

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID - TLEMCEN



**Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Civil**

Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil

Option : Structures - Géotechnique et Matériaux

Thème

**Estimation de dommages sismiques sur un site urbain
Cas des villes de Tlemcen et Boumerdes**

Présenté par

RACHEDI Mohammed Tewfik

M^r F. GHOMARI	Maître de conférences (Université de Tlemcen)	Président
M^r A. BEKKOUCHE	Maître de conférences (Université de Tlemcen)	Encadreur
M^r M. DJAFOUR	Chargé de cours (Université de Tlemcen)	Co- encadreur
M^r D. ZENDAGUI	Chargé de cours (Université de Tlemcen)	Co- encadreur
M^r M.A. ALLAL	Maître de conférences (Université de Tlemcen)	Examineur
M^r M. MEGHACHOU	Maître de conférences (Université Sidi Bel Abes)	Examineur
M^r A. MEGNOUNIF	Chargé de cours (Université de Tlemcen)	Examineur

Résumé

Le nord de l'Algérie est connu pour sa sismicité active et la plupart des villes importantes se situent dans cette zone du pays. Dans cette situation, nous avons besoin d'estimer les pertes qui peuvent se produire en cas d'un séisme important.

Dans ce travail, on a développé un outil d'estimation de dommages sismiques adapté au concept algérien en se basant sur la méthodologie présentée dans le programme «HAZUS» développé par l'Institut National pour les Sciences de la Construction des Etats Unis d'Amérique (NIBS). Dans un premier temps, nous l'avons appliqué à la ville de Tlemcen. Ensuite, nous l'avons appliqué à la Wilaya de Boumerdes touchée par un séisme d'une magnitude de 6.8 le 21 Mai 2003, ce qui nous a permis de comparer les dégâts réels causés par le séisme et les dégâts simulés.

Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes ou de cartes de risque en utilisant un système d'information géographique (SIG). Ces résultats peuvent être exploitées par beaucoup de décideurs comme les assureurs, les responsables de la planification et du développement urbain, les responsables de la sécurité civile ou encore les spécialistes parasismiques travaillant sur les normes de protection.

Abstract

The north of Algeria is known by its active seismicity and the most important cities are situated in this zone of this country. In this situation, we need to estimate losses which can be caused by an important earthquake.

In this work, we have developed a tool for estimating earthquake damages. This tool is adapted to the Algerian concept and it is based on the methodology presented in the HAZUS program developed by the National Institute of Building Sciences of the United States (NIBS). In first time, we have applied it on the city of Tlemcen. After this, we have applied it to the city of Boumerdes hit by an important earthquake the 21 May 2003 with a magnitude of 6.8 on the scale of Richter. This second application enabled us to compare the real damages caused by the earthquake and the simulated damages.

Results are presented on the form of histograms or maps of risks by using a geographical information system (SIG). These results can be exploited by a lot of the decision makers like the underwriters, responsible of planification and urban development, responsible of civil security or specialist working on norms of protections.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I PRÉSENTATION DES MODELES D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUES (MEDS) REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 DEFINITION D'UN MODELE D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUES (MEDS)	4
I.2.1 LES INFORMATIONS RELATIVES AU MOUVEMENT DU SOL	6
I.2.2 LES INFORMATIONS RELATIVES AUX ENJEUX	6
I.2.3 LES INFORMATIONS RELATIVES AUX ALGORITHMES D'ESTIMATION DE DOMMAGES	7
I.3 PRINCIPAUX MODELES D'ESTIMATION DE DOMMAGE	8
I.3.1 LE MODELE HAZUS	8
I.3.2 LE MODELE GEMITIS	14
I.3.3 LE MODELE RADIUS	15
I.4 AUTRES ETUDES LOCALES	17
I.5 CONCLUSION	17
CHAPITRE II ESTIMATION DE DOMMAGES CONSECUTIFS AUX SEISMES METHODOLOGIE UTILISEE	18
II.1 INTRODUCTION	18
II.2 ETAPES DE LA MODELISATION DU DOMMAGE SISMIQUE	19
II.2.1 DEFINITION DE LA COURBE DE CAPACITE	20
II.2.2 DEFINITION DU SCENARIO SISMIQUE	21
II.2.3 OBTENTION DU POINT DE DEMANDE	24
II.2.4 APPLICATION DES COURBES DE FRAGILITE	27
II.2.5 VALEURS DES COURBES DE CAPACITES ET DE FRAGILITES	30
II.3 CONCLUSION	34
CHAPITRE III LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES (SIG) UTILISATION DANS L'ESTIMATION DU RISQUE SISMIQUE	35
III.1 INTRODUCTION	35
III.2 OUTIL DE MODELISATION DE DOMMAGES SISMIQUES	36
III.2.1 INTERFACE DE LA SIMULATION	36
III.2.2 INTRODUCTION DES DONNEES	38
III.2.3 EVENEMENT SISMIQUE	41
III.2.4 ANALYSE SISMIQUE	43
III.2.5 PRESENTATION DES RESULTATS	43
III.3 CONCLUSION	46

**CHAPITRE IV APPLICATION DE LA METHODOLOGIE D'ESTIMATION DE
DOMMAGES SISMIQUES –CAS DE LA VILLE DE TLEMCEN-** 47

IV.1	INTRODUCTION	47
IV.2	DONNEES DE L'ETUDE	47
IV.2.1	DONNEES DES STRUCTURES	47
IV.2.2	DONNEES LIEES AU SOL	50
IV.2.3	DONNEES LIEES A L'EVENEMENT SISMIQUE	55
IV.3	RESULTATS DE L'ANALYSE	58
IV.3.1	RESULTATS DE LA PREMIERE ETUDE	58
IV.3.2	RESULTATS DE LA SECONDE ETUDE	62
IV.4	CONCLUSION	73

**CHAPITRE V APPLICATION DE LA METHODOLOGIE D'ESTIMATION DE
DOMMAGES SISMIQUES - CAS DE LA WILAYA DE BOUMERDES - (SEISME DU 21
MAI 2003)** 75

V.1	INTRODUCTION	75
V.2	GENERALITES SUR LE SEISME DE BOUMERDES (21 MAI 2003)	75
V.2.1	CARACTERISTIQUES DU SEISME	76
V.2.2	ENREGISTREMENTS SISMIQUES	77
V.3	EVALUATION DES ANALYSES DES DOMMAGES	77
V.3.1	MODALITE DE L'EXPERTISE	78
V.3.2	DISTRIBUTION DES DOMMAGES	79
V.3.3	RESULTATS DE L'EXPERTISE DES DOMMAGES SUR LA VILLE DE BOUMERDES	80
V.4	APPLICATION DU MODELE D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUE SUR LA VILLE DE BOUMERDES	82
V.4.1	DONNEES DE L'ETUDE	82
V.4.2	RESULTATS DE L'ANALYSE	85
V.4.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	92
V.5	CONCLUSION	92

BIBLIOGRAPHIE 96

ANNEXE 1 99

INTRODUCTION GENERALE

Les catastrophes naturelles tel que les glissements de terrain, les inondations, les ouragans, les séismes, la sécheresse ...etc. présentent une menace pour les populations et les Etats dans plusieurs endroits du monde. Parmi toutes ces catastrophes, le tremblement de terre reste le plus meurtrier, affectant plus de 80 pays et causant la mort de plus de 1,6 millions de personnes dans le dernier siècle (Coburn et Spence, 2002), dans un contexte où environ la moitié des plus grandes villes du monde se situent aujourd'hui en zone à haut risque sismique (Bendimerad, 2002).

