M_s):

$$M_s = 0.4 I_0 + 1.3 \quad (2.1)$$

La relation empirique entre l'intensité épacentrale et la magnitude établie par Casado (2000) pour la partie Ibéro-Maghrébine est donnée sous l'expression suivante :

$$M_s = 1.5 + 0.0 I_0^2 + 0.7 \quad (2.1)$$

Où

0.70 : est l'écart type.

L'équation 2.14 est valide pour un intervalle d'intensité compris entre II et X, et une magnitude inclut dans l'intervalle [1.6, 7.0].

Grunthal et al. (2012) a établi une relation empirique entre M_s et I_0 pour le Nord Algérien:

$$M_s = 2.8 + 0.2 I_0 \quad (2.1)$$

Notre relation linéaire calculée par une régression au sens des moindres carrés entre M_s et I_0, I_{MM}, I_{MSK} et I_{EMS} est :

$$M_s = 0.2 I_0 + 3.2 \quad (2.1)$$

$$M_s = 0.4 I_E + 1.4 \quad (2.1)$$

Cette relation à partir de 122 paires (I_{EMS}, M_s).

$$M_s = 3.0 I_M + 2.5 \quad (2.1)$$

Cette relation à partir de 57 paires (I_{MM}, M_s).

$$M_s = 0.4 I_M + 1.4 \quad (2.1)$$

Cette relation à partir de 101 paires (I_{MSK}, M_s).

A partir de notre relation de corrélation (M_l vs M_s) et (m_b vs M_s) (I_{EMS} vs M_s) (I_{MM} vs M_s) (I_{MSK} vs M_s) (I_o vs M_s), toutes nos relations semi empiriques sont spécifiques à notre zone d'étude entre les latitudes $34^\circ - 38^\circ$ et les longitudes $4^\circ - 8^\circ$ avec 7007 événements sismiques qui couvrent la période du temps entre 1357 à 2014.

La différence entre nos résultats et ceux obtenus par les auteurs cités plus haut tient essentiellement à la zone couverte. Pour ce travail, nous n'avons retenu que les séismes du catalogue pour la région Est de l'Algérie, tandis que les autres calculs concernaient le nord du continent Africain ou, au minimum, le Nord de l'Algérie.

4. Etude du déclustering du catalogue

Le modèle de probabilité principalement utilisé dans les calculs de l'aléa sismique est basé sur une hypothèse poissonnienne et stationnaire de la sismicité dans le temps (e.g. WGCEP 2003, projet SHARE : <http://earthquake.usgs.gov/hazards/2014prelim/>). Afin que le catalogue de sismicité respecte cette hypothèse, il est nécessaire de « décluster » le catalogue pour supprimer toutes les répliques ou précurseurs pouvant s'y trouver et n'avoir plus que des événements indépendants les uns des autres. Afin de déterminer quel événement est une réplique, on se focalise sur des paramètres spatiaux et temporels. Un événement **B** sera considéré comme réplique d'un événement **A** s'il se produit à un endroit et une date directement liés à la localisation, au temps origine et à la magnitude de **A**.

Il existe de nombreux algorithmes développés pour réaliser ce traitement (référéncé par Van Stiphout et al. 2010 ; http://www.corssa.org/articles/themev/van_stiphout_et_al). Parmi eux, ceux développés par Gardner et Knoppof (1974) utilisant la méthode par fenêtrage et Reasenberg (1985) utilisant la méthode par cluster) sont les plus courants, essentiellement à cause de la simplicité de leur mise en œuvre (e.g. projet SHARE). Ces différents modèles sont construits sur des principes différents pouvant fournir des résultats assez différents. Pour cette étude nous paramétrons uniquement les deux principales méthodes et nous analysons les résultats obtenus pour déterminer les impacts sur l'estimation des propriétés statistiques du catalogue de sismicité au niveau de la région de Constantine et de ses alentours à l'aide du logiciel Z-map (Version 6.0) développé par l'ETH Zurich 2006.

4.1 Méthode par cluster

4.1.1 Principe de la méthode

La méthode par cluster a été développée à partir de l'analyse de la sismicité de Californie centrale entre 1969 et 1982 ($M \geq 4$), reportée dans le catalogue USGS (Reasenberg, 1985). L'algorithme a pour but de définir un cluster d'événements sismiques contenant tous les séismes liés entre eux. Cette méthode intègre la possibilité qu'une réplique d'un séisme puisse engendrer ses propres répliques (Fig.2.2).

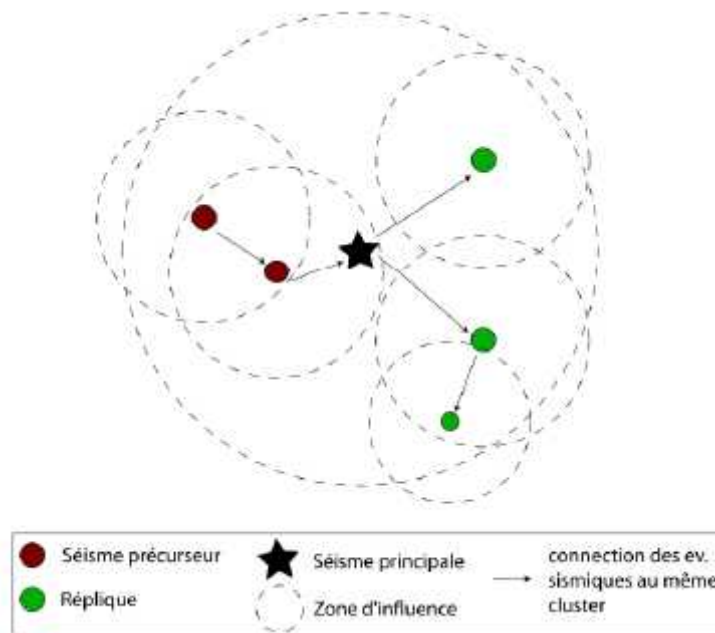


Figure 2.2 Schéma du principe de l'identification des répliques et précurseurs par la méthode de cluster (Reasenberg, 1985). Les séismes sont regroupés dans un même cluster par une suite de connections définies par une zone d'influence spatiale et temporelle basée sur la magnitude. Dans un même cluster seront intégrées les répliques d'un choc principal, ainsi que les répliques de secondes générations générées par ces répliques de première génération.

De la même manière que pour la méthode par fenêtrage, les zones d'interactions des séismes sont modélisées à partir de paramètres spatio-temporels. La dimension spatiale de la zone d'interaction est définie en accord avec la distribution des contraintes près de l'événement principal. L'interaction spatiale est définie par la relation suivante (e.g. 2.20, Molchan et Dmitrieva, 1992) :

$$l_c(d) = 0.4 M_0 - 1.9 + k \quad (2.2)$$

La distance d'influence \mathbf{d} (en km) définie par cette équation est dépendante du moment sismique du séisme correspondant ainsi que du paramètre k pouvant varier entre 1, s'il s'agit du séisme principal, ou 0, s'il s'agit du dernier séisme du cluster. La zone d'influence temporelle est basée sur la loi d'Omori (1894). Tous les séismes liés entre eux par ces zones d'influence spatiotemporelles ont regroupés dans un seul et même cluster qui sera représenté par le séisme ayant la magnitude la plus importante. Ainsi deux clusters connectés entre eux par un même séisme seront concaténés en un seul cluster symbolisé par un seul choc principal, correspondant au séisme de plus forte magnitude.

La dernière version de cet algorithme de « déclustering » (CLUSTER 2000, téléchargeable sur le site USGS) intègre une modification de la magnitude et de la localisation du séisme principal du cluster. La somme des moments sismiques des séismes supprimés du cluster est ajoutée au moment sismique du choc principal. L'épicentre du choc principal est modifié pour être représentatif de la dimension spatiale du cluster en étant déplacé au barycentre de ces événements. Cette relocalisation de l'épicentre peut engendrer des modifications importantes par rapport à la localisation originelle. Une autre approche est considérée ici, dont l'objectif est de respecter la représentativité du cluster sans modifier exagérément la localisation initiale de l'épicentre. Le choc principal est dorénavant relocalisé au barycentre des événements contenus dans le cluster mais pondérés par leur moment sismique. Ce concept de relocalisation au barycentre des moments permet une représentation plus physique du phénomène que la version d'origine.

4.1.2 Paramétrage de la méthode par cluster

L'algorithme développé par Reasenberg (1985) nécessite la définition d'une série de paramètres. Les paramètres τ_m et τ_M définissent respectivement le temps minimal et maximal pour observer le prochain séisme avec une certaine probabilité, p_1 . Ces trois paramètres sont associés selon l'équation 2.21 (Reasenberg 1985, eq. 2.25), en considérant une loi d'Omori (1894), $F(\mathbf{t}) = \mathbf{1}/\mathbf{t}^b$, avec la constante b égale à 1 et un M correspondant à la différence entre la magnitude du choc principal et la magnitude minimale (X_{meff}) considérée dans le catalogue.

$$\tau = -\tau_1 (1 - p_1) \tau_1^{\frac{2(M-1)}{3}} \quad (2.2)$$

L'influence spatiale de la source pour chaque événement est estimée par le rayon a d'une rupture circulaire calculée à partir du moment M_0 et en considérant une chute de contrainte σ de 30 bars (e.g 2.22 ; Kanomori et Anderson, 1975) :

$$M_0 = \mu S \bar{D} = \frac{1}{7} \delta a^3 \quad (2.2)$$

Le paramètre r_f correspond à un facteur applicable au rayon a de l'évènement le plus récent dans le but de considérer sa potentielle association avec l'évènement principal du cluster. Les paramètres standard définis par (Reasenberg, 1985 ;Schorlemmer et Gerstenberger, 2007) sont reportés dans la **Table 2.2**, ainsi que les gammes minimales et maximales définies pour chacun d'entre eux par le centre de test RELM (Regional Earthquake Likelihood Model, Schorlemmer et Gerstenberger, 2007).

	Paramètres standard	$M_{in.}$	$M_{ax.}$
τ_m (jours)	1	0.5	2.5
τ_m (jours)	10	3	15
P_1	0.95	0.9	0.99
S_k	0.5	0	1
X_{meff}	1.5	1.6	1.8
r_f	10	5	20

Tableau 2.2 Tableau récapitulatif des paramètres standards de la méthode de déclustering de Reasenberg (1985) et valeurs utilisées dans le centre de test RELM en Californie (Schorlemmer et Gerstenberger, 2007).

L'exploration menée pour définir ce paramétrage est principalement basée sur la variation des paramètres de temps (min et max) et d'espace (r_{fact}) générant le plus d'impact sur la taille de la zone d'influence utilisée pour associer ou non un événement à un cluster.

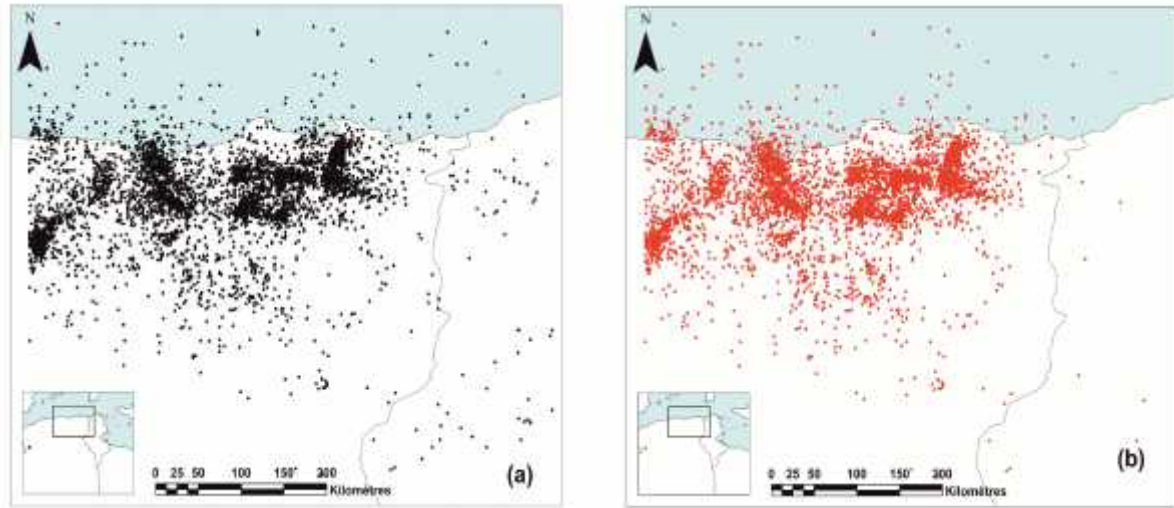


Figure 2.3 Distributions de sismicité dans le Nord-Est de l'Algérie (a) avant et (b) après declustering.

En plus de ces paramètres, la définition de la magnitude minimale revêt une importance capitale. La considération d'une magnitude de coupure trop faible peut entraîner la connexion de nombreux clusters au travers de la succession de plusieurs événements de faible magnitude, jusqu'à former un unique cluster couvrant des dimensions spatiales et temporelles de très grande envergure (ex. en considérant une $M_{\min}=1.3$; Fig.2.3). Cet algorithme permet ainsi de retenir 6441 sur 7007 événements. Les résultats de filtrage sont présents dans la fig. 2.3.

L'algorithme de Reasenberg est appliqué sur les magnitudes instrumentales supérieures à 3.0. Les chocs principaux et répliques sont reportés sur la fig. 2.3 lorsque la magnitude du choc principal est supérieure à 3.5. La sismicité en Algérie est faible et les répliques sont peu nombreuses si l'on considère les magnitudes supérieures à 3.5. L'incertitude liée au nettoyage des répliques n'est donc pas abordée dans cette étude.

4.2 Méthode par fenêtrage

4.2.1 Principe de la méthode

La méthode par fenêtrage (Gardner et Knopoff, 1974) identifie un événement comme une réplique ou un précurseur s'il a lieu dans une fenêtre de temps et de distance définie à partir de la magnitude du séisme principal (fig.2.4).

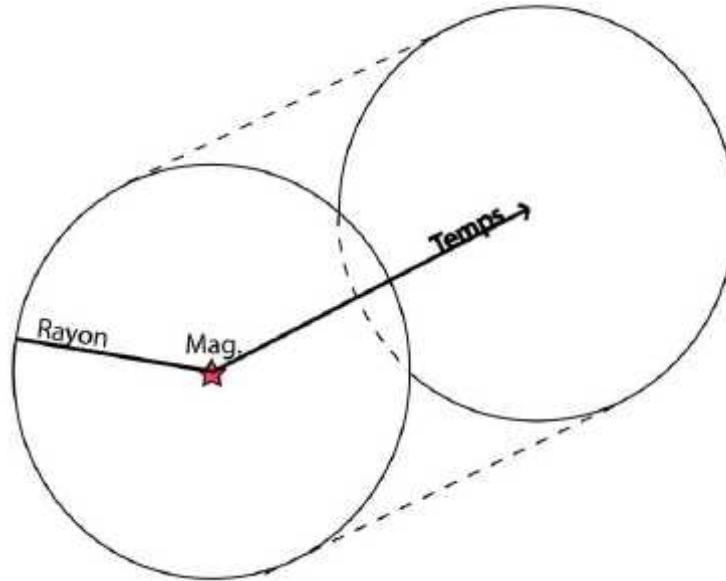


Figure 2.4 Schéma du principe de l'identification des répliques et précurseurs par un fenêtrage spatial et temporel (Gardner et Knopoff, 1974) dont l'extension est déterminée à partir de la magnitude du séisme possédant la magnitude la plus forte.

Le séisme principal est défini comme étant le séisme ayant la magnitude la plus élevée dans la fenêtre spatio-temporelle considérée. Au cas où un séisme **B** de magnitude plus élevée est capté dans le fenêtrage initial déterminé à partir de la magnitude d'un séisme **A**, le fenêtrage sera réinitialisé en prenant **B** comme référence et **A** sera considéré comme un précurseur.

Cette méthode est issue de l'observation de la distribution des répliques d'une série de chocs principaux localisés en Californie du Sud pour la période 1934-1957 et intégrant des magnitudes 3 et plus. L'étude statistique réalisée sur ce catalogue montre que la distribution de la sismicité ne correspond pas à une distribution de Poisson et qu'une connexion pourrait exister entre deux événements successifs (Knopoff, 1964). A partir des conclusions obtenues sur ce catalogue, Gardner et Knopoff (1974) développent des relations définissant les fenêtres spatiales (paramètre de distance : d) et temporelle (paramètre de temps : t) d'un séisme à partir de sa magnitude (e.g. 2.22, 2.23 et 2.24) afin de le séparer des répliques qui lui sont associées :

$$d = 1 \quad 0.1 \quad M + 0.9 \quad (2.2)$$

$$t = 1 \quad 0.0 \quad M + 2.7 \quad P \quad M \quad 6.5 \quad (2.2)$$

$$t = 1 \quad 0.5 \quad M + 0.5 \quad P \quad M < 6.5 \quad (2.2)$$

Un second fenêtrage spatio-temporel à partir de la magnitude est proposé par Uhrhammer (1986) pour la sismicité enregistrée en Californie (e.g 2.25 et 2.26) :

$$d = e^{-1.0 + 0.8 M} \quad (2.2)$$

$$t = 1^{-2.8 + 1.2 M} \quad (2.2)$$

A l'inverse des deux relations précédentes basées sur la sismicité en Californie, Grünthal développe un fenêtrage à partir du catalogue de la sismicité d'Europe centrale et de ses incertitudes (Eqs. 2.27 2.29, Burkhard et Grünthal, 2009) :

$$d(M) = \begin{cases} |e^{-3.9 + 0.6 + 1.3 M} & M < 6.6 \\ |e^{-6.4 + 0.0 M} & M \geq 6.6 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$d(M) = |e^{-1.7 + 0.0 + 1.0 M}| \quad (5.2)$$

4.2.2 Comparaison des méthodes par fenêtrage

Les fenêtrages spatiaux et temporels décrits par ces 3 relations sont comparés selon l'évolution de la magnitude (fig.2.5). Les fenêtrages obtenus à partir des relations de Gardner et Knopoff et de Grünthal présentent de fortes similitudes au niveau de la définition spatiale, mais aussi temporelle. Les fenêtrages établis sur la base de la méthode d'Uhrhammer se démarquent fortement des deux précédents.

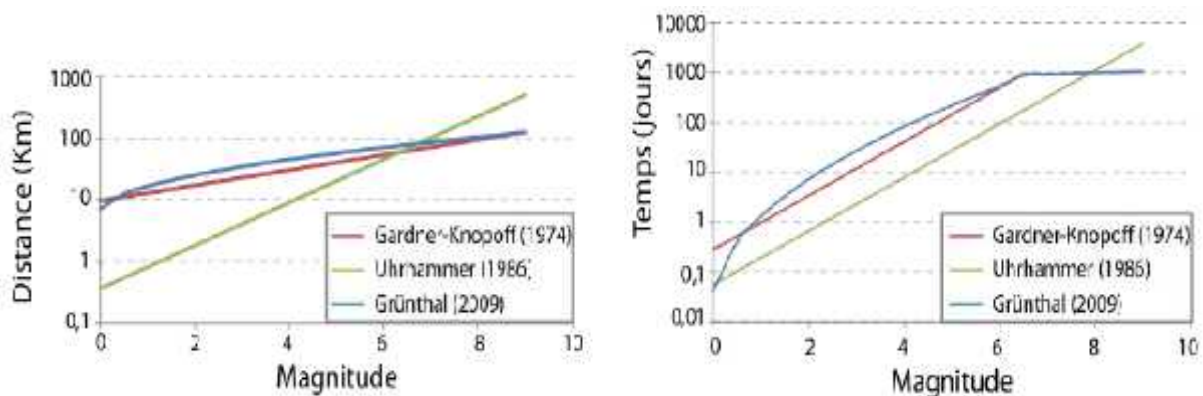


Figure 2.5 Fenêtrage spatial (gauche) et temporel (droite) en fonction de la magnitude à partir des relations de Gardner et Knopoff (1974) en rouge, Uhrhammer (1986) en vert et Grünthal (2009) en bleu.

Les relations de Gardner-Knopoff et Grünthal étant très proches, il est donc décidé de n'en utiliser qu'une seule pour l'analyse du catalogue grec. Le projet européen SHARE (www.share-eu.org) utilise uniquement la méthode de Grünthal.

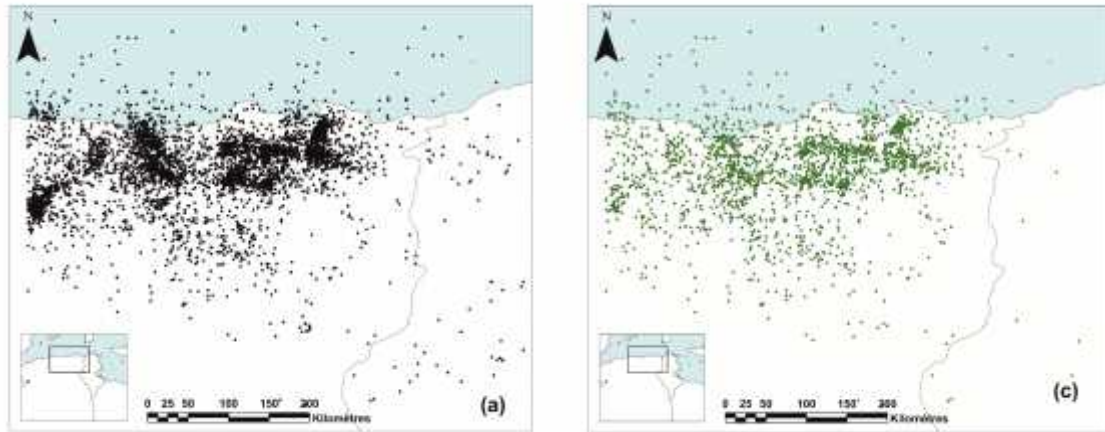


Figure 2.6 Distributions de sismicité dans le Nord-Est de l'Algérie (a) avant et (c) après declustering.

Dans le but de comparer les résultats du projet SHARE avec ceux obtenus dans cette étude, nous choisissons de considérer la même méthode. Les relations développées par Uhrhammer seront également prises en compte. Selon Gardner-Knopoff algorithm, 3936 données sont conservées sur 7007. Les résultats de filtrage sont présents dans les fig. 2.6.

4.3 Comparaisons des méthodes

La réalisation de l'étape de declustering est nécessaire dans le but d'obtenir un catalogue d'événements indépendants, condition nécessaire pour la suite des calculs PSHA. Les méthodes analysées dans ce chapitre sont les méthodes les plus couramment considérées dans les études PSHA, mais il est important de définir l'impact de ces traitements.

Les catalogues obtenus après l'utilisation de la méthode de Reasenber paramétrée précédemment, et par la méthode d'Uhrhammer, apparaissent très similaires. La suppression des précurseurs et répliques définis par chacune d'elles engendre une réduction de la population d'environ 33 % (fig.2.7). A la différence de l'algorithme d'Uhrhammer, l'énergie des événements supprimés par la méthode de Reasenber est réinjectée au niveau des différents chocs principaux.

Dans le catalogue obtenu après le traitement avec la méthode de Grünthal, 82% des séismes sont supprimés, alors qu'avec les deux autres méthodes seulement 33% sont supprimés. Cette réduction est produite essentiellement par la suppression de séismes de faible magnitude.

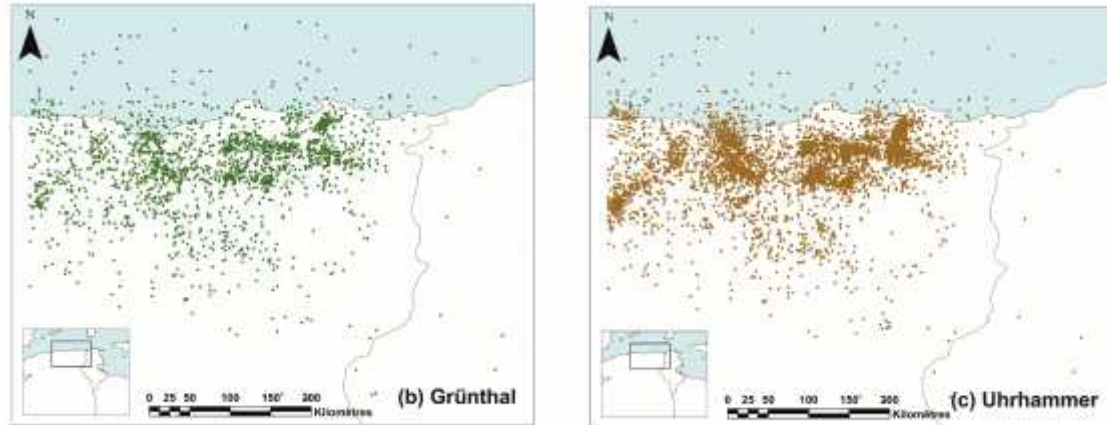


Figure 2.7 Distributions de sismicité dans le Nord-Est (b) Grünthal et (c) d'Uhrhammer.

L'algorithme de Reasenberg (1985). Nous avons conservé les paramètres requis par son programme déterminés pour des catalogues de sismicité en Californie : définir des paramètres propres aux données Algériennes serait très difficile vu le faible nombre de séismes de magnitude significative ($M \geq 4$). L'algorithme de Reasenberg est appliqué sur les magnitudes instrumentales supérieures à 3.0. La sismicité en Algérie est faible et les répliques sont peu nombreuses si l'on considère les magnitudes supérieures à 3.5. L'incertitude liée au nettoyage des répliques n'est donc pas abordée dans cette étude. Les deux méthodes utilisent des fenêtres spatiales et temporelles prédéfinies. La taille 'spatiale' de ces fenêtres est liée au temps par fonction prédéfinie. Tous les séismes situés à l'intérieur d'une fenêtre spatiale pour un événement donné et dans une fenêtre donnée et dans une fenêtre temporelle dépendante de la fenêtre spatiale sont considérés comme appartenant au même 'cluster' et seul l'évènement principal est alors conservé. Les relations entre les fenêtres spatiales et temporelles ont été définies par défaut pour des catalogues de séismes californiens. On obtient des résultats assez variables selon les deux autres algorithmes utilisés. Selon Grünthal, 2406 données sont conservées sur 7007 et avec l'algorithme d'Uhrhammer, 6214 données sont conservées. D'autres approches, basées sur des principes différents par rapport aux modèles déterministes précédents, sont développées pour réaliser cette étape, comme par exemple les modèles stochastiques ETAS. Ces modèles sont basés sur des modèles de processus de branchement espace-temps afin de décrire comment chaque événement génère ses évènements descendants

(e.g. Zhuang et al. 2005; Marsan et Lengline, 2008). Ils impliquent un paramétrage plus complexe que les deux modèles discutés dans ce chapitre. D'après l'étude comparative des modèles de déclustering réalisée par VanStiphout et al. (2010 ;http://www.corssa.org/articles/themev/van_stiphout_et_al), ces modèles permettent d'obtenir des résultats similaires à la méthode de Gardner et Knoppof, voire même engendrent la suppression d'un plus grand nombre d'événements (Fig.2.8).

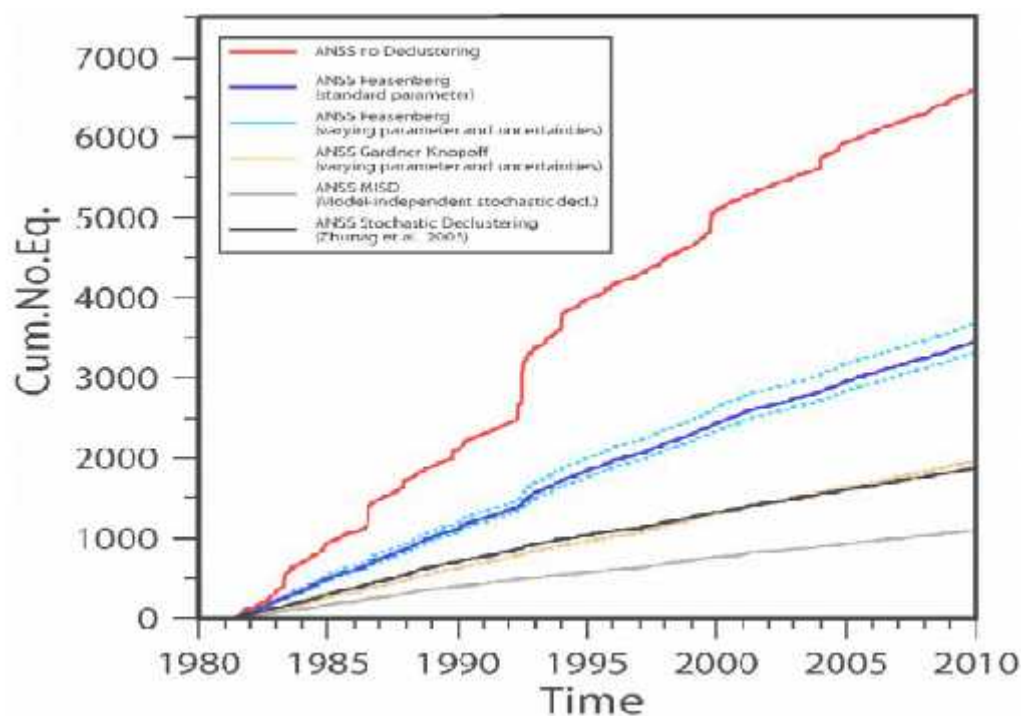


Figure 2.8 Analyse des résultats en termes de nombre cumulé de séismes obtenus selon différentes méthodes de déclustering lors de l'étude comparative réalisée par Van Stiphout et (2010). La courbe rouge correspond au catalogue d'origine, la courbe bleue aux résultats obtenus par la méthode de Reasenberg, la courbe orange par la méthode de Gardner et Knoppof, la courbe noire par le modèle ETAS développé par Zhuang et al. (2005), la courbe grise par le modèle ETAS développé par Marsan et al. (2008).

A l'échelle du catalogue, la mise en place de ces méthodes de déclustering engendre des différences notables pouvant impacter la modélisation de la sismicité par la suite. La méthode de déclustering de Reasenberg (1985) nécessite impérativement la définition des principaux paramètres (r_{fact} , \min , \max) afin d'ajuster au mieux la sélection des répliques et précurseurs à supprimer. La méthode de Grünthal, mise en place dans le projet européen SHARE, génère

une modification importante du catalogue en supprimant de nombreux séismes. Pour cette étude nous utilisons les catalogues obtenus à partir de ces trois méthodes de déclustering.

Il est important de noter que dans le cas de l'occurrence de séismes majeurs générés par des ruptures successives (tel que la série de séismes de 1985 à la région de Constantine), les méthodes de déclustering ne permettent pas de faire la distinction entre ces cas spécifiques et des répliques classiques. De ce fait, il serait intéressant d'analyser plus précisément la physique de ce phénomène à travers la modélisation des changements de contrainte de Coulomb par exemple ou la mise en place d'études statistiques non paramétriques de la détermination des répliques (e.g. Zaliapin and Ben-Zion, **2013**).

D'autre part ces méthodes ne gèrent pas de la même façon les séismes supprimés. Certaines, telles que les méthodes par fenêtrage, suppriment simplement ces événements. A l'inverse, l'algorithme de Reasenberg réinjecte l'énergie de ces événements au séisme principal. Ces différences peuvent influencer les études nécessitant la prise en compte de l'énergie libérée par ces événements principaux.

Dans la construction de l'arbre logique, les pondérations appliquées à ces 3 méthodes sont définies à partir de l'observation de l'efficacité du déclustering au niveau des distributions cumulées de la sismicité, mais aussi de l'analyse plus détaillée des clusters obtenus pour les principaux séismes de la zone d'étude. Ainsi, l'algorithme de Grünthal réduit de manière significative les répliques et précurseurs, impliquant la suppression du catalogue d'un grand nombre d'événements de faible magnitude. A l'inverse, les deux autres méthodes ne semblent pas supprimer tous les événements dépendants, comme l'atteste la présence de légers sauts dans la distribution temporelle cumulée des séismes au niveau des événements majeurs. Ainsi le choix de la méthode de déclustering aurait un impact majeur sur la statistique de la sismicité. Sur la base de cette analyse, l'algorithme de Grünthal nous semble moins adapté à la zone d'étude que les deux autres méthodes. Nous décidons donc d'appliquer une pondération de 0,5 pour le déclustering de Gardner-Knopoff, 0,4 pour les déclustering de Reasenberg et Uharhammer et une pondération plus faible de 0,2 pour le declustering de Grünthal (fig.2.9).

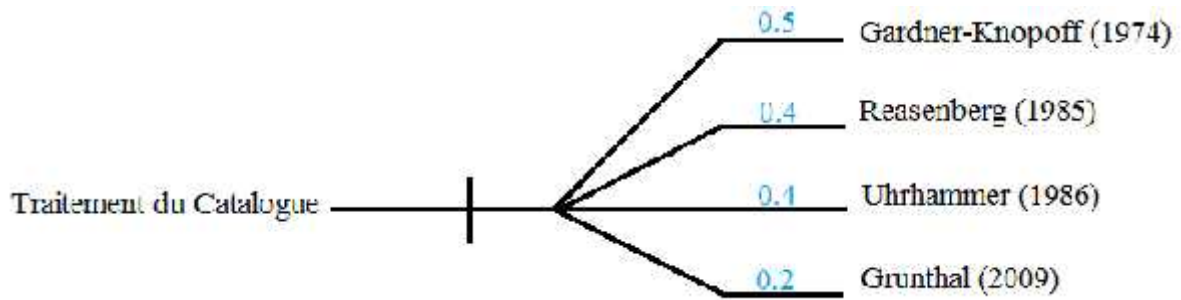


Figure 2.9 Arbre logique mis en place pour l'étude avec l'incorporation des catalogues déclusterés selon les différents algorithmes considérés et les pondérations associées.

5 Traitement Statistique du catalogue de sismicité

5.1 Etude du catalogue de données sismiques

Dans notre zone d'étude, nous avons utilisé trois types de données de sismicité : le catalogue des événements en Algérie, produit par le service sismologique **CRAAG**(Algérie), le catalogue Harbi et al. (2008) et celui du centre de sismologie **ISC** (Angleterre).

Quelques techniques d'analyse statistique du logiciel ZMAP ont été appliquées sur notre catalogue de sismicité. Le catalogue de sismicité 1357-2014 fournit 7007 événements répartis à travers notre région d'étude. Ces événements ont été classés par profondeur où 1579 événements sont profonds ($20 \text{ km} < \text{profondeur focale} < 60 \text{ km}$) et 2353 événements classés peu profonds (fig. 2.10).

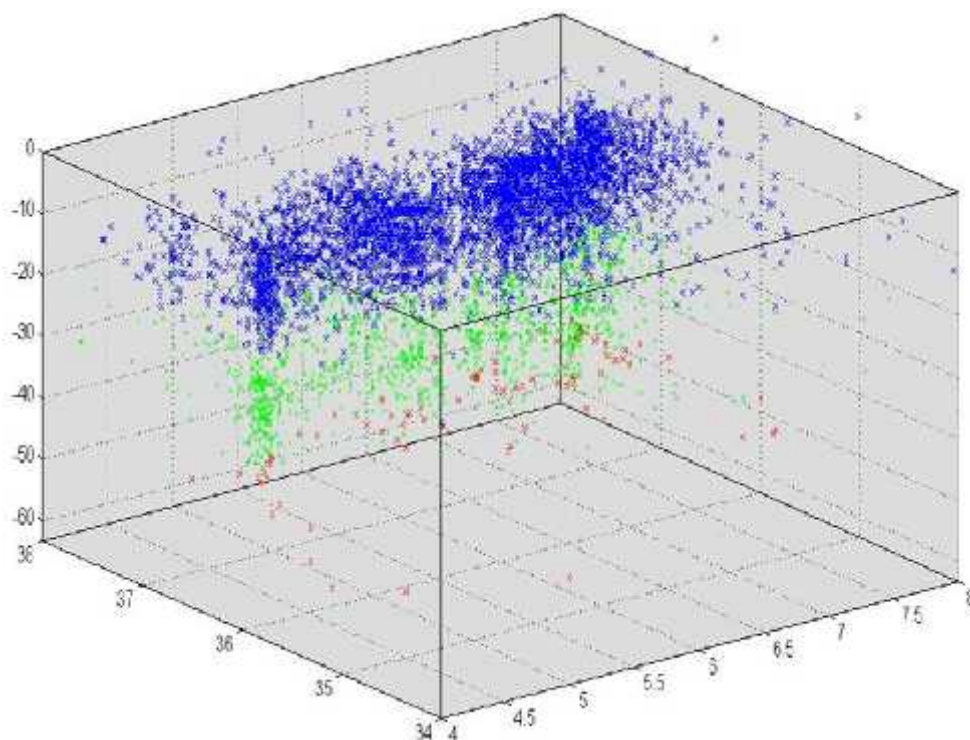


Figure 2.10 distribution de la sismicité (magnitude en fonction de la profondeur) en 3D.

Les événements dans notre catalogue de sismicité s'étendent entre 1 et 6 avec un affaiblissement exponentiel dans leurs nombres aux magnitudes élevées (fig. 2.11).

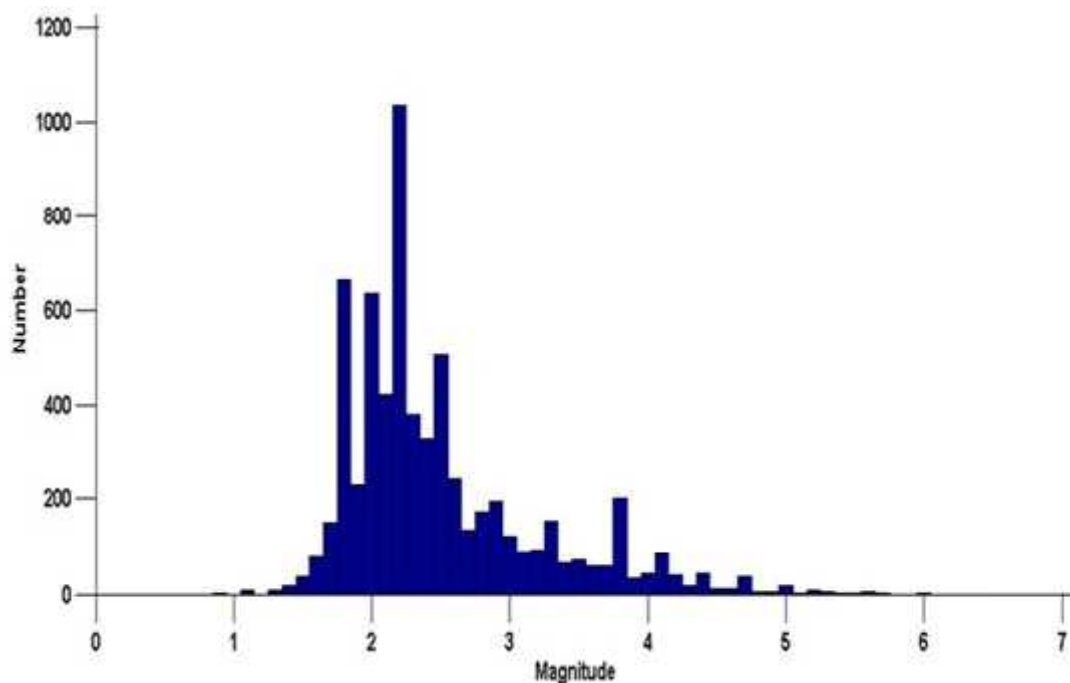


Figure 2.11 Histogramme du nombre d'événements par magnitude. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Mai 1357 à Juin 2014.

La distribution d'événements par profondeur est montrée dans la (fig. 2.12) et la (fig. 2.13) indique la distribution du nombre d'événements par heure de la journée.

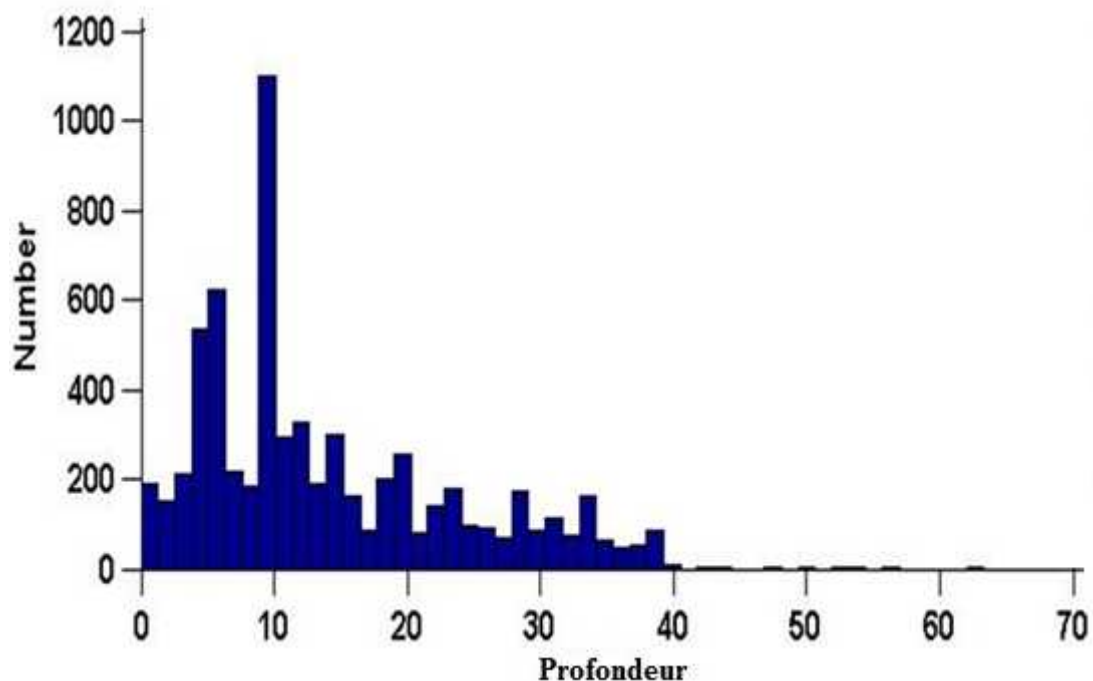


Figure 2.12 Histogramme du nombre d'événements par profondeur. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Juillet 1912 à Juin 2014.

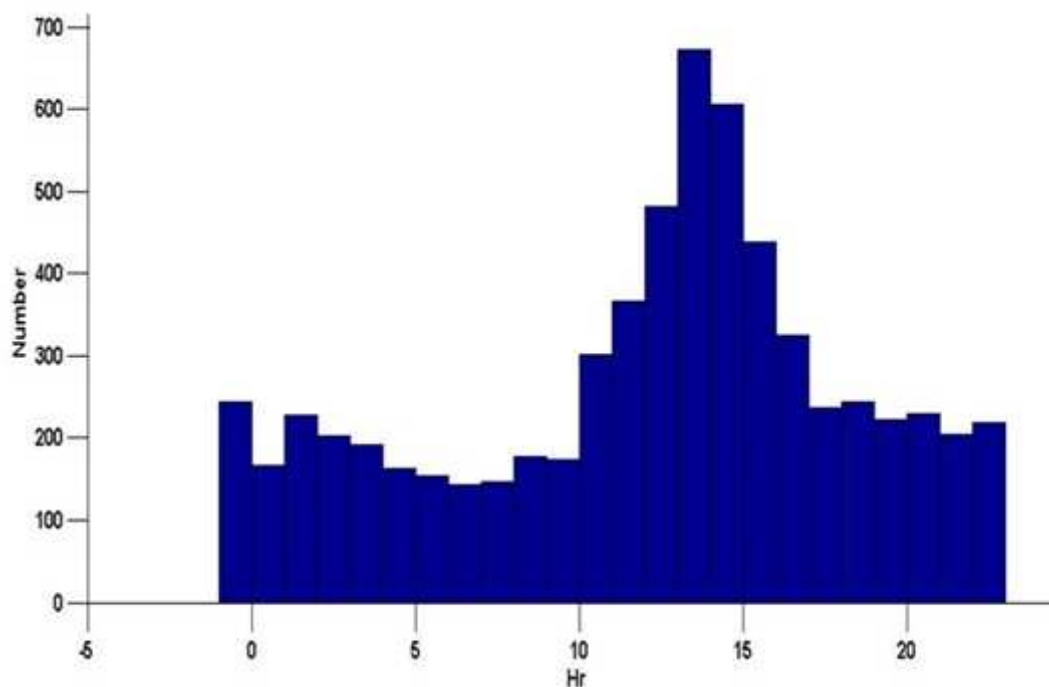


Figure 2.13 Histogramme du nombre d'événements par heure. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Juin 1504 à Juin 2014.

Dans une première approximation, les tremblements de terre se produisent aléatoirement dans le temps (loi de Poisson). C'est la prétention la plus généralement faite pour l'évaluation du risque sismique.

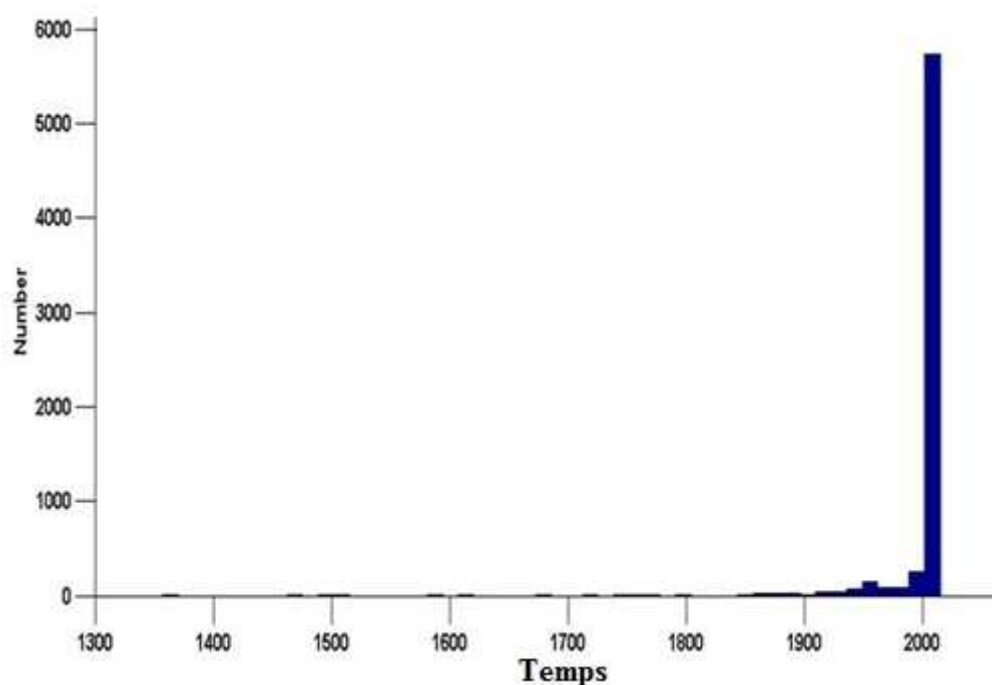


Figure 2.14 Histogramme du nombre d'événements par temps. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Mai 1357 à Juin 2014.

Par exemple, le nombre annuel global de tremblements de terre de toutes les classes de magnitudes $1 < M > 6$ déterminé dans notre catalogue de sismicité est montré sur la (fig. 2.14). Les variations de ce nombre dans les périodes de temps entre (1357-1900), (1900-2000) et (2000-2014) peuvent être liés au fait des méthodes adoptées pour la détermination des magnitudes (Habermann, 1987; Zuniga and Weimer, 1999 ; Zuniga and Wyss, 1995) ainsi que la présence d'instrumentation ou non (séismes rapportés historiquement ou déterminés par instruments).

5.2 Distribution Magnitude-fréquence

La fréquence et l'ampleur de l'équation de Richter et Gutenberg, (1944) sont très couramment utilisées dans la modélisation du risque de tremblement de terre, la plupart du temps liés aux précurseurs des tremblements de terre et les évaluations des risques sismiques probabilistes.

Cette équation est définie comme le nombre de tremblements de terre qui ont eu lieu dans une zone en fonction de la magnitude des séismes M dans ce domaine :

$$L \quad N = a - b M \quad (2.3)$$

Où N est le nombre de séismes dans les différentes classes de magnitude et a et b -value sont des constantes.

La b -value peut être estimée en utilisant la méthode de maximum de vraisemblance d'Aki (1965) :

$$b = \frac{1}{L_i (M - M_{\min})} \quad (2.3)$$

Où M est la magnitude moyenne et M_{\min} est la plus petite Magnitude considérée.

L'équation (2.30) caractérise le comportement statistique des zones sismiques dans le domaine d'énergie en utilisant la distribution Magnitude-fréquence des tremblements de terre.

La b -value calculée à partir de l'équation (2.31) est 0,931 (fig. 2.15).

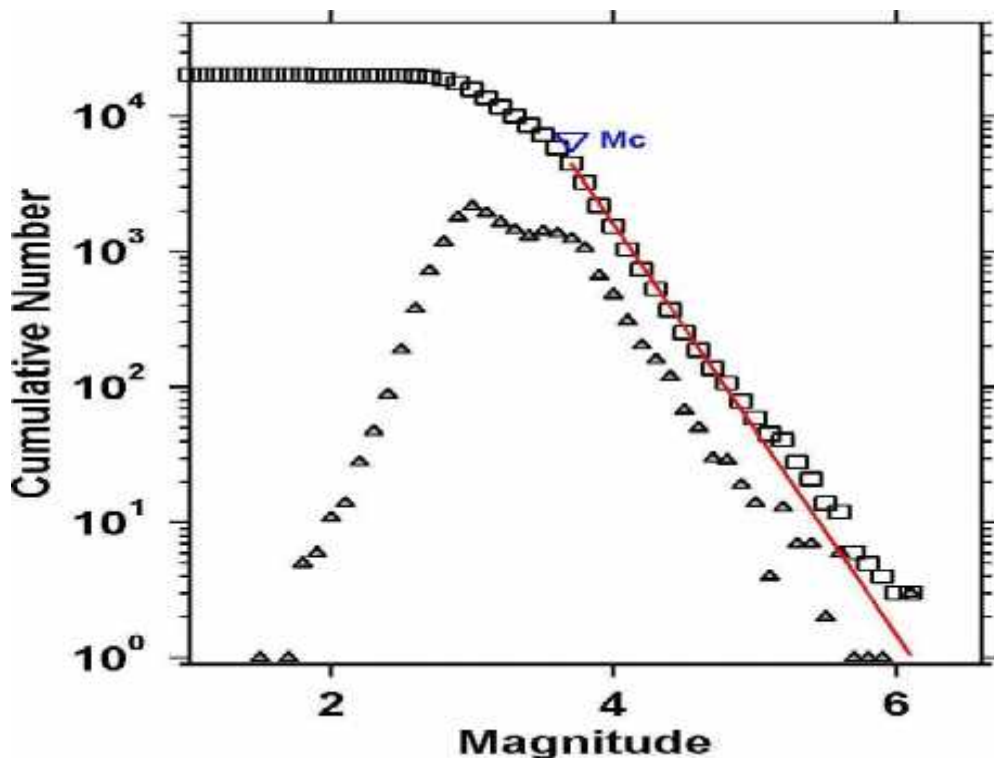


Figure 2.15 Évaluation de la magnitude minimum en utilisant la méthode maximum de courbure, marquant le calcul définissant, la magnitude de complétude $M_c=3.7$, b -value=0.931 et a -value=7.02.

5.3 Analyse de la distribution des séismes en fonction de la magnitude

L'estimation de l'aléa dans une région donnée dépend non seulement du lieu et de l'instant où se produira un événement naturel, mais aussi de sa taille. Or, l'observation montre que la gamme d'échelle sur laquelle varie la taille d'un événement est généralement très étendue. On caractérise donc généralement ces tailles par des distributions statistiques obtenues empiriquement et/ou confirmées par modélisation numérique. En règle générale, pour un aléa donné, plus la taille d'un événement est forte, plus il arrive rarement. Ceci est par exemple reflété dans la distribution de taille des tremblements de terre.

Celle-ci obéit à la loi dite de Gutenberg-Richter, qui s'exprime par :

$$L(N(M)) = 1^{a-b} \quad (2.3)$$

Où $N(M)$ est le nombre observé de séismes de magnitude supérieure ou égale à M .

La valeur de a varie d'une région à une autre (et en reflète l'activité sismique totale intégrée sur toute la durée de la période d'observation), alors que la valeur de b varie entre 0,5 et 1,5 mais prend le plus souvent une valeur très proche de 1. Cela signifie que lorsque l'on augmente la magnitude d'une unité, le nombre de séismes correspondant diminue d'un facteur 10. Nous avons utilisé, la fonction NB.SI (plage ; critère) sur Excel qui permet de réaliser ce comptage sous forme de tableau 2.3 et figure 2.16.

Zone de Calcul	NB.SI(Plage, Critère)	
Valeur de M	Nbre des séismes	LOG10 (N)
1,5=<M>=1	15	1.17609126
2=<M>=1,5	645	2.80955971
2,5=<M>=2	1635	3.21351776
3=<M>=2,5	733	2.86510397
3,5=<M>=3	333	2.52244423
4=<M>=3,5	314	2.49692965
4,5=<M>=4	172	2.23552845
5=<M>=4,5	53	1.72427587
5,5=<M>=5	25	1.39794001
6=<M>=5,5	8	0.90308999
6,5=<M>=6	3	0.47712125

Tableau 2.3 Résultats de l'analyse de distribution.

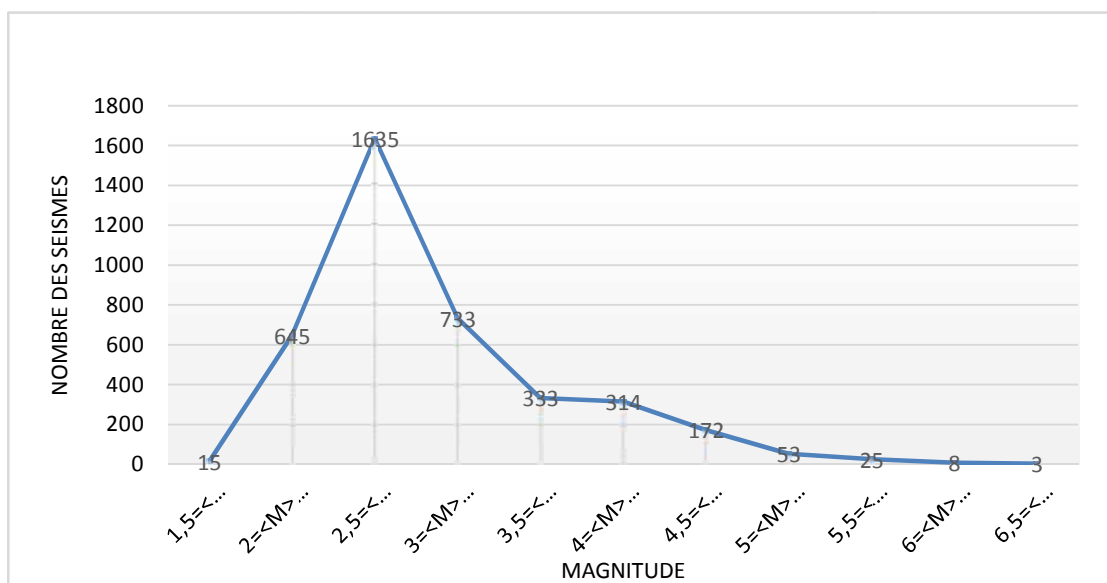


Figure 2.16 Nombre de séismes en fonction de la magnitude.

L'activité sismique d'une région est définie par les expressions analytiques qui relient la fréquence d'occurrence à la magnitude de séisme donnée par la relation (2.32), en passant en échelle logarithmique sur la figure 2.17 retrouve bien la loi énoncée par Gutenberg-Richter.

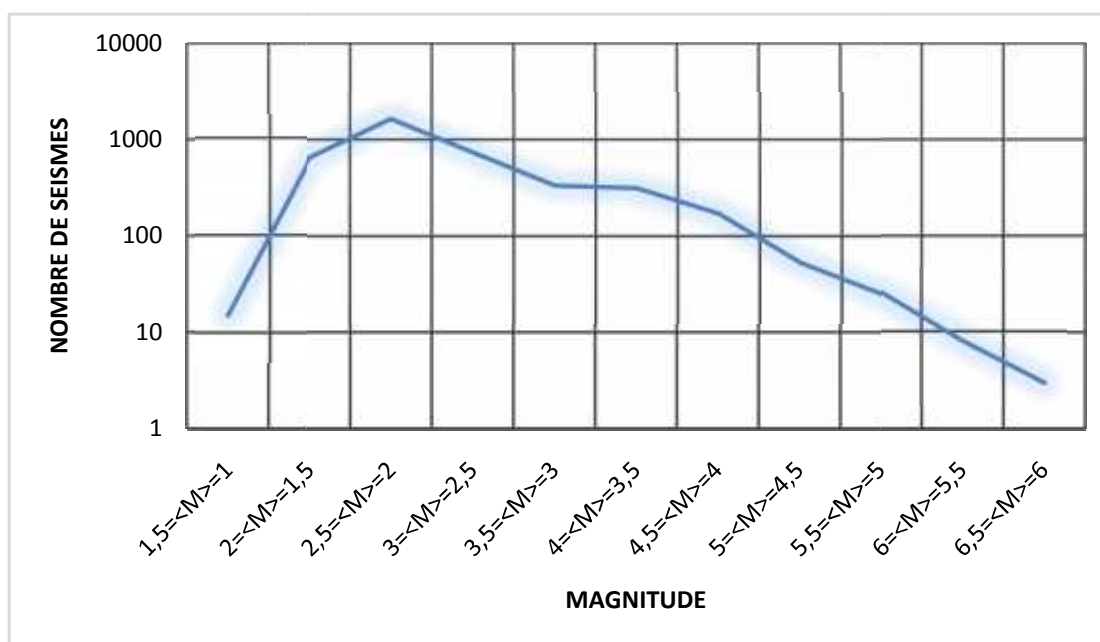


Figure 2.17 Nombre de séismes en fonction de la magnitude en échelle logarithmique.

En utilisant la fonction $\text{LOG}_{10}(N)$ où N = nombre de séismes, on obtient la figure 2.18 suivante :

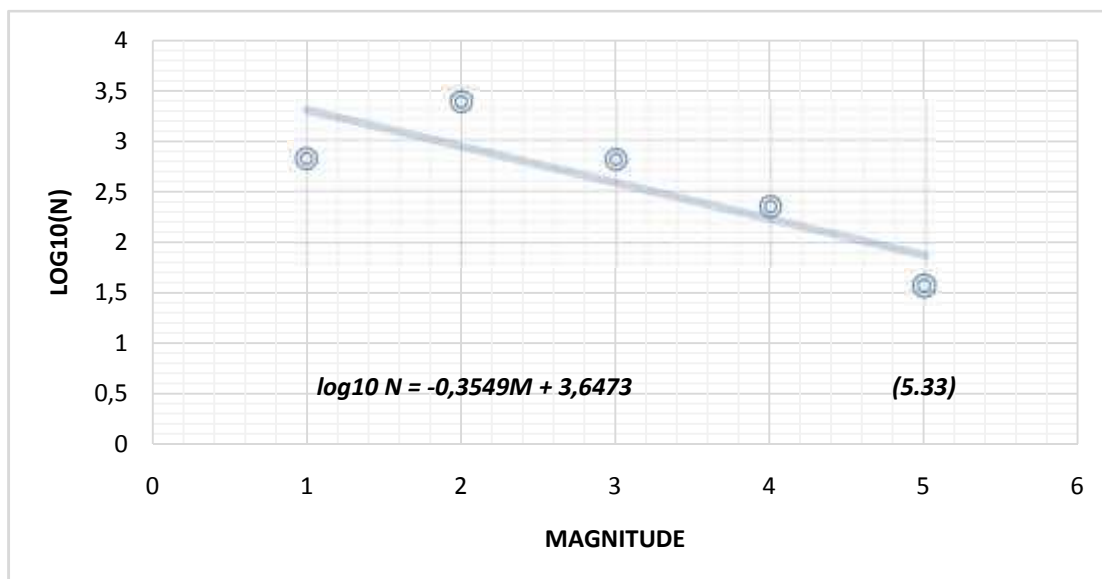


Figure 2.18 Calcul d'une équation de récurrence des magnitudes.

On voit bien une décroissance linéaire de la magnitude des séismes vérifiant la loi empirique de Gutenberg-Richter.

La fréquence de l'aléa sismique semble en fonction de la loi fréquence/magnitude utilisée ici : lorsque l'on augmente la magnitude d'une unité, le nombre de séismes correspondant diminue d'un facteur 10.

6 Détermination des périodes de complétude

Dans le cadre de construction du catalogue fiable, plus complet et plus homogène possible, pour l'évaluation de l'aléa sismique au voisinage de la région de Constantine, on veut savoir dès quelle date les enregistrements des différentes classes de magnitude ont été reportés sans oubli dans le catalogue. Cette opération est dite « analyse de la période de complétude du catalogue ». Le catalogue est incomplet pour certaines périodes de temps et magnitudes. Même si nous avons la preuve de l'occurrence de séismes importants passés, il est fort probable que de nombreux séismes ne soient pas répertoriés pour différentes raisons : localisation dans une zone peu peuplée, absence ou perte de transcriptions écrites pour des séismes historiques, faible niveau de détectabilité du réseau sismologique à une certaine époque. Dans l'optique de réaliser une étude statistique du comportement de la sismicité, il est primordial de ne considérer que des périodes complètes pendant lesquelles on peut considérer

qu'aucun séisme d'une gamme de magnitude donnée n'est manquant. Pour ce faire, des dates ou périodes de complétude sont définies pour chaque gamme de magnitudes considérée.

6.1 Méthodes de déterminations des périodes de complétude

L'estimation des périodes de complétude nécessite un nombre important de données. De ce fait, elles sont généralement déterminées à partir d'un catalogue à l'échelle d'un territoire et supposées valide pour chaque zone du territoire. Cependant, dans la réalité, la résolution varie d'une région à l'autre selon la densité de population ou la couverture du réseau sismologique. Deux méthodes de détermination des périodes de complétude par lecture graphique sont couramment utilisées : la méthode de l'estimation à partir du nombre cumulé de séismes et la méthode de Stepp (Stepp, 1972; Beauval *et al.*, 2003). Elles sont basées sur l'hypothèse que tous les séismes dans une gamme de magnitude donnée sont présents dans le catalogue à partir du moment où leur taux d'occurrence devient stable. La méthode de Stepp suppose le taux de sismicité invariant dans le temps. Tandis que, la méthode de l'estimation à partir du nombre cumulé ne repose pas sur cette hypothèse. Elle consiste à tracer le nombre cumulé de séismes sur des intervalles de plus en plus longs. Ces deux méthodes étant très similaires.

6.1.1 Estimation à partir du nombre cumulé de Séismes

Pour obtenir une analyse de la période de complétude du catalogue pour chaque classe de magnitude, on utilise les graphiques du nombre cumulé des événements contre les années. On admet que le catalogue est complet à partir du moment où les données forment une droite à forte pente. Ceci est illustré par les graphiques de la figure 2.19. Les tronçons linéaires sélectionnés sont indiqués, ainsi que les dates de complétudes. Les résultats de l'analyse sont représentés dans le tableau 2.4.

Classe de magnitude	Complet à partir de l'année	Période de complétude	Nombre d'années pour la période de complétude	Nombre de séismes /années	Nombre de séismes pour la période de complétude
[1 : 2]	2003	[2003 :2014]	12	5.99	660
[2 : 3]	1998	[1998:2014]	159	4.98	2368
[3 : 4]	1993	[1993:2013]	157	1.38	647
[4 : 5]	1870	[1870:2013]	509	0.39	225
[5 : 6]	1725	[1725:2010]	653	0.05	33
[6 : 7]	1907	[1907:1985]	78	0.0045	3

Tableau 2.4 les périodes de complétudes pour le catalogue(GK) selon les classes de magnitudes.

Sur les figures 2.19 et 2.20 sont représentées les courbes des nombres cumulés de séismes par intervalle de largeur 1. Les tronçons linéaires sélectionnés sont indiqués, ainsi que les dates de complétudes. Les courbes obtenues à partir de catalogue Nord-Est. De plus, sur les cartes sont reportés les séismes correspondant à l'intervalle de magnitude considérée.

Pour les intervalles de magnitude $[1-2[$, $[2-3[$ et $[3-4[$, les courbes sont linéaires à partir de 2003, 1998 et 1993, date de mise en place du réseau sismologique. La courbe des magnitudes $[4-5[$ montre une rupture de pente vers 1870, ces magnitudes seront par conséquent utilisées à partir de cette date. De la même manière, mais avec un nombre de séismes de plus en plus réduits, les dates de complétudes déduites pour les magnitudes $[5-6[$ est 1725. L'estimation pour les magnitudes supérieures à 6 est très délicate, vu le très faible nombre de séismes, mais la date de complétude est estimée à 1907.

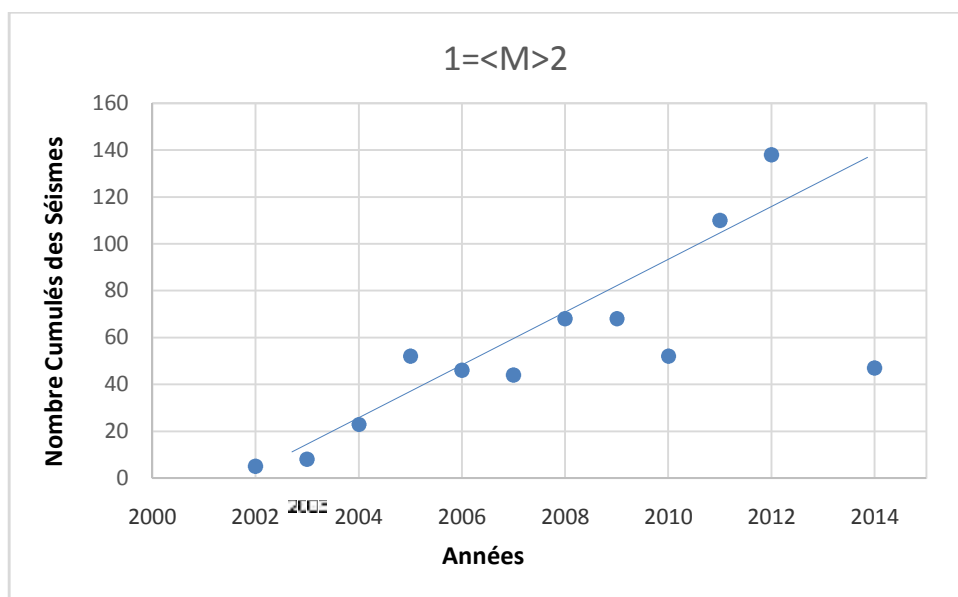


Figure 2.19 Analyse de la complétude du catalogue classe 1 $[1, 2[$.

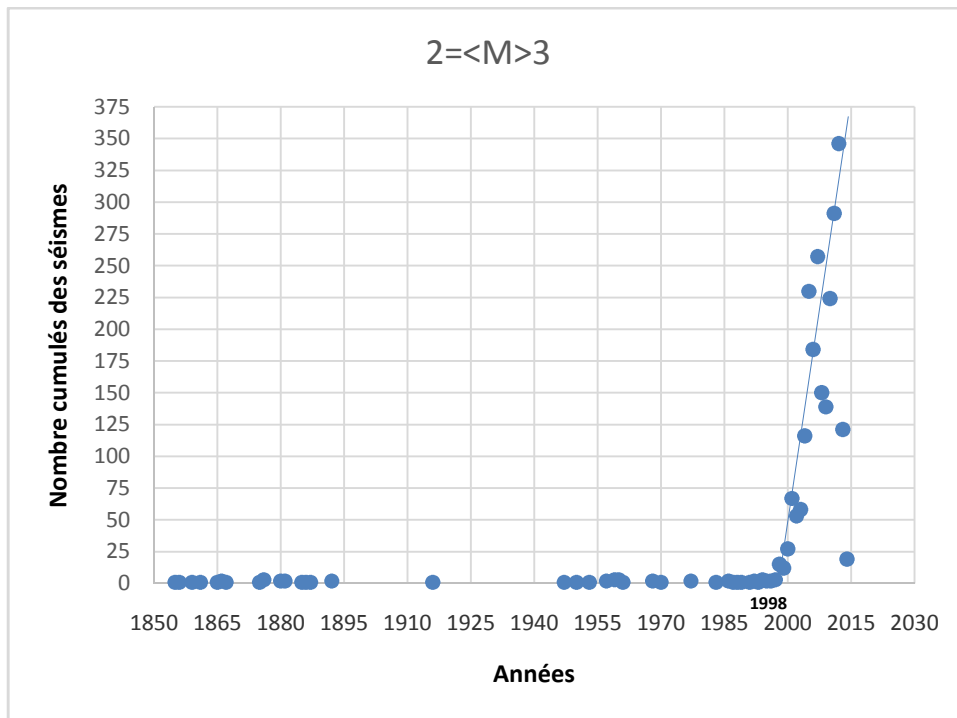


Figure 2.20 Analyse de la complétude du catalogue classe 2 [2, 3].

6.1.2 Méthode de Stepp

La méthode proposée par Stepp (1972) est la seconde méthode graphique pour la détermination de la date de complétude. Celle-ci permet de déterminer l'intervalle de temps pendant lequel, le taux d'occurrence, d'une certaine classe de magnitude, est stable.

Pour ce faire, le catalogue doit être subdivisé en plusieurs classes de magnitudes et pour chaque classe, la méthode consiste à calculer l'écart type du taux de sismicité moyen pour des sous intervalles de période T_i de plus en plus grande ($T_i + \text{pas choisi}$).

Ou trace un graphe log-log, les valeurs de λ s'alignent sur une droite de pente (- 0.5). La période complète se termine lorsque les points s'écartent de cette droite.

Si λ est le taux d'occurrence moyen d'un séisme d'une certaine magnitude, alors :

$$\lambda (M_s) = N(M_s)/T \quad (2.3)$$

Où

- $N(M_s)$ représente le nombre total de séismes de magnitude comprise dans la classe de magnitude M_s .

- T représente l'intervalle de temps pour chaque classe de magnitude. La variance de l'écart type est :

$$\sigma^2 = \frac{\lambda}{T} \quad \sigma = \frac{\lambda}{T} \quad (2.3)$$

Pour notre cas, le pas choisie est **10 ans**, alors le catalogue est subdivisé en 6 classes, les résultats du calcul sont présentés dans le tableau 2.5.

Période	Nbr année	$T^{-1/2}$	Nbr séisme	Classe 1 1 $M_s < 2$			Classe 2 2 $M_s < 3$			Classe 3 3 $M_s < 4$			Classe 4 4 $M_s < 5$			Classe 5 5 $M_s < 6$		
				N			N			N			N			N		
2014-2004	10	0.32	3066	647	64.7	2.543	2077	207.7	4.557	304	30.4	1.743	36	3.6	0.6	2	0.2	0.141
2014-1994	20	0.22	3455	1015	50.75	1.592	2031	101.55	2.253	354	17.7	0.940	53	2.65	0.364	2	0.1	0.0707
2014-1984	30	0.18	3494	1015	33.833	1.061	2042	68.066	1.506	376	12.53	0.646	57	1.9	0.251	4	0.133	0.066
2014-1974	40	0.16	3560	1015	25.375	0.796	2046	51.15	1.130	428	10.7	0.517	66	1.65	0.203	5	0.125	0.0559
2014-1964	50	0.14	3601	1015	20.3	0.637	20.51	41.02	0.905	450	9	0.424	78	1.56	0.176	7	0.14	0.0529
2014-1954	60	0.13	3683	1015	16.916	0.530	2060	34.333	0.756	493	8.216	0.370	106	1.766	0.171	9	0.15	0.05
2014-1944	70	0.12	3749	1015	14.5	0.455	2063	29.471	0.648	533	7.614	0.329	127	1.814	0.160	11	0.157	0.0473
2014-1934	80	0.11	3783	1015	12.687	0.398	2063	25.787	0.567	548	6.85	0.292	143	1.787	0.149	14	0.175	0.0467
2014-1924	90	0.11	3809	1015	11.277	0.353	2063	22.922	0.504	560	6.222	0.262	156	1.733	0.138	15	0.166	0.0430
2014-1914	100	0.1	3835	1015	10.15	0.318	2064	20.64	0.454	575	5.75	0.239	166	1.66	0.128	15	0.15	0.0387
2014-1904	110	0.1	3852	1015	9.227	0.289	2064	18.673	0.413	583	5.3	0.219	174	1.581	0.119	16	0.145	0.0363
2014-1894	120	0.09	3856	1015	8.458	0.265	2064	17.2	0.378	584	4.866	0.201	176	1.466	0.110	17	0.141	0.0343
2014-1884	130	0.09	3874	1015	7.807	0.245	2069	15.915	0.349	587	4.515	0.186	184	1.415	0.104	19	0.146	0.0335
2014-1874	140	0.08	3887	1015	7.25	0.227	2078	14.842	0.325	591	4.221	0.173	184	1.314	0.0968	19	0.135	0.0311
2014-1864	150	0.08	3899	1015	6.766	0.212	2082	13.88	0.304	598	3.986	0.163	184	1.226	0.0904	20	0.133	0.0298
2014-1854	160	0.08	3919	1015	6.343	0.2	2086	13.037	0.285	604	3.775	0.153	193	1.206	0.0868	21	0.131	0.0286
2014-1844	170	0.08	3920	1015	5.970	0.18	2086	12.270	0.268	604	3.552	0.144	194	1.141	0.0819	21	0.123	0.0269
2014-1834	180	0.07	3920	1015	5.638	0.17	2084	11.577	0.253	603	3.35	0.136	197	1.094	0.0779	21	0.116	0.0254
2014-1824	190	0.07	3920	1015	5.342	0.167	2084	10.968	0.240	603	3.173	0.129	207	1.089	0.0757	23	0.121	0.0252
2014-1814	200	0.07	3920	1014	5.075	0.159	2085	10.424	0.228	603	3.015	0.122	197	0.985	0.0701	21	0.105	0.0229
2014-1804	210	0.07	3920	1015	4.833	0.151	2086	9.933	0.217	604	2.876	0.117	194	0.923	0.0663	21	0.1	0.0218
2014-1794	220	0.067	3920	1015	4.613	0.144	2086	9.481	0.207	604	2.745	0.111	194	0.881	0.0633	21	0.0954	0.0120
2014-1784	230	0.066	3921	1015	4.413	0.138	2086	9.069	0.198	604	2.626	0.106	195	0.847	0.0607	21	0.0913	0.0199
2014-1774	240	0.065	3921	1015	4.229	0.132	2086	8.691	0.190	604	2.516	0.102	195	0.812	0.0581	21	0.0875	0.0190
2014-1764	250	0.063	3922	1015	4.06	0.127	2086	8.344	0.182	604	2.416	0.098	196	0.784	0.056	21	0.084	0.0183
2014-1754	260	0.062	3923	1015	3.903	0.122	2086	8.023	0.175	604	2.323	0.094	197	0.757	0.0539	21	0.0807	0.0176
2014-1744	270	0.061	3925	1015	3.759	0.117	2086	7.725	0.169	604	2.237	0.091	199	0.737	0.0522	21	0.0777	0.0169
2014-1734	280	0.06	3925	1015	3.625	0.113	2086	7.45	0.163	604	2.157	0.087	199	0.710	0.0503	21	0.075	0.0163
2014-1724	290	0.059	3926	1015	3.5	0.109	2086	7.193	0.157	604	2.082	0.084	200	0.689	0.0487	21	0.0724	0.0158
2014-1714	300	0.058	3929	1015	3.383	0.106	2086	6.953	0.152	604	2.013	0.081	202	0.673	0.0473	22	0.0733	0.0156
2014-1704	310	0.057	3929	1015	3.274	0.102	2086	6.729	0.147	604	1.948	0.079	202	0.651	0.0458	22	0.0709	0.0151
2014-1694	320	0.056	3929	1015	3.171	0.099	2086	6.518	0.142	604	1.887	0.076	202	0.631	0.0444	22	0.0687	0.0146
2014-1684	330	0.055	3929	1015	3.075	0.096	2086	6.321	0.138	604	1.830	0.074	202	0.612	0.0430	22	0.0666	0.0146
2014-1674	340	0.054	3930	1015	2.985	0.0937	2086	6.135	0.134	604	1.776	0.072	202	0.594	0.0418	23	0.0676	0.0141
2014-1664	350	0.053	3930	1015	2.9	0.0910	2086	5.96	0.130	604	1.725	0.070	202	0.577	0.0406	23	0.0657	0.0137
2014-1654	360	0.053	3930	1015	2.819	0.0884	2086	5.794	0.126	604	1.677	0.068	202	0.561	0.0394	23	0.0638	0.0133
2014-1644	370	0.052	3930	1015	2.743	0.0861	2086	5.637	0.123	604	1.632	0.066	202	0.545	0.0384	23	0.0621	0.0129
2014-1634	380	0.051	3930	1015	2.671	0.0838	2086	5.489	0.120	604	1.589	0.064	202	0.531	0.0374	23	0.0605	0.0126
2014-1624	390	0.051	3930	1015	2.602	0.0816	2086	5.348	0.117	604	1.548	0.063	202	0.517	0.0364	23	0.0589	0.0122
2014-1614	400	0.05	3930	1015	2.537	0.0796	2086	5.215	0.114	604	1.51	0.061	202	0.505	0.0355	23	0.0575	0.0119
2014-1604	410	0.049	3931	1015	2.475	0.0777	2086	5.087	0.111	604	1.473	0.059	203	0.495	0.0347	23	0.0560	0.0116
2014-1594	420	0.049	3931	1015	2.416	0.0758	2086	4.966	0.108	604	1.438	0.058	203	0.483	0.0339	23	0.0547	0.0114
2014-1584	430	0.048	3932	1015	2.360	0.074	2086	4.851	0.106	604	1.404	0.057	204	0.474	0.0332	23	0.0534	0.0111
2014-1574	440	0.048	3932	1015	2.306	0.072	2086	4.740	0.103	604	1.372	0.055	204	0.463	0.0324	23	0.0522	0.0108
2014-1564	450	0.047	3932	1015	2.255	0.070	2086	4.635	0.101	604	1.342	0.054	204	0.453	0.0317	23	0.0511	0.0106
2014-1554	460	0.047	3932	1015	2.206	0.069	2086	4.534	0.099	604	1.313	0.053	204	0.443	0.0310	23	0.05	0.0104
2014-1544	470	0.046	3932	1015	2.159	0.067	2086	4.438	0.097	604	1.285	0.052	204	0.425	0.0303	23	0.0489	0.0102
2014-1534	480	0.046	3932	1015	2.114	0.066	2086	4.345	0.095	604	1.258	0.051	204	0.425	0.0297	23	0.0479	0.0099
2014-1524	490	0.045	3932	1015	2.071	0.0650	2086	4.257	0.093	604	1.232	0.050	204	0.416	0.0291	23	0.0469	0.0097
2014-1514	500	0.045	3932	1015	2.03	0.0637	2086	4.172	0.091	604	1.208	0.049	204	0.408	0.0285	23	0.046	0.0095
2014-1504	510	0.044	3933	1015	1.990	0.0624	2086	4.090	0.089	604	1.184	0.048	205	0.401	0.0280	23	0.0450	0.0094

2014-1494	520	0.044	3934	1015	1.951	0.0612	2086	4.011	0.087	604	1.161	0.047	206	0.396	0.0276	23	0.0442	0.0092
2014-1484	530	0.043	3934	1015	1.915	0.0601	2086	3.935	0.086	604	1.139	0.046	206	0.388	0.0270	23	0.0433	0.0090
2014-1474	540	0.043	3934	1015	1.879	0.0589	2086	3.862	0.084	604	1.118	0.045	206	0.381	0.0265	23	0.025	0.0088
2014-1464	550	0.043	3935	1015	1.845	0.0579	2086	3.792	0.083	604	1.098	0.044	207	0.376	0.0261	23	0.0418	0.0087
2014-1454	560	0.042	3935	1015	1.812	0.0568	2086	3.725	0.081	604	1.078	0.043	207	0.369	0.0256	23	0.0410	0.0085
2014-1444	570	0.042	3935	1015	1.780	0.0558	2086	3.659	0.080	604	1.059	0.043	207	0.363	0.0252	23	0.0403	0.0084
2014-1434	580	0.042	3935	1015	1.75	0.0549	2086	3.596	0.078	604	1.041	0.042	207	0.356	0.0248	23	0.0396	0.0082
2014-1424	590	0.041	3935	1015	1.720	0.0539	2086	3.535	0.077	604	1.023	0.041	207	0.350	0.0243	23	0.0389	0.0081
2014-1414	600	0.041	3935	1015	1.691	0.0530	2086	3.476	0.076	604	1.006	0.040	207	0.345	0.0239	23	0.0383	0.0079
2014-1404	610	0.04	3935	1015	1.663	0.0522	2086	3.419	0.074	604	0.990	0.040	207	0.339	0.0235	23	0.0377	0.0078
2014-1394	620	0.04	3935	1015	1.637	0.0513	2086	3.364	0.073	604	0.974	0.039	207	0.333	0.0232	23	0.0370	0.0077
2014-1384	630	0.04	3935	1015	1.611	0.0505	2086	3.311	0.072	604	0.958	0.039	207	0.328	0.0228	23	0.0365	0.0076
2014-1374	640	0.04	3935	1015	1.585	0.0497	2086	3.259	0.071	604	0.943	0.038	207	0.323	0.0224	23	0.0359	0.0074
2014-1364	650	0.039	3935	1015	1.561	0.0490	2086	3.209	0.07	604	0.929	0.037	207	0.318	0.0221	23	0.0353	0.0073
2014-1354	660	0.039	3936	1015	1.537	0.0482	2086	3.160	0.069	604	0.915	0.037	208	0.315	0.0218	23	0.0348	0.0072

Tableau 2.5 Valeurs du taux d'occurrence moyen et de l'écart type du secteur d'étude.

Les résultats de l'analyse de la complétude par la méthode de Stepp sont représentés dans le tableau 2.6.

Classes	Complète à partir de l'année	Période de complétude
[1, 2]	2004	[2004:2014]
[2, 3]	1984	[1984:2014]
[3, 4]	1987	[1987:2014]
[4, 5]	1864	[1864:2014]
[5, 6]	1714	[1714:2014]

Tableau 2.6 Les périodes de complètes du catalogue de sismicité selon la méthode de Stepp (1972).

Sur le graphique 2.21, les segments, représentés par des tirets et de pente - 0,5, délimitent les alignements des valeurs σ_{λ} pour chaque intervalle de magnitude. Ainsi, la période minimale représentative est de 10 ans pour les intervalles [1-2], [2-3], [3- 4], [5-6] et [6-7]. Les points s'écartent d'une droite de pente - 0,5 lorsque la période complète est atteinte : les périodes complètes sont globalement en accord avec celles déterminées en Fig. 2.21 et 2.22 et indiquées par les traits verticaux. Pour une précision à 10 ans, il faudrait réduire le pas en temps. Au-delà de 6, les données sont très peu nombreuses et il devient difficile de déduire des dates de complétude. Ainsi la méthode de Stepp conforte les dates de complétude estimées, mais elle est limitée aux grandes magnitudes par le faible nombre de séismes disponibles. Au-delà d'une période suffisamment grande, toutes les courbes sont de pente identique-2.

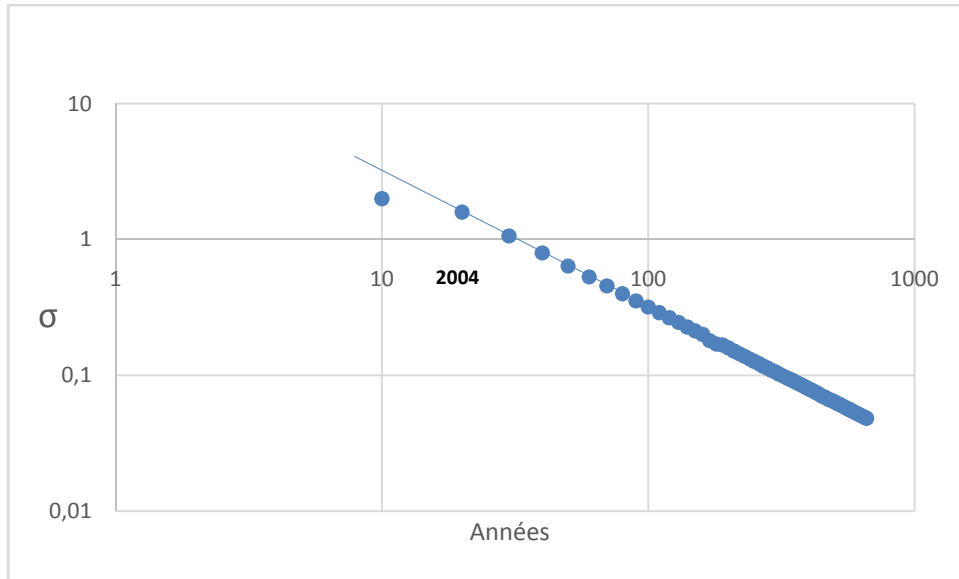


Figure 2.21 Détermination des périodes complètes classe 1 [1, 2].

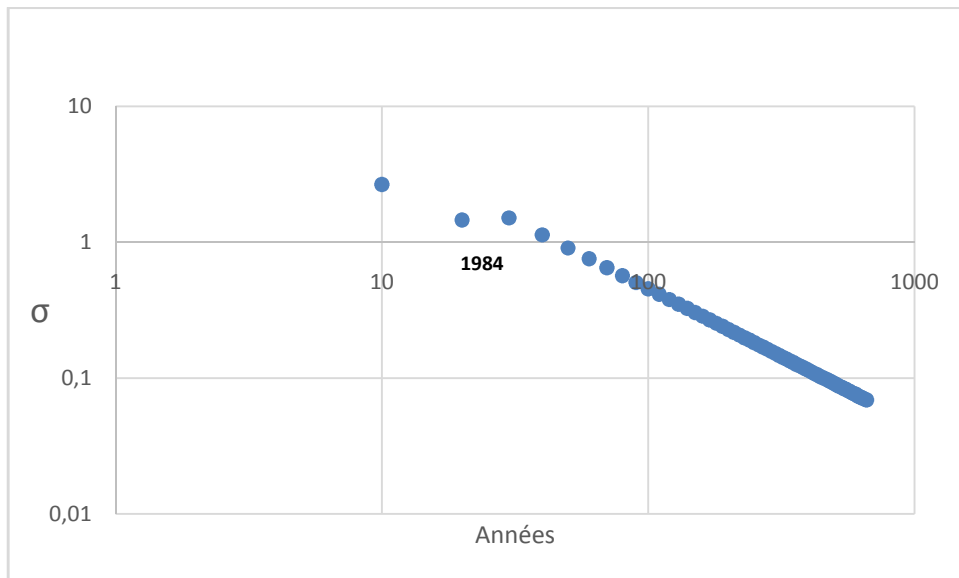


Figure 2.22 Détermination des périodes complètes classe 2 [2, 3].

6.2 Conclusions et récurrences sur le catalogue [1357-2014]

Les deux méthodes reposent sur une même hypothèse : la stationnarité du taux de sismicité dans le temps. Elles fournissent globalement des résultats identiques et deviennent difficiles à appliquer lorsque les données sont rares. L'attribution des dates de complétude pour les magnitudes supérieures à 6 est délicate, ces magnitudes sont rares, la période de temps couverte par le catalogue est trop courte. Par ailleurs, il existe des méthodes systématiques où

la période est calculée et non lue sur un graphique (Albarello *et al.*, 2001), mais ces méthodes statistiques nécessitent de la même manière un minimum de données pour obtenir des périodes fiables avec des intervalles d'incertitude raisonnable.

Les taux annuels des magnitudes supérieures à 3 peuvent maintenant être calculés sur le catalogue de tout le territoire [1357-2014]. La figure 2.20 présente les taux annuels cumulés calculés. La décroissance exponentielle n'est pas respectée sur tout l'intervalle de magnitude. Deux hypothèses majeures sont nécessaires pour tracer une telle courbe : le catalogue [1357-2014] est supposé homogène et les taux de sismicité sont supposés constants. Ces hypothèses ne sont peut-être pas valides sur toute la longueur du catalogue. Il se peut aussi que la loi d'échelle ne soit pas respectée sur l'intervalle de magnitude entier.