Pour avoir une idée sur les conséquences catastrophiques des tremblements de terre, on peut citer le séisme de Tangshan (Chine) en 1976 avec 200.000 morts ; le séisme de Kobe au Japon en 1995 avec plus de 6000 morts et environ 100 milliards de dollars de pertes économiques. Plus récemment, en août 1999, à Izmit, en Turquie, un séisme a provoqué la mort de plus de 20.000 personnes et des pertes économiques estimées à 12 milliards de dollars, ce qui représente environ 7% du produit national brut de ce pays (Bendimerad, 2002). Enfin, en Algérie le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 a provoqué plus de 2000 morts et des pertes directes estimées à plus de 4 milliards de dollars.

Afin de réduire les pertes consécutives à de telles catastrophes, des chercheurs spécialisés dans différents domaines des sciences de la terre, du génie civil et des sciences sociales se sont regroupé à travers une science pluridisciplinaire, le génie parasismique. Aujourd'hui elle intègre plusieurs directions fondamentales de recherches : la géophysique, le génie civil, la géographie, l'économie et enfin la sociologie.

Les approches deviennent de plus en plus diversifiées, proposant à travers des études d'estimation des dommages, des solutions concrètes de protection face à des scénarii potentiels de catastrophes. Indépendamment, un travail important de recherche mené par des scientifiques nord-

américains aboutit en 1997 au lancement d'un premier outil d'estimation du risque sismique (HAZUS) à travers une méthodologie innovante du point de vue technique, l'approche offre des solutions à tous les niveaux d'analyse, en passant par l'estimation des dommages directs au bâti face à une sollicitation sismique simulée par l'utilisateur jusqu'à l'évaluation des pertes économiques indirectes.

Dans ce travail nous essayons de contribuer à l'estimation de dommages sismique dans notre pays (Algérie). Dans un premier temps, nous présentons les travaux de recherche menés dans ce domaine jusqu'à maintenant. Puis, nous exploitons la méthodologie d'estimation de dommages sismiques développée dans le programme (HAZUS), car dans ces dernières années, cette récente méthode est considérée comme une référence mondiale d'estimation de dommages sismiques. Nous définissons les principaux paramètres nécessaires à une étude poste sismique (les enjeux et le risque), les différentes étapes d'analyse et les résultats sous forme de probabilités de dommages. Ensuite, vu le nombre important de données à gérer et d'opérations mathématiques à effectuer, nous développerons un outil informatique qui facilitera l'introduction des données et leurs analyse sous un système d'informations géographiques (SIG). Après cela, nous essayerons d'exploiter cet outil afin d'évaluer le risque sismique sur deux villes algériennes (Tlemcen et Boumerdes). la ville de Tlemcen n'a pas connu de violent séisme durant son histoire et elle est classée en zone I selon les règles parasismiques algériennes RPA99, mais nous l'avons choisie parce que c'est notre ville et nous avons suffisamment de données concernant le bâti et les types de sol pour faire une bonne étude. Tandis que la ville de Boumerdes frappée par un violent séisme le 21 Mai 2003 représente un bon exemple de comparaison entre les dommages réels causés par le séisme et les dommages simulés évalués par l'outil numérique développé.

Les résultats fournis par les modèles d'estimation de dommages sismiques (MEDS) intéressent non seulement les assureurs et réassureurs mais tout autant les acteurs locaux tels que les responsables de la planification et du développement urbain ou régional, les responsables de la sécurité civile, protection et secours ou encore les spécialistes parasismiques travaillant sur les normes de protection.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre présente, dans les objectifs, le fonctionnement et les principaux paramètres des modèles d'estimation des dommages consécutifs aux séismes, en plus de la présentation des principaux travaux tels que HAZUS, RADIUS et GEMITIS.

Le deuxième chapitre présente les étapes de la méthodologie utilisée pour le développement d'un outil d'estimation de dommage. On présente les données nécessaires et la démarche utilisée.

Le troisième chapitre présente l'outil d'estimation de dommage développé, son interface, les différentes boîtes de dialogues et son fonctionnement sous un système d'informations géographiques.

Dans le quatrième chapitre nous faisons des applications de la méthodologie sur un site urbain non touché par un séisme majeur. La ville choisie est Tlemcen.

Dans le dernier chapitre nous appliquerons la méthodologie sur un site urbain déjà touché par un violent séisme. Pour cela nous avons choisi la Wilaya de Boumerdes (séisme du 21 Mai 2003).

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DES MODELES D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUES (MEDS)

Revue bibliographique

I.1 Introduction :

Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans le domaine du risque sismique. Ces recherches ont abouti à l'élaboration de quelques modèles d'estimation de dommage. Dans ce chapitre, nous essayons de présenter la philosophie de modélisation du dommage sismique, d'une façon générale : le fonctionnement, les paramètres requis, les limites d'application, les résultats d'une modélisation ainsi que les utilisateurs potentiels. Ensuite, nous présentons les principales méthodologies existantes.

I.2 Définition d'un modèle d'estimation de dommages sismiques (MEDS) :

Un modèle d'estimation de dommages est un outil utilisé pour évaluer les pertes potentielles dues à la réalisation d'un risque (naturel ou autre). Pour ce qui est du risque naturel, il existe des modèles concernant les inondations, les tempêtes ou bien le risque sismique. L'utilité de tels modèles a été reconnue suite à plusieurs tempêtes en Europe, à l'ouragan Andrew en 1992 et au séisme de Northridge en 1994 qui ont occasionné des pertes catastrophiques pour les assureurs et réassureurs mondiaux. Ces modèles ont alors connu un développement important. Ils permettent en outre une meilleure quantification des risques qu'ils couvrent et donc une meilleure connaissance de leur exposition.

La modélisation du risque sismique est basée sur le croisement mathématique entre le phénomène naturel (le séisme) et les différents éléments exposés à ce risque (la typologie des bâtiments). Ainsi, des estimations des dommages potentiels peuvent être établies.