7 Conclusion

Un nouveau catalogue en magnitude de surface (M_s) a été construit pour le Nord-Est de l'Algérie sur la base des différentes sources d'études (Rothé, Benhallou, Benouar, Harbi) et organismes (CRAAG, IGN, USGS, ISC), ainsi les formats des fichiers de données ne sont pas identiques. Pour pouvoir utiliser l'ensemble des données disponibles (intensités, magnitudes) sous un format standard. Des lois de conversion de M_l en M_s , m_b en M_s et d'intensités (I_0 , I_{MM} , I_{MSK} et I_{EMS}) en M_s ont été étudiées afin d'appliquer les plus adaptées à notre catalogue de sismicité. Ce catalogue inclut une mise à jour des séismes instrumentaux sur la base des données ISC et CRAAG. Pour la partie Est du Constantine, le catalogue est complété par le catalogue de micro-sismicité du CRAAG (1,5 M_l 3). Les différentes parties formant ce catalogue sont concordantes, ce qui permet d'avoir une bonne idée des taux de sismicité.

La notion de Declustering (élimination des répliques) et Completeness (analyse de la complétude du catalogue) sont largement abordées. Comme le processus d'occurrence choisi pour caractériser l'activité sismique est celui de Poisson, par conséquent les précurseurs et les répliques des séismes principaux doivent être supprimés. Les quatre méthodes les plus couramment utilisées (Grünthal, Uhrhammer, Reasenberget Knopoff). Ces 4 méthodes ont été paramétrées à partir de l'observation des impacts sur les séismes localisés dans les environs du Nord-Est de l'Algérie. Les résultats obtenus pour la distribution temporelle cumulée des séismes et par l'observation plus approfondie de la définition de certains clusters, ont permis de caractériser l'impact sur le catalogue de ces méthodes. Ainsi, il apparaît que la méthode développée par Grünthal considère comme réplique un très grand nombre de séismes, tandis que les deux autres en retiennent beaucoup moins. De part la sismicité

particulière du Nord-Est de l'Algérie (micoséismicité, séismes consécutifs), il pourrait être envisagé dans le futur de considérer d'autres méthodes basées sur des modèles physique et dynamique. En attendant, nous allons inclure ces 4 méthodes dans notre arbre logique, avec des pondérations différentes allant de 0.5 pour Knopoff, 0,4 pour Reasenberg et Uhrhammer à 0,2 pour Grünthal.

Cette étape nous a permis une maîtrise complète de ces deux techniques. Pour mettre en évidence le caractère poissonien, nous avons proposé deux méthodes de lectures graphiques afin de trouver les périodes de complétudes pour chaque intervalle de magnitude. La flexibilité de la méthode de Stepp (1972) nous a amené à introduire un programme en Matlab afin de prendre en charge l'ensemble des calculs liés à cette démarche.

8 Bibliographie

- Aki, M., 1965.** *Maximum likelihood estimates of b in formula $\log n = a - b m$ and its confidence limits.* *Bull. Earthquake. Res. Inst. Tokyo Univ.* 43, 237-239.
- Albarelo, D., Camassi, R. & Rebez, A., 2001.** *Detection of space and time heterogeneity in the completeness of a seismic catalog by a statistical approach: an application to the Italian area,* *Bull. Seism. Soc. Am.,* 91(6) :1694–1703.
- Ambraseys, N.N., Finkel, C.F., 1990.** *The Marmara sea earthquake of 1509.* *Terra Nova* 2, 167-174.
- Ambraseys, N.N., Melville C.P., 1982.** *A History of Persian Earthquakes,* 219 pp., Cambridge Univ. Press.
- Beauval, C. & Scotti, O., 2003.** *Variabilité dans la modélisation de la récurrence des séismes et impact sur l'évaluation de l'aléa sismique en France,* 6ème colloque national AFPS, 1-3 juillet, Ecole Polytechnique, Palaiseau.
- Bellalem, F., 2007.** *Aléa sismique en un site, méthodologie et application,* Master thesis.
- Benhallou, H., 1985.** *Les catastrophes sismiques de la région d'Echelif dans le contexte de la sismicité de l'Algérie,* Thèse de doctorat, USTHB, Alger.
- Benouar, D., 1994.** *Magnitude-intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes.* *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 23, 717-727.
- Burkhard, M. & Grünthal, G., 2009.** *Seismic source zone characterization for the seismic hazard assessment project PEGASOS by the Expert Group 2 (EG1b).* *Swiss Journal of Geosciences* 102(1), 149–188.

- Casado, L., Molina, C S., Giner, J.J., Delgado, J., 2000.** *Magnitude-Intensity relationships in the Ibero-Magrebian region. Nat. Hazards* 22, 269-294.
- CRAAG- Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et de Géologie., 1994.** *Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. Service de surveillance sismique, Alger.*
- CRAAG- Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et de Géologie., 2002.** *Les séismes en Algérie de 1992 à 2001. Service de surveillance sismique, Alger.*
- Gardner, J.K., Knopoff, L., 1974.** *Is the sequence of earthquake in Southern California, with aftershocks removed, poissonian. Bull. Seismol. Soc. Am.* 64, 1363-1367.
- Grandjean, A., 1954.** *Séismes d'Algérie de 1940 à 1950 inclus. Ann. Inst. phys. Globe, Strasbourg ; 3^{ème} partie, Géophysique, VII, 83 (Le Puy).*
- Grünthal, G., Wahlström, R., 2012.** *The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - Journal of Seismology, 16, 3, 535-570, DOI: 10.1007/s10950-012-9302-y.*
- Grünthal, G., Wahlström, R., Stromeyer, D., 2009.** *The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) - updated and expanded to the last millennium. - Journal of Seismology, 13, 4, 517-541. DOI: 10.1007/s10950-008-9144-9.*
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944.** *Frequency of earthquakes in California. Bull. Seismol. Soc. Am.* 34, 185-188.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1956.** *Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. Bull. Seismol. Soc. Am.* 46, 105-45.
- Habermann, R.E., 1987.** *An experiment in earthquake prediction and the 7 May 1986 Andreanof Islands earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America February 1, 1988 78:218-229.*
- Harbi, A., 2001.** *Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents actifs dans le Nord-Est Algérien Thèse de Magister, Institut des sciences de la terre, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne (USTHB).*
- Harbi, A., 2006.** *Evaluation de l'Aléa Sismique en Algérie du Nord par la modélisation de l'Input Sismique dans les zones urbaines et l'Etablissement d'un Catalogue. Thèse de Doctorat, Institut des sciences de la terre, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne (USTHB).*

- Harbi, A., Peresan, A., Panza, G.F., 2008.** *Seismicity of Eastern Algeria: ECEA the revised and extended earthquake catalogue. Submitted to Natural Hazard. Available as ICTP internal report, IC/IR/2008/011.*
- Hée, A., 1950.** *Catalogue des séismes algériens de 1850 à 1911, Ann. Inst. Phys. Globe, Strasbourg, 6, 41–49.*
- ISC -International Seismological Center.** *On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, intrenatl. Seis., Thatcham, United Kingdom.*
- Kanamori, H. & Anderson, D., 1975.** *Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bulletin of the Seismological Society of America 65(5), 1073.*
- Karnik V., 1969.** *Seismicity of the European area. Dordrecht, vol. I, 220 pp.; vol. II, 218 pp.*
- Knopoff, L., 1964.** *The statistics of earthquakes in Southern California. Bulletin of the Seismological Society of America 54(6A), 1871.*
- Marsan, D. & Lengline, O., 2008.** *Extending earthquakes' reach through cascading. Science 319(5866), 1076–1079.*
- Mokrane, A., A. Ait Messaoud, A. Sebai, A. Ayadi, M. Bezzeghoud and H. Benhallou.** *Les séismes en Algérie de 1365 à 1992., 1994. Alger: Publication du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Département: Etudes et Surveillance Sismique, ESS, C.R.A.A.G, Alger-Bouzaréah, 277 pp.*
- Molchan, G.M. and Dmitrieva, O.E., 1992.** *Aftershock identification: methods and new approaches, Geophys. J. Int. 109, 501-516.*
- Molchan, G.M., Kronrod, T.L., Nekrasova, A.K., 1999.** *Immediate foreshocks: time variation of the b-value. Phys. Earth planet. Inter. 111, 229-240.*
- mori, F., 1894.** *On aftershocks. Rep. Imp. Earthquake Invest. Comm., 1894, 2, 103 – 109.*
- Reasenber, P.A., 1985.** *Second-order moment of central California seismicity. Geophys. J. Res. 90, 5479-5495.*
- Rothé, J.P., 1950.** *Les séismes de Kherrata et la séismicité de l'Algérie, Bull. Serv. Cart. Geol. Algérie, 4ème Sér., Géophysique, n. 3.*
- Roussel, J., 1973.** *Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie 1716-1970, Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, 64, 11-227.*
- Schorlemmer, D. & Gerstenberger, M., 2007.** *RELM testing center. Seismological Research Letters 78(1), 30.*

- Stepp, J.C ., 1972.** *Analysis of the completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard; Proc. Inter. Conf. Microzonation, Seattle Washington, USA 641189–1207.*
- Uhrhammer, R.A., 1986.** *Characteristics of northern and central California seismicity, Earthquake Notes, 57(1), 21.*
- VanStiphout, T., Zhuang, J. & Marsan, D., 2010.** *Seismicity Declustering. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 1–26.*
- WGCEP- Working Group on California Earthquake Probabilities ., 2003.** *Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002–2031, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 03–214.*
- Yelles, A.K, A. Deramchi, A. Ferkoul & K. Aoulaiche., 2002.** *Les séismes en Algérie de 1992 à 2001. Alger : C.R.A.AG Publication, 216 pp.*
- Zaliapin, I., 2012.** *Detection and classification of earthquake clusters in southern California. Journal of Geophysical Research, 1–32.*
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y., 2013.** *Earthquake clusters in southern California, II: Classification and relation to physical properties of lithosphere. Journal of Geophysical Research, 118(6), 2865-2877. doi: 10.1002/jgrb.50178. SCEC Contribution 1719.*
- Zhuang, J., Chang, C.P., Ogata, Y., Chen, Y.I., 2005.** *A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models. Journal of geophysical research. DOI: 10.1029/2004JB003157.*
- Zuniga, F. R. and Wiemer, S., 1999.** *Seismicity patterns: are they always related to natural causes. Pure Appl. Geophys. 155, 713–726.*
- Zuniga, R., and Wyss, M., 1995.** *Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: Influence on b-value estimates, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1858–1866.*

CHAPITRE 3.

ZONAGE ET RELATION

D'ATTENUATION DU NORD-EST DE

L'ALGERIE

Chapitre 3.

Zonage et relation d'atténuation du Nord-Est de l'Algérie

1	Introduction.....	81
2	Le zonage sismotectonique.....	81
2.1	Identification des zones sources dans la région de Constantine.....	82
2.1.1	Zone source de Constantine (Z1).....	82
2.1.2	Zone source Sud Constantinois_Sigus-Temlouka (Z2).....	83
2.1.3	Zone source de Guelma (Z3).....	83
2.1.4	Zone source Nord Constantinois (Z4).....	83
2.1.5	Zone source d'Ain Smara-Mila (Z5).....	83
2.2	Caractéristique des zones sources.....	84
2.2.1	Estimation de la magnitude maximale.....	84
2.2.2	Fréquence et récurrence des séismes dans la région d'étude.....	85
2.2.3	La profondeur sismogéniques des zones sources.....	86
2.2.4	Les paramètres de sismicité.....	87
2.2.5	Estimations des temps de retour des magnitudes.....	87
3	La relation d'atténuation.....	92
3.1	Formule générale.....	93
3.2	Lois d'atténuation usuellement utilisées en Algérie.....	94
3.3	Loi d'atténuation préliminaire pour le centre de l'Algérie.....	99
3.4	Lois d'atténuation usuellement utilisées dans CRISIS.....	100
3.5	L'intérêt d'évaluer l'aléa sismique par la magnitude M_s	100
4	Conclusion.....	101
5	Bibliographie.....	101

Chapitre 3.

Zonage et relation d'atténuation du Nord-Est de l'Algérie

1 Introduction

Le calcul de l'aléa sismique probabiliste repose sur trois données de base : un catalogue de sismicité de la région d'étude, un zonage sismotectonique et un modèle d'atténuation du mouvement du sol adapté au contexte tectonique. Le zonage et la relation d'atténuation choisis pour cette étude sont présentés dans ce chapitre. Le zonage sismotectonique développé dans ce travail est un nouveau zonage dans la région de Constantine. D'autre part, la relation d'atténuation Sadigh (1993) est la relation adaptée au contexte Algérien. C'est également la relation de référence dans la réglementation parasismique. La carte des zones sources sismiques, constitue une étape de base pour l'évaluation de l'aléa sismique. C'est durant cette étape que les observations géologiques du terrain et les données de la sismicité seront synthétisées et utilisées pour la définition du zonage sismotectonique qui consiste à délimiter des zones sources correspondant aux failles actives et/ou à des aires géographiques pouvant être le siège de secousses sismiques ou zones sources.

En outre, le potentiel sismique des sources sismiques est estimé en évaluant les magnitudes maximales probables pour chacune des sources définies sur la base aussi bien des données géologiques que sismologiques.

2 Le zonage sismotectonique

La sismicité du Nord-Est de l'Algérie est modérée et diffuse. Il est difficile d'associer les événements sismiques aux failles qui les génèrent. A l'échelle du territoire, seules des aires géographiques larges peuvent délimiter les zones sources sismiques où une profondeur superficielle est attribuée à chaque zone source. Ces zones sont déterminantes dans la

méthode probabiliste de Cornell-McGuire : une courbe de récurrence est modélisée à l'intérieur de chaque zone, et la sismicité est ensuite supposée répartie de manière uniforme dans la zone source.

2.1 Identification des zones sources dans la région de Constantine

L'analyse combinée de la carte sismotectonique qui englobe des données de sismicité historiques et les données de géologie permet de voir que les séismes dans la région du Constantinois ne sont pas répartis de façon aléatoire. Ils semblent plutôt bien correspondre à la localisation des structures géologiques actives. Pour les besoins de calcul de l'aléa sismique, cinq (05) zones sources ont été définies. Quatre critères ont été pris en considération dans la définition des zones sources à savoir:

- la présence de structures géologiques actives,
- la distribution de la sismicité historique,
- l'état de nos connaissances sur ces failles et
- cibler les grands sites urbains dans la région d'étude.

Dans ce travail, la délimitation des zones sources représentées sur la figure.6.1 est basée sur les travaux de Hamadache (1998), Aoudia (2000) et Harbi (2003). Pour certaines zones nous avons une cohérence entre la distribution de la sismicité et les données tectonique et géologique. Cependant, nous avons délimité d'autres zones sources en se basant beaucoup plus sur la concentration de la sismicité que sur le contexte géologique. Le zonage défini comprend cinq (5) sources superficielles listées avec ses caractéristiques dans la (Table.3.1) et représentées sur la figure.3.1.

Code	Région	Superficie (Km ²)	Nb	Profondeur (m)
Z1	Constantine	944	182	10-35
Z2	Sud Constantinois (Sigus-Temlouka)	2334	172	3-38
Z3	Guelma	1759	304	1-35
Z4	Nord Constantinois	2080	434	2-44
Z5	Ain Smara-Mila	2127	359	1-35

Tableau 3.1 Caractéristiques des zones sources (Z1, Z2, Z3, Z4 et Z5).

2.1.1 Zone source de Constantine (Z1)

Située à l'Est de l'atlas tellien, cette zone a connu très peu de séismes majeurs. Les principales secousses enregistrées dans la région sont celles du 04.08.1947 (Io=VIII), et du 27.10.1985

d'El Aria (près de la ville de Constantine, $I_0=VIII$). Ce dernier a engendré beaucoup de victimes, et d'importants dégâts ont été causés dans la région d'El Aria située à 24 km du centre-ville. Cette zone a fait l'objet de nombreuses études, son activité sismique semble être comme les autres régions liée à des structures actives orientées NE-SO. Néanmoins d'après Bounif *et al.*, (1987), un mouvement décrochant senestre existe dans la zone.

2.1.2 Zone source Sud Constantinois_Sigus-Temlouka (Z2)

La zone correspond au domaine externe du Tell et sa limite Nord coïncide globalement avec le chevauchement sud tellien, et au sud par les bassins poste nappes Constantinois (bassin de Temlouka,...). Elle est d'une superficie de 2334 km² et d'une magnitude maximale de 4. La zone révèle des évidences de déformation tectonique dans les terrains quaternaires, la zone est classée (Z2). Elle comprend deux failles identifiées actives ou probablement actives (faille de Sigus et faille de Temlouka) à cause d'une concentration de foyers sismiques de magnitudes modérées avec des séismes de magnitude (M_s 4.0).

2.1.3 Zone source de Guelma (Z3)

Contrairement aux autres zones, la zone de Guelma présente un système de failles avec un mécanisme de foyer en extension. Meghraoui (1988) a décrit un bassin de transtension (dépression tectonique formée par extension et subsidence) qui est formé entre deux chevauchements dextres d'une direction Est-Ouest. Le séisme de référence dans cette zone s'est produit le 10 février 1937 $M_s = 5.2$ Benouar (1993). Deux autres séismes importants d'une intensité $I_0= VIII$ (MSK) ont secoué la région, il s'agit du séisme du 17 juin 1908 et celui du 3 décembre 1928.

2.1.4 Zone source Nord Constantinois (Z4)

La zone correspond au domaine géologique situé au nord de la ville de Constantine caractérisée par une faille active segmentée et elle est d'une superficie de 2080 km². L'activité dans cette zone est attestée par la présence du plus grand nombre d'évènements sismiques fiables mais vraisemblablement capables de se produire à l'avenir des séismes plus forts.

2.1.5 Zone source d'Ain Smara-Mila (Z5)

La zone regroupe les trois segments de la faille de Ain Smara et une partie du bassin de Mila, en raison de la présence élevée de nombreuses secousses sismiques. La faille de Ain Smara affecte vraisemblablement les dépôts quaternaires. La zone source (Z5) est orientée Nord Est-Sud Ouest et a une superficie de 2127 km².

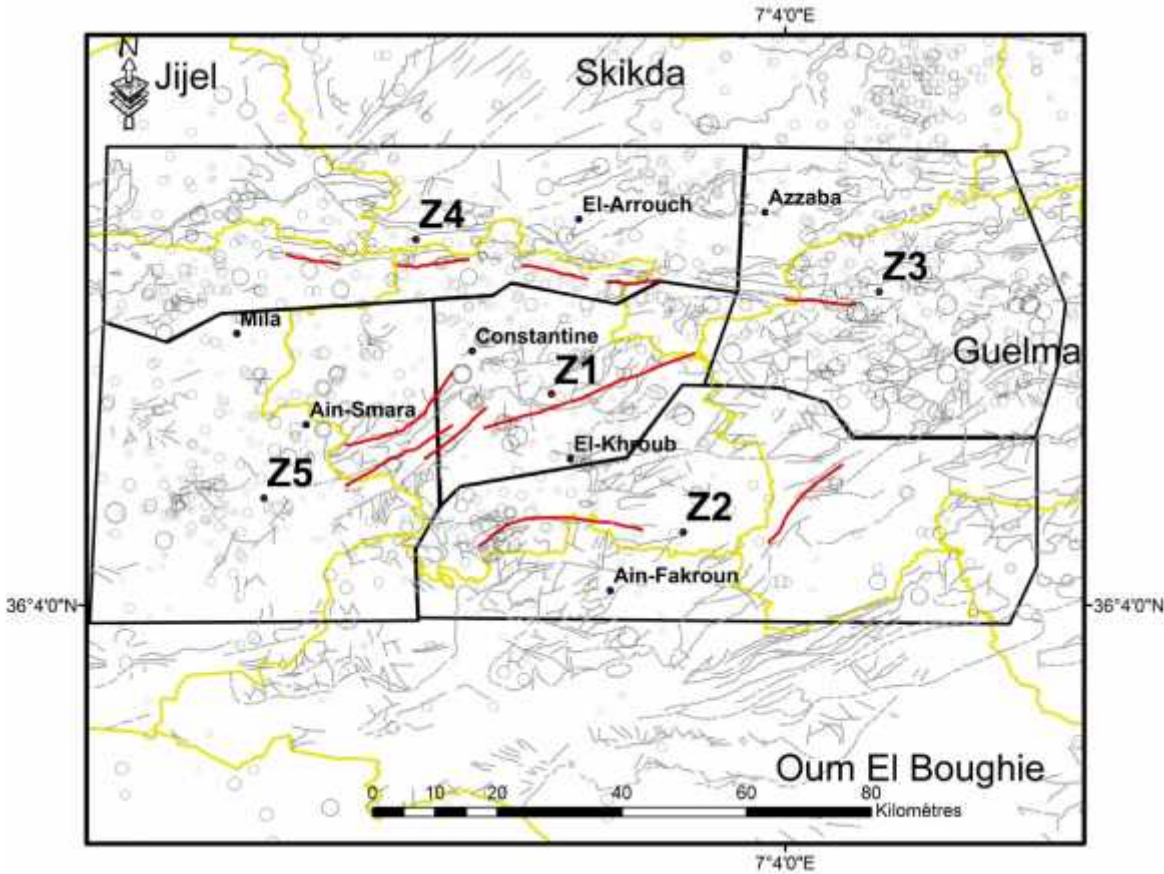


Figure 3.1 Modèle des zones sources sismiques.

2.2 Caractéristique des zones sources

2.2.1 Estimation de la magnitude maximale

Il existe plusieurs méthodes dans la littérature pour estimer le potentiel sismique des failles en termes de la magnitude maximale probable. Deux grands ensembles peuvent être distingués:

(i) La magnitude maximale est estimée à partir de l'analyse statistique d'un échantillon d'épicentres représentant la sismicité historique de la région Kijko-Selleveoll, (1992); Dans les régions qui ont connu des séismes majeurs, où le maximum d'énergie est libérée, le séisme maximal est donc considéré comme tel.

(ii) Méthodes basées sur les observations géologiques du terrain, on distingue les méthodes basées sur les longueurs et les largeurs des ruptures (Wells et Coppersmith, 1994; Slemmons,

1982; Bonilla *et al.*,1984; Wyss, 1979) et celles basées sur la paléosismologie ou sur les déplacements cosismiques observés sur le terrain dont la géomorphologie et/ou la géologie (Slemmons, 1982). Par ailleurs, il est d'usage de considérer comme séisme maximal, notamment dans les études de microzonage sismique, la sismicité historique majorée de 0.5. C'est à dire si dans une zone donnée la sismicité historique est de 6.0, on considère le séisme maximal historique (SMH) $6.0 + 0.5 = 6.5$. D'un autre côté, on définit pour le cas des études stratégiques le séisme historique maximal vraisemblable (SMHV), où ces notions ont été notamment utilisées dans le cadre des études d'aléa sismique caractérisé par une sismicité faible à modérée. L'utilisation du logiciel CRISIS demande de fixer deux limites de magnitude maximum :

- la première (M_{max}) est la plus grande magnitude observée dans chaque zone source ;
- la seconde est obtenue en majorant la magnitude du plus fort séisme observé $M_{max2} = M_{max}(\text{observé}) + 0.5$.
- Les résultats obtenus sont consignés dans la table 3.2.

Code	Région	M_{max1} observée	M_{max} calculée	err (M_{max} calculée)	M_{max2} observée	M_{max1} (majorée)
Z1	Constantine	6.0	6.55	0.58	5.0	6.5
Z2	Sud Constantinois	6.0	6.6	0.64	4.1	6.5
Z3	Guelma	5.2	5.95	0.81	5.2	5.7
Z4	Nord Constantinois	4.4	4.85	0.58	4.4	4.9
Z5	Ain Smara-Mila	4.7	5.25	0.58	4.1	5.2

Tableau 3.2 Magnitudes maximales des sources sismiques de la région d'étude.

2.2.2 Fréquence et récurrence des séismes dans la région d'étude

La région de Constantine est une région à sismicité relativement faible à modérée. Les déformations géologiques d'âge quaternaire, même s'il n'y a aucun doute sur l'activité des failles, sont diffuses et difficilement quantifiables en terme cosismique. Il n'a pas été possible de trouver un endroit qui offre la possibilité de mener des investigations paléosismologiques. C'est pourquoi, la récurrence des séismes sera estimée sur la base des données de la sismicité historique. Dans la pratique de l'analyse de l'aléa sismique deux modèles de récurrence sont utilisés. Il s'agit du modèle de récurrence exponentiel pour les zones sources et le modèle caractéristique de Youngs et Coppersmith (1985) pour le cas des failles plus ou moins bien connues sur le double plan sismotectonique et paléosismologique. La figure 3.2 qui montre la

fréquence des différents séismes de différentes magnitudes indique que la sismicité de la région de Constantine est faible à modérée.

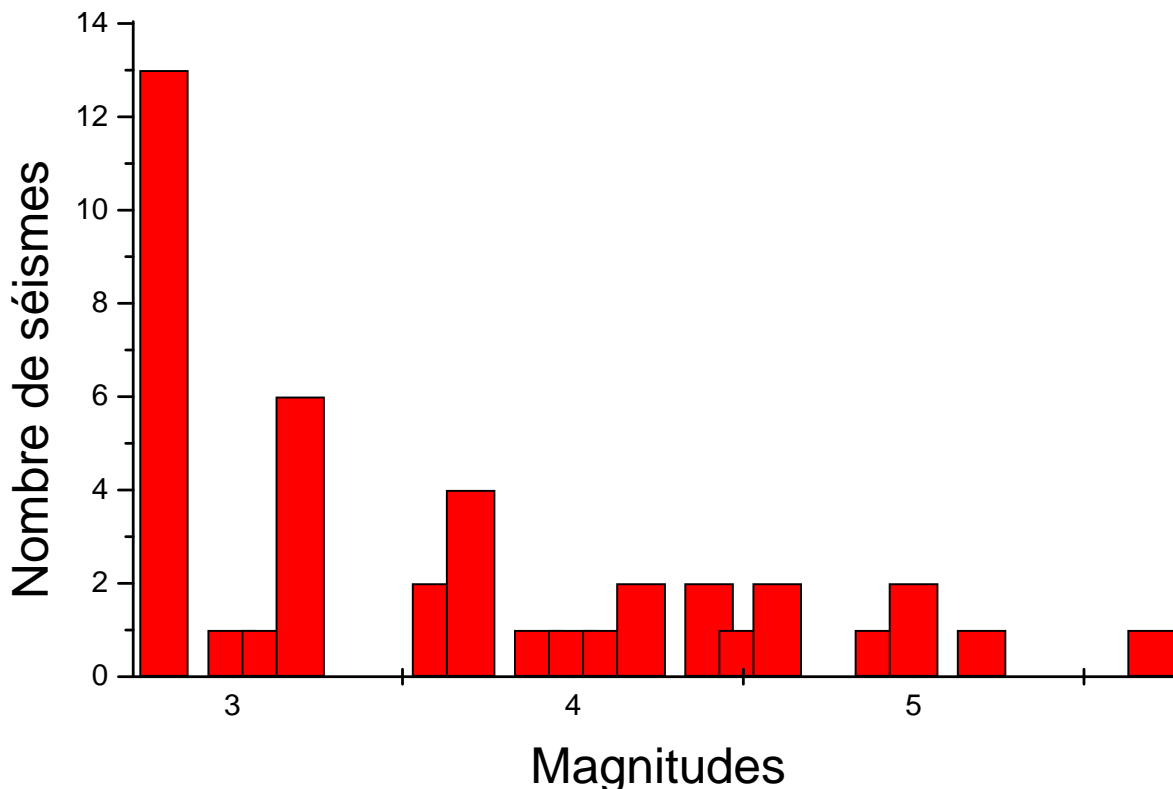


Figure 3.2 Histogramme de fréquence des séismes de différentes magnitudes dans le secteur d'étude.

2.2.3 La profondeur sismogéniques des zones sources

Les profondeurs hypocentrales disponibles pour les séismes de Constantine en particulier et de l'Algérie du Nord de façon générale montrent que 95 % d'entre eux ont eu lieu à des profondeurs de moins de 33 km et environ 60% d'entre eux se sont produits à des profondeurs de moins de 20 km (fig. 6.3) (Ouyed *et al.*, 1981; Benouar, 1994). Par ailleurs, les séismes destructeurs de ces dernières années, Constantine (1985), Chenoua (1989), Mascara (1994), Alger- Ain Bénien (1996) et Béni-Ouartilane (2000) ont eu lieu à des profondeurs d'environ 10 Km. Le séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980 de magnitude 7.3 s'est produit à une profondeur de moins de 10 km. On déduit de ces différentes informations que les séismes forts et modérés dans la région d'étude sont superficiels. Le caractère superficiel de ces séismes est en accord avec le contexte tectonique régional. En effet, les séismes superficiels sont liés aux zones de collision, alors que les séismes profonds et intermédiaires sont observés dans les zones de subduction.

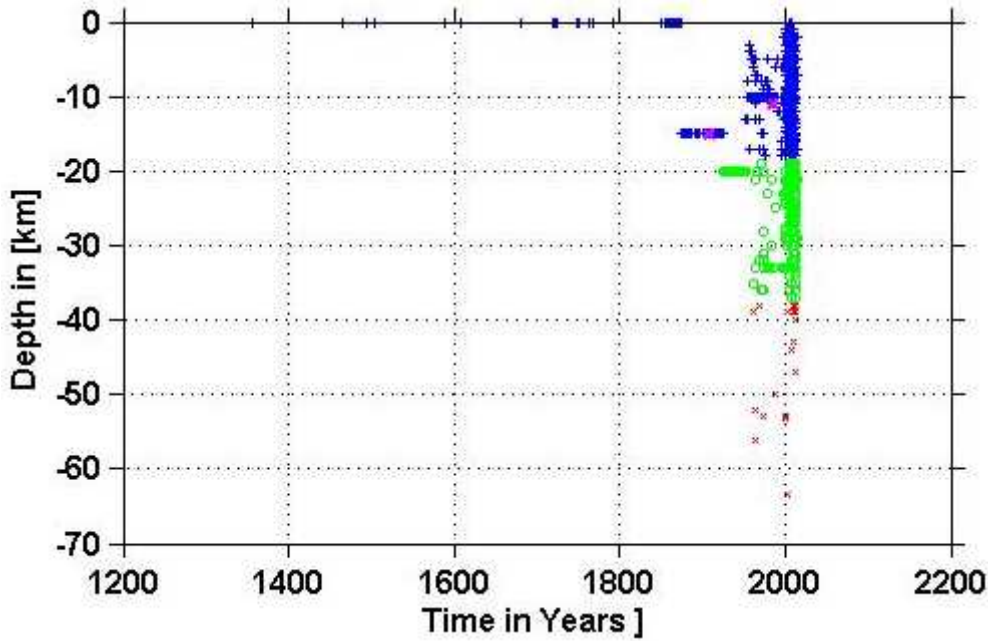


Figure 3.3 Profondeur des tremblements de terre au Nord-Est de l'Algérie.

2.2.4 Les paramètres de sismicité

Le calcul des paramètres de sismicité sera effectué en utilisant la procédure de Kijko et Sellevoll (1992). Cette nouvelle méthode se distingue des autres par la prise en considération de l'incertitude de magnitude ainsi que l'intégration de données sismique mixtes, des grands événements historiques et les catalogues récents Kijko *et al.*, (2003).

Code	Région		err	b	err b	M_0		err	(M)
Z1	Constantine	1.44	0.06	0.62	0.02	1.7	1.07	0.08	1.03
Z2	Sud Constantinois	2.64	0.26	1.15	0.11	2.2	3.95	0.71	3.92
Z3	Guelma	1.77	0.1	0.77	0.05	2.2	10.38	1.09	9.96
Z4	Nord Constantinois	2.2	0.06	0.96	0.02	1.8	3.02	0.15	3.0
Z5	Ain Smara-Mila	2.26	0.07	0.98	0.03	1.8	15.28	1.22	15.18

Tableau 3.3 Paramètres sismique des zones sources.

2.2.5 Estimations des temps de retour des magnitudes

La période de retour(ou le temps moyen de retour), est l'inverse du taux annuel moyen de sismicité. Il exprime l'intervalle moyen d'occurrence des séismes dans la région.

Dans notre cas le temps moyen de retour est l'inverse de l'équation (3.1), dont $M_{min}=2.5$ et $M_{max}=6.4$:

$$T = \frac{1}{\lambda_m} \tag{3.1}$$

$$T = \frac{1 - e^{-\beta(M_m - M_{min})}}{\lambda_{M_m} \cdot (e^{-\beta(M - M_{min})} - e^{-\beta(M_m - M_{min})})} \tag{3.2}$$

Etant donné que cette étude peut servir à l'avenir pour la construction d'un certain type d'ouvrages dans les zones sismiquement actives en Algérie, un effort a été effectué pour estimer les périodes de retour de magnitudes pour chaque zone source.

Les résultats des périodes de retour varient fortement d'une zone à l'autre. A titre d'exemple, une magnitude inférieure à ($M_s < 7.0$) a un temps de retour dans la zone 1 (Zone source de Constantine) qui varie entre 6.1 et 6029 ans ; Cependant dans la zone 2 (Sud Constantinois_Sigus-Temlouka) ce temps de retour prend des valeurs entre 29.6 et 424613,3.

➤ **Zone source de Constantine (Z1)**

M	LAMBDA	RETURN PERIOD	SD/+	SD/-	Pr T= 1	Pr T=50	Pr T=100	Pr T=475
3	1,63E-01	6,1	5,7	6,6	0,150757	0,999717	1	1
3,1	1,41E-01	7,1	6,6	7,6	0,131841	0,999149	0,999999	1
3,2	1,22E-01	8,2	7,6	8,8	0,115119	0,997791	0,999995	1
3,3	1,06E-01	9,5	8,8	10,2	0,100376	0,994953	0,999975	1
3,4	9,15E-02	10,9	10,2	11,8	0,087409	0,989677	0,999893	1
3,5	7,91E-02	12,6	11,8	13,7	0,076028	0,980816	0,999632	1
3,6	6,83E-02	14,6	13,6	15,8	0,066057	0,967188	0,998923	1
3,7	5,90E-02	16,9	15,8	18,3	0,057334	0,947773	0,997272	1
3,8	5,10E-02	19,6	18,2	21,2	0,049713	0,921886	0,993898	1
3,9	4,40E-02	22,7	21,1	24,6	0,043064	0,8893	0,987746	1
4	3,80E-02	26,3	24,5	28,5	0,037267	0,850278	0,977583	1
4,1	3,27E-02	30,5	28,4	33	0,032219	0,805527	0,96218	1
4,2	2,82E-02	35,4	33	38,3	0,027825	0,756094	0,94051	0,999999
4,3	2,43E-02	41,2	38,3	44,5	0,024004	0,703236	0,911931	0,99999
4,4	2,09E-02	47,8	44,5	51,7	0,020682	0,648284	0,876296	0,999951
4,5	1,80E-02	55,7	51,8	60,2	0,017796	0,592535	0,833972	0,999802
4,6	1,54E-02	64,9	60,4	70,1	0,015289	0,53716	0,785779	0,999337
4,7	1,32E-02	75,8	70,5	81,9	0,013114	0,483156	0,732872	0,998108
4,8	1,13E-02	88,6	82,4	95,7	0,011225	0,431319	0,676602	0,995309
4,9	9,63E-03	103,8	96,6	112,2	0,009587	0,382241	0,618374	0,989701
5	8,20E-03	122	113,5	131,8	0,008166	0,336327	0,559538	0,97965
5,1	6,96E-03	143,7	133,7	155,3	0,006933	0,293813	0,5013	0,963294
5,2	5,88E-03	170	158,2	183,7	0,005865	0,254799	0,444675	0,938821

5,3	4,95E-03	202	188	218,3	0,004938	0,219272	0,390464	0,904776
5,4	4,14E-03	241,3	224,5	260,8	0,004135	0,187138	0,339255	0,860312
5,5	3,45E-03	290,3	270,1	313,7	0,003439	0,158241	0,291441	0,805336
5,6	2,84E-03	352,1	327,6	380,5	0,002836	0,132385	0,247244	0,740518
5,7	2,32E-03	431,8	401,8	466,6	0,002313	0,109351	0,206744	0,667178
5,8	1,86E-03	537	499,7	580,3	0,00186	0,088909	0,169912	0,587106
5,9	1,47E-03	680,7	633,3	735,6	0,001468	0,070825	0,136634	0,502348
6	1,13E-03	886	824,4	957,5	0,001128	0,054874	0,106737	0,415005
6,1	8,34E-04	1199,2	1115,8	1296	0,000834	0,040838	0,080008	0,327065
6,2	5,79E-04	1728,4	1608,3	1868	0,000578	0,028514	0,056214	0,240288
6,3	3,57E-04	2798,1	2603,6	3024	0,000357	0,017712	0,03511	0,156142
6,4	1,66E-04	6029	5609,9	6515,8	0,000166	0,00826	0,016452	0,075771

Tableau 3.4 Temps de retour (années) de la magnitude pour la zone source 1.

Le temps moyen de retour varie en fonction de la magnitude d'une manière linéaire de M_{min} jusqu'à $M=6.4$. À partir de $M=6$ la pente de la courbe décroît progressivement jusqu'à M_{max} . Le temps moyen de retour d'un séisme de $M_s=5.9$, comme celui de 27-10-1985, est égal à 680,8 ans.

➤ Zone source Sud Constantinois_Sigus-Temlouka (Z2)

MAG	LAMBDA	RETURN PERIOD	SD/+	SD/-	PrT=1	PrT=50	PrT=100	PrT=475
3	3,38E-02	29,6	25,1	36	0,033253	0,815654	0,966017	1
3,1	2,60E-02	38,5	32,7	46,9	0,025625	0,726905	0,925419	0,999996
3,2	1,99E-02	50,2	42,6	61,2	0,019728	0,630744	0,86365	0,999922
3,3	1,53E-02	65,4	55,4	79,7	0,015178	0,534526	0,783334	0,9993
3,4	1,17E-02	85,2	72,2	103,8	0,01167	0,443979	0,69084	0,996212
3,5	9,01E-03	111	94,1	135,2	0,00897	0,362695	0,593843	0,986155
3,6	6,92E-03	144,6	122,6	176,2	0,006892	0,292327	0,4992	0,962554
3,7	5,31E-03	188,4	159,8	229,6	0,005294	0,233085	0,411842	0,91963
3,8	4,07E-03	245,5	208,2	299,2	0,004065	0,184268	0,334581	0,855555
3,9	3,13E-03	319,9	271,3	389,8	0,003121	0,144697	0,268457	0,773463
4	2,40E-03	416,9	353,5	508	0,002396	0,113025	0,213276	0,679996
4,1	1,84E-03	543,3	460,7	662,1	0,001839	0,08792	0,168111	0,582832
4,2	1,41E-03	708,2	600,5	862,9	0,001411	0,068169	0,131691	0,488667
4,3	1,08E-03	923,3	782,9	1125,1	0,001083	0,052718	0,102656	0,402202
4,4	8,31E-04	1203,9	1020,8	1467	0,00083	0,040684	0,079712	0,326036
4,5	6,37E-04	1570,3	1331,5	1913,5	0,000637	0,031343	0,061703	0,261049
4,6	4,88E-04	2048,3	1736,8	2496	0,000488	0,024111	0,047641	0,206944
4,7	3,74E-04	2673,9	2267,2	3258,3	0,000374	0,018523	0,036704	0,162741
4,8	2,86E-04	3491,9	2960,8	4255,1	0,000286	0,014212	0,028223	0,127146
4,9	2,19E-04	4565,7	3871,4	5563,6	0,000219	0,010891	0,021663	0,0988
5	1,67E-04	5972,1	5063,8	7277,3	0,000167	0,008333	0,016597	0,076418
5,1	1,28E-04	7834,2	6642,7	9546,5	0,000128	0,006365	0,01269	0,058861

5,2	9,73E-05	10281,2	8717,6	12528,3	0,000097	0,004852	0,009681	0,045159
5,3	7,39E-05	13522,7	11466,1	16478,3	0,000074	0,003689	0,007365	0,034505
5,4	5,61E-05	17840,9	15127,6	21740,3	0,000056	0,002796	0,005584	0,026247
5,5	4,22E-05	23721,4	20113,8	28906	0,000042	0,002109	0,004214	0,01986
5,6	3,16E-05	31687,6	26868,4	38613,3	0,000032	0,001582	0,003162	0,014929
5,7	2,36E-05	42461,3	36003,7	51741,8	0,000024	0,001177	0,002353	0,011128
5,8	1,74E-05	57380,2	48653,6	69921,4	0,000017	0,000866	0,001732	0,008199
5,9	1,25E-05	80115,7	67931,4	97626,1	0,000013	0,000628	0,001255	0,005946
6	8,95E-06	111740,3	94746,5	136162,7	0,000009	0,000444	0,000888	0,004212
6,1	6,12E-06	163312,8	138475,6	199007	0,000006	0,000304	0,000607	0,00288
6,2	4,00E-06	249772,5	211786,2	304363,6	0,000004	0,000195	0,000391	0,001855
6,3	2,36E-06	424613,3	360036,6	517418,2	0,000002	0,000113	0,000225	0,001069

Tableau 3.5 Temps de retour (années) de la magnitude pour la zone source 2.

Le temps moyen de retour varie en fonction de la magnitude d'une manière linéaire de M_{min} jusqu'à $M=6.3$. À partir de $M=6.1$ la pente de la courbe décroît progressivement jusqu'à M_{max} . Le temps moyen de retour d'un séisme de $M_s=5$ est égal à 5972,1 ans.

➤ **Zone source de Guelma (Z3)**

MAG	LAMBDA	RETURNPERIOD	SD/+	SD/-	PrT=1	PrT=50	PrT=100	PrT=475
3	8,72E-01	4,7	4,3	5,3	0,190314	0,999974	1	1
3,1	8,72E-01	5,7	5,1	6,3	0,161973	0,999855	1	1
3,2	8,72E-01	6,8	6,1	7,6	0,137463	0,999385	1	1
3,3	8,72E-01	8,1	7,3	9	0,116375	0,997942	0,999996	1
3,4	8,72E-01	9,7	8,7	10,8	0,098308	0,994339	0,999968	1
3,5	8,65E-02	11,6	10,5	12,9	0,082886	0,986782	0,999825	1
3,6	7,23E-02	13,8	12,5	15,5	0,06976	0,973101	0,999276	1
3,7	6,04E-02	16,6	15	18,5	0,058617	0,951213	0,99762	1
3,8	5,04E-02	19,8	17,9	22,2	0,049178	0,919655	0,993545	1
3,9	4,21E-02	23,8	21,5	26,6	0,041196	0,877961	0,985106	1
4	3,51E-02	28,5	25,8	31,9	0,034455	0,826773	0,969992	1
4,1	2,92E-02	34,3	31	38,3	0,028771	0,767686	0,94603	0,999999
4,2	2,43E-02	41,2	37,3	46	0,023983	0,702918	0,911743	0,99999
4,3	2,02E-02	49,6	44,9	55,4	0,019952	0,634938	0,86673	0,99993
4,4	1,67E-02	59,9	54,2	66,9	0,016562	0,566138	0,811764	0,999641
4,5	1,38E-02	72,4	65,5	80,9	0,013712	0,498601	0,748599	0,998582
4,6	1,14E-02	87,9	79,5	98,2	0,011318	0,43398	0,679622	0,995514
4,7	9,35E-03	106,9	96,8	119,5	0,009307	0,373464	0,607452	0,988224
4,8	7,65E-03	130,7	118,3	146,1	0,00762	0,317801	0,534605	0,973567
4,9	6,22E-03	160,7	145,4	179,6	0,006203	0,267371	0,463255	0,947953
5	5,03E-03	198,9	180	222,3	0,005015	0,222255	0,395113	0,908177
5,1	4,03E-03	248,4	224,8	277,6	0,004018	0,182319	0,331398	0,852244
5,2	3,19E-03	313,8	284	350,7	0,003181	0,147282	0,272872	0,779883

5,3	2,48E-03	402,7	364,4	450	0,00248	0,11677	0,219904	0,692601
5,4	1,89E-03	528	477,7	590	0,001892	0,090364	0,172562	0,59333
5,5	1,40E-03	713,9	646	797,8	0,0014	0,067631	0,130689	0,485858
5,6	9,87E-04	1013,6	917,1	1132,6	0,000986	0,048146	0,093974	0,374227
5,7	6,40E-04	1562,5	1413,8	1746,1	0,00064	0,031506	0,06202	0,262231
5,8	3,50E-04	2859,5	2587,4	3195,5	0,00035	0,017339	0,034378	0,153097
5,9	1,06E-04	9393,1	8499,5	10496,7	0,000106	0,005309	0,01059	0,049315

Tableau 3.6 Temps de retour (années) de la magnitude pour la zone source 3.

Le temps moyen de retour varie en fonction de la magnitude d'une manière linéaire de M_{min} jusqu' à $M=5.9$. À partir de $M=5.5$ la pente de la courbe décroît progressivement jusqu'à M_{max} . Le temps moyen de retour d'un séisme de $M_s=5.5$, est égal à 713.9ans.

➤ **Zone source Nord Constantinois (Z4)**

MAG	LAMBDA	RETURN PERIOD	SD/+	SD/-	PrT=1	PrT=50	PrT=100	PrT=475
3.0	0.208E+00	4.8	4.6	5.1	0.187442	0.999969	1	1
3.1	0.166E+00	6.0	5.7	6.4	0.152629	0.999747	1	1
3.2	0.132E+00	7.6	7.2	8.0	0.123676	0.998641	0.999998	1
3.3	0.105E+00	9.5	9.1	10.0	0.099777	0.994782	0.999973	1
3.4	0.836E-01	12.0	11.4	12.6	0.080168	0.984674	0.999765	1
3.5	0.663E-01	15.1	14.4	15.9	0.064156	0.963678	0.998681	1
3.6	0.525E-01	19.1	18.1	20.1	0.051132	0.927509	0.994745	1
3.7	0.414E-01	24.1	23.0	25.4	0.040571	0.873921	0.984104	1
3.8	0.326E-01	30.7	29.2	32.4	0.032028	0.803603	0.961428	1
3.9	0.255E-01	39.3	37.4	41.4	0.025132	0.719911	0.921550	0.999994
4.0	0.198E-01	50.6	48.1	53.3	0.019573	0.627815	0.861478	0.999916
4.1	0.152E-01	65.7	62.5	69.3	0.015099	0.532656	0.781590	0.999273
4.2	0.116E-01	86.5	82.3	91.1	0.011500	0.439180	0.685481	0.995890
4.3	0.865E-02	115.7	110.1	121.8	0.008609	0.351004	0.578804	0.983545
4.4	0.631E-02	158.5	150.9	167.0	0.006288	0.270489	0.467813	0.950019
4.5	0.443E-02	225.5	214.6	237.6	0.004425	0.198861	0.358176	0.878318
4.6	0.293E-02	340.8	324.3	359.1	0.002930	0.136457	0.254294	0.751861
4.7	0.173E-02	577.1	549.2	608.0	0.001731	0.082993	0.159098	0.560923
4.8	0.771E-03	1297.6	1234.8	1367.1	0.000770	0.037798	0.074166	0.306524

Tableau 3.7 Temps de retour (années) de la magnitude pour la zone source 4.

Le temps moyen de retour varie en fonction de la magnitude d'une manière linéaire de M_{min} jusqu'à $M=4.8$. À partir de $M=4.5$ la pente de la courbe décroît progressivement jusqu'à M_{max} . Le temps moyen de retour d'un séisme de $M_s=4.7$ est égal à 713.9ans.

➤ **Zone source de Ain Smara-Mila (Z5)**

MAG	LAMBDA	RETURNPERIOD	SD/+	SD/-	PrT=1	PrT=50	PrT=100	PrT=475
3.0	0.105E+00	9.5	8.8	10.3	0.099734	0.994770	0.999973	1
3.1	0.837E-01	12.0	11.1	13.0	0.080256	0.984747	0.999767	1
3.2	0.666E-01	15.0	13.9	16.3	0.064417	0.964181	0.998717	1
3.3	0.530E-01	18.9	17.5	20.5	0.051587	0.929227	0.994991	1
3.4	0.421E-01	23.8	22.0	25.8	0.041227	0.878162	0.985156	1
3.5	0.334E-01	29.9	27.7	32.5	0.032882	0.812083	0.964687	1
3.6	0.265E-01	37.7	34.9	41.0	0.026174	0.734492	0.929506	0.999997
3.7	0.210E-01	47.6	44.1	51.7	0.020789	0.650203	0.877642	0.999954
3.8	0.166E-01	60.2	55.8	65.4	0.016472	0.564157	0.810041	0.999625
3.9	0.131E-01	76.3	70.7	82.9	0.013015	0.480579	0.730202	0.998016
4.0	0.103E-01	97.1	89.9	105.5	0.010249	0.402561	0.643067	0.992505
4.1	0.807E-02	123.9	114.8	134.6	0.008037	0.332008	0.553786	0.978356
4.2	0.629E-02	159.0	147.3	172.8	0.006269	0.269801	0.466809	0.949570
4.3	0.487E-02	205.4	190.3	223.2	0.004856	0.216052	0.385425	0.900978
4.4	0.374E-02	267.7	248.0	290.9	0.003728	0.170354	0.311688	0.830379
4.5	0.283E-02	353.2	327.1	383.7	0.002827	0.132000	0.246576	0.739423
4.6	0.211E-02	473.9	439.0	514.9	0.002108	0.100139	0.190249	0.632998
4.7	0.154E-02	651.4	603.4	707.7	0.001534	0.073887	0.142314	0.517709
4.8	0.108E-02	928.6	860.2	1008.9	0.001076	0.052398	0.102051	0.400284
4.9	0.711E-03	1407.2	1303.5	1528.9	0.000710	0.034900	0.068583	0.286433
5.0	0.418E-03	2391.4	2215.1	2598.1	0.000418	0.020711	0.040994	0.180307
5.1	0.186E-03	5380.6	4984.1	5845.7	0.000186	0.009244	0.018402	0.084445

Tableau 3.8 Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 5.

Le temps moyen de retour varie en fonction de la magnitude d'une manière linéaire de M_{min} jusqu' à $M=5,1$. À partir de $M=4.8$ la pente de la courbe décroît progressivement jusqu'à M_{max} . Le temps moyen de retour d'un séisme de $M_s=4.8$ est égal à 928,6ans.

3 La relation d'atténuation

L'évaluation de l'aléa sismique au voisinage du site, auquel on quantifie le risque sismique, requiert la définition d'une relation d'atténuation du mouvement fort du sol (accélération, vitesse, déplacement, intensité...) à une distance donnée de la source, en fonction de la magnitude, intensité, distance focale... D'une autre manière, c'est de quantifier l'atténuation de l'énergie rayonnée de la source jusqu'au site.

Les lois d'atténuation de l'accélération avec la distance ne peuvent pas être déterminées de façon locale comme pour l'intensité, étant donné le manque d'enregistrements en Algérie. Il

faut donc utiliser une loi établie pour un pays (ou pour un groupe de pays) ayant une sismicité du même type que celle de l'Algérie. Afin de faire un choix, un certain nombre de lois ont été comparées. Elles ont été établies à partir de données de séismes s'étant produits en Europe et dans les régions adjacentes.

L'utilisation des lois d'atténuation doit se faire en prenant des précautions, notamment, du fait que différents auteurs n'utilisent pas nécessairement les mêmes définitions pour la magnitude (M_w , M_s , M_L , m_b à travers le monde et MJMA au Japon), pour la distance (focale, au plan de faille, à la projection de la faille en surface...etc.) et même pour le paramètre prédit (maximum des deux composantes, moyenne des maxima, composition vectorielle). Aussi, il convient de connaître la gamme de magnitudes et de distances de la base de données utilisées. Les lois d'atténuation ont généralement une dispersion importante, l'écart type logarithmique étant souvent de l'ordre de 0.3, c'est à dire que l'addition d'un écart type revient à doubler la valeur du paramètre.

3.1 Formule générale

L'équation d'atténuation calcule l'amplitude des mouvements en un site ponctuel d'un séisme caractérisé par sa magnitude et par sa distance au site. Comme les données de mouvements forts montrent en général une grande dispersion, les incertitudes sont explicitement intégrées dans la loi d'atténuation. La forme générale est la suivante :

$$I(\mathbf{a}, r) = f(M, r) + \varepsilon \quad (3.3)$$

Où

L'*amplitude* peut être une accélération maximale (**PGA** : **Peak Ground Acceleration**), une vitesse, un déplacement ou une réponse spectrale.

r: distance hypocentrale, épacentrale ou représente la distance horizontale la plus proche ou la distance inclinée à la surface de rupture.

ε : est une variable aléatoire, obéissante en général à une distribution normale de moyenne nulle et d'écart type σ_ε .

la forme générale de la fonction $f(M, r)$ est la suivante :

$$f(M, r) = C_1 + C_2 M + C_3 r + C_4 L(r) \quad (3.4)$$

Où

C_1, C_2, C_3 et C_4 sont des constantes calculées à partir des enregistrements réels.

En général les relations d'atténuation développées expliquent l'atténuation de l'accélération à la surface du sol. La relation d'atténuation qui donne l'accélération en fonction de la magnitude et de la distance hypocentrale a la forme suivante (Ambraseys *et al.*, 1996) :

$$l_i(P, A) = C_1 + C_2 M + C_3 r + C_4 l_i(r) + \sigma P \quad (3.5)$$

Avec

$$r = \sqrt{d^2 + h_0^2}$$

Où r est la distance épacentrale et h_0 est une constante.

3.2 Lois d'atténuation usuellement utilisées en Algérie

Les lois d'atténuation constituent un élément important dans l'analyse de l'aléa sismique. En ce qui concerne l'Algérie, pour longtemps, des lois d'atténuations développées dans d'autres régions du monde ont été utilisées.

Les lois d'atténuation du mouvement du sol décrivent la variation du pic d'accélération du sol à des périodes de vibration spécifiques de structures et le rapport d'impédance avec la magnitude du séisme et la distance entre la source et le site en question. Les mouvements forts du sol produits par les tremblements de terres sont influencés par les caractéristiques de la source du séisme, du trajet de propagation des ondes, et de la géologie locale du site. En conséquence, des lois d'atténuation typiques sont développées pour des environnements tectoniques spécifiques. N'ayant pas accès aux données des enregistrements de tremblements de terres enregistrés en Algérie, des relations d'atténuation empiriques développées sur la base d'analyse statistique des données de séismes enregistrés dans le monde sur des sites ayant un environnement tectonique similaire, ont été utilisées. Les relations développées par Sadigh *et al.*, (1986, 1993) et par Ambraseys et Bommer (1991) ont été utilisées dans cette étude. Ces relations sont appropriées pour les conditions en surface correspondant à des sites rocheux.

Les similarités des caractéristiques des environnements tectoniques et la propagation générale des ondes entre la Californie et l'Algérie sont jugées pour être assez proches pour justifier l'utilisation de lois d'atténuation empiriques basées essentiellement sur les données de

mouvement fort de la Californie. Ces lois d'atténuation ont été développées par Sadigh *et al.* (1993) et sont basées sur des études menées pour «The Diablo Canyon Nuclear Power Plant» (Sadigh *et al.*, 1989), qui ont été mises à jour pour introduire les données du séisme de Loma Pietra, Californie de 1989. Ces études sont le résultat d'évaluations d'enregistrements empiriques des mouvements forts du sol dans les conditions d'un site rocheux et ont été le sujet d'une étude scientifique durant «The U.S Nuclear Regulatory commission's review of the Diablo Canyon Power Plant ». La distance mesurée utilisée dans l'analyse de l'aléa sismique est la distance la plus proche de la surface de rupture pour un séisme donné localisé en un point quelconque sur le plan de la faille. La loi développée par Ambraseys et Bommer (1991) basée sur les enregistrements de mouvements forts en Europe a été aussi utilisée dans cette étude. La plupart des enregistrements européens sont dans la région méditerranéenne. La forme de ces lois ne diffère pas de façon significative de celles développées par Joyner et Boore (1982), rendant leur utilisation dans le code de l'aléa sismique possible. Leur similitude inclue la formulation de coefficients et de termes et l'utilisation d'une distance minimale à la surface de projection de la surface de rupture. Cependant, le terme de la magnitude de la loi de Joyner et Boore (1982) est centré sur les événements de magnitude 6.0, ainsi le terme de la magnitude a été remplacé par $M = 6.0$ dans la loi d'Ambraseys et Bommer (1991). Ambraseys et Bommer (1991) ont aussi utilisé la magnitude des ondes de surface.

Pour cette analyse, il a été assumé que la magnitude des ondes de surface est équivalente à la magnitude du moment dans l'intervalle de magnitude auquel on s'intéresse dans l'analyse de l'aléa ($5 \leq M \leq 7.5$).

La mesure de la distance utilisée dans l'analyse de l'aléa pour cette loi est la distance la plus proche de la surface de projection de la surface de rupture.

Pour l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique, les deux lois d'atténuation sont données égales à un poids de 0.5. Cette égalité de poids est basée sur le fait que la base des données européennes est dérivée de l'environnement tectonique aux alentours de l'Algérie et en faisant des comparaisons avec les données de l'Amérique du Nord, on trouve que la base des données européennes converge fortement vers les valeurs les plus petites de magnitude et de pic d'accélération (Ambraseys et Bommer, 1991). Ainsi l'extrapolation des données à un intervalle de grandes magnitudes peut être moins fiable.

Les coefficients des deux lois d'atténuation utilisées dans cette étude du pic d'accélération horizontale du sol sont donnés ci-dessous. La loi de Sadigh *et al.*, (1993) est pour les sites rocheux. La loi comporte aussi un terme pour la nature de la faille indiqué par F_T , avec $F_T = 1$

pour une faille inverse et $F_T = 0$ pour un décrochement et une faille normale. La loi de Ambraseys et Bommer (1991) ne comporte pas de terme qui représente l'influence de la géologie du site et comporte les sites de type rocheux et de type sol.

✓ Sadigh *et al.*, (1993)

$$L_i(P) = -0.6 + 1.0 M - 2.1 L_i(R + 3.6 e^{0.2M}) + 0.1 F_T \quad (3.6)$$

Pour $M \leq 6$

$$L_i(P) = -1.2 + 1.1 M - 2.1 L_i(R + 0.6 e^{0.5M}) + 0.1 F \quad (3.7)$$

Pour $M > 6$

$$\text{Pour } M \leq 7.124 \quad = 1.39 - 0.14 M$$

$$\text{Pour } M > 7.124 \quad = 0.38 \text{ OÙ}$$

R est la distance à la rupture, M est la magnitude moment, PGA est le pic d'accélération du sol en fonction de g et σ est l'erreur standard en $\ln(PGA)$.

Elle est développée sur la base des données de mouvements forts enregistrés sur un site rocheux en Californie tels que ceux du séisme de Loma Prieta de 1989.

✓ Ambraseys et Bommer, (1991)

Elle a été dérivée à partir de 525 enregistrements accélérométriques obtenus principalement de la roche meuble et le sol, provenant de 219 séismes superficiels comprenant les données méditerranéennes et quelques données Algériennes.

$$L_i(a_h) = -0.8 + 0.2 (M_s) - L_i(r) - 0.0 (r) \dot{E} 0.2 \quad (3.8)$$

Avec

$$r = (r^2 + 6^2)^{1/2}, \quad \sigma = 0.28$$

Où

r est la distance à la surface de projection de la rupture et σ est l'erreur standard en $\log(PGA)$.

✓ Joyner & Boore, (1981)

$$L_i(a) = -1.0 + 0.2 (M) - L_i(r) - 0.0 (r) \dot{E} 0.2 \quad (3.9)$$

Cette loi est développée pour l'Ouest des USA, à partir de 123 enregistrements de mouvements forts obtenus au rocher durant 23 séismes superficiels.

✓ Benouar, (1994)

$$I = 6.2 + 1.4 \log s - 0.0 (R) + -5.2 \log (R) - 0.2 \quad (3.1)$$

Elle est obtenue à partir des données de l'intensité MSK pour le Nord Algérien par l'utilisation de 91 paires de (I_i, D_i) provenant de 22 événements sismiques, où $R = (D^2 + (6.82)^2)^{1/2}$. Les données de la sismicité historique ont été préalablement homogénéisées, compilées et complétées.

✓ Ambraseys, (1995)

$$\log_{10}(A) = -1.0 + 0.2 M_s - 1.0 \log_{10}(h) - 0.0 h \quad (3.1)$$

Avec

$$\sigma = 0.2 \quad 4 \quad M_s \quad 7.3 \quad 1 \quad h \quad 3 \quad k$$

La loi a été établie à partir de 1667 enregistrements triaxiaux de 865 séismes de toutes magnitudes et profondeurs enregistrés en Europe et au Moyen-Orient dans le domaine crustal (tout type de sols).

✓ Ambraseys et al., (1996)

$$\log_{10}(A) = -1.4 + 0.2 M_s - 0.9 \sqrt{d_s^2 + 3.5^2} \quad (3.1)$$

La loi a été établie à partir de 422 enregistrements triaxiaux de 157 séismes de toutes magnitudes et profondeurs enregistrés en Europe et dans les régions adjacentes. Elle est très utile surtout en absence d'une relation d'atténuation régionale.

$$a(m/S^2) = 0.3 e^{(0.3)} [D^{0.3} + 1.6]^{-1.5} - 0.0 \quad (3.13)$$

Une banque de données accélérométriques a été constituée à partir des enregistrements du réseau national d'accélérographes. Le premier instrument de ce réseau a été installé en 1980 suite au séisme de Chlef (ex: EL Asnam) de 1980. Depuis, plusieurs enregistrements ont été faits à la suite des séismes de Constantine (1985), de Mascara (1994), et d'Alger-Ain Benian (1996) (Laouami, 1998a). Cette loi d'atténuation est développée à partir de cette banque de données (Laouami, 1998b).

La banque de données accélérométriques est obtenue à partir d'une analyse détaillée effectuée sur l'ensemble des signaux enregistrés par le réseau national d'accélérographes géré par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). Au nombre de 71, ces signaux incluent les composantes Est-Ouest, Nord-Sud et verticales.

Dans le présent travail deux lois d'atténuation ont été utilisées, à savoir celles de Ambraseys and Bommer, (1991) et celle de Sadigh *et al.*, (1993). La figure 6.4 montre la comparaison entre la courbe d'atténuation empirique correspondant à la moyenne des composantes Est-Ouest et Nord-Sud des accélérations déterminées pour le nord de l'Algérie et les courbes d'atténuation empiriques obtenues à travers le monde (Sadigh *et al.*, 1993; Ambraseys et Bommer, 1991; Ambraseys, 1995; Ambraseys et al., 1996). Il ressort des courbes tracées une similitude satisfaisante entre la loi Algérienne (Laouami, 1998b) et les lois de Sadigh *et al.*, 1993 et celle d'Ambraseys et Bommer, 1991, notamment pour les distances de moins de 40 km de la source.

Cela justifie l'utilisation de ces deux lois, dans le présent travail d'évaluation de l'aléa sismique dans la région de Constantine, car la principale zone urbaine où il est demandé de calculer l'aléa sismique, en l'occurrence l'agglomération de Constantine, est située à moins de 50 km des principales sources sismiques de la région.

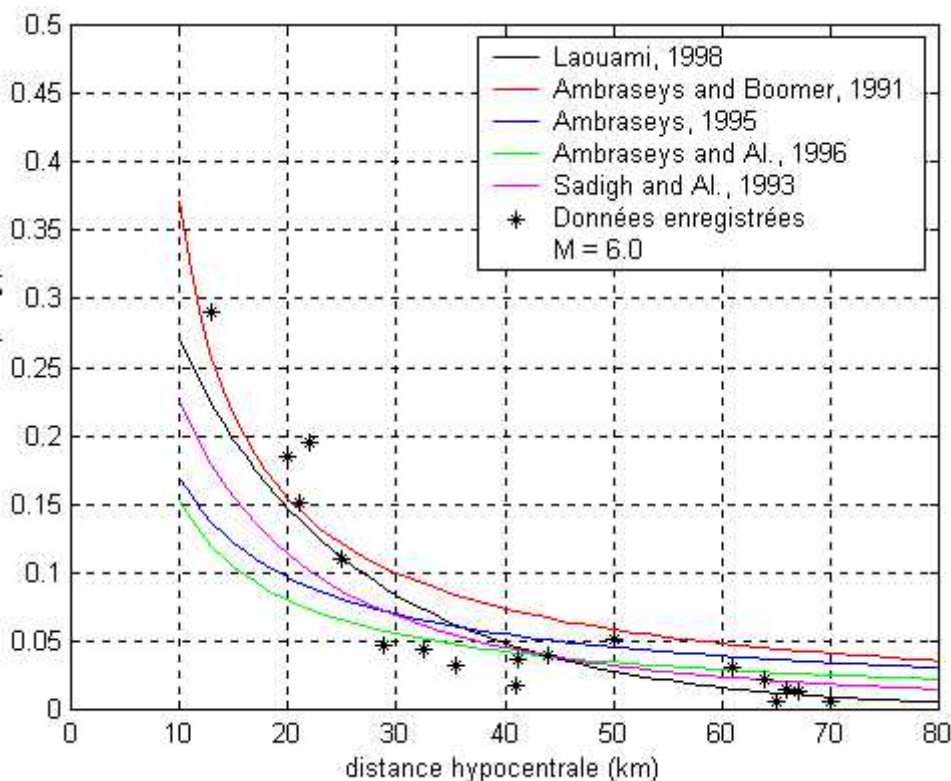


Figure 6.4 Comparaison entre les lois d'atténuation empiriques, déterminées pour le Nord de l'Algérie, et les lois de Sadigh et al.,1993 de Ambraseys et Bommer, 1991 de Ambraseys, 1995 et de Ambraseys et al.,1996, pour la magnitude $M = 6,0$.

3.3 Loi d'atténuation préliminaire pour le centre de l'Algérie

L'étude expérimentale est basée sur la banque de données de mouvements forts (Laouami, 1998). Deux séismes sont considérés, à savoir, Chenoua (1989) et Ain-Benian (1996). L'intérêt du choix de ces séismes réside dans le fait qu'ils présentent une magnitude presque égale à six (entre 5,7 et 6,0), d'où l'homogénéité des enregistrements par rapport à ce paramètre, et une gamme de distances qui est située dans un intervalle propice au calcul des lois d'atténuation (20 - 70 km).

Deux étapes de calcul sont considérées. La première consiste à calculer les lois d'atténuation expérimentales. La deuxième consiste à calculer les lois d'atténuation empiriques établies par ajustement au sens des moindres carrés des résultats expérimentaux.

Sur la base des résultats expérimentaux, et partants de la relation empirique donnée par l'équation 3.14, une étude d'ajustement, au sens des moindres carrés, a été effectuée. L'expression de la loi d'atténuation empirique considérée est donnée par :

$$a(m/s^2) = c e^{(\alpha M)} [D^k + a]^{-\beta-\gamma} \quad (3.1)$$

Avec

$D = (R^2 + d^2)^{1/2}$ est la distance hypocentrale et c , k , a , et γ étant des coefficients numériques à déterminer en minimisant, par la méthode des moindres carrés, l'erreur quadratique entre la courbe expérimentale et la loi empirique.

Le calcul d'ajustement par la méthode des moindres carrés est fait, pour les différents cas d'accélération. L'amplitude du mouvement de sol est considérée comme une variable aléatoire qui suit la loi log normale, et dont la valeur moyenne est dépendante de la magnitude du séisme et de la distance source - site. Cette dernière est spécifiée par la relation d'atténuation.

3.4 Lois d'atténuation usuellement utilisées dans CRISIS

Dans le programme du calcul de l'aléa sismique probabiliste CRISIS, il existe des lois prédéfinies intégrées dans la base de ce programme. Parmi les lois d'atténuation qui existent dans logiciel CRISIS sont: Abrahamson et Silva, (1997), SEA99, (1997), García *et al.*, (2005) et Youngs *et al.*, (1997). Toutes ces lois ne sont pas adaptées à notre région d'étude. A cet effet, nous introduisons notre loi spécifique à notre région d'étude, c'est-à-dire un tableau qui donne la variation des paramètres de mouvement en fonction des distances et des magnitudes. Pour le format d'écriture nous avons créé un programme en c++.

3.5 L'intérêt d'évaluer l'aléa sismique par la magnitude M_s

Dans l'étape d'homogénéisation du catalogue, nous avons choisi de travailler avec les magnitudes des ondes de surface M_s . Dans ce qui suit nous donnons les raisons :

Les séismes superficiels produisent autant d'ondes de surface que les séismes profonds, cela veut dire, qu'une partie de l'énergie des ondes de volume peut être convertie en ondes de surface. Ces dernières sont contrôlées par la profondeur et l'hétérogénéité du milieu traversé, alors qu'une autre partie de l'énergie des ondes de volumes est dissipée lors de leur propagation en traversant des profondeurs importantes, pour arriver aux terrains superficiels (les terrains de fondations), avec une énergie inférieure à celle qui existe au foyer sismique.

Pour le cas des séismes superficiels, l'arrivée en surface des ondes de volume est plus importante et donne, par conséquent, l'occasion à une grande partie de leur énergie de se convertir en des ondes de surface, car la propagation à partir du foyer ne traverse pas de grandes profondeurs.

La comparaison entre l'atténuation géométrique des ondes de surface et des ondes de volume, a montré que les ondes de surface ont tendance à se propager plus loin que les ondes de volume (décroissance en $1/\bar{r}$, au lieu de $1/r$ pour les ondes de volume).

Pour cette raison, au vu du contexte de la sismicité superficielle Algérienne, il est recommandée d'utiliser, pour le calcul de l'aléa sismique probabiliste et déterministe, les magnitudes des ondes de surface M_s , car avec leur introduction dans les lois d'atténuation pour calculer les paramètres de mouvement de sol, il y a une bonne quantification de la perturbation sismique qui se propage à des distances loin des sources sismiques.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentée l'intérêt de zonage et la loi d'atténuation dans l'évaluation des paramètres de mouvement de sol, comme nous avons présenté quelques lois dans le but des sélectionner parmi elles celles qui sont établies dans un contexte tectonique, sismique et géologique semblable à notre cas d'étude du Nord-Est de l'Algérie.

Le zonage développé dans cette étude dans la région de Constantine, est un nouveau zonage. La méthodologie qui a été mise en place a consisté à établir dans un premier temps plusieurs zonages basés sur des critères différents, puis dans un second temps à fusionner ces zonages pour obtenir le zonage probabiliste. Les zonages existants, établis pour des estimations déterministes probabilistes de l'aléa, ont servi de support. Dans un zonage à viser probabiliste, la répartition de la sismicité devient un critère important.

Les données néotectoniques, sismologiques, sismotectoniques et urbaines obtenues dans la région de Constantine, dans le cadre de cette étude, ont été synthétisées et ont permis de définir les sources sismiques pour les séismes futurs de la région du Constantinois. Cinq zones sources ont été définies.

Pour le calcul des probabilités de dépassement, en utilisant une loi d'atténuation sélectionnée en fonction des distances épacentrales et des magnitudes, nous avons préféré d'utiliser le M_s , dont nous avons montré l'intérêt pour évaluer l'aléa sismique.

5 Bibliographie

- Abrahamson, N.A and Silva, W., 1997. Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, Seismological Research Letters, vol 68, num 1, pp 94-127).*
- Ambraseys, N.N. and Bommer, J.J., 1991. The attenuation of ground accelerations in Europe, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 20, 1179-1202.*
- Ambraseys, N.N., 1995. The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, Earth. Eng. Structur. Dyn., 24, 467-490.*
- Ambraseys, N.N., Simpson, K. A. and Bommer, J. J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe, Earth. Eng. Struct. Dyn., 25 (4), 371- 400.*
- Aoudia, A., Vaccari, F., Suhadolc, P., Meghraoui, M., 2000. Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. J. Of seismology. 4, 79-98.*

- Benouar, D., 1993.** *The seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century, PhD-Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Univ. London, 712 pp.*
- Benouar, D., 1994.** *Magnitude-intensity and intensity-attenuation relationships for Atlasregion and Algerian earthquakes. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 23, 717-727.*
- Bonilla, M.G., Mark, R.F. & Lienkaemper, J.J., 1984.** *Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement: BSSA, 74, 2379-2411.*
- Bounif, M.A., Haessler, H., and Meghraoui, M., 1987.** *The Constantine earthquake of October 27, 1985: Surface ruptures and aftershock study. Earth and planetary science letters. 85, 451-460.*
- García, D., Singh, S.K., Herráiz, M., Ordaz, M and Pacheco, J., 2005.** *Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 6, pp. 2272–2282.*
- Hamdache, M., 1998.** *Seismic Hazard Assessment for the Main Seismogenic Zones in North Algeria. Pure appl. geophys. 152 (1998) 281 – 314.*
- Harbi, A., Benouar, D., Benhallou, H., 2003.** *Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria Part I: Review of historical seismicity. Journal of Seismology, January, 1; 7: 115-136.*
- Joyner, W. B & Boore, D.M., 1981.** *Prediction of earthquake response spectra: US geological survey, open file report 82- 997, 16p.*
- Kijko, A., Retief, S.J.P., Graham, G., 2003.** *Seismic Hazard and Risk Assessment for Tulbagh, South Africa : Part II – Assessment of Seismic Hazard Risk. Natural Hazards 30 : P25–41.*
- Kijko, A., Sellevoll, M.A., 1992.** *Estimation of earthquake parameters from incomplete data files, Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity. Bull. Seismol. Soc. Am. 82, 120-134.*
- Laouami, N., 1998a.** *Etude expérimentale sur l'atténuation du mouvement sismique. Elaboration de lois d'atténuation empiriques pour les régions de l'Algérie du Nord. Rapport interne CGS, pp. 55.*
- Laouami, N., 1998b.** *Banque de données des mouvements forts.*

- Meghraoui, M., 1988.** *Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie, tectonique active, paléosismologie, et synthèse sismotectonique, thèse de doctorat, Univ. Paris-Sud Orsay, 356 pp.*
- Ouyed, M., Meghraoui, M., Cisternas, A., Deschamps, A., Dorel, J., Frechet, J., Gaulon, R., Hatzfeld, D., Philip, H., 1981.** *Seismotectonics of the El Asnam earthquake: Nature, 292,26-31.*
- Sadigh, K., Chang C.Y., Abrahamson N.A., Chiou S.J and Power, M.S., 1993.** *Specification of long period ground motion. Updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factors for near fault effects, Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, 11–12 March, San Francisco, CA, pp. 59–70.*
- Sadigh, K., Chang, C.Y., Makdisi, F and Egan, J.A., 1989.** *Attenuation relationships for horizontal peak ground acceleration and response spectral acceleration for rock sites (abs.), Seism. Res. Lett., 60, 19.*
- Sadigh, K., Egan, J.A and Youngs, R.R., 1986.** *Specification of ground motion for seismic design of long period structures (abs.), Earthquake Notes, 57, n. 1, 13. Relationships printed in W.B.*
- SEA99- Spudich, P., Joyner, W. B., Lindh, A. G.D., Boore, M., Margaris, B. M and Fletcher, J. B., 1999.** *A Revised Ground Motion Prediction Relation for Use in Extensional Tectonic Regimes, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 5, pp. 1156-1170.*
- Slemmon.,1982.** *Determination of design earthquake magnitude for microzonation: Proceedings , 3rd International Earthquake Microzonation conference, 1, 119-130.*
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J.1994,** *Updated empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. BSSA, 84, 974-1002.*
- Wyss, M.,1979.** *Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions: Geology, 7, 336-340.*
- Youngs, R.R. and Coppersmith, K.J., 1985.** *Implication of fault slip rates and earthquakes recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. BSSA, 75, 939-964.*
- Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J and Humphrey, J.R., 1997.** *Strong Motion Attenuation Relations for Subduction Zone Earthquakes, Seismological Research Letters, Vo. 68, No. 1, pp-58-73.*

CHAPITRE 4.

**Évaluation probabiliste du aléa sismique
dans la région de Constantine, au nord-
est de l'Algérie**

Chapitre 4.

Évaluation probabiliste du aléa sismique dans la région de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Abstract.....	106
1 Introduction.....	106
2 Overview of the Constantine region.....	108
2.1 Description of the study area.....	108
2.2 Catalogue seismicity of the region.....	108
2.3 Geology and seismotectonics of the region.....	108
2.4 Identification of seismic sources.....	109
2.4.1 The Constantine zone (Z1).....	110
2.4.2 The southern Constantine zone (Sigus-Temlouka) (Z2).....	110
2.4.3 The Guelma zone (Z3).....	110
2.4.4 The northern Constantine zone (Z4).....	110
2.4.5 The Ain Smara-Mila zone (Z5).....	110
3 Probabilistic seismic hazard and catalog of sismicity analysis.....	110
4 Catalogue data preparation.....	111
4.1 Earthquake catalogue homogenization based on the M_s scale.....	111
4.2 Declustering the earthquake catalogue.....	112
4.3 Completeness period.....	113
4.3.1 Estimations based on the cumulative number of earthquakes.....	113
4.3.2 The Stepp method.....	113
4.4 b-value analysis.....	113
5 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).....	115
5.1 Magnitude return time calculations.....	116
5.2 Determination seismicity parameters.....	116
5.2.1 Determination of λ and b values.....	116

5.2.2 Maximum earthquake M_{max} estimation.....	117
5.3 Ground motion attenuation.....	117
5.4 Computing seismic hazards.....	120
5.5 PSHA results and discussion.....	120
6 Conclusions.....	122
7 References.....	123

Chapitre 4.

Probabilistic seismic hazard assessment in the Constantine region, Northeast of Algeria

Ce chapitre est constitué d'une publication scientifique internationale représentant la première partie de la Thèse portant sur l'évaluation du risque sismique par la méthode probabiliste dans la région de Constantine, Nord-Est de l'Algérie. Cet article a été publié à la revue scientifique « Arabian Journal of Geoscience-DOI 10.1007/s12517-017-2876-5» au début de l'année 2017. Au vu de l'avis de plusieurs reviewers ainsi que des lecteurs, cet article a eu une grande valeur scientifique, par son apport dans le domaine du risque sismique dans la région d'étude. L'objectif de cet article est d'analyser l'activité sismique et le traitement statistique du catalogue de sismicité de la région du Constantinois entre 1357 et 2014, en adoptant un nouveau zonage basé sur la sismicité, le mécanisme au foyer, la tectonique puis l'identification des zones sismogènes avec l'évaluation de leurs potentiels destructeur à moyen et long terme et cibler les grands centres urbains. Notre recherche est une contribution à l'amélioration de la gestion du risque sismique en évaluant l'aléa sismique dans la région du constantinois. De nouvelles cartes d'aléa sont produites pour la région Constantinoise à plusieurs périodes de retours et spectrales et comparées aux zonages existants en Algérie. Pour réaliser et visualiser la modélisation de l'input Sismique dans les zones urbaines, l'évaluation de l'aléa sismique et l'établissement d'un Catalogue de sismicité Nord-Est Algérien, des graphes et des cartes ont été conçus à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) avec le code Z-MAP version 6 et le logiciel CRISIS version 2007.



Probabilistic seismic hazard assessment in the Constantine region, Northeast of Algeria

Hamidatou Mouloud^{1,2} · Sbartaï Badreddine^{3,4}

Received: 14 March 2016 / Accepted: 26 January 2017
 © Saudi Society for Geosciences 2017

Abstract This paper presents a seismic hazard evaluation and develops an earthquake catalogue for the Constantine region over the period from 1357 to 2014. The study contributes to the improvement of seismic risk management by evaluating the seismic hazards in Northeast Algeria. A regional seismicity analysis was conducted based on reliable earthquake data obtained from various agencies (CRAAG, IGN, USGS and ISC). All magnitudes (M_l , m_b) and intensities (I_0 , I_{MMB} , I_{MSK} and I_{EMS}) were converted to M_s magnitudes using the appropriate relationships. Earthquake hazard maps were created for the Constantine region. These maps were estimated in terms of spectral acceleration (SA) at periods of 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.5 and 2.0 s. Five seismogenic zones are proposed. This new method differs from the conventional method because it incorporates earthquake magnitude uncertainty and mixed datasets containing large historical events and recent data. The method can be used to estimate the b value of the Gutenberg-Richter relationship, annual activity rate $\lambda(M)$ of an event and maximum possible magnitude M_{max} using incomplete and heterogeneous data files. In addition, an earthquake is considered a Poisson with an annual activity rate λ and with a doubly truncated exponential earthquake magnitude distribution. Map of

seismic hazard and an earthquake catalogue, graphs and maps were created using geographic information systems (GIS), the Z-map code version 6 and Crisis software 2012.

Keywords Seismic hazard · Seismicity · Earthquake catalogue · Constantine · PGA · b value

Introduction

Natural hazards have garnered significant research interest across the globe. Earthquakes are the deadliest of these natural disasters, affecting more than 80 countries and causing over 1.6 million deaths each year. Approximately 20 earthquakes with magnitudes greater than 7 are recorded worldwide each. Algeria is subject to a seismic hazard because Northeast Algeria is located at the convergent boundary of the African and Eurasian tectonic plates. This boundary is complex and poorly defined (McKenzie 1972; Philip 1987). A 100–150-km band of deformed Quaternary and Neogene deposits has formed in northern Algeria near the Tell chain (Philip and Thomas 1977; Philip and Meghraoui 1983; Thomas 1985). The band is expanding by approximately 4–6 mm/year based on paleoseismological data and source mechanism analyses (Meghraoui et al. 1988; DeMets et al. 1990). Earthquake data were used to define a concentrated epicentre area, which spans the coastal region from Annaba to Jijel and from the Basin Constantine to Guelma (Fig. 1). This seismoactive area defines the collision zone between the tectonic plates (Meghraoui et al. 1988). The seismic activity is concentrated in specific portions of Northeast Algeria, such as the Constantine region (including Constantine, Mila, Guelma, Setif, Bejaia, Skikda and Jijel). This area is purportedly the most seismically active zone in Northeast Algeria. At least three recent earthquakes with maximum intensities of $I_0 = \text{VII–IX}$ on the MSK scale have

✉ Hamidatou Mouloud
 m.hamidatou@univ-skikda.dz; m.hamidatou@craag.dz

¹ Department of Civil Engineering, University of August 20, 1955-Skikda, P. O. Box 26, 21000 Skikda, Algeria

² Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, BP. 63, Bouzareah, Alger, Algeria

³ Department of Civil Engineering, University of Badji Mokhtar-Annaba, P. O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria

⁴ LMGHU Laboratory, 20 Août 1955-Skikda University, Skikda, Algeria

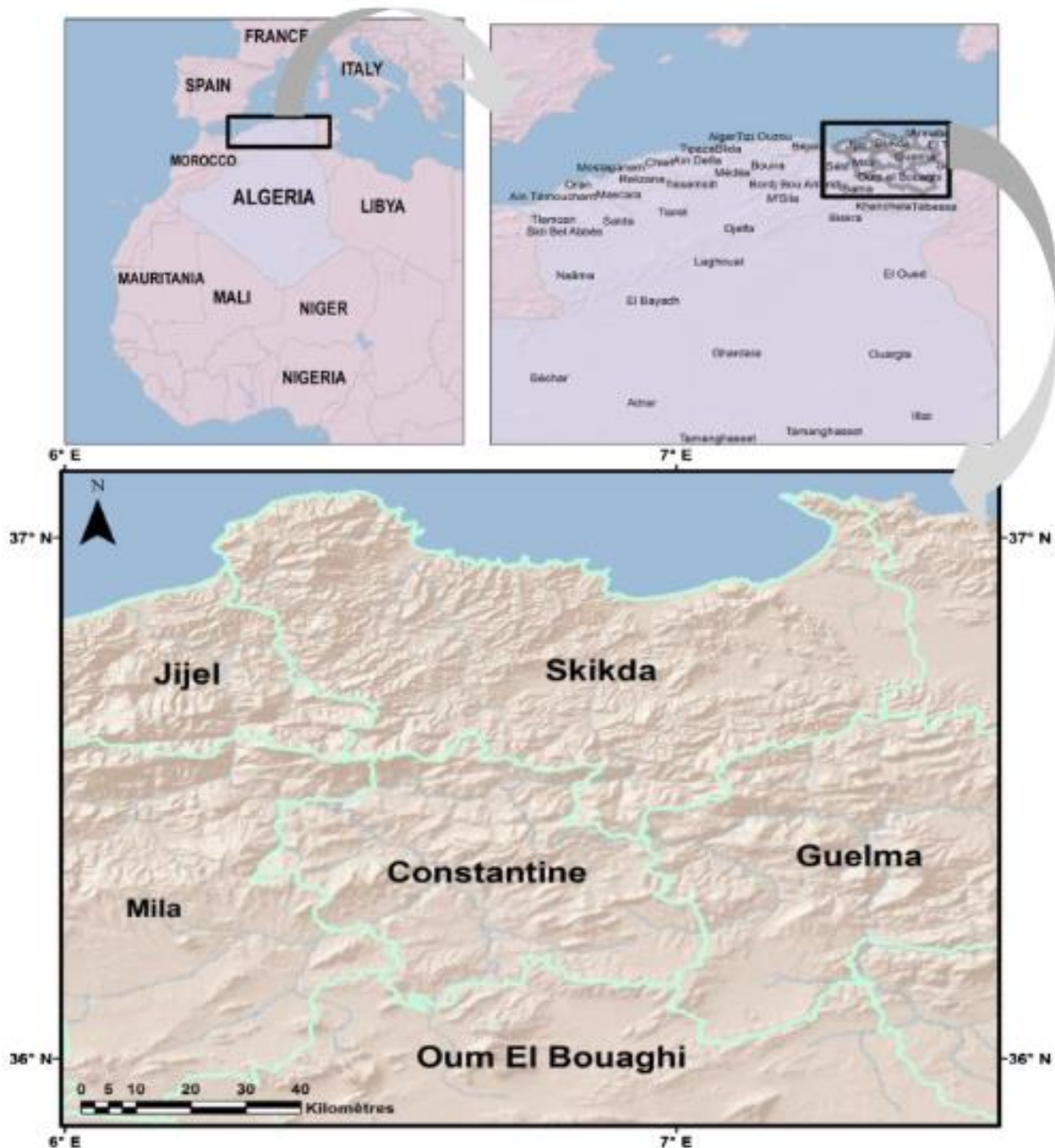


Fig. 1 Map and location of Constantine region, Northeast of Algeria

occurred in the area (Bounif et al. 1987; Harbi et al. 2010), including (M_s 5.2), (5.3) and (5.9) events on August 4, 1908, August 6, 1947, and October 27, 1985, respectively (Ousadou et al. 2013). Seismic hazard assessment requires reliable and complete seismicity data. Numerous studies have reviewed the available Algerian seismic datasets (Mokrane et al. 1994; Benouar 1993; Harbi 2008). This study compiles an earthquake catalogue for the Constantine region [34°N–38°N, 4°E–8°E].

Detailed urban area micro-zoning characteristics are needed to evaluate and reduce seismic hazards in the Constantine region. Various parameters were analysed in urban areas, including seismicity, tectonic regimes, geology, urbanization and seismic potential. Several studies have assessed seismic hazards in Algeria using deterministic and probabilistic methods (Mortgat and Shah 1978; Hamdache et al. 1998–2001; Peláez et al. 2004–2005–2006; Bouhadad 1998–2001–2002; Ayadi

2002–2003; Aoudia 2000; Benouar 1994–1996; Harbi et al. 2004; Boughacha 2004; Laouami et al. 2006; Farsi et al. 2007; Bensaïbi et al. 2007; Hamidatou et al. 2016). This study provides a probabilistic assessment of urban area seismic hazard based on source area and seismotectonic data. The results suggest that previous studies have underestimated the seismic hazard in the Constantine region. The probabilistic approach suggests that significant ground movements will occur due to seismic hazards (Cornell 1968). (McGuire 1978) presented five hazard analysis steps: (i) identification of potential earthquake sources; (ii) assessment of geological, geophysical and geometric source parameters; (iii) identification of the seismic motion attenuation patterns; (iv) site-specific hazard calculations and (v) regional hazard mapping. This study uses the earthquake hazard evaluation procedure developed by (Kijko and Sellevoll 1992) to estimate seismic hazard parameters in northern Algeria. Seismogenic sources and parameters are established based on field data (CGS 2003) and geological maps (Vila 1980; Coiffait 1992).

Overview of the Constantine region

Description of the study area

The study area is in the Constantine region in Northeast of Algeria about 430 km east of the capital city of Algiers (Fig. 1). The study area extends on about 150 km radius from the centre of agglomeration of the Constantine city. It

administratively corresponds to the perimeter of the Wilaya of Constantine and that of certain administrative districts of the Wilayas of Mila, Oum El Bouagui, Skikda, Jijel and Guelma.

Catalogue seismicity of the region

Data catalogues provide parameters that can be used in seismic hazard analyses. The earthquake data used in this study are largely based on the Harbi dataset (2008). The catalogue established by Harbi covers portions of eastern Algeria [4°E–8°E, 33°N–38°N] from 1850 to 2008, and this study updated the dataset for periods from 1357 to 1850 and 2009 to 2014. The (Benouar 1994), (CRAAG 1994) and (Hée 1950) datasets were also used in this analysis. Figure 2 shows the distribution of earthquake epicentres in Northeast Algeria from 1357 to 2014.