Les principaux paramètres intervenant dans ce type de démarches sont : la définition du risque, la définition des enjeux, le calcul des dommages physiques et le calcul des pertes économiques. La figure I.1 présente le diagramme de fonctionnement des modèles d'estimation de dommages sismiques (MEDS). Les résultats fournis par les MEDS intéressent non seulement les assureurs et réassureurs mais tout autant les acteurs locaux tels que les responsables de la planification et du développement urbain ou régional, les gestionnaires

d'un nombre important de bâtiments ou d'autres structures, les responsables de la sécurité civile, protection et secours ou encore les spécialistes parasismiques travaillant sur les normes de protection. Le tableau I.1, d'après Coburn et Spence (2002), résume le type d'information extraite des MEDS par type d'utilisateur.

Tableau I-1 Type d'informations fournies par les Modèles d'estimation des dommages sismiques
(Coburn et al 2002)

Utilisateurs	Objectif	Information souhaitée
Urbanistes	Identification des zones à risque	Zonage de risque
Propriétaires	Identification des structures à risque	Etude de vulnérabilité structure par structure
Ingénieurs d'études	Détermination de niveau optimum de résistance	Etude coût - bénéfices
Protection civile	Identification des zones a risque ; Plan de gestion de crise.	Estimation des dommages physiques et sociaux
(Ré)Assureurs	Définition des primes ; Transfert du risque	Pertes «annualisées » ; courbes de probabilité de pertes

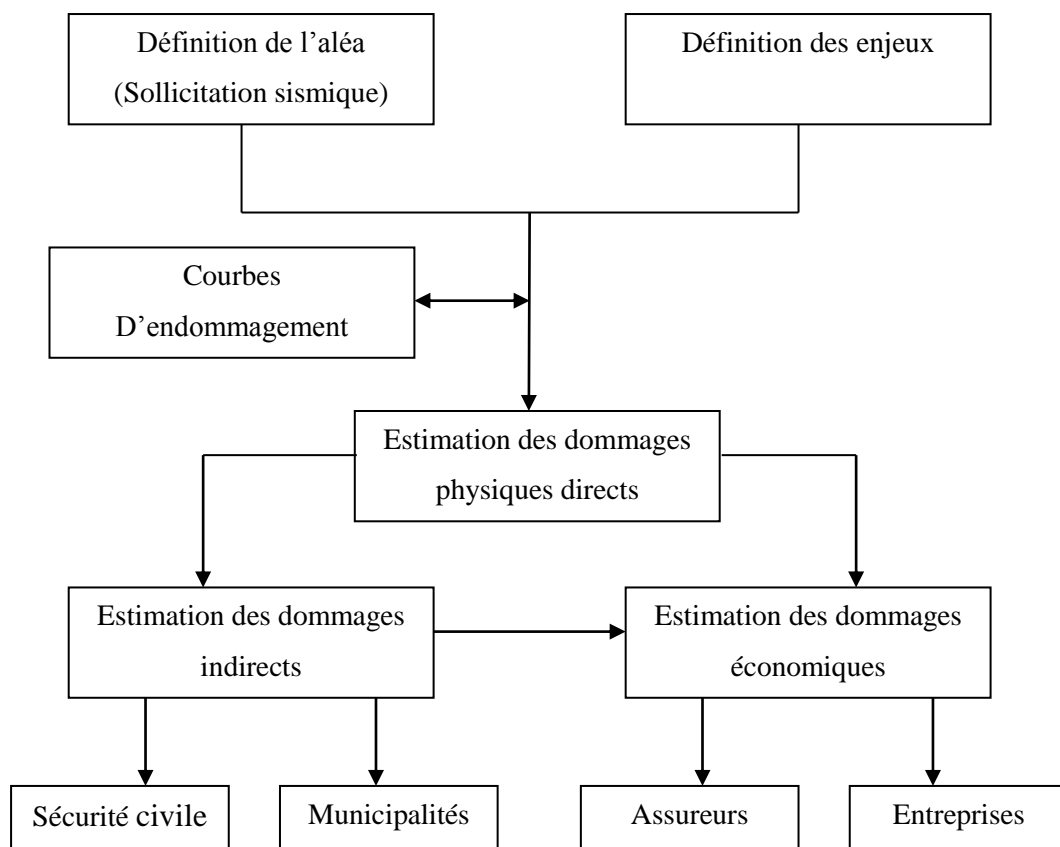


Figure I-1 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages (Chiroiu L. 2003)

Principaux paramètres :

Trois types fondamentaux de paramètres interviennent dans la structure d'un MEDS :

- Les informations relatives au mouvement du sol.
- Les informations relatives aux enjeux.
- Les informations relatives aux algorithmes d'estimation de dommages.

I.2.1 Les informations relatives au mouvement du sol :

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour une modélisation fiable de l'action sismique. Les plus importants sont : le type du sol, la topographie, les failles existantes, les données accélérométriques, les spectres de réponse, les relations d'atténuation, les distances épacentrales et les effets de site. En fonction du niveau de détail, les résultats seront plus ou moins fins. Généralement des études locales de l'aléa sismique sont faites dans les zones urbaines exposées aux risques sismiques.

I.2.2 Les informations relatives aux enjeux :

Après les informations liées au sol, cette deuxième catégorie représente tous types d'enjeux affectés par le mouvement du sol : bâtiments, infrastructures de transport et d'énergie, structures vitales et informations démographiques. Diverses classes de structures pour chaque type d'enjeu doivent être définies en fonction de leur comportement parasismique afin de quantifier les effets d'un séisme par groupes homogènes d'éléments exposés. Plusieurs classifications standard de bâtiments d'habitations sont en effet disponibles aujourd'hui (NIBS 1997, Grunthal 1998). En absence d'inventaires précis des types de bâtiments situés sur la zone d'étude, la date de construction des structures pourrait être un élément important permettant la définition d'une typologie approximative du bâti. Pour une estimation fine de dommages, des inventaires complets et exhaustifs doivent être pris en compte lors de la modélisation.

I.2.3 Les informations relatives aux algorithmes d'estimation de dommages

La troisième catégorie d'informations est liée aux modèles mathématiques d'estimation de dommages. Les relations entre la sollicitation sismique et les dommages physiques associés ont été développées depuis peu de temps. Ces relations, dénommées courbes de fragilité ou d'endommagement, ont été élaborées essentiellement sur la base d'extrapolations des données liées aux dommages observés après divers séismes, sur dire d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire (ATC 13, 1985 ; Coburn et Spence, 2002; NIBS, 1997).

En ce qui concerne le premier type, le document ATC 13 (1985) propose une première approche des courbes d'endommagement, en fournissant des niveaux d'endommagement pour différents types de constructions, en fonction de l'échelle MMI (macrosismique multi intensity). Cette méthode est restée pendant longtemps comme la référence standard d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Après les séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994), les courbes de fragilité ont été re-calibrées, et une seconde approche a été développée. Celle-ci, apparue en 1997, est réalisée sous la forme d'un logiciel public d'estimation du risque sismique, HAZUS (NIBS, 1997). Le paramètre d'entrée n'est plus l'intensité macrosismique, mais des caractéristiques directement liées au mouvement du sol, représentées par le spectre de réponse ou bien par le PGA (*Peak ground acceleration*). Ces données sont par conséquent associées à un niveau d'endommagement, défini et décrit pour chaque type d'enjeux analysé.