Geology and seismotectonics of the region

The present study area is located in an active seismic zone within Algeria, which has been shaken by several moderate to strong earthquakes during the last few centuries. At least three recent earthquakes had a maximum felt intensity of at least $I_0 = VII-IX$ on the MSK scale (Bounif et al. 1987, Harbi et al. 2010); i.e., $M_s = 5.2$ on 4 August 1908, $M_s = 5.3$ on 6 August 1947 and $M_s = 5.9$ on 27 October 1985 (Ousadou et al. 2013). From a geological point of view, the Constantine region belongs to the external domain of the Tellian Atlas chain, a part of the North African Alps (Maghrebides), built during the main paroxysmal compressional phases of the Eocene and Miocene

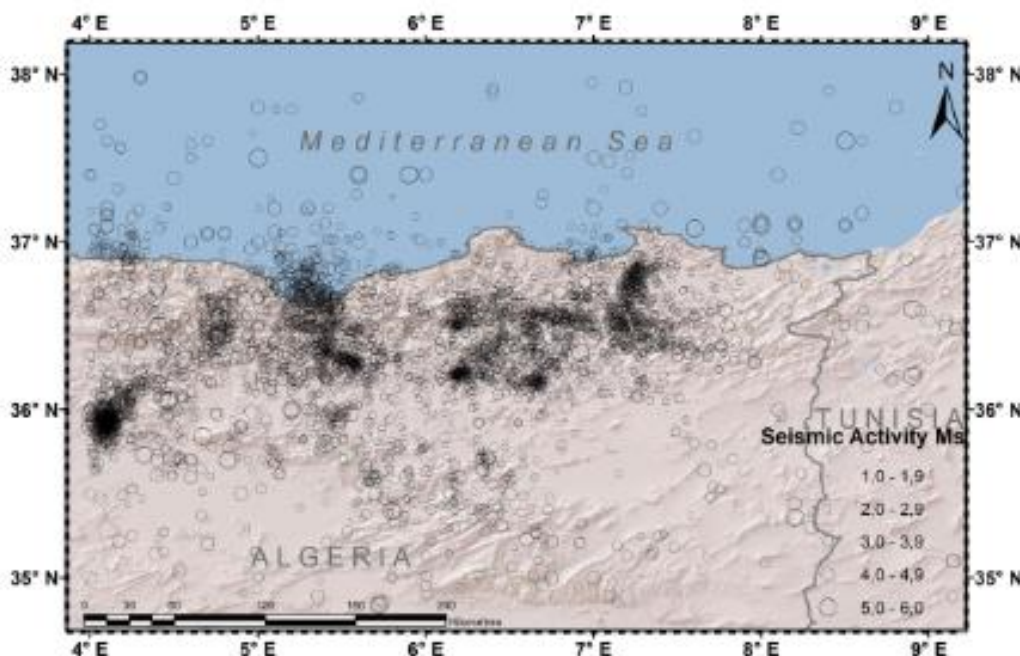


Fig. 2 Distribution of earthquake epicentres in Northeast Algeria from 1357 to 2014

epochs (Mattauer 1958; Vila 1980) and the Quaternary period. Lithologically, the studied area exhibits four main lithostratigraphic formations: (i) the Cretaceous limestone and marls bed rock that belongs to the Constantine neritic formation, (ii) the Cretaceous-Eocene marls and calcareous marls of the Tellian thrust sheet unit, (iii) the Mio-Pliocene sandy clays and conglomerates and (iv) the Quaternary alluvial terraces and lacustrine calcareous formations (Durand Delga 1969; Guiraud 1973; Vila 1980; Aris et al. 1998; Benaissa and Bellouche 1999; Harbi 1999; Marni and Guiraud 2006; Bougdal 2007).

Identification of seismic sources

The seismic source areas were determined based on previous studies (Hamdache et al. 1998; Harbi et al. 1999; Aoudia et al. 2000; CGS 2003; Harbi 2003). Hamdache et al. (1998) defined four source zones in northern Algeria based on the observed fault mechanisms. Harbi et al. (1999). Figure 3 attempts to correlate seismic data with the neotectonic faults in the Eastern Tellian Atlas and surrounding areas (35°N–38°N, 4°E–9.5°E) based on geological information (Vila 1980; Meghraoui 1988; Bounif et al. 1987), geophysical data (Harbi 1996) and previous studies (Hatzfeld 1978;

Deschamps et al. 1991; Benouar 1993; Mokrane et al. 1994; Bezzeghoud et al. 1996). Additional data files were also used during the analysis, including CRAAG, IGN, ISC and USGS/NEIC datasets. (Aoudia et al. 2000) defined 12 source zones in the Tell Atlas based on: (1) the distribution of well-identified Quaternary and active faults in Neogene basins, (2) thrust-related crustal tectonics and kinematic mechanisms at local and regional scales, (3) relationships between geological structures and earthquakes and (4) earthquake epicentre clustering patterns. An Earthquake Engineering Research Centre study (CGS 2003) identified 4 sources in the Constantine region based on the active faults, seismicity and geology, with a goal of finding links between seismicity and active structures. In this study, five seismic zones are presented with their parameters and characteristics (see in Tables 1 and 2), Fig. 4 based on the data and information provided in previous studies. All seismic sources are considered area sources.

The Constantine zone (Z1)

Located to the east of the Tell Atlas, this area has experienced very few major earthquakes. The major tremors recorded in the region include events on August 4, 1947 (Io = VIII) and

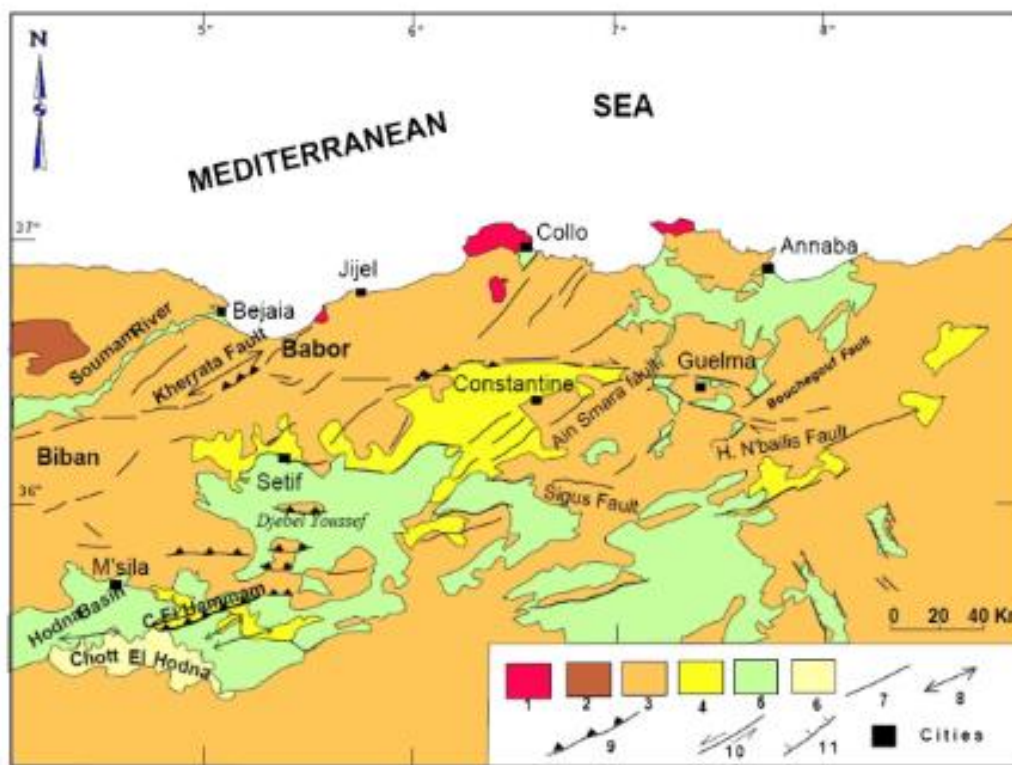


Fig. 3 Tectonic map of the Eastern Tellian Atlas of Algeria (Meghraoui 1988). (1) Volcanism (2) Paleozoic. (3) Jurassic-Cretaceous and lower Cenozoic basement. (4) Neogene post nappe deposits. (5) Plio-quaternary

deposits. (6) Quaternary deposits. (7) Faults. (8) Anticline. (9) Reverse fault. (10) Strike-slip fault. (11) Normal fault

Table 1 Important seismogenic source zone characteristics

Zone	Largest earthquake of the zone	Active or potentially active faults
Constantine	27/10/1985, $I_0 = VIII$ MSK, $M_s = 6$	Constantine fault
South Constantine	09/04/1985, $M_s = 6$	Temlouka and Sigus are potentially active
Guelma	10/02/1937, $I_0 = VIII$ MSK, $M_s = 5.2$	Boucbegouf and Hammam N'Bailis faults are potentially active
North Constantine	03/04/1919, $M_s = 4.6$	El-Kanteur fault
Ain Smara-Mila	27/03/1962, $M_s = 4.9$	Ain Smara fault was active during the 27/10/1985 earthquake

October 27, 1985 (near the city of Constantine, $I_0 = VIII$). These events caused numerous deaths and damages. The Z1 area has been the subject of multiple studies. The seismic activity in the zone is associated with active structures, which are typically oriented NE-SW. However, Bounif et al. (1987) suggested that sinistral movement is becoming more common in the zone.

The southern Constantine zone (Sigus-Temlouka) (Z2)

This zone corresponds to the external Tell domain, and the northern boundary coincides with the south Tellian overlap and the southern boundary coincides with the Temlouka basin. Z2 encompasses an area of 2334 km² and experienced a maximum magnitude of 4. The zone includes tectonic deformation in Quaternary terrains and two active faults (Sigus and Temlouka). Seismic activity is common due to concentrated seismic events with moderate magnitudes ($M_s \geq 4.0$).

The Guelma zone (Z3)

The Guelma zone includes a fault system with an extended focal mechanism. Meghraoui (1988) described a basin transtension (tectonic depression formed by extension and subsidence), which formed between two dextral overlaps in an east-west direction. The reference earthquake in this zone occurred on February 10, 1937, with a magnitude of 5.2 (Benouar 1993). Two other $I_0 = VIII$ (MSK) earthquakes occurred in the region on June 17, 1908 and December 3, 1928.

Table 2 The parameters for each seismic zone (Z1, Z2, Z3, Z4 and Z5)

Code	Zone	Surface (km ²)	Number of events	Depth (km)
Z1	Constantine	944	182	10–35
Z2	South Constantinois	2334	172	3–38
Z3	Guelma	1759	304	1–35
Z4	North Constantinois	2080	434	2–44
Z5	Ain Smara-Mila	2127	359	1–35

The northern Constantine zone (Z4)

This zone corresponds to the geological field located to the north of Constantine, which is characterized by a segmented active fault and encompasses 2080 km². Seismic activity in this area has been associated with relatively small seismic events, but the zone is capable of producing large earthquakes because the potentially active fault is located in this area.

The Ain Smara-Mila zone (Z5)

This zone includes three segments of the Ain Smara fault and part of the Mila basin. Seismic shocks originating from the Ain Smara fault resulted in Quaternary deposits. Z5 is oriented northeast-southwest and encompasses an area of 2127 km².

Probabilistic seismic hazard and catalogue of sismicity analysis

Probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) as formulated by (Cornell 1968) requires a compiled earthquake catalogue, seismicity parameters and ground motion predication equations (GMPEs). The different steps for the seismic hazard assessment and the various processing steps used in the catalogue of seismicity (Compilation, Homogenization, Statistical, Parameter, Cartography and Seismic hazard), graphs and maps were created using different software (EXCEL, MATLAB, Z-map, GIS and CRISIS) (Fig. 5). The initial step requires the delineation of all the seismic sources that might have an effect on the area of interest. The second step includes determination of the seismicity parameters for each zone. These seismicity parameters are seismic activity rate λ , the maximum expected earthquake magnitude M_{max} , and the Gutenberg-Richter b value. A homogeneous earthquake catalogue is an important input for estimation of seismic hazard study. The preparation of a homogeneous earthquake catalogue for a seismic region needs regressed relations for conversion of different magnitudes types, e.g. m_b , M_L to the unified surface magnitude M_s . The last step consists of declustering the earthquake catalogue, which involves removal of aftershocks and foreshocks. For this purpose, the earthquake catalogue was analysed and dependant events were removed based on Gardner and Knopoff (1974) approach

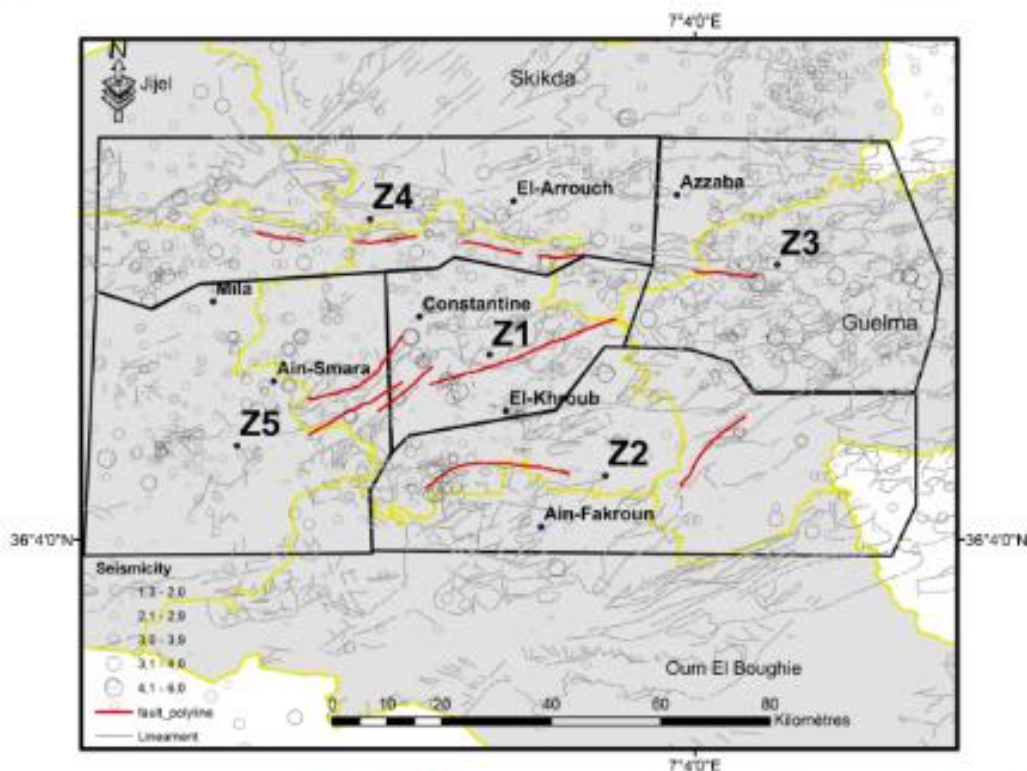


Fig. 4 The proposed seismic source model, which can be used to assess seismic hazards in Northeast Algeria based on geology, tectonics and seismicity

considering 100 days time window (Musson 1999). Declustering eliminated 40% events from the catalogue. The declustered catalogue includes 3936 earthquakes with $M_s \geq 1.3$ for the study region. The incomplete earthquake data may lead to underestimation of the mean rate of earthquake occurrence. Hence, for reliable mean rate of earthquake occurrence for the given magnitude range, the analysis of completeness has been carried out by adopting the procedure given by Stepp (1972), which gave the extent to which all the reported earthquakes in a catalogue for a given magnitude range and time period are complete. The completeness analysis has been performed by grouping the earthquakes in three magnitude classes: ($3.0 \leq M_s \leq 3.9$), ($4.0 \leq M_s \leq 4.9$) and ($5.0 \leq M_s \leq 6.0$).

Catalogue data preparation

The following earthquake sources were used (Fig. 6):

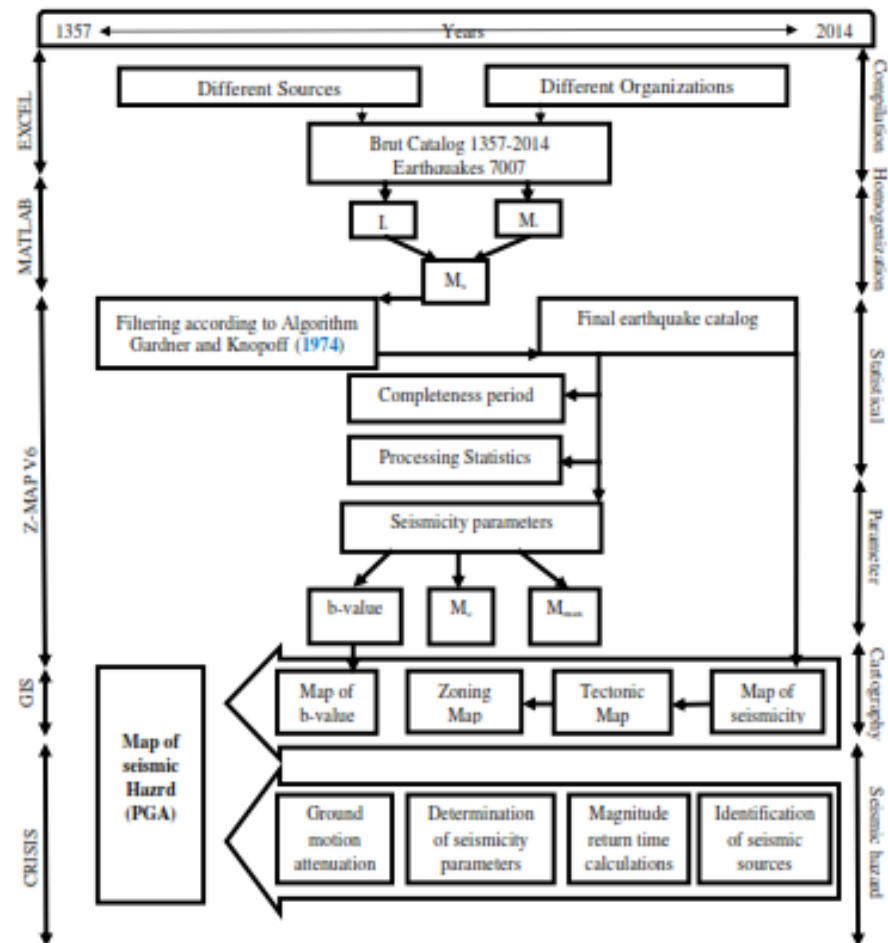
- CRAAG (1994): the first catalogue published by the centre of research on astronomy, astrophysics and geophysics (CRAAG) of Algeria.
- Mokrane et al. (1994): it covers the time period 1673–1992.
- The second catalogue (CRAAG 2002): published by the same institution and covering the time period 1992–2001.

- Yelles Chaouch et al. (2002): this source was extended to 2014 using the semi-annual bulletins of the CRAAG seismological database.
- Benouar (1994): includes a catalogue covering all the region of the Maghreb from 1900 to 1990.
- Harbi (2008): includes a catalogue covering the eastern part of Algeria between 4–9°E and 33–38°N within the time period 1850–2008. This source contributed with 111 additional events in the compiled catalogue.
- The Instituto Geográfico Nacional (IGN) catalogue (2014), Madrid, Spain (Mezcua and Martínez Solares 1983; Martínez Solares and Mezcua 2002). Its sub catalogue covering the Ibero-Maghreb region for the time period 412–2014 was used.
- The International Seismological Centre (ISC) catalogue (2014): includes seismicity data that span the northeast region of Algeria over the period from 1850 to 2014 and were used as a basis for this study.

Earthquake catalogue homogenization based on the M_s scale

The developed catalogue has been completed through 2014 using ISC (Harbi 2008) and CRAAG data. The seismic event magnitudes were converted into the

Fig. 5 The earthquake catalogue and seismic hazard methodology



surface-wave magnitude scale (M_s) using empirical relationships (Table 3) and a linear regression. We compared our results to those published by Benhallou (1985), Benouar (1994), Casado et al. (2000), Harbi et al. (2001, 2006), Bellalem (2007) and Grunthal et al. (2012). The earthquake catalogue homogenization results are shown in (Fig. 7).

Declustering the earthquake catalogue

Poisson statistical distributions have been used to probabilistically analyse seismic hazards. Earthquakes independently occur and exhibit random spatial distributions in earthquake zones. Therefore, foreshocks and aftershocks must be removed from the earthquake catalogue. These data were

Fig. 6 The major sources used to compile the earthquake catalogue, Northeast Algeria

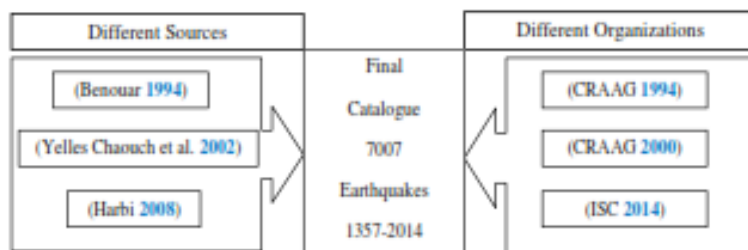


Table 3 Regression relations for M_c , m_b , I_0 , f_{MSB} , f_{MSM} and f_{MSK} on the M_c scale

Conversion type	Relationships
m_b vs M_c (a)	This study $M_c = 0.6769 + 1.6172 * m_b$
M_1 vs M_c (b)	This study $M_c = 2.51908 + 0.459 * M_1$
I_0 vs M_c (c)	This study $M_c = 0.2094 * I_0 + 3.2246$
f_{MSB} vs M_c (d)	This study $M_c = 0.4744 * f_{MSB} + 1.4142$
f_{MSM} vs M_c (e)	This study $M_c = 0.3004 * f_{MSM} + 2.591$
f_{MSK} vs M_c (f)	This study $M_c = 0.4725 * f_{MSK} + 1.406$
	Casado (2000) $M_c = -3.44 + 1.65 * m_b + 0.40 * P$
	Benouar (1994) $M_c = 1.40 + 0.76 * M_1$
	Harbi et al. (2001) $M_c = 0.24 * I_0 + 3.21$
	Benouar (1994) $M_c = 0.47 * I_0 + 1.36$
	Belkhem (2007) $M_c = 1.1382 * M_1 - 0.536005$
	Benouar et al. (1994) $M_c = 0.47 * I_0 + 1.36$
	Harbi (2006) $M_c = 0.3959 + 0.8417 * m_b$
	Benhalou (1985) $M_c = 1.18 * m_b - 0.96$
	Granath et al. (2012) $M_c = 2.819 + 0.2871 * f_0$
	Casado (2000) $M_c = 1.52 + 0.051 * f_0^2 + 0.70 * P$

removed based on the method of Gardner and Knopoff (1974) using the ZmapV6 software. Figure 8 illustrates the earthquake epicentre distribution before and after declustering. The declustered catalogue includes 3936 earthquakes. Figure 9 shows the degree of seismic event filtering in the study area according to the algorithm Gardner and Knopoff (1974).

Completeness period

Accurate event dates and magnitudes are essential for creating a reliable, comprehensive and homogeneous seismic catalogue for the Constantine region. The earthquake occurrence values a and b were estimated for the earthquake catalogue based on the completeness period of the entire catalogue. The seismic parameters are calculated over a range of 3 to 6. The results are given in Tables 4 and 5 by the Stepp method.

Estimations based on the cumulative number of earthquakes

A 3 magnitude threshold was estimated using the maximum curvature method (Wiemer and Katsumata 1999).

The completeness analysis results are shown in Fig. 10 and Table 4.

The Stepp method

The completeness periods corresponding to selected magnitude cut-offs were assessed using the (Stepp 1972) approach after catalogue homogenization. The completeness analysis resulted by the Stepp method is shown in Fig. 11 and Table 5.

The completeness magnitude m_c generally decreases with time as the number of seismic network stations and measurement sensitivities increase (Wiemer and Wyss 2000). The maximum curvature method (MAXC) was used to validate m_c estimates for the periods shown in (Table 5) (Wiemer and Katsumata 1999; Wyss et al. 2000). Figure 12 illustrates the frequency–magnitude relation for the entire region, with estimated seismic hazard parameters of b value = 0.83, a value (annual) = 3.81 and $m_c = 3.1$. Thus, the PGA zone maps were compared based on different b values for each seismogenic source zone and a constant b value for the entire region.

4.4 b value analysis

The spatial b values were estimated using the ZMAP software (Wiemer 2001). The regional b value is calculated using the (Weichert 1980) method. The resulting values are highly variable, as shown in Fig. 13.

The Constantine and Mila regions are characterized by small b values while the Guelma region is characterized by high b values. This trend suggests that more hazards have occurred in the Constantine and Mila regions compared to Guelma. Thus, the seismic activity is higher near Constantine and Mila. Low b values in the Constantine and Mila regions are related and define a unique area (Constantine basin).

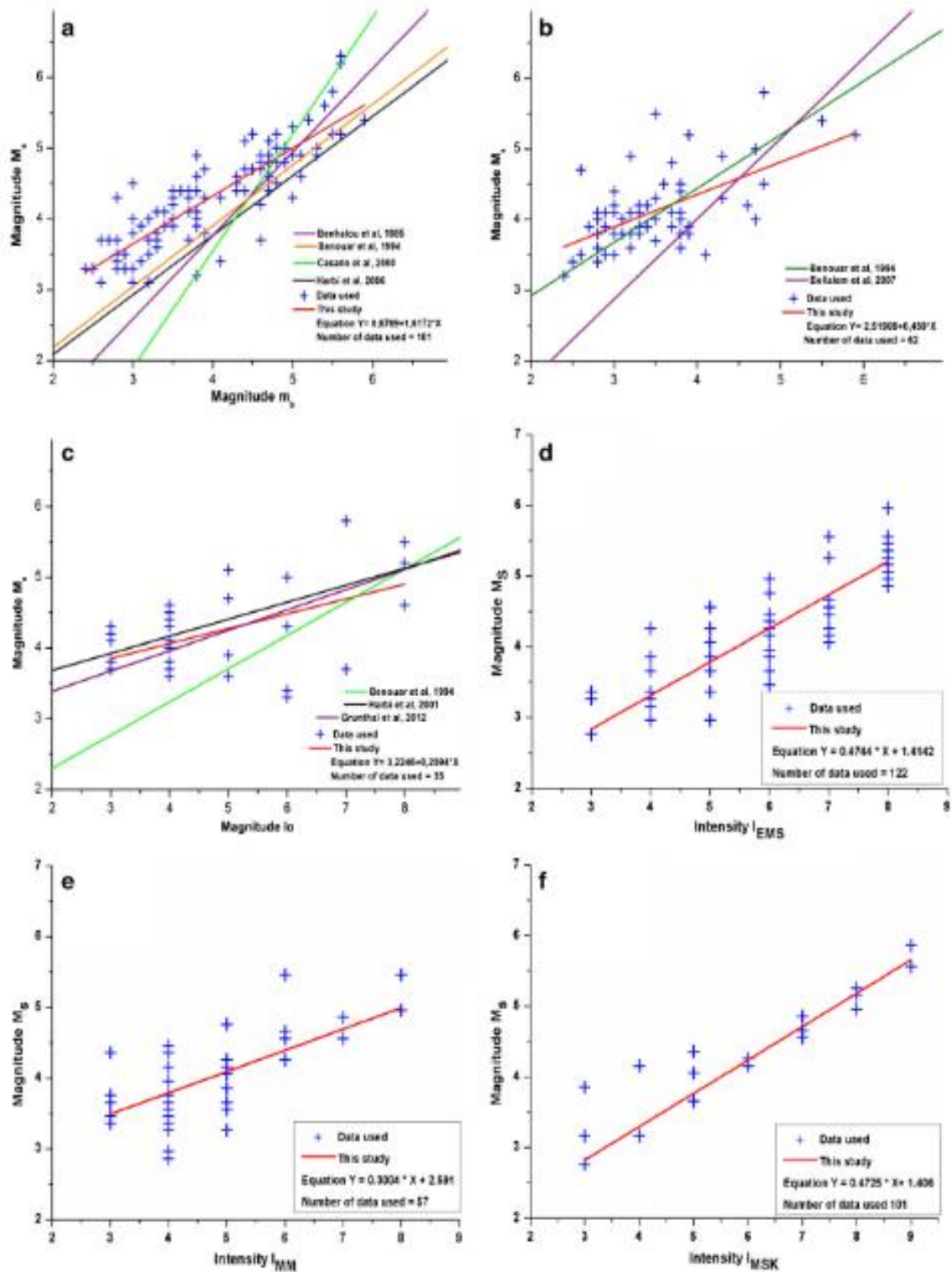


Fig. 7 Comparison of the M_s , m_b , J_0 , I_{EMS} , I_{MM} and I_{MSK} semi-empirical relationships on the M_c scale

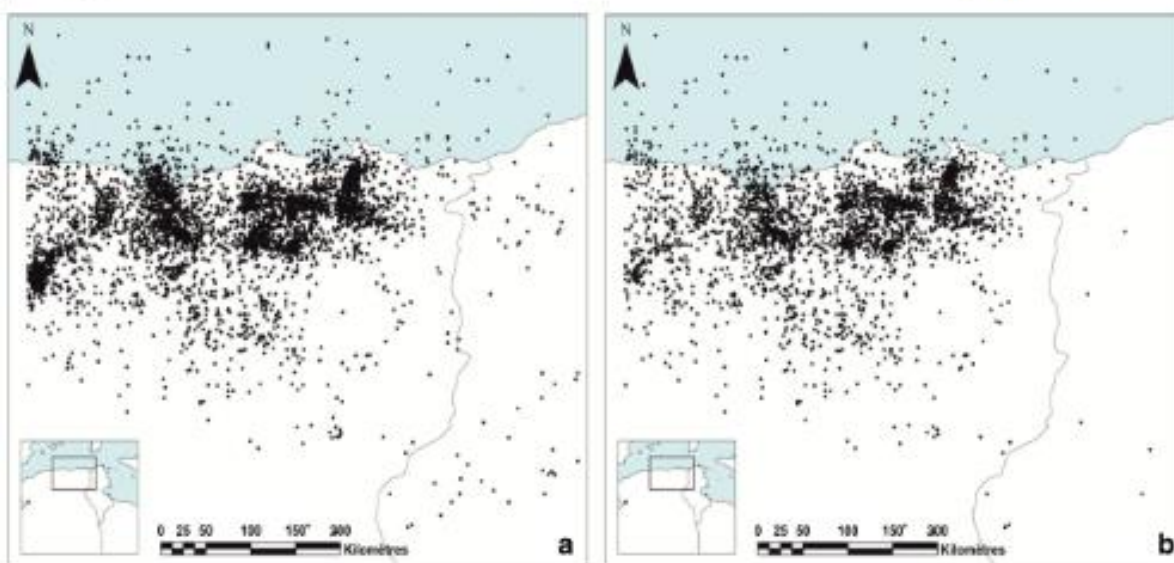


Fig. 8 Epicentre seismicity distributions from 1357 to 2014 in Northeast Algeria a before and b after declustering

Probabilistic seismic hazard analysis

Probabilistic seismic hazard analysis is the most commonly used approach to evaluate the seismic design. Used hereafter, was initially developed by Cornell (1968) and developed in its computer form by McGuire (1976) and Algermissen and Perkins (1978). Mac-Guire developed EqRisk in the year 1976 and FRISK in the year 1978. Algermissen and Perkins (1976) developed RISK4a, presently called SeisRisk III and Geomatrix (1993). It is assumed that the occurrence of earthquakes in a seismic

source results from a Poisson process. Then, the probability that at a given site a ground motion parameter, Z , will exceed a specified level, z , during a specified time, T , is represented by the expression:

$$P = (Z > z) = 1 - e^{-\nu(z)T} \leq \nu(z)T \tag{1}$$

where $\nu(z)$ is the average frequency during time period T at which the level of ground motion parameter, Z , exceed level z at a given site. The function $\nu(z)$ incorporates the uncertainty in time, size and location of future earthquakes and

Fig. 9 Degree of seismic event filtering (Gardner and Knopoff 1974)

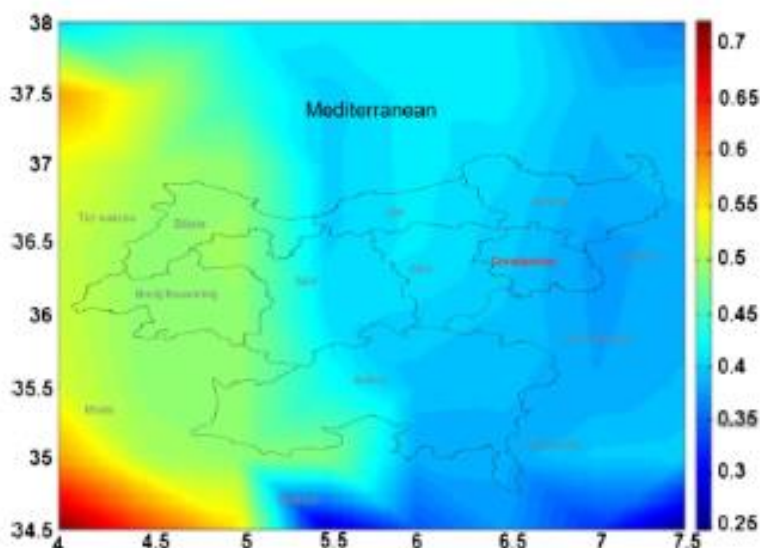


Table 4 Completeness of various magnitude classes over the reporting period

Magnitude classes	Completeness from the year	Period of completion	Number of years to the time of completion	Number of earthquakes/year	Number of earthquakes for the period of completion
[3:4]	1856	[1993:2014]	75	8.62	647
[4:5]	1504	[1870:2014]	144	1.562	225
[5:6]	1357	[1725:2014]	289	0.124	36

uncertainty in the level of ground motion they produce at the site. It is given by the following:

$$\nu(z) = \sum_{n=1}^N N_n(m_0) \int_{m_0}^{m^*} f_n(m) \left[\int_{r=0}^{\infty} f_n(r/m) P(Z > z/m, r) dr \right] dm \quad (2)$$

where $N_n(m_0)$ is the frequency of earthquakes on seismic source n above a minimum magnitude m_0 that is taken equal to 1.3 in this work. Indeed, below this value, magnitudes are considered to be without engineering significance; $f_n(m)$ is the probability density function for event size between m_0 and a maximum event for the source, m^* ; $f_n(r/m)$ is the conditional probability density function for distance to earthquake rupture; and $P(Z > z/m, r)$ is the probability that, given a magnitude m earthquake at a distance r from the site, the ground motion exceeds level z . In practice, the integrals in Eq. ((2)) are replaced by summations and the density functions $f(m)$ and $f(r/m)$ are replaced by discrete mass functions. The resulting expression for $\nu(z)$ is given by the following:

$$\nu(z) = \sum_{n=1}^N \sum_{m_0}^{m^*} \lambda_n(m_i) \left[\sum_{r=r_{min}}^{r_{max}} P_n(R = r/m_i) P(Z > z/m_i, r) \right] \quad (3)$$

where $\lambda_n(m_i)$ is the frequency of events of magnitude m_i occurring on source n obtained by discretizing the earthquake recurrence relationship for source n . The estimation of uncertainty involved in magnitude, distance and peak ground acceleration are discussed in respective sections.

Magnitude return time calculations

The return period, or the mean return time, is the inverse of the average annual seismicity rate. The value represents the

Table 5 Completeness periods with corresponding magnitude ranges assessed using the Stepp method

Magnitude classes	Completeness from the year	Completeness period
[3:4]	1987	[1987:2014]
[4:5]	1864	[1864:2014]
[5:6]	1714	[1714:2014]

average earthquake occurrence interval for the region. In this study, the mean return time is the inverse of cE. (4), in which $M_{min} = 3$ and $M_{max} = 6.4$.

$$T = \frac{1}{\lambda_M} \quad (4)$$

$$T = \frac{1 - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}}{\lambda_{M_{max}} (e^{-\beta(M - M_{min})} - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})})} \quad (5)$$

This study can serve as a reference for future active seismic zone studies in Algeria. Therefore, magnitude return periods were estimated for each source zone. The calculated return periods exhibit significant variation between areas (Fig. 14). A magnitude less than $M_s < 7.0$ is associated with a return time that varies between 6.1 and 6.029 years in zone 1 (Constantine). However, in the zone 2 (South Constantine), the return time varies between 29.6 and 424.6133 years (Table 6).

Determination seismicity parameters

Determination of λ and b values

The relative number of generated earthquakes that occur on the seismic source is described by magnitude distribution. In the current work, magnitude distribution is carried out in form of the doubly truncated exponential model. It is based on the well known Gutenberg-Richter magnitude recurrence relation. The Gutenberg-Richter relation (Gutenberg and Richter 1954) is given by:

$$\log \lambda_M = a - b.M \quad (6)$$

where λ_M is the mean annual rate of exceedance of magnitude M where a and b are constants. If earthquakes smaller than lower threshold magnitudes M_{min} are eliminated and the relation are truncated at M_{min} and M_{max} , Table 7 shows the seismicity parameters for each seismic zone, the mean annual rate of exceedance expressed as (McGuire and Arabasz 1990):

$$\lambda M = v \frac{\exp[-\beta(M - M_{min})] - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]}$$

where $v = \exp(\alpha - \beta M)$, $\alpha = \ln a$ and $\beta = \ln b$

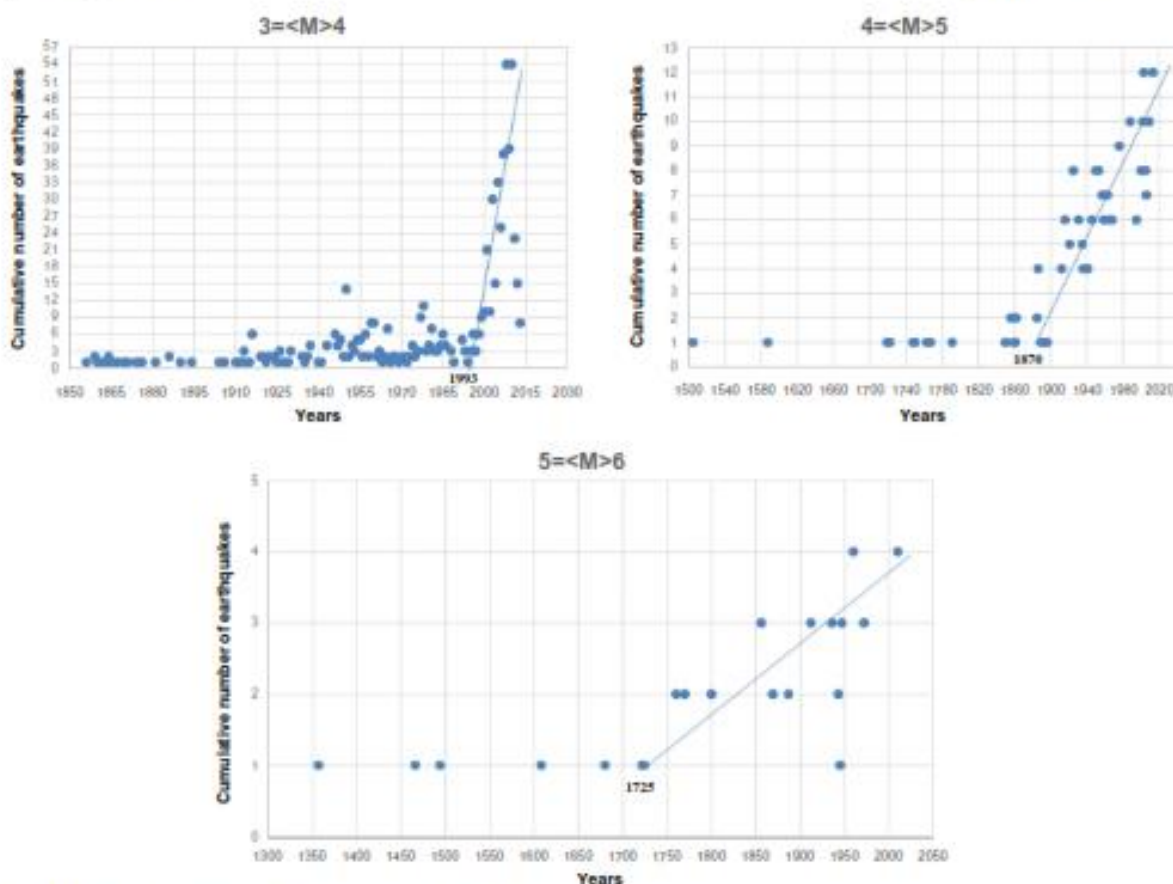


Fig. 10 All magnitude classes within the completeness periods

Maximum earthquake M_{max} estimation

The maximum regional earthquake magnitude or maximum expected magnitude, M_{max} , is defined as the upper limit of earthquake magnitude for a given region and is synonymous with the magnitude of the largest possible earthquake (Kijko and Singh 2011). Due to the variation in seismicity levels for the defined seismic sources, we adopted more than one approach to define the M_{max} as follows:

-For the seismic sources occurring in subduction regions with high seismicity, Hellenic and Cyprian arcs, the statistical approach of (Kijko 2004) (hereinafter will be referred as statistical approach) is used to determine M_{max} .

-The other sources that relate to shallow-active-crust tectonic environments with low to moderate seismicity, we adopted the statistical approach in addition to an alternative approach by adding 0.5 magnitude unit to the maximum observed magnitude (M_{max}^{obs}). It is noticed that, for some sources, the calculated M_{max} by the statistical approach are equal to $M_{max}^{obs} + 0.5$

The maximum expected magnitude in the approach of (Kijko 2004) is the equal to maximum observed magnitude

M_{max}^{obs} , plus an integral $\Delta = \int_{M_{min}}^{M_{max}} [F_M(m)]^{-n} dm$, where $[F_M(m)]$ is the cumulative distribution function (CDF) for M_{max}^{obs} . In case of the Gutenberge-Richter relation that bounded from above by M_{max} , the integration Δ is given by:

$$\Delta = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \left[\frac{1 - \exp[-\beta(M - M_{min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{max} - M_{min})]} \right]^{-n} dm$$

Such integration is not simple and (Kijko 2004) used Cramer’s approximation (Cramer 1961) to estimate it. Table 8 shows the maximum observed and expected magnitude for each seismic zone.

Ground motion attenuation

Among the critical elements required in seismic hazard analysis, the attenuation relation of peak ground (PGA) and spectral acceleration (SA) are very important. Ground motion attenuation relationships describe the

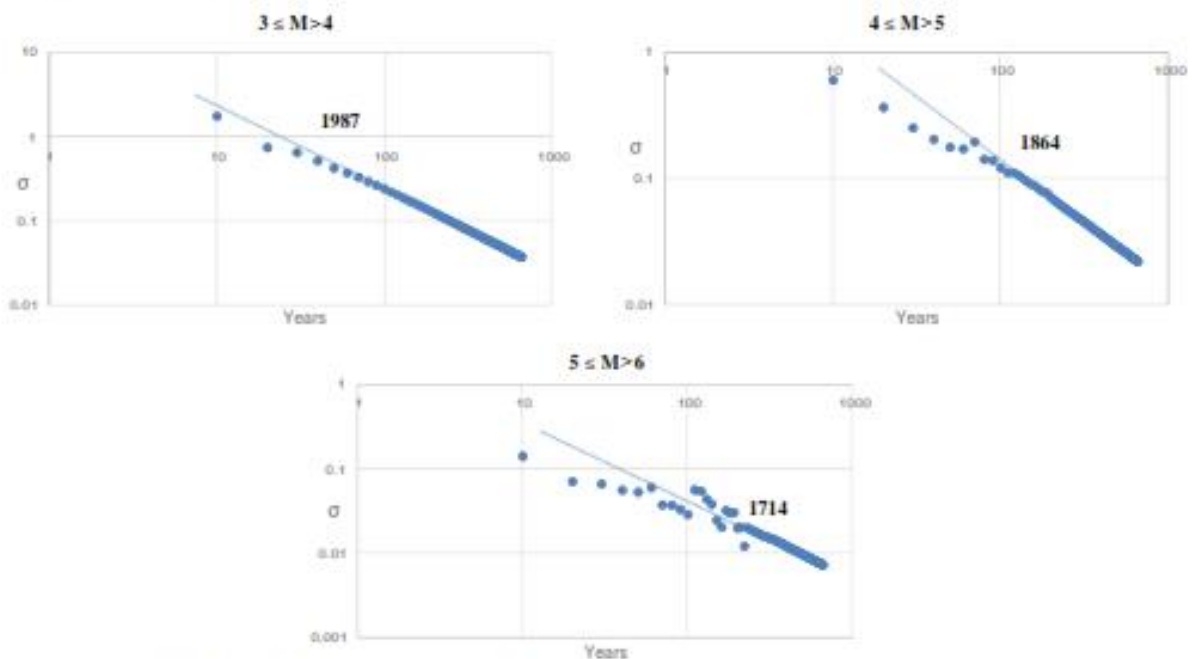


Fig. 11 All magnitude classes within the completeness periods

variation of peak ground acceleration at specific structural periods of vibration and damping ratios with earthquake magnitude and source to site distance. Strong ground motions produced by earthquakes are influenced by the characteristics of the earthquake source, the crustal wave propagation path, and the local site geology (Bouhadad et al. 2002). Accordingly, attenuation relationships typically are developed for specific tectonic environments. In this study, empirical attenuation relationships developed on the basis of statistical analysis of

strong motion data recorded at locations having a similar tectonic environment were used. They are given by the following formulas of (Sadigh et al. 1993):

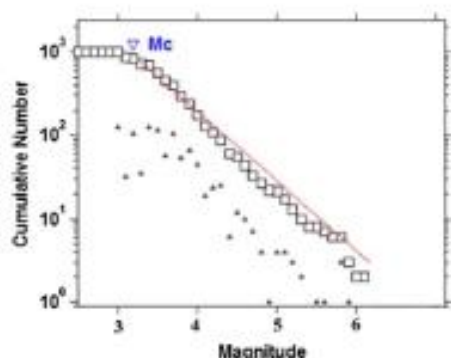


Fig. 12 Frequency–magnitude relation for the Constantine region

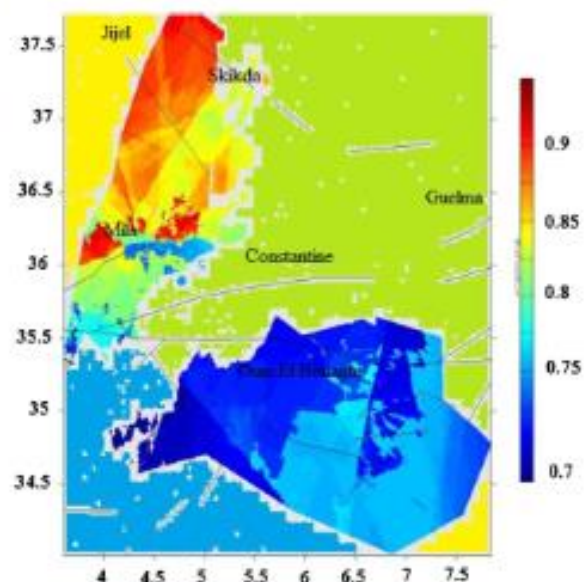


Fig. 13 Spatial variations of the regional b value

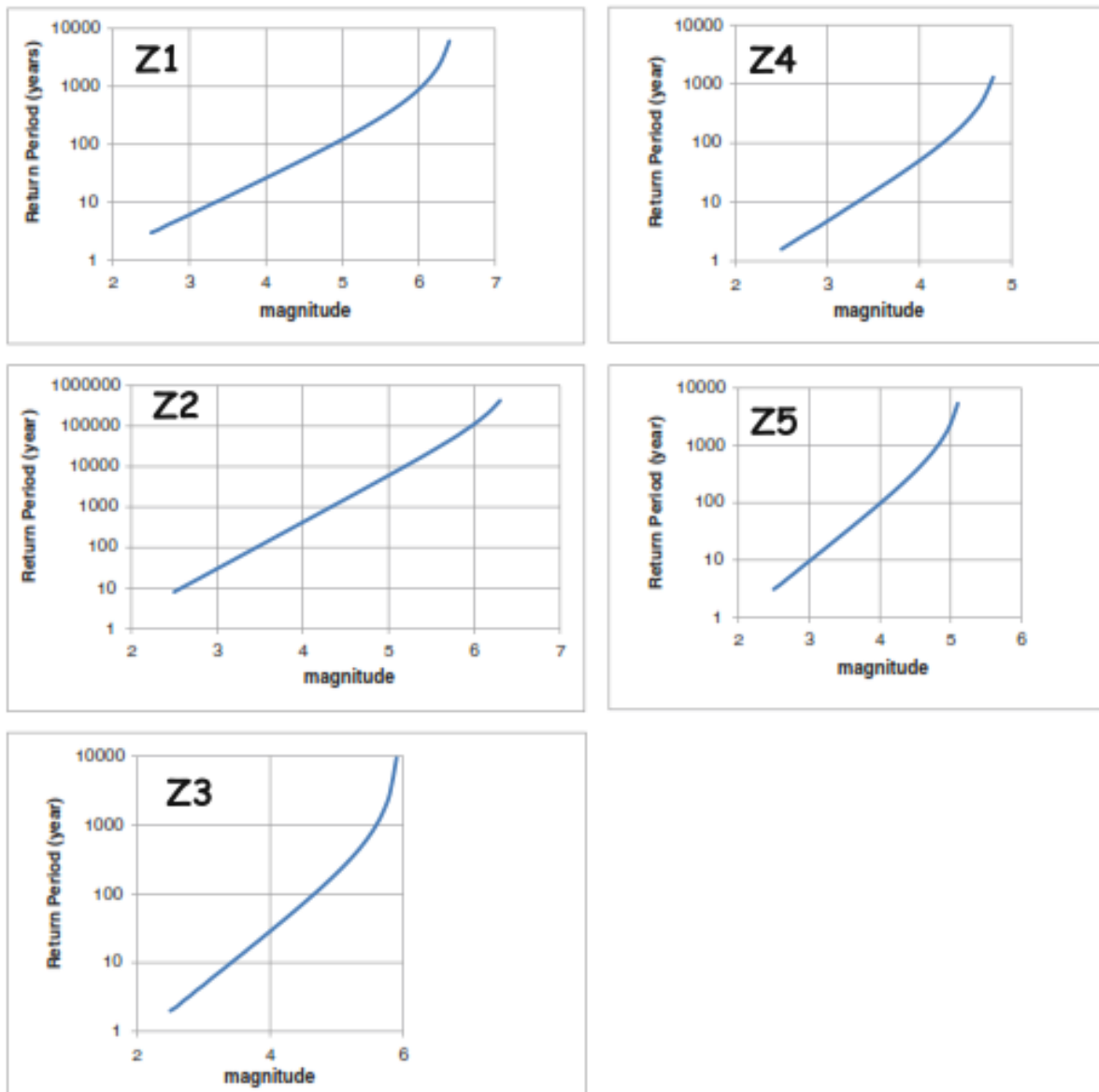


Fig. 14 Magnitude return times (years) for all zones

$$\text{for } M \leq 6.5 : \ln(a_h) = -0.624 + 1.0M - 2.10[\ln(R + \exp(1.29649 + 0.25M))]$$

$$\sigma = 1.39 - 0.14M$$

$$\text{for } M > 6.5 : \ln(a_h) = -1.274 + 1.1M - 2.10[\ln(R + \exp(-0.48451 + 0.524M))]$$

$$\sigma = 0.38$$

where R is the closest distance to the rupture area, M is moment magnitude, a_h is maximum peak ground acceleration in ground surface and σ is the standard error in $\ln(a_h)$, and Ambraseys and Bommer (1991) give the following:

$$\log(a_h) = -0.109 + 0.238 M_r - \log(r) - 0.00050 r + 0.28 P$$

$$h = 6.0 \text{ km}, \sigma = 0.28$$

Table 6 Mean return period of magnitudes between 3 and 6 in each of the five seismogenic zones

Mean average return period (years)					
Magnitude	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
3	6.1	29.6	4.7	4.8	9.5
3.5	12.6	111	11.6	15.1	29.5
4	26.3	416.9	28.5	50.6	97.1
4.5	55.7	1570.3	72.4	225.6	353.2
5	122	5972.1	198.9	1297.6	2391.4
5.5	290.3	23,721.3	713.9		
6	886	111,740.3	9393.1		
6.3	2798.1	424,613.3			

Table 7 The seismicity parameters for each seismic zone

Code	Region	β	err β	b	err b	M_c	λ	err λ	$\lambda(M)$
Z1	Constantine	1.44	0.06	0.62	0.02	1.7	1.07	0.08	1.03
Z2	South Constantine	2.64	0.26	1.15	0.11	2.2	3.95	0.71	3.92
Z3	Guelma	1.77	0.1	0.77	0.05	2.2	10.38	1.09	9.96
Z4	North Constantine	2.2	0.06	0.96	0.02	1.8	3.02	0.15	3.0
Z5	Ain Smara-Mila	2.26	0.07	0.98	0.03	1.8	15.28	1.22	15.18

where r is the closest distance to the surface projection of the rupture surface, M_s is the surface magnitude and h is the depth; P ranges from 0 (for 50% percentile) to 1 (for 84% percentile).

Computing seismic hazards

The probabilistic seismic hazard estimation software CRISIS-2007 developed by (Ordaz et al. 2012a, b) has been used, to produce seismic hazard curves, uniform hazard spectra (UHS) and hazard maps showing peak ground acceleration (PGA), in addition to the six spectral periods (0.1, 0.8, 0.9, 1.0, 1.5 and 2.0 s) for three levels of ground shaking (50, 10 and 2% probability of exceedance in 50 year). These spectral periods and the different levels of ground shaking are commonly applied in Algerian building codes. For the purpose of estimat-

ing ground motion at different points as close as possible, the study area has been divided into 144 small grids of size $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. In the computational scheme, parameters such as a , b , m_c and M_{max} and attenuation models are the input parameters in the CRISIS program and PSA are the output. Results obtained have been prepared in tabular format and used in CRISIS program to introduce effects of user attenuation model. The estimated PGA has been presented in the form of zone maps for different return periods.

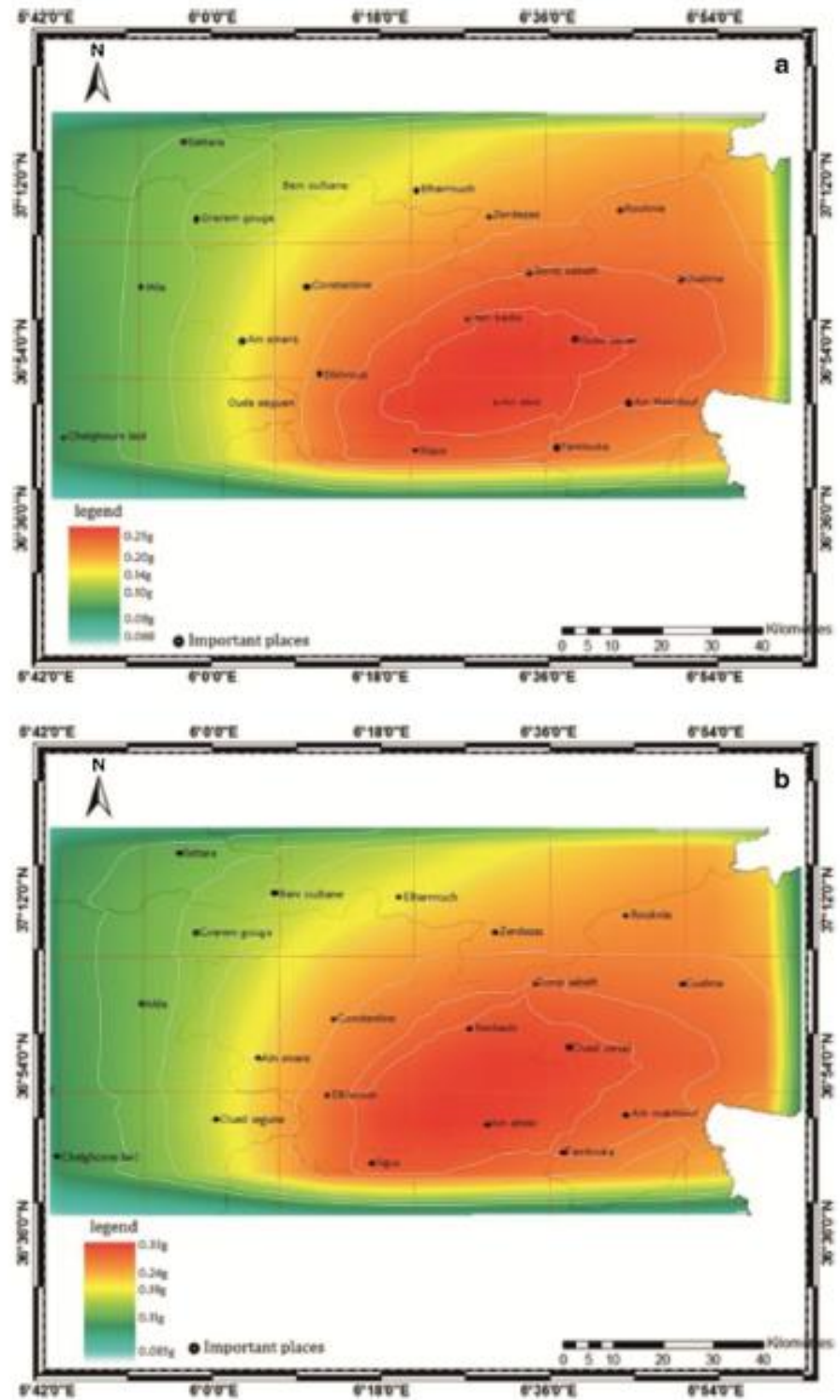
Probabilistic seismic hazard assessment results and discussion

The results of this study were obtained for a rock soil with 5% damping. The Constantine region displayed higher values, specifically around the October 27, 1985 (M_s 6.0) earthquake

Table 8 Maximum observed and expected magnitude

Code	Region	M_{max1} observed	M_{max} calculated	err (M_{max} calculated)	M_{max2} observed	M_{max1} (increased)
Z1	Constantine	6.0	6.55	0.58	5.0	6.5
Z2	South Constantine	6.0	6.6	0.64	4.1	6.5
Z3	Guelma	5.2	5.95	0.81	5.2	5.7
Z4	North Constantine	4.4	4.85	0.58	4.4	4.9
Z5	Ain Smara-Mila	4.7	5.25	0.58	4.1	5.2

Fig. 15 Peak ground acceleration for return periods of **a** 475 and **b** 1000 years



location. Values of 0.2 and 0.33 g were calculated for a 0.9-s period with return periods of 100 and 475 years, respectively.

Seismic hazard assessments results are presented as zoning maps for return periods of 475 and 1000 years based on mean

Table 9 Comparison of the estimated PGA results from this study with other studies

Research carried out by author/agency	Type of study	Return period (years)	Range of PGA (g)	
			Average lnw_1	Average lnw_2
Pelaez et al. (2006)	PSHA	475	0.129	0.206
Pelaez et al. (2006)	PSHA	100	0.059	0.097
Hamdache (1998a)	PSHA	50	0.08	0.17
Aoudia et al. (2000)	DSHA		0.05	0.20
Hamdache (1998a)	PSHA	100	0.09	0.21
Hamdache (1998b)	PSHA	200	0.11	0.24
Rules of Algerian earthquake (2003)			0.20	0.25
CGS (2001)	PSHA	500	0.12	0.25
Hamidatou et al. (2016)	DSHA		0.10	0.26
This study	PSHA	1000	0.085	0.331
This study	PSHA	475	0.068	0.25
This study	PSHA	100	0.024	0.123

acceleration values (Fig. 15) for different urbane sites (El-Khroub, Tamlouka, El-Harrouch, Ain Smara and Chelghoum-Laid). For major parts of the sites, PGA varies from 0.10 to 0.29 g. However, small segments in the south part of the region have a hazard level that varies from 0.08 to 0.10 g. For the areas located in northern Constantine zone and Mila zone, in general, the PGA varies from 0.068 to 0.25 g for 475 years return period (Fig. 15a). However, for return period of 1000 years, the PGA varies from 0.085 to 0.33 g in the major part of the region (Fig. 15b). As in the earlier case, in the south part of the study area PGA varies from 0.095 to 0.11 g.

These results were compared to the results obtained in other studies (Table 9). The results of Morgat and Shah (1987) were used to develop regulatory seismic zoning maps of Algeria based on the Rules of Algerian earthquake (1981; 1988; and 1999) rules. The Rules of Algerian earthquake (2003) code gives for the Constantine city an acceleration of 0.25 g, which makes the results of this study very satisfactory.

Conclusions

Hazard and seismic risk assessments are necessary in all countries. The ultimate goal of these assessments is to ensure public safety in the case of a major event, that is, to avoid major structural damage and significant loss of lives. A seismicity study was conducted for Northeast Algeria [4°–8°E and 34°–38°N] that included pre-1900 (the historical period) and 1900 to 2014 (the instrumental period) time frames. The seismicity analysis distinguished three periods, including a high-intensity period from 1357 to 1900, a smaller, less frequent event period from 1900 to 1999 and a small, frequent event period

from 2000 to 2014 (magnitudes of approximately 1.3). These periodic variations are related to the development of the Algerian monitoring network. Spatial *b* value variations were investigated in the Constantine region. This region presented a high seismic potential with low *b* values, indicating a high stress concentration. The results of this study may provide a basis for future earthquake process research in the tectonic regions of Northeast Algeria. The seismic hazard study was used to define five seismogenic zones based on seismic and tectonic analyses. This analysis represents one of the first seismic hazard and risk reduction studies of Northeast Algeria. The existence of a significant seismicity suggests the possibility of moderate to strong events in the region. Therefore, this work should be continued in the future to improve the understanding of active structures in the region and better assess earthquake hazards. In addition, major cities require further risk assessments. This study presents a theoretical process and probabilistic assessment of seismic hazards for a given region based on the methodology proposed by Cornell (1968). This process was then applied to the study area. The study results suggest that the cities of Constantine and Guelma are subject to lesser seismic hazards than Skikda and Mila, but statistical vulnerabilities limit the significance of the conclusions. The calculated acceleration is relatively low because the large earthquake epicentres are located near the Constantine city, representing a reduced seismic hazard. However, the number of earthquakes and time period are limited in this study, and a more representative sample would be beneficial for identifying seismic hazards and risks in the Constantine region. Although many seismic hazard estimation methods exist, they can be combined to

implement a first phase of seismic hazard reduction and prevention in earthquake prone regions. In this study, seismic hazard parameters in terms of PGA has been estimated considering the following: (i) compile the earthquake catalogue, Northeast Algeria 1357 to 2014 (ii) estimated in terms of spectral acceleration (SA) at many periods (iii) estimated b value for each seismogenic source zone, and (iv) constant b value obtained considering entire earthquake catalogue. The following broad conclusions could be drawn from the study:

1. A PSHA of the Constantine region has been performed using Algerian data. Historical and instrumental seismic catalogues from various agencies (CRAAG, IGN, USGS and ISC) have been merged and analysed to build a single trans-border seismic catalogue. Surface magnitude M_s is adopted as the reference magnitude scale because it is the most commonly used magnitude in the regional catalogues.
2. For all return periods, the estimate of PGA considering constant b value for each source zones (Z1, Z2, Z3, Z4 and Z5) was done, where the PGA varies between 0.09 and 0.26 g
3. For 475 years return period, the PGA values vary from 0.096 to 0.15 g.
4. For a return period of the 1000 years, the PGA varies between 0.14 g to 0.37 g by considering constant b values.
5. Higher PGA values are observed in the Constantine and Guelma region including Constantine city, El-Khroub, Ben Badis, Ain Abide, Sigus, Tamlouka and Bordj Sabath considering constant b values.
6. Limit the seismic hazard in the Constantine region by proposing five seismogenic zones that are related to different big urban sites in Northeast of Algeria (Z1 'Constantine city, Didouche Mourad, El-Khroub', Z2 'Sigus, Tamlouka', Z3 'Guelma city, Oued Zneti', Z4 'El-Harrouch, Beni Oulbane', Z5 'Mila city, Ain Smara and Chelghoum Laid').
7. Proposition of maps that estimate the spectral accelerations (SA) for periods ($T = 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.5$ and 2.0 s).

Acknowledgments The authors are thankful to the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research for supporting this work. The first author also likes to grateful for the support of the North African Group for Earthquake and Tsunami studies (NAGET-OEA/ICTP Net-40), and we are indebted to the Constantine CRAAG regional service for assistance, encouragement. We acknowledge the centre of research on astronomy, astrophysics and geophysics (CRAAG) of Algeria and the International Seismological Center (ISC) and A.Harbi for providing seismicity catalogues used in this study. The article benefited from useful comments and suggestions from Editor-in-Chief A.M. Al-Amri, the Associate Editor M. Meghraoui, and two anonymous reviewers. Great thanks to F. Cotton, S. Dietrich, S. Konrad, G. Grunthal from GFZ Section 2.6 "Seismic Hazard and Stress field" for fruitful discussions

and suggestions. Finally big thanks to mawys, she kindly revised the English text.

References

- Algermissen ST, Perkins DM (1976) A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States. USGS Open File Report 76-416cp45
- Ambraseys NN, Bommer JJ (1991) The attenuation of ground accelerations in Europe, *Earthquake Eng. Struct Dyn* 20:1179–1202
- Aoudia A, Vaccari F, Suhadolc P, Meghraoui M (2000) Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. *J Of seismology* 4:79–98
- Aris Y, Coiffat PE, Guiraud R (1998) Characterisation of Mesozoic-Cenozoic deformation and paleostress fields in the Central Constantinois, northeast Algeria. *Tectonophysics* 290:59–85
- Ayadi A (2003) Strong Algerian earthquake strikes near capital city. *Eos* 84(50):16
- Ayadi A, Ousadou F, Bourouis S, Benhallou H (2002) Sismotectonique et calme sismique de la région Oranie (Algérie occidentale): Le tremblement de terre de Mascara du 18 Août th 1994 Mw = 5.7, MS = 6.0. *J Seismol* 6:13–23
- Bellalem F (2007) Aléa sismique en un site, méthodologie et application, Master thesis.
- Benaissa A, Bellouche MA (1999) Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrain dans l'agglomération de Constantine (Algérie). *Bull Eng Geol Environ* 57:301–310
- Benhallou H (1985) Les catastrophes sismiques de la région d'Cheliff dans le contexte de la sismicité historique de l'Algérie. PhD Thesis, University of Algiers.
- Benouar D (1993) The seismicity of Algeria and adjacent regions during the twentieth century. PhD-Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine. Univ. London, 712 pp
- Benouar D (1994) Magnitude-intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes. *Earthq Eng Struct Dyn* 23:717–727
- Benouar D (1996) Seismic hazard evaluation at Algiers using Benouar's earthquake catalogue. *Nat Hazards* 13:119–131
- Bensaïbi M, Tadjer K, Brahim Mezazigh B (2007) Scénario catastrophe de la ville de Blida. 7th National Conference AFPS Ecole Centrale Paris, 2007.
- Bezzechoud M, Ayadi A, Sebai A, Aï Messaoud M, Mokrane A and Benhallou H (1996) Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI). *Avances en Geofisica y Geodesia*, I, IGN, Madrid, 107–114.
- Bougdal R (2007) Urbanisation et mouvements de versants dans le contexte géologique et géotechnique des bassins néogènes d'Algérie du Nord. PhD thesis. USTHB, Algiers, p 185.
- Boughacha MS, Ouyed M, Ayadi A, Benhallou H (2004) Seismicity and seismic hazard mapping of northern Algeria: map of maximum calculated intensities (MCI). *J Seismol* 8:1–10
- Bouhadad Y (2001) The Murdjadjo, Western Algeria, fault-related fold: implications for seismic hazard. *J Seismol* 5:541–558
- Bouhadad Y, Laouami N (2002) Earthquake hazard assessment in the Oran region (Northwest Algeria). *Nat Hazards* 26:227–243
- Bouhadad Y, Laouami N, Bensalem R, Larbes S (1998) Seismic hazard estimation in the central Tell Atlas of Algeria (Algiers-kabylia). PRO. 11th ECEE, Balkma, Rotterdam.
- Boumif MA, Haessler H, Meghraoui M (1987) The Constantine earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study. *Earth Planet Sci Lett* 85:451–460

- C.R.A.A.G (1994) Les séismes en Algérie de 1365 à 1992, Publication du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et de Géophysique (CRAAG), sous la direction de Benhalou, H. et Bezzeghoud, M.
- C.R.A.A.G- Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et de Géologie (2002) Les séismes en Algérie de 1992 à 2001. Service de surveillance sismique, Alger.
- Casado L, Molina C, Giner JJ, Delgado J (2000) Magnitude-intensity relationships in the Ibero-Maghrebian region. *Nat Hazards* 22(3): 269–294
- Centre de Génie Parasismique C.G.S (2003) Rapport final du 20/11/2003: Etude de l'aléa sismique de la région de Constantine.
- Coiffait PHE (1992) Un bassin post-nappe dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord-orientale). PhD Thesis, University of Nancy.
- Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bull Seismol Soc Am* 58:1583–1606
- Cramer H (1961) *Mathematical methods of statistics*, second edn. Princeton University Press, Princeton
- DeMets C, Gordon RC, Argus DF, Stein S (1990) Current plate motion. *Geophys J Intern* 101:425–478
- Deschamps A, Bezzeghoud M, Boucif A (1991) Seismological study of the Constantine (Algeria) earthquake (27 Octobre 1985). In: J. Mezcua and A. Udías (eds), *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region*. Monografía 8, IGN, Madrid, 163–173.
- Durand Delga M (1969) Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ Serv Géol Algérie* 39:89–131
- Farsi M, Belazougui M (2007) Microzonage du risque sismique de la wilaya d'Alger. 7th National Conference AFPS Ecole Centrale Paris, 2007.
- Gardner JK, Knopoff L (1974) Is the sequence of earthquake in Southern California, with aftershocks removed, poissonian. *Bull Seismol Soc Am* 64:1363–1367
- Geomatrix Consultants (1993) Probabilistic seismic hazard analysis computer program: A user manual.
- Grünthal G, Wahlström R (2012) The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *J Seismol* 16(3):535–570. doi:10.1007/s10950-012-9302-y
- Guiraud R (1973) Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. PhD. thesis. Nice University.
- Gutenberg B, Richter CF (1954) *Seismicity of the earth and associated phenomena*. Princeton University Press, NJ, 310 pp
- Hamdache M (1998a) Seismic hazard assessment for the main seismogenic zones in North Algeria. *Pure Appl Geophys* 152:281–314
- Hamdache M (1998b) Seismic hazard estimation in northern Algeria. *Nat Hazards* 18:119–144
- Hamdache M, Retief SJP (2001) Site-specific seismic hazard estimation in the main seismogenic zones of north algeria. *Pure appl. GEOPHYS.* 158, 1677–1690.
- Hamdache M, Bezzeghoud M, Mokrane M (1998) Estimation of seismic hazard parameters in the northern part of Algeria. *Pure Appl Geophys* 151:101–117
- Hamidou M, Sbartaï B (2016) Deterministic assessment of seismic risk in Constantine city. Northeast Algeria *Nat Hazards*. doi:10.1007/s11069-016-2693-2
- Harbi A (1996) La marge algérienne orientale: résultats d'une étude par sismique réflexion, C.R.A.A.G Publications (internal report), Alger, n°762, 124 pp.
- Harbi A (2001) Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents Actifs dans le Nord-Est Algérien. PhD Thesis, University of Algiers.
- Harbi A (2006) Evaluation de l'Aléa Sismique en Algérie du Nord par la Modélisation de l'Input Sismique dans les Zones Urbaines et l'Établissement d'un Catalogue. PhD Thesis, University of Algiers.
- Harbi A, Benouar D, Benhalou H (2003) Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria Part I: Review of historical seismicity. *Journal of Seismology*, January, 1; 7: 115–136.
- Harbi A, Maouche S, Ayadi A (1999) Neotectonics and associate seismicity in the Eastern Tellian Atlas of Algeria. *J Seismol* 3:95–104
- Harbi A, Maouche S, Ayadi A, Benouar D, Panza GF, Benhalou H (2004) Seismicity and tectonic structures in the site of Algiers and its surroundings: a step towards microzonation. *PAGEOPH* 161: 949–967
- Harbi A, Peresan A, Panza GF (2008) Seismicity of Eastern Algeria: ECEA the revised and extended earthquake catalogue. Submitted to *Natural Hazard*. Available as ICTP internal report, IC/IR/2008/011.
- Harbi A, Peresan A, Panza G (2010) Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. *Nat Hazards* 54:725–747
- Hatzfeld D (1978) Etude sismotectonique de la zone de collision Ibéro-Maghrebine. Ph. D., Thesis, Grenoble (France), pp 281.
- Hée A (1950) Catalogues des séismes algériens de 1850 à 1911. *Ann. Physical. Globe*, Strasbourg 6:41–49
- Kijko A (2004) Estimation of the maximum earthquake magnitude. *Mmax*. *Pure Appl Geophys* 161:1655e1681
- Kijko A, Sellevoll MA (1992) Estimation of earthquake parameters from incomplete data files. Part II Incorporation of magnitude heterogeneity *Bull Seismol Soc Am* 82:120–134
- Kijko A, Singh M (2011) Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation. *Acta Geophysica* 59 (no. 4), 674e700. doi:10.2478/s11600-011-0012-6.
- Laouarni N, Slimania A, Bouhadada Y, Chatelaina JL, Noura A (2006) Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. *Soil Dyn Earthq Eng* 26:991–1003
- Marni R, Guiraud R (2006) End cretaceous to recent polyphased compressive tectonics along the 'Mo'le Constantinóis' and foreland (NE Algeria). *Afr Earth Sci* 45(1):123–136
- Martínez Solares JM and Mezcua J (2002) *Seismic Catalog of the Iberian Peninsula (880 B.C.- 1900)*. Madrid, Spain: Ed. IGN (in Spanish).
- Mattauer M (1958) Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). *Publ Serv Carte géol Algérie, N.S. Bull.* 17, p 534.
- McGuire RK (1976) FORTRAN computer program for seismic risk analysis. *US Geol Surv, Open File Rep* No:76–67
- McGuire RK (1978) FRISK: computer program for seismic risk analysis using faults as earthquake sources. *U.S. geological survey. Open file. report* 78–1007.
- McGuire RK, Arabasz, WJ (1990) An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental. Geophysics*, 3, pp. 333e353.
- McKenzie D (1972) Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys J Astr Soc* 30:109–185
- Meghraoui M (1988) Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie, tectonique active, paléosismologie, et synthèse sismotectonique, PhD Thesis, University of Paris-Orsay, 356 pp.
- Meghraoui M, Jaegy R, Lammali K, Albaredé F (1988) Late Holocene earthquake sequences on the El Asnam (Algeria) thrust fault, *Earth Planet. Sci Lett* 90:187–203
- Mezcua J and Martínez Solares JM (1983) Seismicity of the Ibero-Maghrebian Region. IGN report, Madrid, Spain (in Spanish).
- Mokrane A, Ait Messaoud A, Sebai A, Ayadi A & Bezzeghoud M (1994) Publication du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique. Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. Département: Etudes et Surveillance Sismique, ESS, C.R.A.A.G, Alger-Bouzaréah.

- Mortgat CP, Shah HC (1978) Seismic hazard analysis of Algeria, technical report, the John A. Blume Earthquake Engineering Center, California, pp. 97.
- Musson R (1999) Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region; *Ann. Geofis* 42(6):1109–1124
- Ordaz M, Martinelli F, Aguilar A, Arbolada J, Meletti C, D'Amico V (2012a) Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México; CRISIS 2012.
- Ordaz M, Martinelli F, Aguirer A, Arbolada J, Meletti C and Amico V D (2012b) CRISIS 2007: Program for computing seismic hazard, Ver. 4.4, Instituto de Ingeniería, UNAM, Mexico.
- Ousadou F, Dorbath L, Dorbath C, Bounif MA, Benhallou H (2013) The Constantine (Algeria) seismic sequence of 27 October 1985: a new rupture model from aftershock relocation, focal mechanisms, and stress tensors. *J Seismol* 17(2):207–222
- Peláez JA, Hamdache M, Pezcasado C (2006) Seismic hazard in terms of spectral accelerations and uniform hazard spectra in northern Algeria. *Pure Appl Geophys* 163:119–135
- Peláez JA, Hamdache M (2004) Comment on the paper "Earthquake Hazard Assessment in the Oran Region (Northwest Algeria)" by Youcef Bouhadda and Nasser Laouami. *Nat Hazards* 32:155–159
- Peláez JA, Hamdache M, Pezcasado C (2005) Updating the probabilistic seismic hazard values of northern Algeria with the 21 May 2003 $M = 6.8$ Algiers earthquake included. *Pure Appl Geophys* 162(2005):2163–2177
- Philip H (1987) Plioquaternary evolution of the stress field in Mediterranean zones of subduction and collision. *Ann Geophys* 5B:301–320
- Philip H, Meghraoui M (1983) Structural analysis and interpretation of the surface deformation of the El Asnam earthquake of October 10, 1980. *Tectonics* 2(1):17–49
- Philip H, Thomas G (1977) Détermination de la direction de raccourcissement de la phase de compression quaternaire en Oranie (Algérie). *Revue de Géogr Phys et Géol Dynam* XIX(4):315–324
- Règles parasismiques algériennes [Rules of Algerian earthquake]. CGS, Algeria, 1981.
- Règles parasismiques algériennes [Rules of Algerian earthquake]. CGS, Algeria, 1988.
- Règles parasismiques algériennes [Rules of Algerian earthquake]. CGS, Algeria, 1999.
- Règles parasismiques algériennes [Rules of Algerian earthquake]. CGS, Algeria, 2003.
- Sadigh K, Chang CY, Abrahamson NA, Chiou SJ and Power MS (1993) Specification of long period ground motion. Updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factors for near fault effects, Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, 11–12 March, San Francisco, CA, pp. 59–70.
- Stepp JC (1972) Analysis of the completeness of the earthquake sample in the Puget sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. *Proc Inter Conf Microzonation*, Seattle Washington, USA 64:1189–1207
- Thomas G (1985) Géodynamique d'un bassin intramontagneux: Le bassin du bas Cheliff occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire, PhD-Thesis, Univ. Pau, 594 pp.
- Vila JM (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, PhD-Thesis, Univ. Paris VI, 633 pp.
- Wiemer S (2001) A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seism Res Lett* 72(3):373–382
- Wiemer S, Katsumata K (1999) Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones. *J Geophys Res* 104:13,135–13,151
- Wiemer S, Wyss M (2000) Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. 2000. *Bull Seismol Soc Am* 90(4): 859–869
- Wyss M, Schorlemme D, Wiemer S (2000) Mapping asperities by minima of local recurrence time: the San Jacinto-Elsinore fault zones. *J Geophys Res* 105(B4):7829–7844
- Yelles Chaouche AK, Deramchi A, Ferkoul A and Aoulache K (2002) Les séismes en Algérie de 1992 à 2001.
- Weichert DH (1980) Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bull Seism Soc Am* 70(4):1337–1346

CHAPITRE 5.

**ÉVALUATION DETERMINISTE DU
RISQUE SISMIQUE DANS LA VILLE
DE CONSTANTINE, AU NORD-EST
DE L'ALGERIE**

Chapitre 5.

Évaluation déterministe du risque sismique dans la ville de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Abstract.....	128
1 Introduction.....	129
2 Overview of Constantine city.....	130
2.1 Study area.....	130
2.2 Seismotectonic context of Constantine region.....	130
2.3 Creation of an earthquake scenario for the Constantine city.....	132
3 Methodology used for assessment of seismic risk in Constantine.....	133
3.1 Peak ground acceleration (PGA) on bedrock.....	136
3.2 PGA soil amplification factors (Coeff).....	139
3.3 PGA threshold for landslides (Tl).....	139
3.4 PGA threshold for liquefaction (Tliq).....	139
3.5 PGA thresholds for induced phenomena (Ti).....	139
3.6 The method VULNERALP level 1.0.....	140
3.6.1 Vulnerability Assessment.....	140
3.6.2 Vulnerability index.....	140
4 Results and discussion.....	141
4.1 Risk Assessment.....	141
4.2 Calculation of maximal acceleration (Amax).....	143
4.3 Calculation of vibrational acceleration (Avib).....	144
4.4 Calculation of intensities (I).....	144
4.5 Calculating the coefficients of safety (Fs) of induced effects.....	144
4.6 Damage assessment.....	145
4.7 Building vulnerability estimates.....	145
4.8 Damage evaluation.....	145
5 Conclusions.....	148
6 References.....	148

Chapitre 5.

Deterministic assessment of seismic risk in Constantine city, northeast Algeria

Ce chapitre est constitué d'une publication scientifique internationale représentant la deuxième partie de la Thèse portant sur l'évaluation du risque sismique par la méthode déterministe et la vulnérabilité sismique dans la Ville de Constantine, nord-est de l'Algérie. Cet article a été publié à la revue scientifique « Natural Hazards Journal-DOI 10.1007/s11069-016-2693-2» à la fin de l'année 2016. Au vu de l'avis de plusieurs reviewers ainsi que des lecteurs, cet article a eu une grande valeur scientifique, par son apport dans le domaine du risque sismique dans les zones urbaines.

La ville de Constantine située au Nord de l'Algérie, région à forte sismicité, est classée en zone IIa d'après le Règlement Parasismique Algérien (RPA99 version 2003). De part le passé, la ville a été secouée par plusieurs séismes destructeurs. Parmi les plus récents ceux du 4 Août 1908 (Ms=5.25), du 6 août 1947(Ms=5.3) et du 25 Octobre 1985(Ms=6.0). A cet effet, afin de minimiser les effets désastreux d'un probable futur séisme, une évaluation de l'aléa sismique de la ville de Constantine a été effectuée dans cette étude .Parallèlement, une enquête de terrain a été menée pour définir des zones homogènes de bâti pour lesquels un indice de vulnérabilité moyen a été établi à partir de critères constructifs simples. Pour réaliser et visualiser l'impact de la vulnérabilité sismique sur la ville de Constantine, des cartes de risques ont été conçues à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) avec le logiciel ArcGis.

Author's personal copy

Nat Hazards (2017) 86:S441–S464
 DOI 10.1007/s11069-016-2693-2



ORIGINAL PAPER

Deterministic assessment of seismic risk in Constantine city, Northeast Algeria

Mouloud Hamidatou¹ · Badreddine Sbartaï²

Received: 1 December 2015 / Accepted: 22 November 2016 / Published online: 5 December 2016
 © Springer Science+Business Media Dordrecht 2016

Abstract Northern Algeria has experienced many destructive earthquakes throughout its history. The largest recent events occurred in El Asnam on October 10, 1980 (moment magnitude; $M_w = 7.3$), in Constantine on October 27, 1985 (surface-wave magnitude; $M_s = 6.0$), and in Zemmouri–Boumerdes on May 21, 2003 ($M_w = 6.8$). Because of the high population density and industrialization in these regions, the earthquakes had disastrous consequences and hence highlighted the vulnerability of Algeria to seismic events. To reduce seismic risk in Constantine, the capital city of East Algeria, we present a seismic risk scenario for this city, focusing on the vulnerability of the key historic areas of Coudia, Bellevue–Cilic, and the Old City. This scenario allows us to assess the maximum ground acceleration using empirical attenuation laws, based on the following considerations: (a) the 1985 Constantine seismic event as an earthquake reference; (b) site effects related to regional geology; (c) damage to buildings, and (d) seismic vulnerability. This study shows the map of peak ground acceleration taking into account the effects of site lithology (Avib). We observe the strongest vibrations along the two rivers “Boumerzoug and Rhumel” and also, we note that the EC8 gives a good estimate acceleration in the image of the three studied areas (Bellevue–Cilic, Coudia, and Old Town). By correlating with the geology, we observe an acceleration of 0.13 g in the neritic limestone of the rock (Old Town) something that fits with the value obtained 0.14 g (PGA) without taking into consideration the lithology. Moreover, according to the Algerian Earthquake Engineering Code (2003) (RPA), the Wilaya of Constantine is classified in the zone IIIa (medium

Mouloud Hamidatou
 mouloudh83@yahoo.com

Badreddine Sbartaï
 bsbartaï@hotmail.fr

¹ Department of Civil Engineering, University of August 20, 1955-Skikda, P. O. Box 26, 21000 Skikda, Algeria

² Department of Civil Engineering, University of Badji Mokhtar-Annaba, P. O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria

seismicity) with an acceleration data of 0.25 g. This study integrates geographic information system (GIS) data into risk models.

Keywords Vulnerability index · Earthquake · Seismic risk · Damage · GIS · Acceleration

1 Introduction

Earthquakes are among the most deadly and destructive natural hazards. Seismic activity resulted in more than 2 million deaths during the last century and destroyed many cities (Duval 2007). Earthquake activity in North Algeria constitutes a constant threat to human life and property, causing major economic losses and disruption. The losses result from not only great earthquakes, such as the $M_s = 7.3$ El Asnam event of October 10, 1980 (Ouyed et al. 1981), but intermediate events such as the $M_s = 5.9$ Constantine earthquake of October 27, 1985 (Bounif et al. 1987) and the May 21, 2003, Zemmouri earthquake ($M_w = 6.8$) (Belazougui 2008; Meslem et al. 2012; Mébarki et al. 2013). Constantine city lies in the eastern Tellian Atlas Mountains, one of the most seismically active regions of Northeast Algeria. Assessments of seismic risk in Northeast Algeria are relatively new and started in the 1990. The current work consists of regional and local studies, mainly based on seismic risk assessment and seismic hazard (Mortgat and Shah 1978; Benouar 1996; Hamdache et al. 1998; Aoudia et al. 2000; Bouhadad and Laouami 2002; Boughacha et al. 2004; Peláez et al. 2004, 2005, 2006; Harbi 2006; Laouami et al. 2006; Farsi and Belazougui 2007; Bensaïbi et al. 2007; Boukri et al. 2012a, b). Seismic risk assessment is already well established for major urban centers, but is still of great importance in risk assessment in more sparsely populated areas. For example, it is crucial to examine the potential impact of earthquakes on Constantine city because there are few connecting roads between the city and nearby centers. Accurate assessment of the seismic risk faced by urban areas is needed by public authorities and decision makers, who are responsible for regional planning and urbanization. Geotechnicians, architects, construction supervisors, and public works institutions, among others, must have a good understanding of the nature of the potential for soil liquefaction before making decisions related to development. Here, we present the results of a seismic risk scenario developed for Constantine city. For each at-risk element, the procedure consists of linking seismic vulnerability values with hazard values. Hazard is expressed in terms of maximum horizontal soil acceleration as a first step in risk analysis. Induced phenomena (liquefaction and landslides) are evaluated using soil data, expressed in terms of maximum triggering percentage of gravitational acceleration (PGA). For each of these hazards and for each element of seismic risk, we assess potential damage to structures in three homogeneous areas (Coudia, Bellevue-Cilloc, and Old Town). We then describe a procedure for the adaptation of existing seismic risk and vulnerability assessment approaches to account for local geographic and geologic features. Our input information comprises an earthquake scenario, earthquake catalogs, local geology, soil classification, geotechnical conditions, and building structural data and typology. We present results as maps, including distributions of peak ground acceleration (PGA) on bedrock and design ground acceleration (DGA), intensity (I), damage assessment (D), and coefficients of safety ($F_{s_{liq}}$, $F_{s_{lan}}$) for induced effects. These thematic maps constitute important basic information for sustainable socioeconomic development in Northeast Algeria.

2 Overview of Constantine city

2.1 Study area

Constantine, the second most important city in Algeria and the largest city in Northeast Algeria, is assumed to have a moderate seismic risk. It houses important economic, scientific, and cultural aspects of Algerian infrastructure. Constantine province occupies a central geographic location within the region (Fig. 1). The center of Constantine occupies an area of 232 km², with 448,374 inhabitants, yielding a high population density of 1936 inhabitants/km² (Boudemagh 2013). Many civilizations have influenced the development and architecture of the urban area throughout its long history, from the Phoenicians to modern times (Boussouf 2002).