L'échelle macrosismique européenne, publiée en 1998, propose également d'autres courbes de fragilité, en reliant un niveau d'endommagement à une intensité macrosismique (paramètre toutefois implicite, car l'intensité est elle-même une mesure de l'endommagement, et non de l'action sismique).

Les courbes d'endommagement représentent une donnée d'entrée fondamentale dans un MEDS. En effet, elles permettent le calcul des estimations de dommages, et elles ne peuvent pas être contournées ou remplacées par d'autres types d'informations. La fiabilité d'un modèle dépend en grande mesure de la précision de ces données. Malgré leur importance, il existe relativement peu de méthodes proposant une définition des courbes d'endommagement au niveau international. Ceci est dû aux difficultés liées à leur obtention ainsi qu'à leur validation.

I.3 Principaux modèles d'estimation de dommage :

Plusieurs modèles d'estimation de dommage ont été développés dans le monde. Certains d'entre eux, à cause de leur caractère privé, ne sont pas communiqués au public, comme ceux développés par les grandes compagnies de réassurance MunichRE et SwissRE. Mais il existe d'autres modèles qui sont publics tel que HAZUS, RADIUS et GEMITIS, ainsi que d'autres modèles développés au niveau local.

I.3.1 Le modèle HAZUS :

I.3.1.1 Présentation générale :

HAZUS est une méthode complexe d'estimation de dommages sismiques, présentée sous la forme d'un logiciel, développé par l'Institut National pour les Sciences de la Construction des Etats Unis d'Amérique (*NIBS*) pour l'Agence américaine de gestion de crise (*FEMA*). Réalisée dans sa première version en 1997, l'approche a été revue en 1999. Une équipe pluridisciplinaire, composée d'ingénieurs, géologues, géographes, architectes, économistes et gestionnaires de crise a été réunie pour développer cette méthode. Initialement dédiée uniquement au risque sismique, elle fait aujourd'hui l'objet de développement concernant d'autres risques naturels, notamment d'inondations et de tempêtes.

Le programme est organisé en plusieurs modules interdépendants, permettant l'insertion de nouvelles données complémentaires ou de nouveaux modules de calcul. Ainsi, des améliorations peuvent être apportées notamment dans le cadre d'une application particulière, en fonction de données disponibles. Le caractère modulaire du modèle apporte à l'utilisateur la possibilité de limiter l'analyse à son niveau d'intérêt.

L'exploitation du modèle peut être divisée en six parties principales : l'inventaire des enjeux, l'analyse de l'aléa, l'estimation de dommages physiques directs, l'estimation de dommages physiques indirects, pertes économiques directes et indirectes. L'ensemble des modules, des informations ainsi que des résultats sont présentés sous une forme cartographique et intégrés dans un système d'information géographique (SIG).

Trois types d'analyses peuvent être réalisés avec HAZUSTM, en fonction du niveau de complexité de l'étude. Ainsi, un premier niveau d'analyse, basé sur les données contenues par défaut, fournit des résultats bruts. Un deuxième niveau d'analyse est basé sur des données fournies par l'utilisateur, car des informations complémentaires sont requises pour un calcul fin. Enfin, un troisième niveau d'analyse avancée est défini à partir de données complémentaires relatives aux inventaires, aux paramètres techniques des constructions ainsi

qu'aux coûts économiques. La distinction entre les trois niveaux d'analyse repose sur la nature des informations dont dispose l'utilisateur.

I.3.1.2 Inventaire des enjeux :

Quatre types principaux d'enjeux sont considérés dans cette approche : le bâti courant, les constructions spéciales, les infrastructures de transport et enfin les réseaux d'eau, d'énergie et de communication. Chaque type d'enjeux est à son tour différencié en sous-types suivant plusieurs classes d'enjeux. Ainsi, pour le bâti courant sont définies 38 typologies différentes de constructions, sur la base notamment de leur système structural et de leur hauteur. Les constructions spéciales (les hôpitaux, les établissements d'enseignement, les stations de police et de pompiers) sont quant à elles différenciées en 8 classes, en fonction de leur affectation.

I.3.1.3 Analyse de l'aléa :

Le mouvement du sol, représenté d'une manière cartographique, est caractérisé par la réponse spectrale. Il est défini à travers une approche déterministe ou probabiliste, l'utilisateur ayant le choix de la méthode. Ce module dispose également d'une option supplémentaire permettant l'utilisation de scénarii de séismes réalisés indépendamment de HAZUSTM. L'analyse est complétée par l'utilisation des relations d'atténuation ainsi que des possibles amplifications du signal dus au type du sol.

L'approche déterministe est définie par trois possibilités de calcul. La première est basée sur le choix d'une source sismique à partir d'un inventaire exhaustif de toutes les failles sismiques existantes. Pour chaque faille, on doit disposer des informations telles que son type, la magnitude maximale enregistrée ou estimée, la largeur de la faille ou encore les coordonnées de ses limites. La deuxième solution est le choix d'un séisme déjà réalisé. Cette option repose sur un catalogue des séismes d'une magnitude supérieure à 5 survenus entre l'année 300 avant JC et 1990. Enfin, une troisième possibilité consiste dans la définition d'un événement sismique arbitraire. L'utilisateur spécifie ainsi la position de l'épicentre, sa profondeur, le type et l'orientation de la faille ainsi que la magnitude souhaitée pour l'analyse. L'approche probabiliste est définie à partir des cartes de zonage sismique développées par l'Institut Géologique des Etats Unis d'Amérique. Plusieurs zonages sont ainsi disponibles, correspondant à une période de retour de 100, 250, 500, 750, 1000, 1500 et 2000 ans. L'utilisateur dispose également, dans le cadre de l'approche probabiliste, de la possibilité d'introduction dans le calcul d'un spectre défini au choix.

Le mouvement du sol ainsi défini (de manière probabiliste ou déterministe) est atténué ensuite par rapport à la distance à l'épicentre, à travers des relations d'atténuation caractéristiques de différentes régions et différents types de sols. Une amplification du signal sismique en fonction des conditions locales du site est considérée par la suite, suivant différentes classes du sol associées à des facteurs d'amplification. Six classes de sols sont ainsi définies, avec des facteurs d'amplification allant de 0,8 à 3,5.

I.3.1.4 Dommages physiques directs

Les dommages physiques directs concernent toutes les catégories d'enjeux définies dans les inventaires. L'objectif est d'estimer le niveau d'endommagement face à une sollicitation sismique donnée, pour un type standard de bâtiment. L'approche utilisée ici, basée sur la méthode du spectre de capacité, repose sur deux courbes (ou fonctions) : les courbes de capacité et les courbes d'endommagement. La première catégorie de courbes indique le comportement d'une construction face à n'importe quelle sollicitation de type sismique. Celles-ci décrivent ainsi le niveau de dommages probables dus à l'action sismique imposée. La deuxième catégorie de courbes, celles d'endommagement, indique ensuite la probabilité d'atteindre un niveau donné de dommages.