2.2 Seismotectonic context of Constantine region

The Tellian Atlas (Northeast Algeria) is an active collision zone between the African and Eurasian plates that is experiencing shortening of ~5–6 mm/year (Anderson and Jackson 1987; Argus et al. 1989; DeMets et al. 1990). The present study area is located around of the Constantine city, where the regional tectonics has been studied previously (Fig. 2). The study area was settled in the post-pley period, after emplacement of the Numidian layers (the uppermost structural layers in the mountain range). This area is bounded to the east by the Guelma basin (specifically, by the Temolouka Fault that separates the two basins), and to the north by an unconformity with the inner area of the Petite Kabylie, which

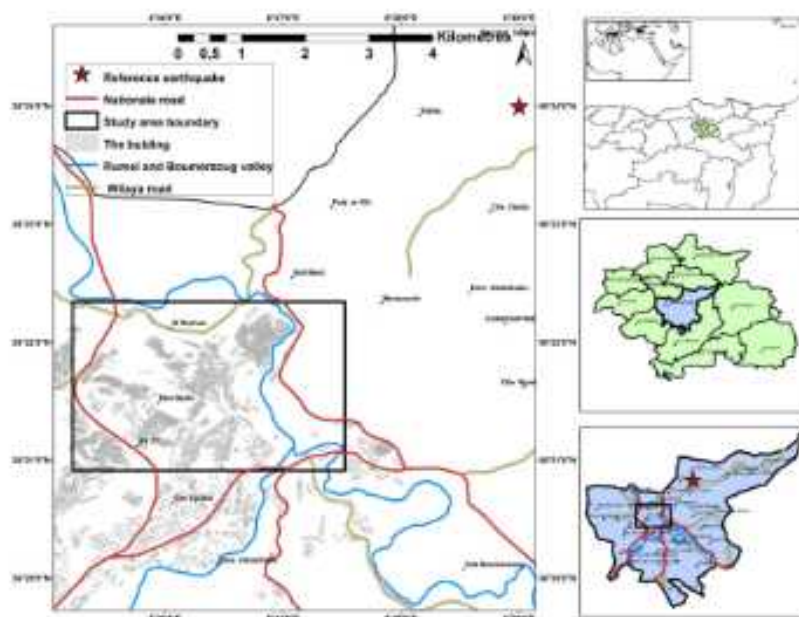


Fig. 1 Location map of Constantine city and choice reference earthquake for study area

Author's personal copy

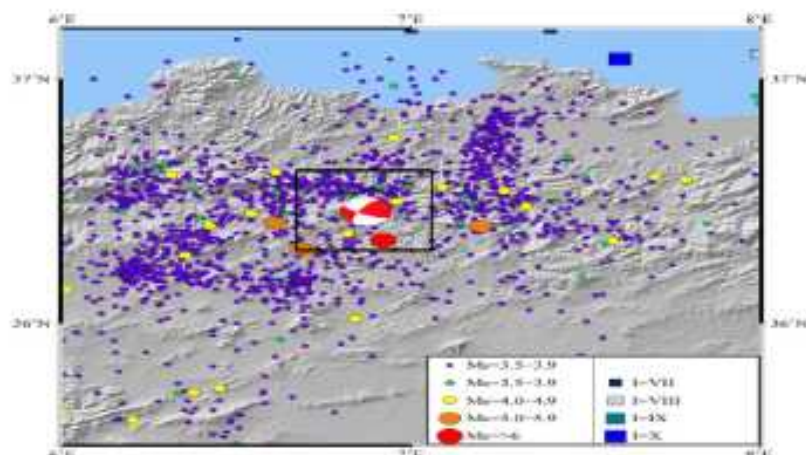


Fig. 3 Spatial distribution of earthquakes in Northeast Algeria from 1357 to 2014

Table 1 Historic seismicity in the Constantine region from Rothé (1950), Grandjean (1954). Two main historic seismic events are apparent: August 4, 1908, and August 6, 1947. The recurrence interval of the main seismic event is ~ 39 years

Date	Time	Location		Magnitude or intensity
		Log	Lat	
August 4, 1908	02:11	36°24'N	6°36'E	VIII Constantine
January 22, 1925	11:00	36°10'N	6°35'E	V
October 23, 1928	06:00	36°18'N	6°35'E	VI
March 19, 1946	05:23:29	36°24'N	6°36'E	(5.3) VIII-IX
August 6, 1947	09:45:38	36°18'N	6°40'E	IV
November 18, 1947	05:59	–	–	IV Constantine
December 20, 1947	10:30	–	–	IV El Khroub
July 21, 1948	11:40	–	–	IV Constantine
September 17, 1948	19:00	36°24'N	6°36'E	IV
August 25, 1959	22:31:30	36°20'N	6°40'E	V
October 27, 1985	19:34:59	36°24'N	6°39'E	(6.0) IX El Aria

reviews of historic seismicity by Harbi et al. (2003, 2010) concluded that the seismic history of the region was largely unknown before 1900 (Ousadou et al. 2012).

2.3 Creation of an earthquake scenario for the Constantine city

The Constantine city and its vicinity, with an area of about 55 km², were chosen to illustrate GIS-based risk assessment, using data on the structural vulnerabilities of different types of construction. Maps were produced from GIS databases using thematic analysis

Author's personal copy

tools in MapInfo 7.0, spatial analysis tools in ArcGIS 9.3 (Christophe 2008), and other techniques, such as georeferencing and vectorization layers (Thierno 2004). For a deterministic scenario, our choice of reference earthquake in the Constantine province was the October 27, 1985, main shock, for which the epicenter was located between El Khroub and Beni Yagoub. We used a magnitude of $M_s = 6$ and a depth of 10 km (Bounif et al. 1987). We have geologic maps (1/50,000) at this scale: the eastern part of the province, which includes the city of Constantine (Vila 1980), and the western region, which covers El Aria (Coiffait et al. 1992). The association of the two parts was used to produce a geologic map, assembled, and georeferenced (Fig. 4). We created a 1-km grid for the entire Wilaya of Constantine, a 400-m grid for the city of Constantine, a 100-m grid covering the study area, and three 20-m grids covering the buildings of the Old Town (the Rock), Coudia, and Ciloc–Bellevue (Fig. 5).

3 Methodology used for assessment of seismic risk in Constantine

The main goal of this work is to evaluate seismic risk levels for buildings and roads in the Constantine city, based on the vulnerability of infrastructure to potential seismic sources (e.g., magnitudes, distances, and source mechanisms). The methodology is based on evaluating the consequences of ground motion (PGA) for building stocks and soil (Fig. 6). Risk is assigned to each area element based on field assessments of the soil amplification coefficient (coeff) due to lithological site effects, and PGA triggering thresholds for various phenomena. Field surveys allow the assessment of ground shaking vulnerability by creating a specific vulnerability index for each building. From these, a more general vulnerability index can be developed for homogenous urban zones. PGA was computed for

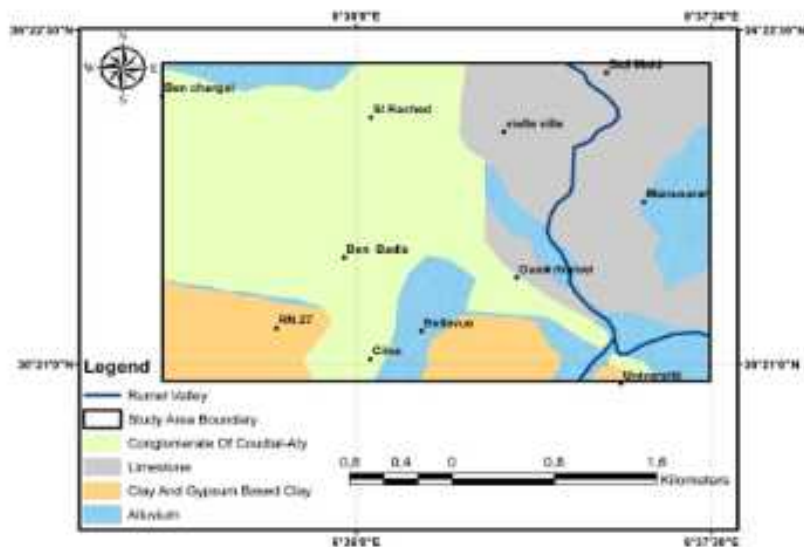


Fig. 4 Geologic map of study area

Author's personal copy

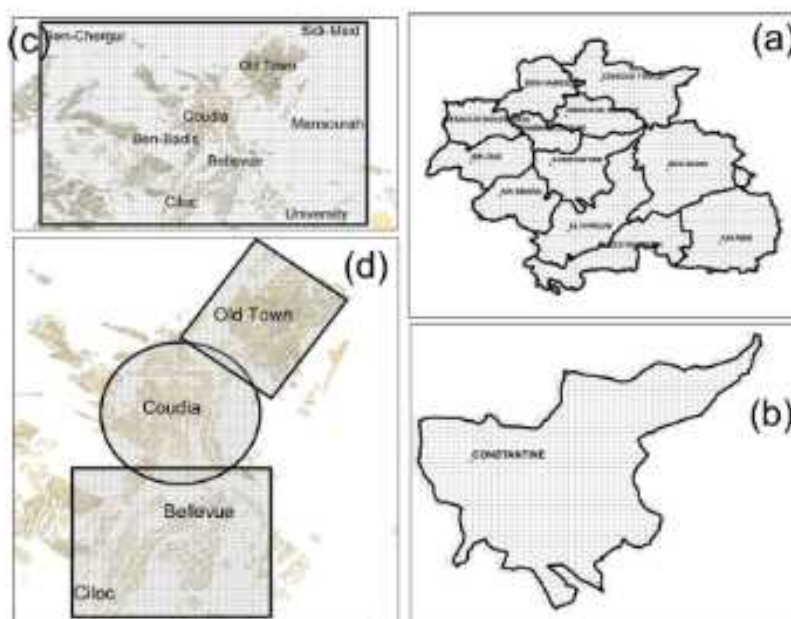


Fig. 5 Different grids: **a** grid (1 km spacing) across the Wilaya of Constantine, **b** grid (400 m) across the Constantine city, **c** grid (100 m spacing) across the study area, **d** finer grid (20 m) over Bellevue-Cilloc, Coudia, and the Old Town

the selected earthquake scenario using existing empirical attenuation laws summarized by Bommer et al. (2003). PGA values were then multiplied by site amplification factors to obtain maximum ground shaking values (A_{vib}). For each hazard phenomenon, a security factor was computed by comparing A_{vib} with a threshold T_i to estimate an event probability. Finally, a damage grade was computed by cross-referencing the vulnerability index with EMS98-intensity values derived from A_{vib} . A low-grade approach was used to infer site effect amplifications. Soil types were assigned according to building code soil classifications (NFP06-013 1995). For each soil category, an amplification factor (coeff) is given in Table 2, based on existing tables proposed for other soil classifications (TC4 2003; EC8 1998). A PGA threshold for liquefaction was assigned based on a pioneering study of susceptibility to liquefaction as a function of the age and nature of sediment deposits (Youd and Perkins 1978). Table 3 lists the PGA values corresponding to zero probability of liquefaction for each susceptibility category. These values are based on Hazus99TM (1999). The method proposed by Keefer (1984), Wilson and Keefer (1985) is used to estimate the PGA threshold for landslides (T_L). Based on the analysis of many earthquake effects, Table 4 provides the minimum PGA for triggering landslides as a function of geologic structure, slope angle, and water saturation. For each induced liquefaction and landslides, we define a security factor (F_s liq and F_s ls) to warn if a risk is likely to be triggered during an earthquake. Values of 0–1 are obtained for each factor by comparing estimated PGA (including site effects) with the threshold for a given liquefaction and landslides and site conditions (Table 5). The method used in the present study

Author's personal copy

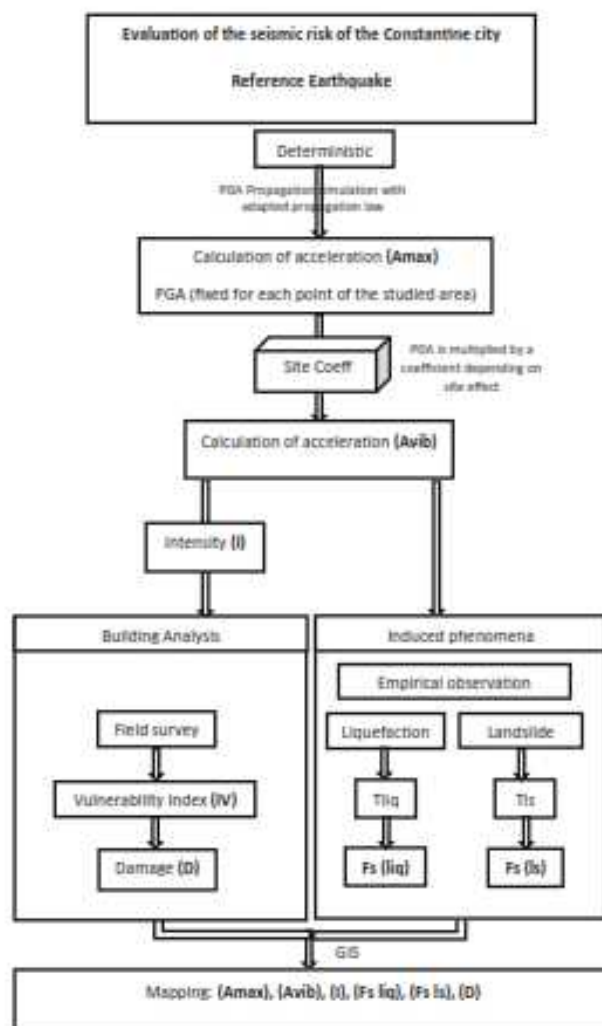


Fig. 6 Global concept of the method of the study

for the assessment of building vulnerability is derived from the European Macroseismic Scale (EMS98 1998), based on correlations between macroseismic intensity and apparent (observed) damage from past earthquakes. This vulnerability model has been improved in several studies (RADIUS, GNDT, Risk-UE, and VULNERALP) (Radius 1999; Mouroux et al. 2004; GNDT 1993a, b; Risk-UE 2003; Guéguen et al. 2007). In this work, we use a vulnerability evaluation criterion partly developed in the framework of the VULNERALP project, identical to that used by Nicem France during the GEMGEP project (Bard et al.

Author's personal copy

Table 2 Proposed amplification factors for each defined soil category (EC8 1998)

Soil type		Coeff	N SPT	Relative density (%)	Modulus (Mpa)	V _s (m/s)
Bedrock	Hard bedrock and hard chalk	1			>100	>800
Soil with good to very good geotechnical characteristics	Compact granular soil	1.35	>30	>60	>20	>400
	Soil with good coherence (clay or hard marl)				>25	
Soil with medium geotechnical characteristics	Weathered or fractured rock				50–100	300–800
	Granular soil with medium compaction	1.35	10–30	40–60	6–20	150–400
	Soil with good coherence and medium consistency + soft chalk	1.5			5–25	
Soil with weak geotechnical characteristics	Loose granular soil		<10	<40	<6	<150
	Soft coherent soil (soft clay or mud) and altered chalk	1.8	<2		<5	<150

2005). This approach, derived from that developed by the GNDT group in Italy (Benedetti and Petrini 1984; GNDT 1993b; Faccioli et al. 1999; Dolce et al. 2003), is adapted to Algerian building standards. A standardized survey and inventory form are used for data collection and the rapid determination of a vulnerability index (VI), based on building typology and aggravating factors (e.g., height, irregularities in shape, position with respect to other buildings). This makes it possible to quantitatively estimate the susceptibility to specific hazards. The vulnerability index, which ranges from zero (not vulnerable) to 100 (exceedingly vulnerable), is used to construct an empirical vulnerability (or fragility) curve for a building. This curve links a seismic event, expressed in terms of macroseismic intensity, with a damage index (*d*), from which we compute probabilities corresponding to different levels of damage. This distribution is estimated from a probability law, with parameters scaled based on actual observations of damage during various earthquakes, mainly in Italy and Greece. Using vulnerability indices obtained from field surveys makes it possible to estimate the damage rate (*d*) for a given EMS-98 intensity using the formula of Giovinazzi and Lagomarsino (2003) (Tables 6, 7). This yields a fragility function associated with each vulnerability index. The damage rate is correlated with the damage grade, defined in the EMS-98 (Table 8), but allows building distributions to be divided into five EMS-98 damage grades using a binomial formula Giovinazzi and Lagomarsino (2003).

3.1 Peak ground acceleration (PGA) on bedrock

In a deterministic scenario, the PGA of bedrock is assigned to each point in the zone. To evaluate scenarios for a particular earthquake, the user can designate an epicenter location and magnitude. Induced PGA can be computed from this information using the empirical attenuation laws of Douglas (2001). However, empirical laws are developed in local contexts and are not always generalizable. Their application, even when the conditions are fulfilled, is subject to large uncertainties that can be difficult to quantify. This must be kept

Author's personal copy

Table 3 Proposed T liquefaction (g) and PGA thresholds for landslides, as functions of geology and age. Adapted from Wilson and Keefer (1985)

Type of deposit	Proposed T_{liq} by age of deposit			
	<500 ya modern	<11 Ka Holocene	11 Ka–2 Ma Pleistocene	>2 Ma pre-Pleistocene
<i>Continental deposits</i>				
River channel	0.09	0.12	0.21	0.26
Alluvial fan and plain	0.15	0.21	0.21	0.26
Marine terrace	–	0.21	0.26	0.26
Delta and fan delta	0.12	0.15	0.21	0.26
Lacustrine	0.12	0.15	0.21	0.26
Colluvium	0.12	0.15	0.21	0.26
Dune	0.12	0.15	0.21	0.26
Loess	0.12	0.12	0.12	–
Glacial fill	0.21	0.21	0.26	0.26
Tuff	0.21	0.21	0.26	0.26
Residual soils	0.21	0.21	0.26	0.26
<i>Coastal areas</i>				
Delta	0.09	0.12	0.21	0.26
Estuarine	0.12	0.15	0.21	0.26
Beach	0.15	0.21	0.26	0.26
Lagoon	0.12	0.15	0.21	0.26
<i>Artificial embankment</i>				
Uncompact fill	0.09	–	–	–
Compacted fill	0.21	–	–	–

Table 4 Proposed T landslide (g), PGA thresholds for liquefaction (g) as a function of age, and nature of the sediment deposits. Based on Youd and Perkins (1978) and Hazus (1999)

Geologic group	Hydrological conditions	Slope angle (degrees)					
		0°–10°	10°–15°	15°–20°	20°–30°	30°–40°	>40°
Strongly cemented rocks (crystalline rocks and well-cemented sandstone, calcareous)	Wet	–	–	0.60	0.50	0.35	0.25
	Dry	–	0.4	0.25	0.20	0.15	0.15
Weakly cemented rocks and soils wet (sandy soils and poorly cemented sandstone, rock slide)	Wet	–	0.4	0.35	0.30	0.25	0.20
	Dry	0.3	0.15	0.10	0.10	0.10	0.05
Argillaceous rocks (shale, clayey wet soil, existing landslides, slump, poorly compacted fills)	Wet	0.3	0.25	0.20	0.10	0.10	0.10
	Dry	0.2	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05

Author's personal copy

Table 5 Security factors for inducing phenomena

F _s (security factor)	Induced phenomenon occurrence
F _s = 0	No release of the phenomenon
0 < F _s ≤ 0.4	Not very probable release
0.4 < F _s ≤ 1	Probable release
1 < F _s ≤ 2	Nearly certain release

Table 6 Correspondence between vulnerability classes of the EMS 98 and scores of GNDT, according Giovanazzi and Lagomarsino (2003)

Method	Equivalence EMS 98—GNDT				
	A	B	C	D	E
EMS class 98					
Score GNDT	45	25	15	5	0

Table 7 Equivalence between GNDT and methods VULNERALP for environmental criteria

Environmental criteria GNDT	Materials	IV	Equivalence VULNERALP 1.0
Buildings on stable ground with a slope exceeding 10% The foundations are all on the same level Absence of thrust due to retaining walls	Concrete Masonry	0 0	Rock-flat terrain
Buildings on the rock with a slope of between 10 and 30% Buildings on low-quality soil with a slope of between 10 and 20% Height differences foundations not exceeding 1 m Absence of thrust due to retaining walls	Concrete Masonry	5 5	Rock-flat terrain Sediment-flat terrain
Buildings on the rock with a slope of between 30 and 50% Buildings on low-quality soil with a slope of between 20 and 30% Height differences foundations not exceeding 1 m Absence of thrust due to retaining walls	Concrete Masonry	10 25	Rock-sloped terrain Sediment-flat terrain
Buildings on the rock with a slope greater than 50% Buildings on low-quality soil with a slope greater than 30% Height differences foundations exceed 1 m Thrust due to the presence of retaining walls	Concrete Masonry	15 45	Rock-sloped terrain Sediment-sloped terrain

in mind during map analyses (Bommer et al. 2003), e.g., for laws developed from European strong motion records. For earthquakes with magnitudes $4 \leq M \leq 7.7$, epicentral distances $10 \leq D \leq 200$ km, and focal depths $Z < 30$ km, PGA is given by

$$PGA = 10^{-1.482 + 0.204M - 0.383 \log^{10} \sqrt{\left(\frac{D}{10}\right)^2 + \left(\frac{Z}{10}\right)^2 + 2.4732}} \quad (1)$$

We construct a map grid where (D) is measured for each grid point.

For each mesh of the base map grid and each element of this study, the distance (D) to the earthquake is measured. The PGA is then computed from this distance (D, even if it does not fit exactly the law definition) and the magnitude (M).

Author's personal copy

Table 8 EMS-98 damage grades and corresponding damage rate ranges (EMS98 1998)

Damage grade	Damage grade level	Description	Mean damage rate, d
D0	None	No damage	0
D1	Slight	Negligible to slight damage	Inf. 0.20
D2	Moderate	Slight structural, moderate non-structural	0.21–0.40
D3	Substantial to heavy	Moderate structural, heavy non-structural	0.41–0.60
D4	Very heavy	Heavy structural, very heavy non-structural	0.61–0.80
D5	Destruction	Very heavy structural, total or near total collapse	0.81–1.00

3.2 PGA soil amplification factors (Coeff)

The aim here is to account for site effects due to soft layers above bedrock (e.g., alluvial basins), which can increase PGA and amplify damage. A low-grade approach is used. Soil type is assigned according to the French building code classification scheme (NFP06-013 1995). Based on geotechnical properties of each category, and existing tables proposed for soil classification (e.g., Borcherdt et al. 1991; TC4 2003), an amplification factor (coeff) is proposed for each soil category in Table 2. For the base map, the geologic unit crossing this study that could induce site effect is first digitalized and the most relevant coefficient of Table 2 is assigned. This step has to be clarified for this study, even if it has no influence on the resulting damage scenario map. For both base maps, the estimated PGA will be multiplied by the relative coeff to produce Avib.

3.3 PGA threshold for landslides (Ti)

Landslides are among the major consequences of earthquakes. We use the method of Keefer (1984) and Wilson and Keefer (1985) to estimate the PGA threshold for this hazard (T landslide). Table 3 gives a minimum PGA for triggering landslides as a function of deposit type and age.

3.4 PGA threshold for liquefaction (Tliq)

Liquefaction is a phenomenon that can occur when superficial sand layers lose their shear strength and act as liquids, due to rapid excitation by seismic waves. Our approach to assigning PGA liquefaction thresholds is based on the pioneering work of Youd and Perkins (1978), who investigated susceptibility as a function of age and deposit type. Table 4 shows for each of the susceptibility category, a PGA threshold corresponding to zero probability of liquefaction. These threshold values are based on Hazus99TM (1999).

3.5 PGA thresholds for induced phenomena (Ti)

To determine the soil amplification factor coeff, the PGA threshold for inducing phenomena (Ti) must be inferred from geologic maps or field surveys. For a given scenario, if Avib > Ti, a given phenomenon is likely to appear. The corresponding Ti value is fixed at

Author's personal copy

a very high value that cannot be realistically achieved by Avib. For both induced phenomena, we calculate a safety factor reflecting the probability that a given phenomenon occurs after the earthquake.

3.6 The method VULNERALP level 1.0

3.6.1 Vulnerability assessment

The VULNERALP method was proposed. Since some similarity exists between the Italian old buildings (especially masonry) and Algerian, it is based entirely on the method of GNDT (1993b). The weights and Italian scores of each structural criterion were considered as no return of comprehensive experience available in Algeria. However, for a context of moderate seismicity, it is essential to have a first level of evaluation (1.0 level) that is as simple as possible, for first hierarchical “seismic” buildings. That is why the structural criteria GNDT were alleviated. This implies simplified visual auscultation, especially as the GNDT was developed on the basis of observations of damage, the situation where construction is laid bare and structural criteria more easily completed. This method, certainly the most validated in Europe, also allows the representation of the damage and their equivalence to the average damage *D*, according to the European macroseismic scale (EMS98 2001) (Fig. 7). The types of constructs used in VULNERALP are identical to those detailed in EMS98. As a result, the *IV_i* function of the building material is fixed on the work presented by Giovinazzi and Lagomarsino (2003) who translated the vulnerability classes of the European Scale EMS98 in *IV_i* (Table 6).

3.6.2 Vulnerability index

The 1.0 level is established on the basis of six criteria that are structural building material, irregularity in elevation and plan, the shape of the roof, its period of construction, and the nature of the foundation within the meaning of GNDT. *IV_i* the means and the range of likely values extracted from GNDT vulnerability matrices are assigned to each criterion, for example, the GNDT four types of environment (Table 7), functions of the slope, and nature of foundation materials. These classes can be grouped in any case in rock or not, hillside or not, two levels of information that can be filled with high reliability. These two classes then have median scores and the likely intervals.

EMS98 Scale	1	2	3	4	5
Masonry structures					
Reinforced concrete structure					
Average damage	[0.0 – 0.2]	[0.2 – 0.4]	[0.4 – 0.6]	[0.6 – 0.8]	[0.8 – 1.0]

Fig. 7 Equivalence between EMS98 scale damage levels and the average damage *D* calculated by the method of GNDT, according to Giovinazzi and Lagomarsino (2003)

Author's personal copy

So as to be consistent with the GNDT, structural criteria not accepted by the VULNERALP method are nevertheless taken into account in calculating the IV, the associated score (and range) corresponding to the median (and range) of values of GNDT the scores. The overall IV vulnerability index is normalized to 100. Under VULNERALP, IVi the quality of construction is adjusted according to the time of construction, reflecting in France changing codes design and use of building materials. This strategy then connects the vulnerability to damage level compatible with that of the EMS98. Vulnerability matrices are then offered, with the range of likely values extracted from the criteria GNDT.

The overall IV of the structure is calculated by the following formula:

$$IV = \sum_{i=1}^n IV_i W_i \tag{2}$$

The average damage *D* is calculated based on the intensity of IEMS98 scenario earthquake and IV, and the following relationship of GNDT:

$$D = 0.5 + 0.45 \arctan (0.55(I_{EMS98} - 10.2 + 0.05IV)) \tag{3}$$

The estimated intensity for a given scenario can be mapped based on earthquake intensity using the formula of (Geoter 2002):

$$I = 3.92 \times \log_{10} (Avib) + 10.74 \tag{4}$$

Avib is a lithological term.

4 Results and discussion

In this work, we have created seismic scenarios for Constantine city, using spatial analysis with layouts suitable to determine vibrational and peak accelerations and estimate potential damage. We now present the results of our deterministic approach.

4.1 Risk assessment

Figures 8 and 9 present the peak ground acceleration values, which can reach 0.10–0.13 g for an *M* = 6.0 local earthquake. Because soil in the valley El Rhumel is mainly composed of recent quaternary alluvial deposits from the Rhumel and Boumerzoug rivers, the largest PGA values are found here. On the road between the Old Town and Boumerzoug, vibrational accelerations are estimated with soil conditions to be 0.24 g in Mansourah and Kasteur; 0.12–0.13 g in Old Town, Sidi-Msid, and Constantine University; 0.16 g in Sidi Rached and Ben Badis; and 0.20–0.22 g in Bellevue, Bencherghui, Djenane-El-Zitoune, and Bent-Elisse (Fig. 10). Using geologic data, we identify homogenous zones where induced phenomena could occur. Two threshold values corresponding to different types of induced risks are attributed to each zone. Several landslides have been detected on the slopes that border the Rhumel valley and Ciloc. Analysis of the associated slope angles, surface geologies, and hydrological conditions yields landslide threshold values of 0.10–0.25 g; the associated triggering threshold values are 0.12–0.21 g. Finally, liquefaction occurs in the main alluvial fan of the valley at 0.15 g and in secondary alluvial areas if acceleration reaches 0.09 g. The latter value may be underestimated because river alluvium is

Author's personal copy

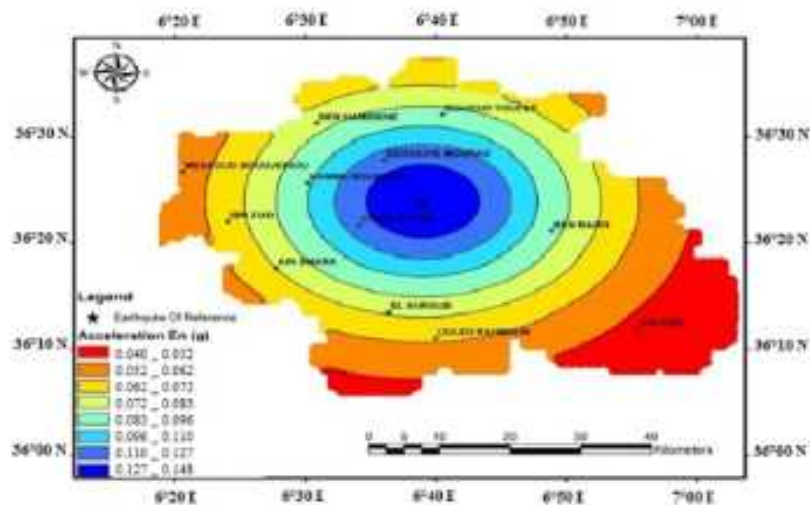


Fig. 8 Maximum acceleration (Amax) in the Wilaya of Constantine

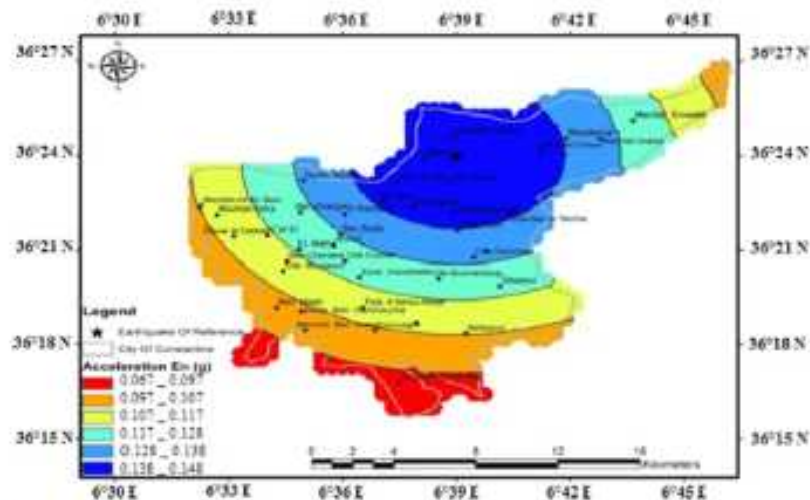


Fig. 9 Maximum acceleration (Amax) in Constantine City

composed of coarse gravel with a few small, isolated sand lenses. Regarding the PGA values derived in the chosen scenario, liquefaction presents a non-null security risk in Bellevue, Ciloc, Bent-Elisse, and Djenane-El-Zitoune (Figs. 11, 12).

Author's personal copy

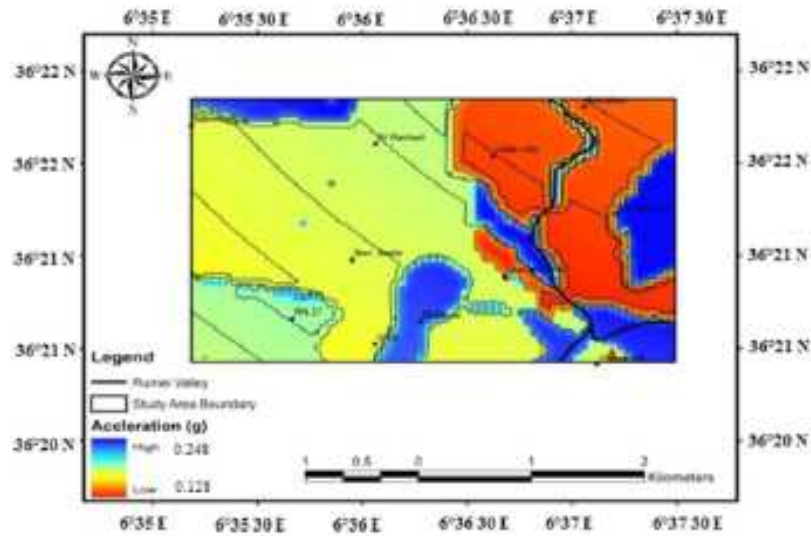


Fig. 10 Acceleration (A_{vib}) in the study area of Constantine City

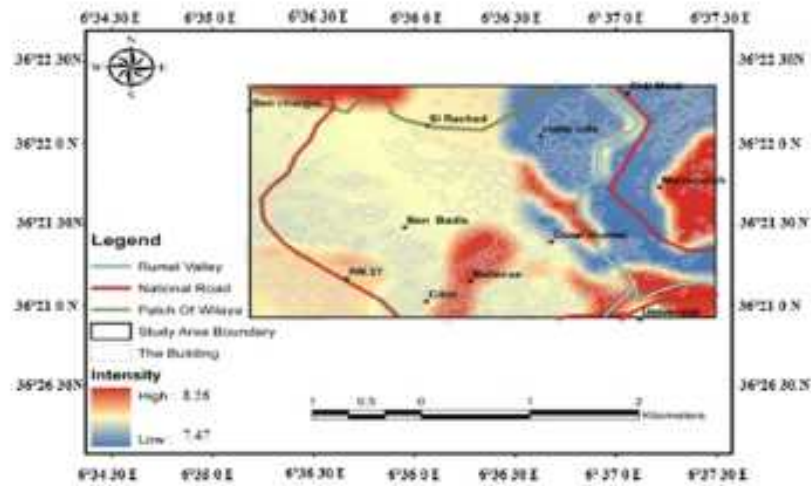


Fig. 11 Intensity (I) in the study area of Constantine City

4.2 Calculation of maximal acceleration (A_{max})

We used the attenuation law of (Bommer et al. 2003), which estimates maximum acceleration for a rocky site. The results obtained are shown in maps (Figs. 8, 9).

Author's personal copy

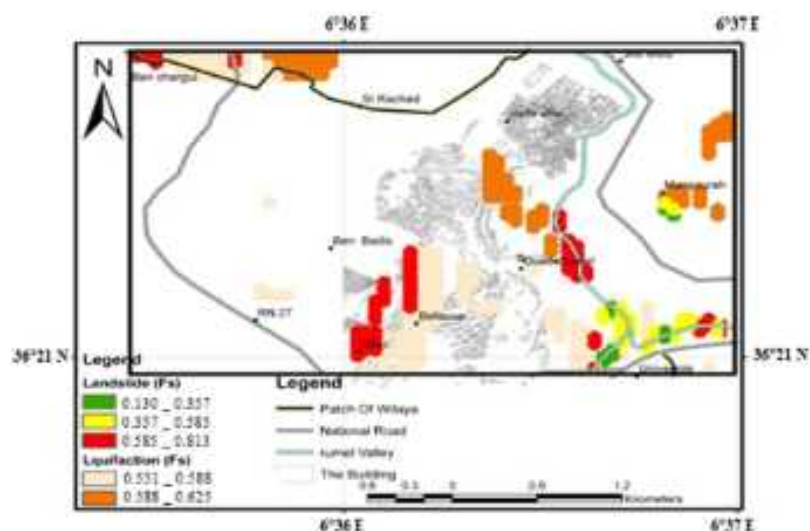


Fig. 12 Factor of safety (Fs) from the effects of the study area

4.3 Calculation of vibrational acceleration (Avib)

The same factors that amplify maximum acceleration (PGA) (e.g., lithology, EC8 1998) will change the vibration risk “Avib” significantly. The risk map in Fig. 10 shows peak ground acceleration, accounting for lithological site effects (Avib). We observe the strongest vibrations along the two rivers (Boumerzoug and Rhumel). We note that EC8 gives a good estimate of acceleration in the three study areas (Bellevue-Cilloc, Coudia, and Old Town). By integrating the acceleration with the geology, we observe an acceleration of 0.13 g in the neritic limestone (Old Town), which is similar to the value of 0.14 g (PGA) obtained without taking lithology into account. Moreover, according to the RPA (Algerian Earthquake Engineering Code), the Wilaya of Constantine is classified in Zone IIa (medium seismicity) with an expected peak acceleration rate of 0.25 g (RPA 2003).

4.4 Calculation of intensities (I)

The implementation of a damage scenario enables us to map the probable extent of damage to the Constantine city. On both maps in Fig. 10, we observe a high intensity along the two rivers (Boumerzoug and Rhumel).

4.5 Calculating the coefficients of safety (Fs) of induced effects

Figure 12 defines areas susceptible to liquefaction and landslides. From the map, we notice that liquefiable zones correspond to geologic formations (sand) in these areas, e.g., Benchergui, Bellevue, and Kef-Chadad.

4.6 Damage assessment

The use of geographic information system data has allowed us to cross-reference the vulnerability of specific neighborhoods (Bellevue–Cilloc, Coudia, and Old Town) against peak ground accelerations. Figure 13 shows estimates of damage rates for these areas: values are 0.399–0.663 for Bellevue–Cilloc, 0.501–0.738 in Coudia, and 0.634–0.793 in Old Town. We note that the highest expected rates of injury are in Old Town.

4.7 Building vulnerability estimates

Three zones were defined in Constantine city: the Coudia area, Bellevue–Cilloc, and Old Town. In all, individual vulnerabilities were assessed for 90 buildings. Old Town has the highest vulnerability index; however, indices are similar among the zones, ranging from 52 (Bellevue–Cilloc) to 69 (Old Town) (Fig. 14).

4.8 Damage evaluation

By linking PGA to the vulnerability index that we defined for the homogenous zones, we are able to estimate the mean building damage in upper Coudia. These values range between 0.502 and 0.738 (Fig. 15). Because of lithological site effects, the greatest building damage is expected in Old Town. However, only a few buildings line the Rhumel Valley; most homes are concentrated in the center of Old Town. Bellevue and Old Town are the most populated residential areas in central Constantine; it is thus interesting to study the damage that might occur at these locations on a finer scale. We find maximum damage values in the center of the Old Town. We also note that damage decreases with increasing distance from this area, reaching values as low as 0.399 (Fig. 16). Many buildings would be either destroyed or severely damaged in Old Town (Fig. 17).

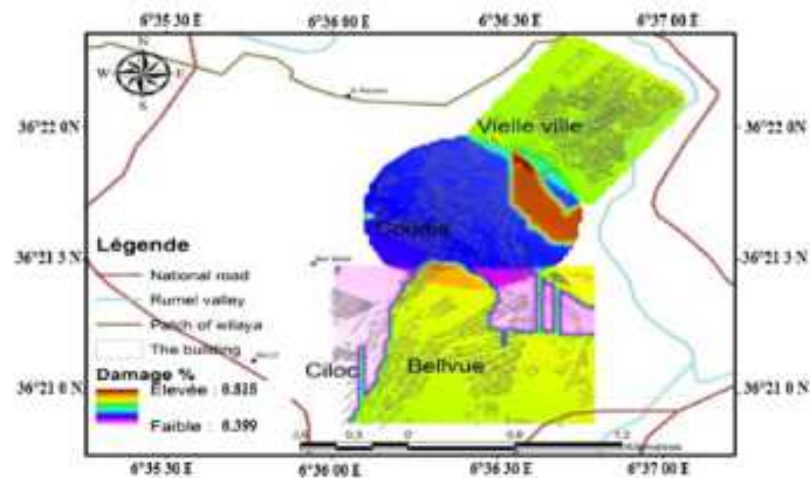


Fig. 13. Damage rates for the three districts (Bellevue–Cilloc, Coudia, and Old Town)

Author's personal copy



Fig. 14 Example of the boundary of the Bellevue-Cilic area (red-dashed line), mean vulnerability index IV = 52. The boundary of the Coudia area (green-dashed line), mean vulnerability index IV = 59 and the boundary of the Old Town area (yellow-dashed line), mean vulnerability index IV = 69

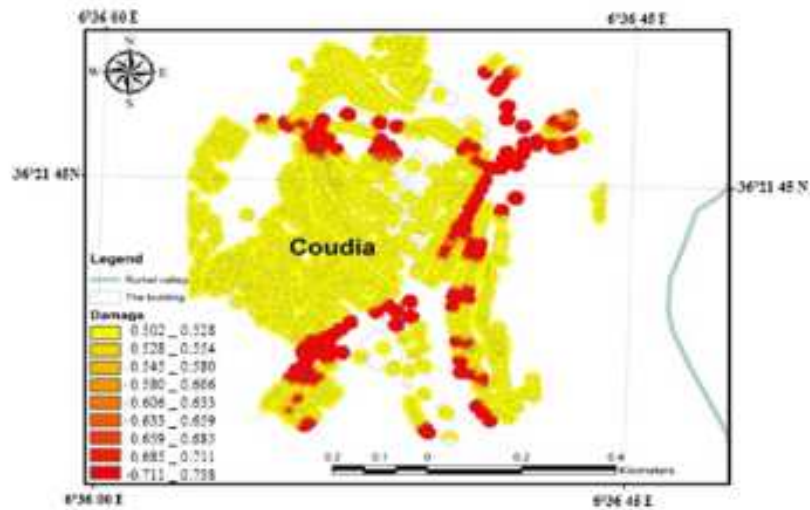


Fig. 15 Building damage Coudia square

Nevertheless, we notice that damage is more severe in Old Town than in Bellevue-Cilic and Coudia. These increased damage levels do not solely reflect the vulnerability index, which is higher in Bellevue-Cilic and Coudia.

Author's personal copy

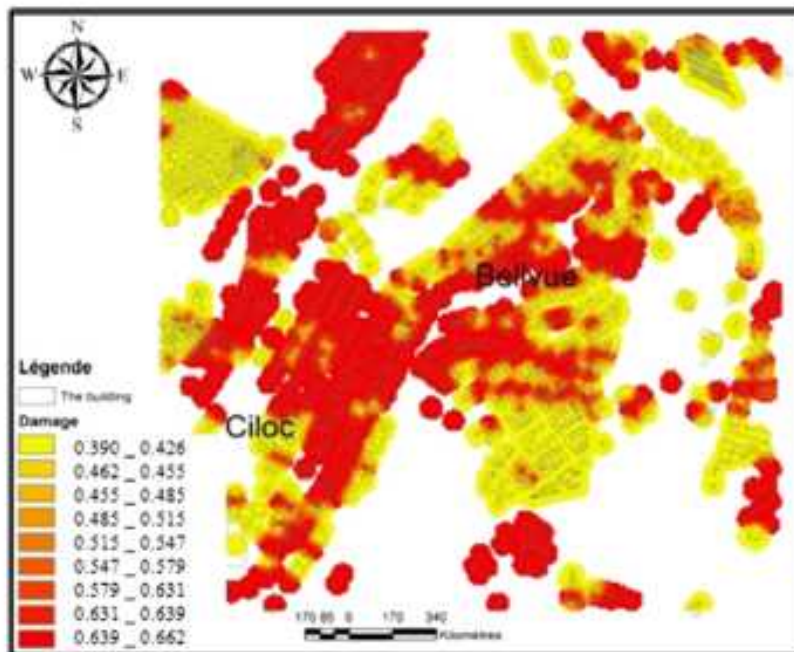


Fig. 16 Building damage Bellevue-Cilic square

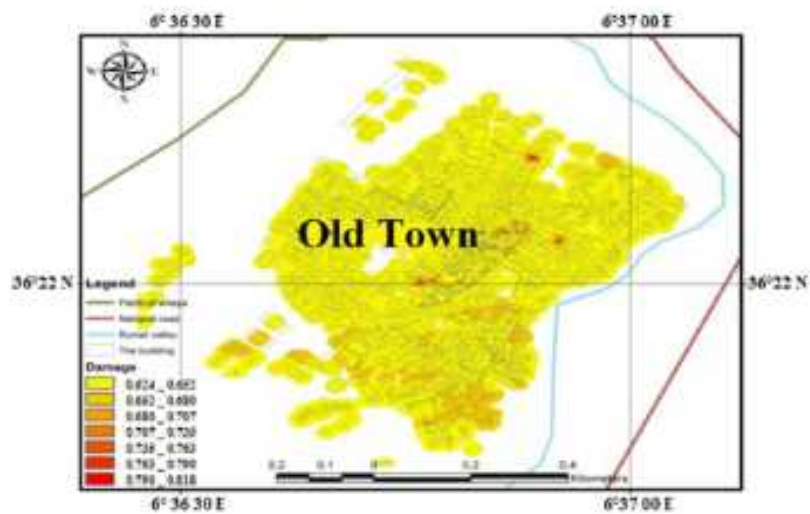


Fig. 17 Building damage Old Town square

5 Conclusions

Seismic risk assessments are priority activities in all countries that can potentially experience large earthquakes. The ultimate goal is to ensure public safety in the event of an earthquake, that is, to avoid major structural damage and loss of human lives. Damage is unavoidable but can be limited. In this work, we present a deterministic seismic risk assessment for the Constantine city, Algeria. We have assessed the seismic risk potential in detail. This work presents a methodology for assessing the likely consequences of future earthquakes in urban areas. Results are provided in the form of maps of the Constantine region. Evaluation consists of assessing the maximum acceleration of ground motion, taking site effects and area geology into account, as well as induced effects (landslides and liquefaction). Therefore, it is important that data are sufficiently well structured to be properly analyzed in GIS software, including MapInfo and ArcGIS. Of note, the direct application of EC8 yields sound estimates of alluvial PGA amplifications throughout the Constantine city. This shows that EC8 correctly accounts for lithology. Constructing such risk maps for seismically vulnerable areas permits us to (1) identify geographic areas affected by seismic risks; (2) determine more precisely whether induced effects (landslides and liquefaction) are localized on backfill, on grounds reworked by relatively old natural landslides, or on rigid bedrock affected by active deformation (e.g., seismogenic faults, broken fault, isostatic adjustment); and (3) limit the damage to buildings and to construct new buildings with seismic risk prevention in mind.