Cinq niveaux de dommages ont été distingués dans cette méthodologie : D0, pour l'absence de dommages ; D1, pour les dommages légers ; D2, pour les dommages modérés ; D3, pour les dommages importants ; et enfin D4, pour les dommages très importants.

I.3.1.4.1 Les courbes de capacité

Les courbes de capacité expriment une relation entre la force imposée au bâti par le séisme et le déplacement du bâti sous l'effet de cette force (figure I.2). Cette relation est spécifique à chaque type de construction, en raison notamment des caractéristiques structurelles et géométriques différentes.

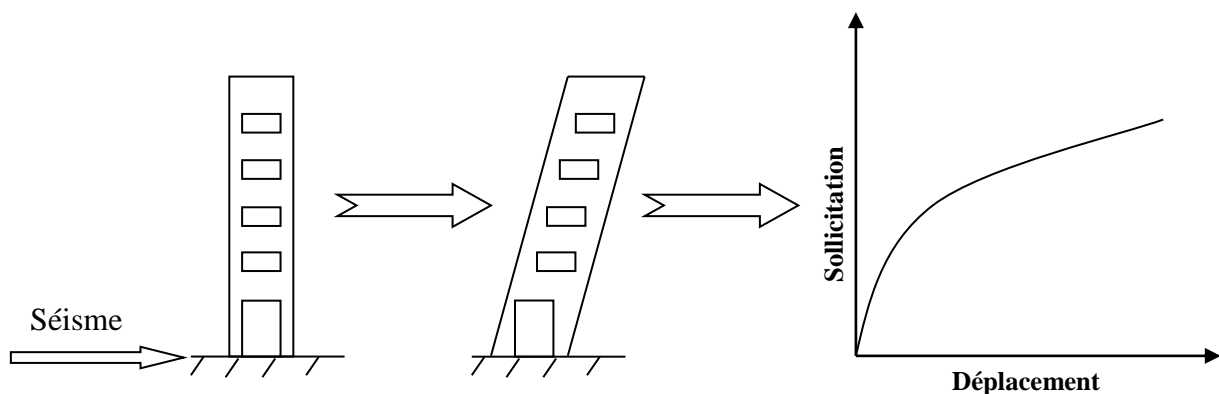


Figure I-2 Courbes de capacité d'une structure

Le déplacement d'un bâtiment peut ainsi être exprimé en fonction d'une sollicitation de type sismique et de sa résistance :

$$D = f(S, R) \dots\dots\dots(I-1)$$

Où : S = la sollicitation imposée au bâti ;

R = la résistance du bâti.

La sollicitation sismique peut être basée soit sur un enregistrement réel d'un séisme, soit sur un spectre de réponse. L'accélération du sol est ensuite représentée en fonction du déplacement (figure I.3), à travers la transformation standard :

$$S_d = S_a \times (1/\omega^2) \dots\dots\dots(I-2)$$

Où : Sa : le spectre d'accélération ;

ω : la pulsation.

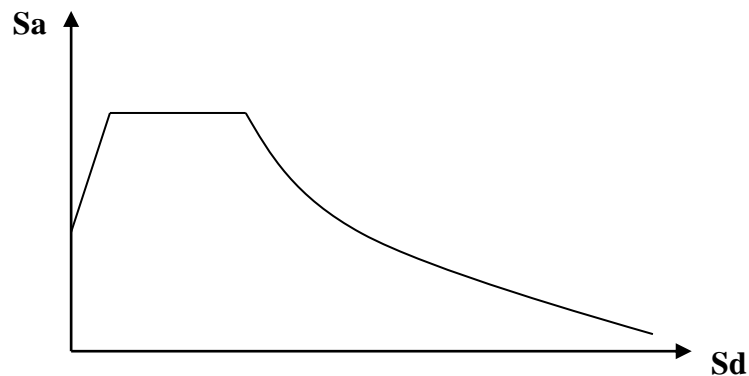


Figure I-3 Sollicitation sismique sous forme spectrale

En fonction de la sollicitation sismique donnée, nous obtenons le déplacement susceptible de se produire dans le bâtiment, représenté par la translation au niveau du toit de la construction. Ce déplacement, considéré comme le facteur majeur conditionnant l'endommagement structurel, est donné par l'abscisse du point de croisement entre la courbe définissant les séismes et la courbe de capacité, appelé « *point de demande* » (fig.I.4). Les coordonnées du point de demande sont obtenues de cette manière pour le site analysé, en fonction de l'action sismique correspondante, pour le type d'enjeu considéré.

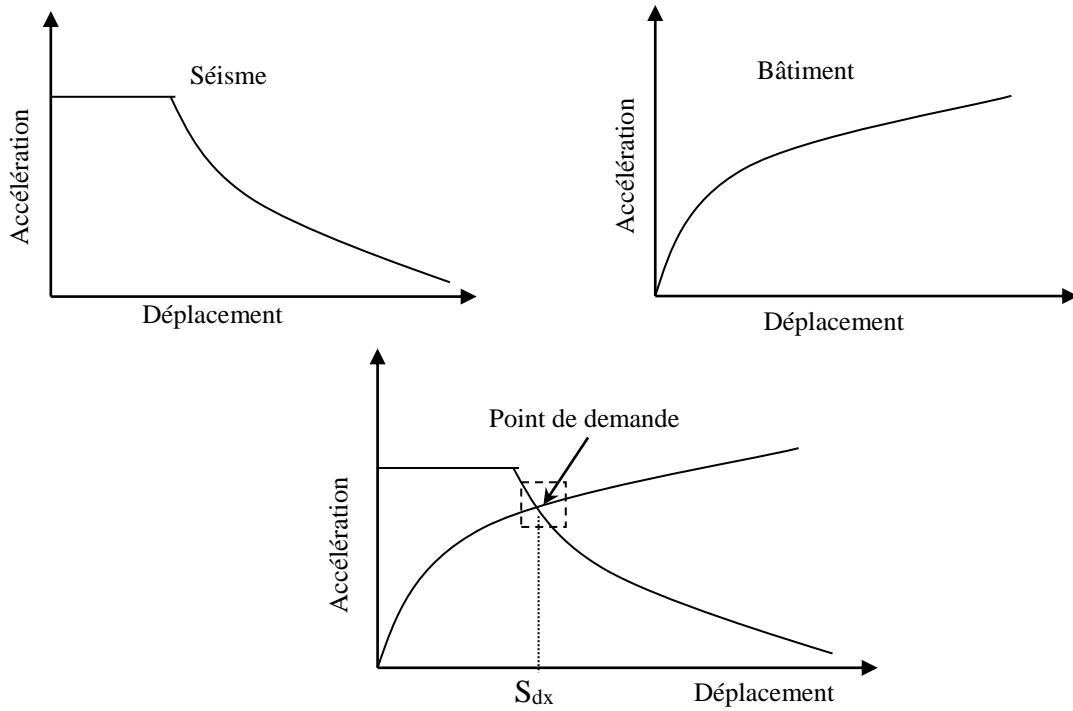


Figure I-4 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel

I.3.1.4.2 Les courbes d'endommagement

Les courbes d'endommagement sont des fonctions calculant la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain niveau de dommage, pour une valeur donnée du déplacement correspondant au point de demande (fig. I.5).

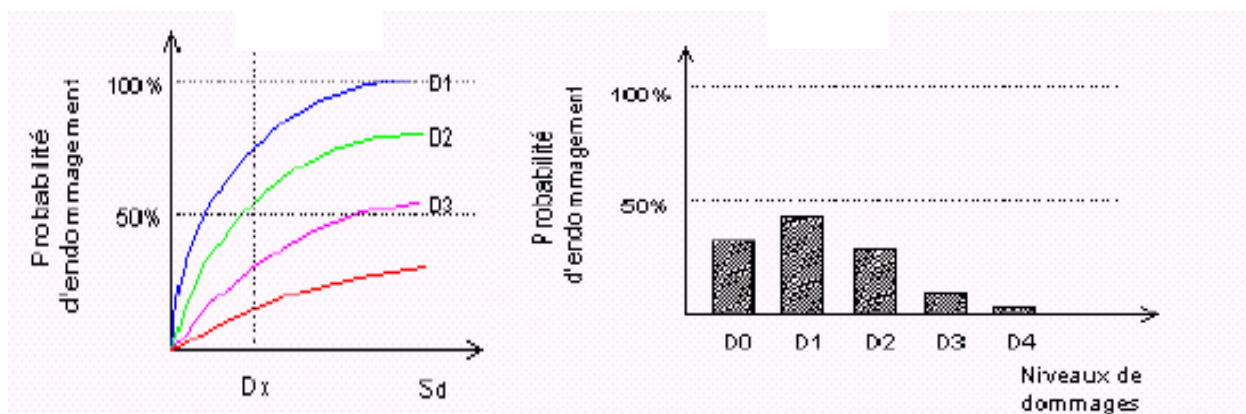


Figure I-5 Courbes d'endommagement d'une structure correspondant à un déplacement S_{dx}

Ces courbes, définies pour les dommages structurels ainsi que non structurels, ont été mises au point à partir d'extrapolations des données liées aux dommages observés, sur dires d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire (ATC, 1985). Elles ont été notamment calibrées avec de données consécutives aux séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge

(1994). L'endommagement est modélisé par une distribution normale cumulée du logarithme du déplacement (ou de l'accélération) spectrale. Pour le niveau de dommage d_s provoqué par un déplacement spectral S_d donné, la probabilité d'endommagement s'exprime à travers la formule suivante :

$$P[\beta_{d_s}/S_d] = \Phi(\beta_{d_s}, S_d, d_s) \dots \dots \dots (I-3)$$

Où : S_d, d_s est le logarithme de la valeur moyenne de déplacement pour le niveau d'endommagement d_s

β_{d_s} est le logarithme de l'écart type du déplacement pour le niveau d'endommagement d_s .

Une fois les probabilités des dommages obtenues, plusieurs autres pertes peuvent être calculés comme les dommages sociaux, le nombre de victimes, les pertes économiques.

I.3.1.5 Commentaires et remarques :

HAZUS représente une première approche d'estimation de dommages sismiques de cette envergure, et reste pour l'instant la seule. Elle pose les bases d'une nouvelle méthodologie sur un plan technique, en introduisant la méthode du spectre de capacité. Celle-ci est devenue entre temps une référence au niveau mondial, et elle est de plus en plus utilisée pour les estimations de dommages dus aux catastrophes naturelles. Le caractère novateur de l'approche réside essentiellement dans l'utilisation des paramètres directement liés au mouvement du sol pour l'évaluation de dommages, à l'opposé des méthodes traditionnelles basées sur l'utilisation de l'EMS 98, telle que celle utilisée pour le programme GEMITIS.

L'aspect le plus important reste toutefois le caractère novateur de l'approche, caractérisé par la présentation et l'utilisation de la méthode du spectre de capacité, proposée ici pour la première fois à des fins d'estimation de dommages. C'est en raison de son exhaustivité que le modèle HAZUS représente aujourd'hui la référence internationale dans le domaine de la modélisation du risque sismique.

I.3.2 Le modèle GEMITIS :

L'étude réalisée dans le cadre d'une opération engagée par le comité français de la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (1990 - 2000), a pour objet l'évaluation de dommages causés par un séisme. Plusieurs applications ont été effectuées, notamment sur les villes de Nice, Pointe à Pitre et Fort de France.

Cette opération porte notamment sur les aspects suivants : la description du milieu physique et l'identification du potentiel sismique ; l'analyse des enjeux humains, socio-économiques et fonctionnels ; l'élaboration de scénarios de crise et évaluation du coût d'une éventuelle catastrophe. La méthodologie globale d'évaluation de dommages directs utilisée ici est présentée par le schéma de la figure I.6.