Acknowledgements The authors are grateful to the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research for supporting this work. We would like to thank two anonymous reviewers for the critical reviews and useful suggestions that really improved the manuscript.

References

- Anderson H, Jackson J (1987) The deep seismicity of the Tyrrhenian sea. *Geophys J R Astron Soc* 91:613–637
- Aoudia A, Vaccari F, Suhadolc P, Meghraoui M (2000) Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. *J Seismol* 4:79–98
- Argus DE, Gordon RG, De Mets C, Stein S (1989) Closure of the Africa–Eurasia–North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault. *J Geophys Res* 94:5585–5602
- Bard PY, Gempep Team (2005) Le risque sismique à Nice. Apport méthodologique, Résultats et perspectives opérationnelles. METATM, MEDD, CANCA
- Belazougui M (2008) Boumerdes Algeria earthquake of May 21, 2003: damage analysis and behavior of beam-column reinforced concrete structures. In: *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*. Beijing, Paper 14_01-1006
- Benedetti D, Petrucci V (1984) on seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. *L'Ind Costr* 18:66–78
- Benhallou H, Roussel J (1971) Catalogue des Séismes Algériens de 1951 à 1970. Note L.M.P.G.A. Alger
- Benouar D (1996) Seismic hazard evaluation at Algiers using Benouar earthquake catalogue. *Nat Hazards* 13:119–131
- Bensaïbi M, Tadjer K, Brahim Mezazigh B (2007). Scénario catastrophe de la ville de Blida. In: 7th national conference AFPS Ecole Centrale Paris
- Bommer JJ, Douglas J, Strasser FO (2003) Style-of-faulting in ground motion prediction equations. *Bull Earthq Eng* 1:171–203
- Borcherdt R, Wentworth CM, Janssen A, Fumal T, Gibbs J (1991) Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco bay region, CA. In: 4th int. conf. on seismic zonation, Stanford

- Boudemagh SS (2013) A City between Metamorphosis and Mutation from 19th to 21st Century. *J Civ Eng Archit* 7(3):302–309 (Serial No. 64)
- Bougdal R (2007) Urbanisation et mouvements de versants dans le contexte géologique et géotechnique des bassins néogènes d'Algérie du Nord. USTHB, Alger
- Boughacha MS, Ouyed M, Ayadi A, Benhallou H (2004) Seismicity and seismic hazard mapping of northern Algeria: Map of Maximum Calculated Intensities (MCI). *J Seismol* 8:1–10
- Bouhadad Y, Laouami N (2002) Earthquake hazard assessment in the oran region (Northwest Algeria). *Nat Hazards* 26:227–243
- Boukri M, Farsi MN, Belazougui M, Amellal O, Guessoum N, Meharki A, Mezzeigh B (2012a) 15 WCEE Lisboa
- Boukri M, Farsi MN, Belazougui M, Amellal O, Guessoum N (2012b) Seismic risk assessment of Constantine City (Algeria). 15 WCEE Lisboa
- Boumif MA, Haessler H, Meghraoui M (1987) The Constantine earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study. *Earth Planet Sci Lett* 85:451–460
- Boussouf R (2002) Constantine: D'une ville attractive à une ville répulsive. Laboratoire d'Aménagement du territoire. Université de Constantine, Algérie
- CGS (2003) Etude de l'aléa sismique de la région de Constantine. Rapport final du 20/11/2003
- Christophe L (2008) Points forts de ArcGIS 9.3. ESRI Géo informatique SA
- Coiffait PhE (1992) Un bassin post-nappe dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord-orientale). Thèse doctoral, Université de Nancy, p 1442
- Coiffait B, Goellat S, Vila JM (1992) Carte géologique au 1/50.000 d'El Aria. Sonatrach. Division Hydrocarbures
- DeMets CR, Gordon G, Argus DF, Stein S (1990) Current plate motions. *Geophys J Int* 101:425–478
- Dolce M, Masi A, Marino M, Vona M (2003) Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects. *Bull Earthq Eng* 1:115–140
- Douglas J (2001) A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Civil and Environmental Engineering Dept. Imperial College London, ESEE research report 01-1, p 126
- Dutand DM (1969) Mise au point sur la structure du Nord-Est de la BERBERIE. *Bull Serv Carte Géol Algérie NS* 39:89–131
- Duval AM (2007) Des effets de site aux scénarios de crise sismique méthode et application. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées pp 45–120
- EC-8 (1998) Design provisions for earthquake resistance of structures—part 1-1: general rules. Seismic actions and general requirements for structures. European Prestandard ENV 1998-1-1. Comité Européen de Normalisation, Brussels
- European Macroseismic Scale (1998) Conseil de l'Europe. Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. G. Grünthal Editor
- Faccioli E, Pessina V, Calvi GM, Borzi B (1999) A study on damage scenarios for residential buildings in Catania City. *J Seismol* 3(3):327–343
- Farsi M, Belazougui M (2007) Micronotage du risque sismique de la Wilaya d'Alger. In: 7th national conference AFPS Ecole Centrale Paris
- Geotier (2002) Révision du zonage sismique de la France. Etude probabiliste, rapport no. GTR/MATE0701-150 synthèse, p 39
- Giovinazzi S, Lagomarsino S (2003) Seismic risk analysis: a method for the vulnerability analysis of built-up areas. In: European safety and reliability conf. ESREL. June, Maastricht
- GNDT (1993a) Manuale Per Il Rilevamento Della Vulnerabilità Sismica Degli Edifici. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rome
- GNDT (1993b) Rischio sismico di edifici pubblici—parte I: aspetti metodologici. Centro Servizi Quasco, Bolagna Grünthal G (1998)
- Grandjean A (1954) Séismes d'Algérie de 1940 à 1950 inclus. *Ann. Inst. phys. Globe, Strasbourg*, 3ème partie, Géophysique, VII, 83 (Le Puy)
- Grégoire P, Michel C, Le Corre L (2007) A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bull Earthq Eng* 5:467–490
- Hamdache M, Bezzougouf M, Mokrane M (1998) Estimation of seismic hazard parameters in the northern part of Algeria. *Pure Appl Geophys* 151:101–117
- Harbi A (2001) Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents Actifs dans le Nord-Est Algerien. Mémoire de Magister, USTHB, Alger
- Harbi A (2006) Evaluation de l'Aléa sismique en Algérie du nord par la modélisation de l'Input sismique dans les zones urbaines et l'Établissement d'un catalogue. PhD thesis, University of Algiers

Author's personal copy

Nat Hazards (2017) 86:5441–5464

5463

- Harbi A, Maouche S, Ayadi A (1999) Neotectonics and associate seismicity in the Eastern Tellian Atlas of Algeria. *J Seismol* 3:95–104
- Harbi A, Benouar D, Benhallou H (2003) Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria part I: review of historical seismicity. *J Seismol* 1(7):115–136
- Harbi A, Peresan A, Panza G (2010) Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. *Nat Hazards* 54:725–747
- Hazus (1999) Federal emergency management agency, Washington DC. Earthquake loss estimation methodology, Hazus99 (SR2). Technical manual, Chapter 4, Potential Earth Hazards
- Héa A (1933) La fréquence des tremblements de terre en Algérie, 1911–1932. *Monogr Bur Centr Seism Intern*, p 99
- Héa A (1950) Catalogue des séismes algériens de 1850 à 1911. *Ann Inst Phys Globe Strasbourg* 6:4–49
- Keefer DK (1984) Landslides caused by earthquakes. *Geol Soc Am Bull* 95:406–421
- Laouani N, Slimania A, Bouhalada Y, Chatelaina JL, Noura A (2006) Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. In: *Soil dynamics and earthquake engineering* 26, pp 991–1003
- Mebarki A, Boukri M, Larbi A, Farsi MN, Belazroug M, Kharchi F (2013) Seismic vulnerability: theory and application to Algerian buildings. *J Seismol*. doi:10.1007/s10950-013-9377-0
- Meslem A, Yamazaki F, Maruyama Y, Benouar D, Kibboua A, Mehani Y (2012) The effects of building characteristics and site conditions on the damage distribution in Boumerdes after the 2003 Algeria earthquake. *Earthq Spectra* 28(1):185–216
- Mezcua J, Martínez JM (1983) *Sismidad Del Area Ibero Magrebi*. Sección de Sismología. Inst Geogr Nacional, Madrid
- Mokrane A, Ait Messaoud A, Sebai A, Ayadi A (1994) Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. Publication du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Département: Etudes et Surveillance Sismique, ESS, CRAAG Alger-Bouzaréah, p 277
- Mortgat CP, Shah HC (1978) Seismic hazard analysis of Algeria, technical report, the John A. Blume Earthquake Engineering Center, p 97
- Mouroux P, Bour M, Bertrand E, Le Brun B, the RISK-UE Team (2004) From geology and seismology to earthquake-risk scenarios: the RISK-UE project. In: *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*. Vancouver
- NFP06-013 (1995) Règles de construction parasismique applicables aux bâtiments, dites règles PS92, norme française, AFNOR, p 217
- Ousadou F, Dorbath L, Dorbath C, Bouain MA, Benhallou H (2012) The Constantine (Algeria) seismic sequence of 27 October 1985: a new rupture model from aftershock relocation, focal mechanisms, and stress tensors. *J Seismol*. doi:10.1007/s10950-012-9320-9
- Ouyed M, Meghraoui M, Cisternas A, Deschamps A, Dorel J, Frechet J, Gaulon R, Hatzfeld D, Philip H (1981) Seismotectonics of the El Asnam earthquake. *Nature* 292:26–31
- Peláez JA, Hamdache M (2004) Comment on the paper “Earthquake hazard assessment in the oran region (Northwest Algeria)” by Youssef Bouhadja and Nasser Laouani. *Nat Hazards* 32:155–159
- Peláez JA, Hamdache M, Pezcasado C (2005) Updating the probabilistic seismic hazard values of Northern Algeria with the 21 May 2003 $M = 6.8$ Algiers Earthquake Included. *Pure Appl Geophys* 162:2163–2177
- Peláez JA, Hamdache M, Pezcasado C (2006) Seismic hazard in terms of spectral accelerations and uniform hazard spectra in Northern Algeria. *Pure Appl Geophys* 163:119–135
- RADIUS (1999) Risk assessment tools for diagnosis of urban areas against seismic disasters. Final Reports, United Nations Initiative towards Earthquake Safe Cities, p 37
- Raoult JF (1974) Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord Constantinois, Algérie). Thesis Paris Mém. Soc. Géol. Fr. 121, p 163
- RISK-UE (2003) An advanced approach to earthquake risks scenarios with to applications different European towns. WP4: Vulnerability of Current Buildings
- Rothé JP (1950) Les séismes de Kerrata et la sismicité de l’Algérie. *Bull Serv Carte Géol Alger Sér*
- Roussel J (1973) Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie 1716–1970. *Bull Soc Hist Natur Afrique du Nord* 64(3):11–227
- RPA (2003) Règles parasismiques algériennes (Rules of Algerian earthquake). COS, Algeria
- TC4 (2003) Technical committee for earthquake geotechnical engineering of the international society for soil mechanics and geotechnical engineering, manual for zonation on seismic geotechnical hazards. Japanese Geotechnical Society, Dec 2003 revised 1999
- Thierno AW (2004) Initiation à Mapinfo Professionnel étape 1 cartographie élémentaire avec Mapinfo Professional. ENPC-LVMT, Marne-la-Vallée

Author's personal copy

S464

Nat Hazards (2017) 86:S441–S464

- Vila JM (1980) Carte géologique au 1/50.000. Thesis University of Paris VI
- Wilson RC, Keefer DK (1985) Predicting aerial limits of earthquake-induced landsliding. In: JI
- Youd TL, Perkins DM (1978) Mapping of liquefaction induced ground failure potential. *J GED ASCE* 104(4):433–446

Discussion générale

Cette étude qui porte sur une vaste portion du territoire Nord-Est Algérien va permettre ainsi d'intégrer ces nouveaux résultats pour la compréhension du risque sismique de la région Est Algérienne.

L'estimation de l'aléa sismique en un site au moyen de méthodes déterministes conduit à identifier un ou plusieurs scénarios magnitude-distance et à calculer l'accélération correspondante au site. Les méthodes déterministes n'apportent pas d'information sur le temps de retour associé à ce mouvement du sol. Les méthodes probabilistes peuvent alors être associées aux estimations déterministes, en calculant les temps de retour des accélérations déterministes.

La méthode déterministe utilisée est la suivante : pour un site donné sont calculées les accélérations engendrées au site par un séisme historique fort du catalogue ; l'accélération maximale est ensuite sélectionnée : c'est l'accélération maximale observée dans l'histoire. Le catalogue de sismicité totale est considéré (de 1357 à 2014, périodes non complètes comprises, catalogue). Les accélérations sont calculées avec la relation d'atténuation Bommer et al. (2003) en prenant en compte un écart-type et avec une profondeur de 10 km. Ces accélérations déterministes sont calculées au niveau de la ville de Constantine.

Les accélérations déterministes ainsi déterminées sont comprises entre 0.128 et 0.248 g. Un niveau d'accélération de 0.24 g est obtenu pour le centre de la ville de Constantine, il est engendré par un séisme localisé juste à El-Aria. Ces valeurs correspondent au séisme de référence choisie : une profondeur des séismes à 10 km et une accélération à un écart-type au-dessus de la valeur moyenne. Les valeurs les plus faibles (< 0.1 g) sont obtenues pour les sites Z5 (Mila), Z4 (Grarem-Gouga). Les accélérations les plus fortes (> 0.2 g) sont obtenues pour les sites Z1 (Constantine), Z2 (Sigus), Z1 (El-khroub) et Z3 (Guelma).

Cette méthode déterministe est très simple, les localisations et magnitudes des scénarios considérés sont directement celles des séismes du catalogue. Les incertitudes sur les localisations épacentrales et les déterminations de magnitude des séismes ne sont pas prises en compte. La méthode déterministe à la base des estimations d'aléa dans les zones urbaines en Algérie est plus complexe. Un séisme de scénario est utilisé.

A partir de la méthode probabiliste de Cornell-McGuire, un intervalle est estimé pour la période de retour de chaque accélération déterministe, aux cinq zones sources. Au chapitre 6, quatre paramètres clefs du calcul probabiliste ont été identifiés : des temps de retour des magnitudes, magnitudes minimales et maximales et la relation d'atténuation. Le domaine de variation de ces paramètres a par ailleurs été déterminé afin de quantifier les impacts des choix de paramètres sur les estimations d'aléa et la variabilité totale engendrée.

Le catalogue de sismicité, utilisé pour le calcul des accélérations maximales déterministes, couvre 657 ans (1357-2014). Il n'est cependant pas complet sur toute cette période temporelle, même pour les magnitudes élevées. L'accélération déterministe est ici l'accélération maximale ressentie au site, en prenant en compte tous les séismes du catalogue de sismicité. Les périodes de retour des magnitudes 6 (zones sources Z1, Z2, Z3) sont extrêmement grandes : entre 886 et 9393 ans. Ce cas de figure illustre la difficulté d'une estimation de l'aléa sismique dans une zone peu active (cf. tableau 7.6, chapitre 7) mais qui a connu un ou plusieurs séismes historiques forts.

Cet exemple illustre la complémentarité entre les approches probabiliste et déterministe. Le calcul probabiliste fournit une estimation de la période de retour de l'accélération déterministe, un intervalle de valeurs possibles est calculé tenant compte des incertitudes liées à l'estimation probabiliste. L'estimation de l'accélération déterministe comporte également des incertitudes, le choix d'ajouter un écart-type à la valeur moyenne de la relation d'atténuation est purement arbitraire. Une autre manière de combiner les deux approches consisterait à tenir compte également des incertitudes sur l'accélération déterministe et fournir, pour chaque accélération possible, l'intervalle des périodes de retour probabilistes. Ces estimations sont un outil d'aide à la décision pour l'expert en charge de l'estimation de l'aléa sismique en un site.

De plus, la complémentarité entre les approches probabiliste et déterministe est illustrée sur un exemple : l'estimation probabiliste des périodes de retour d'accélérations calculées avec une méthode déterministe. Les experts en charge de l'estimation de l'aléa sismique ont ainsi deux outils à disposition. En étant conscient des incertitudes associées aux deux types d'approches et des modèles sur lesquels elles reposent, le mouvement sismique à considérer pourra être choisi, selon la nature et la durée de vie de l'installation à dimensionner.

Ce travail a permis de mettre en valeur des moyens alternatifs aux méthodes existantes pour l'analyse de la vulnérabilité et du risque sismique des bâtiments, de l'échelle d'un bâtiment individuel à celle de la ville dans son ensemble. En particulier, nous nous sommes

concentrés sur l'utilisation de la méthode Vulnéralp 1.1 pour analyser la vulnérabilité. Cette application à la ville de Constantine (échelle du bâtiment) et l'analyse de photographies aériennes et d'autres sources de données de masse (échelle de la ville) ont également été abordées.

A l'échelle de la ville, la méthode VulnéRALp (Guéguen et al. **2007b**) a été appliquée à partir de sources de données variées : données, questionnaires envoyés à la population. D'autres sources de données comme le recensement de la population les photos aériennes ont été explorées pour permettre une évaluation rapide de la vulnérabilité à grande échelle (ville, département, région. . .). Ces dernières ont, en particulier, permis d'isoler les zones de bâti homogène dans la ville. Elles pourraient également être utilisées pour une évaluation post-sismique rapide. Les résultats de cette étude sont des cartes de dommage moyen, mais également des cartes de taux de dommages, dans chaque zone pour un séisme de référence.

Les résultats pour la ville de Constantine sont une vulnérabilité nettement plus forte de la Vieille Ville, qui subirait des taux de dommage très élevés pour les scénarios testés, ce qui est également montré par la méthode empirique.

Conclusion générale

Cette thèse consacrée à étudier l'évaluation du risque sismique et traitement de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie. Ce travail se base donc sur deux approches probabiliste et déterministe.

Les évaluations de risque sismique sont des activités prioritaires dans tous pays où la menace est jugée réelle. L'objectif final est d'assurer la sécurité publique en cas de séisme, c'est-à-dire d'éviter les dégâts structuraux importants et les pertes considérables en vies humaines. Les dégâts sont acceptables, mais ils doivent être limités. Dans ce mémoire nous avons présenté le processus de l'évaluation déterministe de l'aléa sismique en un site donné. Ensuite, nous avons appliqué ce processus sur la région d'étude. Plusieurs difficultés ont été rencontrés comme l'insuffisance de l'information au niveau de la géologie, la géotechnique et la et par fois la difficulté d'accessibilité aux informations existante. Si la maîtrise de l'aléa est une question purement technique, la réduction de la vulnérabilité de la population est plutôt d'ordre politique et nécessite des choix de gouvernance et une ferme volonté d'appliquer et de faire respecter les lois urbanistiques. La prise en compte du risque est donc aussi importante que celle de l'aléa.

La ville de Constantine, située au nord de l'Algérie, est une région qui est marquée par un contexte géologique-géographique propice aux phénomènes naturels tels que des phénomènes induits de glissement de terrain.

Ainsi, le but de ce travail a été consacré à suivre une méthode qui a abouti à cartographier le risque sismique dans la ville de Constantine. Ce travail m'a permis d'acquérir notamment une connaissance du risque sismique dans cette région.

La réalisation du scénario sismique comprend le croisement des données de l'aléa (effets de site, mouvement de terrain, liquéfaction) avec la vulnérabilité des éléments exposés. Donc, il est important que les différentes données soient bien structurées pour être prise en compte correctement dans un logiciel MapInfo et ArgGIS « outil SIG ».

Ces études ont permis d'une part de cartographier l'aléa et d'estimer la possibilité d'activation d'un phénomène induit (mouvement de terrain, liquéfaction) exprimé par un

coefficient de sécurité et d'estimer d'autre part les dommages dans les zones bâties pour un séisme de scénario choisi par nos soins.

Pour les phénomènes induits (liquéfaction, glissement de terrain) un coefficient de sécurité a été calculé à partir de seuils de déclenchement trouvés dans les zones Ciloc ,Bellvue ,Mansorah et la confluence de Oued el Rhmel-Boumerzoug . Cette approche simpliste a pour avantage une mise en œuvre très rapide et facile mais présente, en contre partie, une incertitude élevée.

La sensibilité des scénarios aux paramètres d'entrée a été testée. L'influence du coefficient d'amplification du PGA (accélération maximale) lié aux formations géologiques a ainsi été analysée. Nous avons calculé deux scénarios en tenant compte de coefficients différents :

- Issus des PS92.
- Issus des EC8.

Comme nous le présentions, les résultats diffèrent beaucoup d'un scénario à l'autre. Etrangement, l'application directe des coefficients des PS92 entraîne une diminution du PGA tout le long de la ville de Constantine. Ceci montre que la PS92 ne prend pas en compte correctement les formations géologiques du site lithologiques.

Ce n'est pas le cas des coefficients (EC8) pour lesquels les alluvions amplifient bien le PGA et de façon plus raisonnable. Une étude bibliographique, la vulnérabilité et l'appropriation du logiciel «arcGIS », « MapInfo », les résultats obtenus sont prometteurs. Afin de compléter ce travail et pour avoir des meilleurs résultats il est conseillé d'utiliser dans un premier temps les coefficients de la norme européenne (EC8). Dans un deuxième temps il serait nécessaire de préciser les scénarios avec une étude plus approfondie sur les effets de site et les phénomènes induits grâce entre autre aux informations géologiques plus approfondies.

Dans ce travail, nous avons effectué une étude de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie [4°-9°E et 34°-39°N] pour la période avant 1900 (la période historique) et la période allant du 1900 jusqu'à Décembre 2014 (la période instrumentale). L'analyse de la sismicité nous a permis de distinguer trois périodes : la première du 1357 à 1900 caractérisée par des intensités, la deuxième entre 1900 et 1999 caractérisée par un nombre peu élevé d'évènements et par des magnitudes plus au moins importantes. La troisième période entre 2000-2014 est caractérisée par une augmentation considérable du nombre d'évènements principalement du nombre de petits évènements (même de magnitude égal à 1). Cette différence entre les trois périodes est liée au développement du réseau de surveillance Algérien. L'étude de la sismicité nous a conduits à délimiter cinq (05) zones sismogènes à

partir d'analyse sismologique et tectonique. Ce travail représente une des premières contributions à la connaissance de l'aléa sismique et à la réduction du risque de cette région Nord-Est de l'Algérie. L'existence d'une sismicité importante laisse supposer la possibilité d'événements modérés à forts dans la région, c'est pour cela que ce travail devra être poursuivi afin de mieux connaître les différentes structures actives de la région, de mieux évaluer l'aléa sismique. Ce travail doit être accompagné par une meilleure évaluation du risque sismique et de la vulnérabilité du bâti dans les grandes villes. Dans ce travail nous avons présenté le processus théorique suivi dans l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique en un site donné, selon la méthode proposée par Cornell (1968). Ensuite, nous avons appliqué ce processus sur la région d'étude. Au terme de cette étude nous constatons que la ville de Constantine et Guelma est soumise à un aléa sismique peu élevé comparé à Skikda et Mila ou à d'autres régions dans le Nord-Est algérienne mais pour d'autres raisons liées au degré de vulnérabilité on peut parler d'une région à grand risque sismique. Les accélérations obtenues sont relativement modéré car les épicentres des séismes importants sont situés loin du site de Mila et du fait introduisent un aléa sismique réduit. D'autre part le nombre de séismes pris en compte dans cette analyse ainsi que la période de temps considérée reste très limitée, constituant un échantillon peu représentatif pour cerner l'aléa sismique dans la région constantinoise. Enfin, même si les méthodes d'estimation de l'aléa sismique sont nombreuses, elles convergent et participent toutes à la mise en place d'une politique de réduction et de prévention des risques sismiques et sont même la première phase dans la réduction des risques dans une société exposée à des tremblements de terre car ces évaluations de l'aléa permettent d'avoir une connaissance de l'agression sismique probable.

Liste des figures

Chapitre 1. Recherche Bibliographiques

Figure 1.1	<i>Domaines d'utilisation des méthodes probabilistes et déterministes pour le calcul de l'aléa sismique suivant la région étudiée (Mc-Guire, 2001).</i>	10
Figure 1.2	<i>Détail des 4 étapes nécessaires à la définition de l'aléa sismique selon l'approche PSHA (Reiter, 1990).</i>	12
Figure 1.3	<i>Présentation schématique de l'approche déterministe.</i>	13
Figure 1.4	<i>Synthèse cinématique en Europe-Méditerranée occidentale et centrale (d'après Nocquet, 2002).</i>	14
Figure 1.5	<i>Carte géologiques de la zone d'étude. AA' et BB' sont des coupes géologiques Fig 1.9 (Bougdal, 2007).</i>	15
Figure 1.6	<i>Coupes géologiques AA' et BB' (Bougdal, 2006).</i>	16
Figure 1.7	<i>Carte des intensités maximales observées Roussel, (1973b).</i>	19
Figure 1.8	<i>Carte des intensités maximales observées Bezzeghoud et al. (1996).</i>	20
Figure 1.9	<i>Carte des intensités maximales calculées (MCI) Boughacha et al. (2004). Selon cette carte, les intensités maximales calculées sont situées à El Asnam (10/10/1980, $I_0 = X$), Oran (10/09/1790, $I_0 = X$), Alger (02/03/1716, $I_0 = IX$), Biskra (16/11/1869, $I_0 = IX$) et Constantine (27/10/1985, $I_0 = VIII$).</i>	21
Figure 1.10	<i>PGA moyenne avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (Période de retour 475 années) (Hamadache et al. 2006).</i>	22
Figure 1.11	<i>PGA moyenne avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (Période de retour 475 années) Pelaez et al. (2005 modifié).</i>	23
Figure 1.12	<i>Courbe d'aléa : périodes de retour des accélérations.</i>	25
Figure 1.13	<i>Deux types de zones sources, les failles dans les régions caractérisées par une activité sismique importante, les aires géographiques larges dans les régions de sismicité modérée.</i>	26

Figure 1.14	<i>Courbe de récurrence: modèle de l'exponentielle tronquée.</i>	27
Figure 1.15	<i>Découpage des sources en sous-éléments triangulaires dans CRISIS (2007).</i>	34
Chapitre 2. Construction d'un catalogue de sismicité homogène en magnitude de surface, M_s		
Figure 2.1	<i>Sismicité de l'Est de L'Algérie de 1886-2014.</i>	46
Figure 2.2	<i>Schéma du principe de l'identification des répliques et précurseurs par la méthode de cluster (Reasenberg, 1985). Les séismes sont regroupés dans un même cluster par une suite de connections définies par une zone d'influence spatiale et temporelle basée sur la magnitude. Dans un même cluster seront intégrées les répliques d'un choc principal, ainsi que les répliques de secondes générations générées par ces répliques de première génération.</i>	51
Figure 2.3	<i>Distributions de sismicité dans le Nord-Est de l'Algérie (a) avant et (b) après declustering.</i>	54
Figure 2.4	<i>Schéma du principe de l'identification des répliques et précurseurs par un fenêtrage spatial et temporel (Gardner et Knopoff, 1974) dont l'extension est déterminée à partir de la magnitude du séisme possédant la magnitude la plus forte.</i>	55
Figure 2.5	<i>Fenêtrage spatial (gauche) et temporel (droite) en fonction de la magnitude à partir des relations de Gardner et Knopoff (1974) en rouge, Uhrhammer (1986) en vert et Grünthal (2009) en bleu.</i>	56
Figure 2.6	<i>Distributions de sismicité dans le Nord-Est de l'Algérie (a) avant et (c) après declustering.</i>	57
Figure 2.7	<i>Distributions de sismicité dans le Nord-Est (b) Grünthal et (c) d'Uhrhammer.</i>	58
Figure 2.8	<i>Analyse des résultats en termes de nombre cumulé de séismes obtenus selon différentes méthodes de declustering lors de l'étude comparative réalisée par Van Stiphout et al. (2010). La courbe rouge correspond au catalogue d'origine, la courbe bleue aux résultats obtenus par la méthode de Reasenberg, la courbe orange par la méthode de Gardner et Knoppof, la courbe noire par le modèle ETAS développé par Zhuang et al. (2005), la courbe grise par le modèle ETAS développé par Marsan et al. (2008).</i>	60
Figure 2.9	<i>Arbre logique mis en place pour l'étude avec l'incorporation des</i>	61

catalogues déclusterés selon les différents algorithmes considérés et les pondérations associées.

Figure 2.10	distribution de la sismicité (magnitude en fonction de la profondeur) en 3D.	62
Figure 2.11	Histogramme du nombre d'événements par magnitude. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Mai 1357 à Juin 2014.	62
Figure 2.12	Histogramme du nombre d'événements par profondeur. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Juillet 1912 à Juin 2014.	63
Figure 2.13	Histogramme du nombre d'événements par heure. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Juin 1504 à Juin 2014.	63
Figure 2.14	Histogramme du nombre d'événements par temps. L'histogramme est basé sur le catalogue de sismicité à partir de Mai 1357 à Juin 2014.	64
Figure 2.15	Évaluation de la magnitude minimum en utilisant la méthode maximum de courbure, marquant le calcul définissant, la magnitude de complétude $M_c=3.7$, $b\text{-value}=0.931$ et $a\text{-value}=7.02$.	65
Figure 2.16	Nombre de séismes en fonction de la magnitude.	67
Figure 2.17	Nombre de séismes en fonction de la magnitude en échelle logarithmique.	67
Figure 2.18	Calcul d'une équation de récurrence des magnitudes.	68
Figure 2.19	Analyse de la complétude du catalogue classe 1 [1, 2[.	70
Figure 2.20	Analyse de la complétude du catalogue classe 2 [2, 3[.	71
Figure 2.21	Détermination des périodes complètes classe 1 [1, 2[.	74
Figure 2.22	Détermination des périodes complètes classe 2 [2, 3[.	74
Chapitre 3. Zonage et relation d'atténuation du Nord-Est de l'Algérie		
Figure 3.1	Modèle des zones sources sismiques.	84
Figure 3.2	Histogramme de fréquence des séismes de différentes magnitudes dans le secteur d'étude.	86
Figure 3.3	Profondeur des tremblements de terre en Nord-Est d'Algérie.	87
Figure 3.4	Comparaison entre les lois d'atténuation empiriques, déterminées pour le nord de l'Algérie, et les lois de Sadigh et al. 1993 de Ambraseys et	99

Bommer, 1991 de Ambraseys, 1995 et de Ambraseys et al. 1996, pour la magnitude $M = 6,0$.

Chapitre 4. Évaluation probabiliste du aléa sismique dans la région de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Figure 4.1	<i>Map and location of Constantine region, Northeast of Algeria.</i>	107
Figure 4.2	<i>Distribution of earthquake epicentres in Northeast Algeria from 1357 to 2014.</i>	108
Figure 4.3	<i>Tectonic map of the Eastern Tellian Atlas of Algeria (Meghraoui 1988): (1) Volcanism; (2) Paleozoic; (3) Jurassic-Cretaceous and lower Cenozoic basement; (4) Neogene post nappe deposits; (5) Plio-quaternary deposits; (6) Quaternary deposits; (7) Faults; (8) Anticline; (9) Reverse fault; (10) Strike-slip fault; (11) Normal fault.</i>	109
Figure 4.4	<i>The proposed seismic source model, which can be used to assess seismic hazards in Northeast Algeria based on geology, tectonics and seismicity.</i>	111
Figure 4.5	<i>The earthquake catalogue and seismic hazard methodology.</i>	112
Figure 4.6	<i>The major sources used to compile the earthquake catalogue, Northeast Algeria.</i>	112
Figure 4.7	<i>7.7 Comparison of the M_b, m_b, I_0, I_{EMS}, I_{MM} and I_{MSK} semi-empirical relationships on the M_s Scale.</i>	114
Figure 4.8	<i>Epicentre seismicity distributions from 1357 to 2014 in Northeast Algeria (a) before and (b) after declustering.</i>	115
Figure 4.9	<i>Degree of seismic event filtering (Gardner and Knopoff 1974).</i>	115
Figure 4.10	<i>All magnitude classes within the completeness periods.</i>	117
Figure 4.11	<i>All magnitude classes within the completeness periods.</i>	118
Figure 4.12	<i>Frequency–magnitude relation for the Constantine region.</i>	118
Figure 4.13	<i>Spatial variations of the regional b-value.</i>	118
Figure 4.14	<i>Magnitude return times (years) for all zones.</i>	119
Figure 4.15	<i>Peak ground acceleration for return periods of (a) 475 years and (b) 1000 years.</i>	121

Chapitre 5. Deterministic assessment of seismic risk in Constantine city, northeast Algeria

Figure 5.1	<i>Location map of Constantine city and choice reference earthquake for study area.</i>	130
Figure 5.2	<i>Tectonic map of the study area (Constantine basin) (Harbi et al. 1999).</i>	131
Figure 5.3	<i>Spatial distribution of earthquakes in Northeast Algeria from 1357 to 2014.</i>	132
Figure 5.4	<i>Geological map of the study area.</i>	133
Figure 5.5	<i>The different grids: (a) Grid (1 km spacing) across the Wilaya of Constantine, (b) grid (400 m) across the Constantine city, (c) grid (100 m spacing) across the study area and (d) finer grid (20 m) over Bellevue-Cilloc, Coudia, and the Old Town.</i>	134
Figure 5.6	<i>Flow diagram of the method employed in this study.</i>	135
Figure 5.7	<i>Equivalence between EMS98 scale damage levels and the average damage D calculated by the method of GNDT, according Giovinazzi and Lagomarsino (2003).</i>	140
Figure 5.8	<i>Maximum acceleration (A_{max}) in the Wilaya of Constantine.</i>	142
Figure 5.9	<i>Maximum acceleration (A_{max}) in Constantine City.</i>	142
Figure 5.10	<i>Acceleration (A_{vib}) in the study area of Constantine City.</i>	143
Figure 5.11	<i>Intensity (I) in the study area of Constantine City.</i>	143
Figure 5.12	<i>Factor of safety (F_s) from the effects of the study area.</i>	144
Figure 5.13	<i>Damage rates for the three districts (Bellevue-Cilloc, Coudia, and Old Town).</i>	145
Figure 5.14	<i>Example of the boundary of the Bellevue-Cilloc area (red dashed line), mean vulnerability index $IV = 52$. The boundary of the Coudia area (green dashed line), mean vulnerability index $IV = 59$ and the boundary of the Old Town area (yellow dashed line), mean vulnerability index $IV = 69$.</i>	146
Figure 5.15	<i>Building damage estimates for Coudia.</i>	146
Figure 5.16	<i>Building damage estimates for Bellvue-Cilloc.</i>	147
Figure 5.17	<i>Building damage estimates for Old Town.</i>	147

Liste des tableaux

Chapitre 1. Recherche Bibliographiques

Tableau 1.1	<i>Éléments sismotectoniques pris en compte pour l'examen de l'aléa sismique à différentes échelles.</i>	9
--------------------	--	----------

Chapitre 2. Construction d'un catalogue de sismicité homogène en magnitude de surface, M_s

Tableau 2.1	<i>Des différents catalogues de sismicité algérienne.</i>	44
Tableau 2.2	<i>Tableau récapitulatif des paramètres standards de la méthode de déclustering de Reasenberg (1985) et valeurs utilisées dans le centre de test RELM en Californie (Schorlemmer et Gerstenberger 2007).</i>	53
Tableau 2.3	<i>Résultats de l'analyse de distribution.</i>	66
Tableau 2.4	<i>les périodes de complétudes pour le catalogue(GK) selon les classes de magnitudes.</i>	69
Tableau 2.5	<i>Valeurs du taux d'occurrence moyen et de l'écart type du secteur d'étude.</i>	72
Tableau 2.6	<i>Les périodes de complétudes du catalogue de sismicité selon la méthode de Stepp (1972).</i>	73

Chapitre 3. Zonage et relation d'atténuation du Nord-Est de l'Algérie

Tableau 3.1	<i>Les caractéristiques des zones sources (Z1, Z2, Z3, Z4 et Z5).</i>	82
Tableau 3.2	<i>Magnitudes maximales des sources sismiques de la région d'étude.</i>	85
Tableau 3.3	<i>Paramètres sismique des zones sources.</i>	87
Tableau 3.4	<i>Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 1.</i>	89
Tableau 3.5	<i>Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 2.</i>	90
Tableau 3.6	<i>Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 3.</i>	91
Tableau 3.7	<i>Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 4.</i>	91
Tableau 3.8	<i>Temps de retour (années) de magnitude pour la zone source 5.</i>	92

Chapitre 4. Évaluation probabiliste du aléa sismique dans la région de Constantine, au nord-est de l'Algérie

Table 4.1	<i>Important seismogenic source zone characteristics.</i>	110
Table 4.2	<i>The parameters for each seismic zone (Z1, Z2, Z3, Z4 and Z5).</i>	110
Table 4.3	<i>Regression relations for M_b, m_b, I_0, I_{EMS}, I_{MM} and I_{MSK} on the M_s Scale.</i>	113
Table 4.4	<i>Completeness of various magnitude classes over the reporting period.</i>	116
Table 4.5	<i>Completeness periods with corresponding magnitude ranges assessed using the Stepp method.</i>	116
Table 4.6	<i>Mean return period of magnitudes between 3 and 6 in each of the five seismogenic zones.</i>	120
Table 4.7	<i>The seismicity parameters for each seismic zone.</i>	120
Table 4.8	<i>Maximum observed and expected magnitude.</i>	120
Table 4.9	<i>Comparison of the estimated PGA results from this study with other studies.</i>	122
Chapitre 5. Évaluation déterministe du risque sismique dans la ville de Constantine, au nord-est de l'Algérie		
Table 5.1	<i>Historical seismicity in the Constantine region (after Rothé 1950; Grangeand 1954) Two main historical seismic events occurred on 4 August 1908 and 6 August 1947. Note the recurrence interval of the main seismic event of ~39 years.</i>	132
Table 5.2	<i>Proposed amplification factors for each defined soil category (EC8 1998).</i>	136
Table 5.3	<i>Proposed T-Liquefaction (g), PGA thresholds for landslide triggering as a function of geology and age. Adapted from Wilson and Keefer (1985).</i>	137
Table 5.4	<i>Proposed T-Landslide (g), PGA threshold for liquefaction (g) as a function of age, and nature of the sediment deposits. Based on Youd and Perkins (1978) and (Hazus 1999).</i>	137
Table 5.5	<i>Security factors for inducing phenomena.</i>	138
Table 5.6	<i>Correspondence between vulnerability classes of the EMS 98 and scores of GNDT, according Giovinazzi and Lagomarsino (2003).</i>	138
Table 5.7	<i>Equivalence between GNDT and methods VULNERALP for Environmental criteria.</i>	138
Table 5.8	<i>EMS-98 damage grading and corresponding damage rate range (EMS98 1998).</i>	139

Résumé

En Algérie, l'activité sismique demeure relativement importante telle la partie Nord-Est, qui présente des concentrations importantes d'enjeux sociaux et économiques. Dans le cas où se reproduirait un séisme tel que celui de la ville de Constantine (1985), des pertes très importantes affecteraient plusieurs villes littorales. Les pertes économiques directes engendrées seraient de l'ordre de plusieurs milliards de dollars. Ces chiffres justifient le besoin de prise en compte du risque sismique en Algérie. Le présent travail entre dans le cadre de l'estimation du risque sismique et des niveaux d'endommagement suite à des scénarios d'événements sismiques qui ont été réalisées dans un premier temps sur la base du développement préalable d'un outil central de notre modélisation, qui est l'accélération. La modélisation du risque sismique, malgré les imperfections qu'elle comprend, peut servir comme référence pour la gestion des autres risques naturels, tel que les inondations. Compte tenu de la nécessité des études permettant la quantification du dommage et l'évaluation du risque sismique dans les zones urbaines, l'objectif général de ce présent travail est d'évaluer le risque sismique par la méthode probabiliste et déterministe pour estimer le risque, le potentiel de dommage et la vulnérabilité sismique dans une agglomération urbaine. Pour cela, il est nécessaire de construire de nouvelles matrices de probabilité de dommage permettant de réaliser l'analyse de la probabilité de divers états de dommage, pour tout scénario sismique. Pour la réalisation de scénario de risque sismique, une importance spéciale a été accordée à l'homogénéisation des données d'entrée (sismicité historique, sismotectonique, zone source). De nouvelles cartes d'aléa sont produites pour la région Constantinoise à plusieurs périodes de retour et périodes spectrales, et comparés aux zonages existants en Algérie.

Abstract

In Algeria, the seismic activity remains relatively large, such as the northeastern part, which has significant concentrations of social and economic issues. In case an earthquake like the one of Constantine city (1985) reoccurs, very large losses would affect several coastal towns. The direct economic losses would be in the order of several billion dollars. These numbers justify the need to take consideration of the seismic risk in Algeria. The present work falls within the framework of the estimation of the seismic risk and damage levels following scenarios of seismic events which were carried out initially on the basis of the preliminary development of a central tool of our modeling, which is acceleration. Seismic risk modeling, despite its imperfections, can serve as a reference for the management of other natural hazards, such as floods. Regarding the necessity of studies enabling the quantification of damage and the assessment of seismic risk in urban areas, the general objective of this work is to assess the seismic risk using the probabilistic and deterministic method to estimate the risk, damage potential and seismic vulnerability in an urban agglomeration. Thus, it is necessary to construct new matrices of damage probability enabling to perform the analysis of the probability of various states of damage, for any seismic scenario. For the realization of a seismic risk scenario, special importance has been given to the homogenization of input data (historical seismicity, seismotectonic, source zone). New hazard maps are produced for the Constantine region at several return periods and spectral periods in compare to the existing zoning in Algeria.

ملخص

في الجزائر، لا يزال النشاط الزلزالي عاليا نسبيا كما هو الحال في الناحية الشمالية الشرقية، التي تمثل تركيزات كبيرة من القضايا الاجتماعية والاقتصادية. في حالة تكرار وقوع زلزال مثل مدينة قسنطينة (1985) خسائر كبيرة تتأثر على العديد من المدن الساحلية. ان الخسائر الاقتصادية المباشرة الناتجة . المليارات من لد هذه الأرقام تبرر الحاجة إلى الأخذ بعين الاعتبار مخاطر الزلازل في الجزائر . مستويات الأضرار الزلزالية تبعا لسيناريوهات أحداث زلزالية أجريت في البداية على أساس تطوير أولي لا مركزية من الأ . على الرغم من أن نمذجة مخاطر عيوباً الا مرجع لإدارة مخاطر طبيعية أخرى . ونظرا للحاجة لإجراء دراسات لتحديد الأضرار وتقييم المخاطر الزلزالية في المناطق الحضرية، فإن الهدف العام تقييم المخاطر الزلزالية بالإعتماد على طريقتين الاحتمالية قيمة احتمال الضرر والضعف الزلزالي في ضريبة . إنه لمن الضروري بناء مصفوفات جديدة لإحتمالية الأضرار إجراء تحليل لاحتمال مختلف حالات التضرر لأي سيناريو زلزالي . سيناريو مخاطر تركيز تجانس البيانات المدخلة (الزلزالية التاريخية sismotectonique) . يتم إدراج خرائط مخاطر جديدة لمنطقة قسنطينة لعدة فترات العودة و الفترات الطيفية، و لك بالمقارنة مع تقسيم المناطق الموجودة في الجزائر.