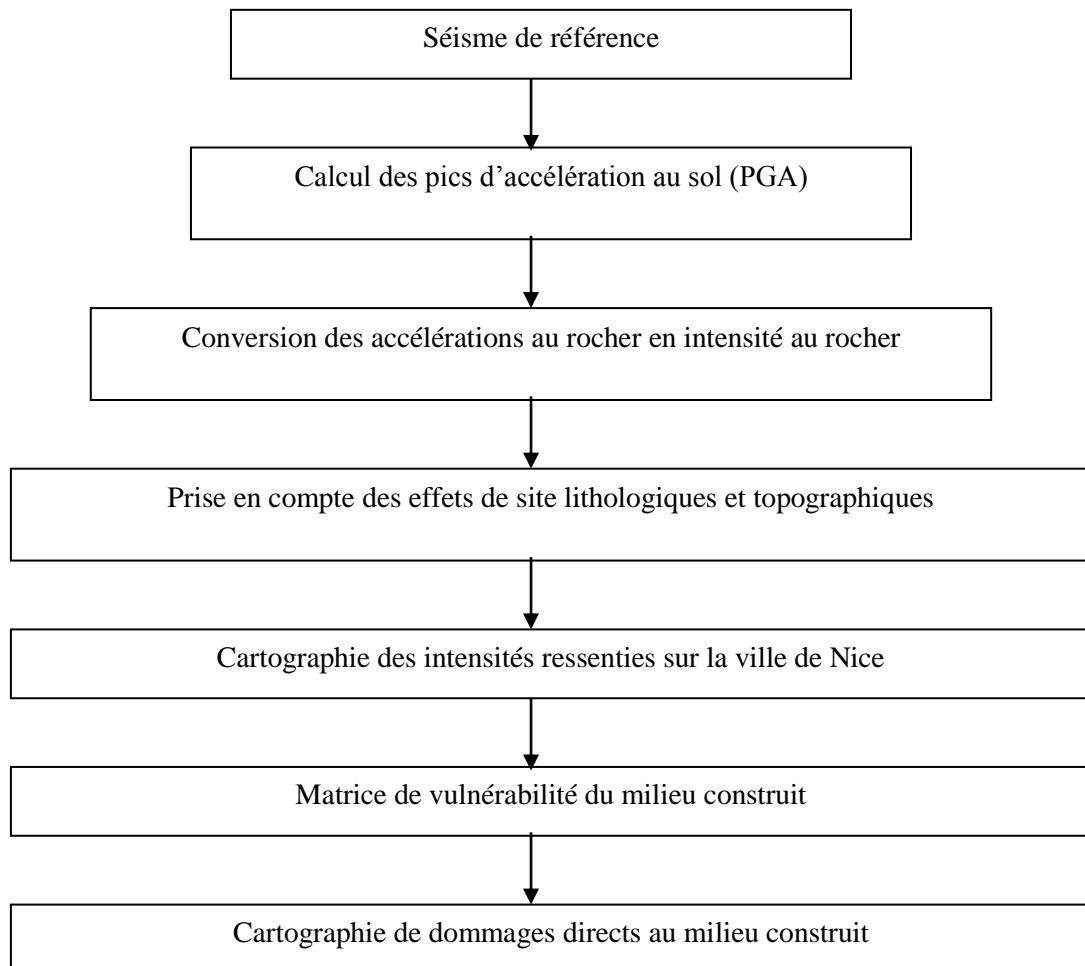


Figure I-6 Méthodologie d'estimation de dommages directs (Source : Arnal et Martin, 1999)

Le modèle définit dans une première étape le scénario sismique de référence, caractérisé par sa magnitude. A cette magnitude il a été associé, dans une deuxième étape, une accélération maximale du sol, qui conduit ensuite au calcul d'une intensité sismique

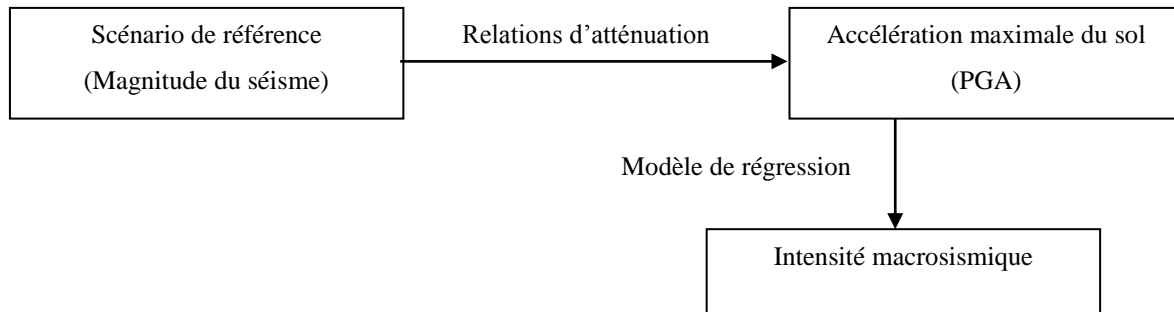


Figure I-7 Détermination de la sollicitation sismique de référence

En fonction de l'intensité présumée du séisme, des courbes d'endommagement issues de l'EMS 98, associées à chaque type de bâti estiment un pourcentage d'endommagement probable. Les pourcentages d'endommagement ainsi obtenus sont ensuite transformés en cinq niveaux de dommages. Ces classes sont les suivantes : dommages négligeables (associés à un pourcentage d'endommagement de 0 à 5%), dommages légers (endommagement de 5% à 20%), dommages modérés (endommagement de 20% à 50%), dommages graves (endommagement de 50% à 90%) et enfin effondrements partiels ou totaux (endommagement supérieur à 90%). La distribution spatiale de dommages, pour chaque type de construction, est ensuite représentée cartographiquement.

I.3.3 Le modèle RADIUS

RADIUS correspond à la mise en œuvre d'un programme lancé par la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (1990 - 2000), sous l'égide des Nations Unies, afin de contribuer à la réduction du risque sismique en zone urbaine, particulièrement dans les pays en développement. Sur la base d'une méthodologie commune, neuf études de cas ont été réalisées, sur des villes choisies sur une liste initiale de 58 candidates situées sur des zones à forte sismicité : Addis Abeba (Ethiopie), Antofagasta (Chili), Bandung (Indonésie), Guayaquil (Ecuador), Izmir (Turquie), Skopje (Macédoine), Tashkent (Ouzbékistan), Tijuana (Mexico) et Zigong (Chine).

Les objectifs principaux de RADIUS ont été : la réalisation des scénarii de dommage et des plans d'action contre le risque sismique dans les neuf villes choisies ; le développement

d'un outil de gestion du risque sismique, applicable partout ; de comparer le risque sismique urbain à travers le monde ; et enfin promouvoir l'échange d'informations pour la réduction du risque au niveau d'une ville. Les résultats obtenus devraient être utiles notamment pour les décideurs de l'urbanisation et de l'aménagement urbain, pour la préparation d'une stratégie de renforcement du bâti existant et pour la préparation des plans de gestion de crise. Le modèle d'estimation de dommages est un outil indépendant, applicable à n'importe quelle ville. Réalisée sous l'interface Excel, il permet (sans pour autant être un SIG) de représenter spatialement, d'une manière simplifiée, la distribution des enjeux dans une ville, des types de sols et des estimations de dommages obtenues. Les données de base sont, comme pour tous les modèles de ce type, les scénarii de séismes, les conditions locales du sol, l'inventaire des enjeux ainsi que les courbes d'endommagement. Le schéma ci-dessous présente l'organisation générale du modèle (fig. I.8).

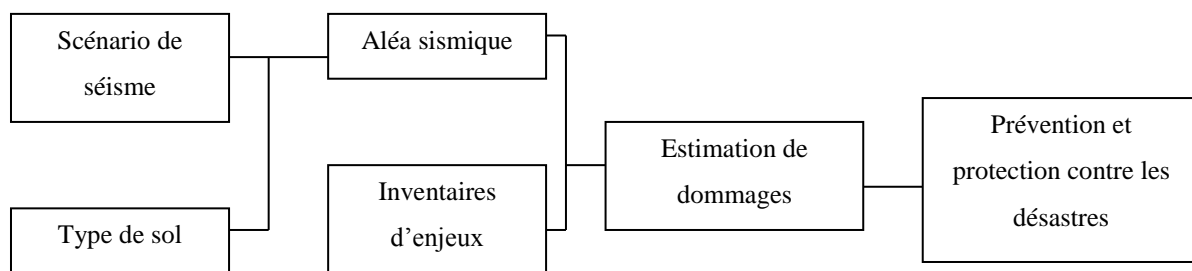


Figure I-8 Schéma conceptuel du modèle RADIUS (Source : RADIUS, 2002)

Dix classes de bâti sont ainsi distinguées ici, en fonction de leur typologie structurale et de leur affectation. Cette classification a été réalisée principalement suivant les caractéristiques du bâti observées en Amérique Latine et généralement dans l'ensemble des pays en développement. Les courbes de fragilité utilisées dans ce modèle sont des relations «intensité–dommages», basées sur des observations réalisées après des séismes antérieurs. Un pourcentage d'endommagement est ainsi associé à chaque niveau d'intensité. Les résultats sont présentés sous forme cartographique ainsi que sous forme tabulaire.

Les résultats du programme RADIUS, appliqué sur les neuf villes mentionnées auparavant, permettent la prise en compte et la réduction du risque sismique, notamment dans les pays en développement. L'outil de modélisation de dommages développé par RADIUS représente également une approche intéressante et simplifiée d'estimation du risque. Il permet l'analyse des scénarii de séismes en milieu urbain, sans aucune difficulté de transposition d'un site à un autre. Le modèle RADIUS représente toutefois, outre le modèle simplifié d'estimation de dommages, une initiative au niveau mondial très utile notamment là où sans

des raisons économiques d'envergure n'a jusqu'ici pas été possible une réelle prise en compte du risque sismique.

I.4 Autres études locales

D'autres études de vulnérabilité au niveau local ont été menées en Europe, les villes sur lesquelles des modélisations de dommages ont été appliquées sont : Barcelone (Espagne) (Gonzales et al, 2001 ; Chavez, 1998) ; Lisbonne (Portugal) (Pais et al, 1995) ; Rome (Italie) (Rovelli et al, 1995) ; Istanbul (Turquie) (Erdik et al, 1995) ; Bâle (Suisse) (Fah et al, 2000).

Enfin, les exemples en Asie et Amérique du Sud des villes ayant fait l'objet d'études de modélisations de dommage sont également nombreux: la région du Dagestan (Lutikov et al, 1995) et Irkutsk (Pavlov et al, 1995) en Russie; la région de Kanagawa (Enomoto et al, 1995) et Yokohama (Amakuni et al, 1995), au Japon ; Erevan, en Arménie (Balassanian et Manukian, 1995) ; Sylhet, au Bangladesh (Ansary, 2002) ; Manilla, au Philippines (Midorikawa et al, 2002) ; Seoul, en Corée (Kim et al, 2002) ; Manizales, en Colombie (Bonett et al, 2001) ; Bogota, en Colombie (Varella et al, 2002) ; Caracas (Enomoto et al, 2001) et Mérida (Castillo et al, 2001), au Venezuela.

I.5 Conclusion :

Un nombre important de modèles d'estimation de dommages sismiques a pu être réalisé dans les dernières années à travers le monde. Entre l'ensemble de ces modélisations, HAZUSTM se distingue par sa clarté et sa démarche directe permettant l'évaluation de dommages à partir du mouvement du sol. Contrairement à lui, la plupart des autres approches proposent des estimations réalisées d'une manière indirecte, à partir des valeurs de l'intensité sismique, qui est elle-même une mesure des conséquences d'un séisme. On note également l'exhaustivité des données fournies en entrée à l'utilisateur par HAZUSTM, qui dépasse largement le choix existant ailleurs. Toutefois, la simplicité des autres modèles tel que RADIUS rend son application accessible à des non-spécialistes, aspect très utile en vue de leur utilisation par des collectivités ou décideurs locaux. Malgré les incertitudes inhérentes, qui varient d'un modèle à l'autre, une évaluation de dommages sismiques permet la connaissance de ce qui se passerait dans le cas d'un tremblement de terre, élément indispensable pour une meilleure prévention et protection face à un risque sismique.

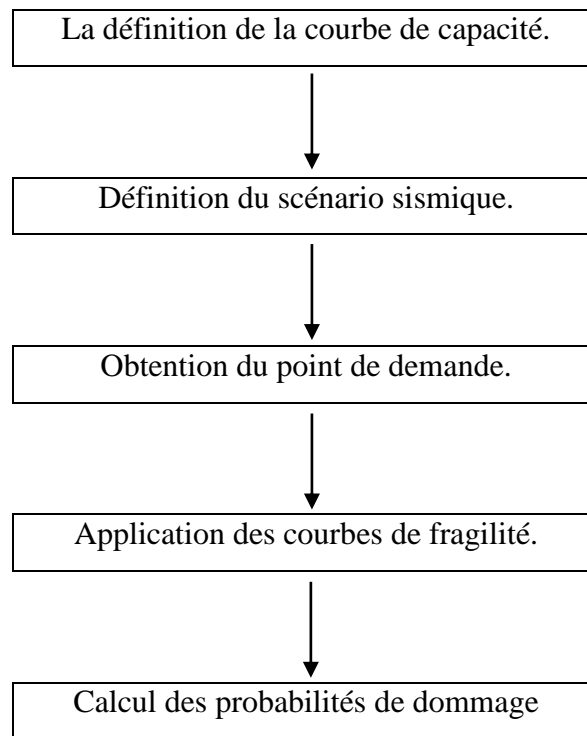
CHAPITRE II

ESTIMATION DES DOMMAGES CONSECUTIFS AUX SEISMES

Méthodologie Utilisée

II.1 Introduction :

L'approche utilisée pour l'estimation des dommages repose sur la méthode du spectre de capacité (MSC) utilisée dans le modèle HAZUS. Cette méthode, basée sur l'utilisation de courbes de capacité, a été développée par plusieurs chercheurs (Mahaney, 1993 ; Paret, 1996 ; Chopra et Goel, 1999 & 2001 ; Fajfar, 1999 & 2000 ; Comartin et al, 2000) pour estimer l'endommagement consécutif à un séisme. Elle est définie par les étapes principales suivantes (figure II.1):



FigureII-1 principales étapes du modèle d'estimation de dommages sismiques

Ces étapes seront définies d'une manière plus détaillée dans le paragraphe suivant.

II.2 Etapes de la modélisation du dommage sismique :

Les deux paramètres principaux d'un modèle d'estimation de dommages sismiques sont le risque qui est le séisme et l'enjeu qui est le bâti. Dans la modélisation du dommage l'événement sismique est traduit sous forme de spectre de réponse et le comportement de la structure sous forme d'une courbe de capacité. Ces deux courbes sont présentées dans le même plan afin de déduire le point de demande utilisé pour le calcul des probabilités de dommages en utilisant des courbes de fragilités. Dans la figure suivante (figure II-2) on présente un schéma analytique des procédures du modèle d'estimation des dommages sismiques.

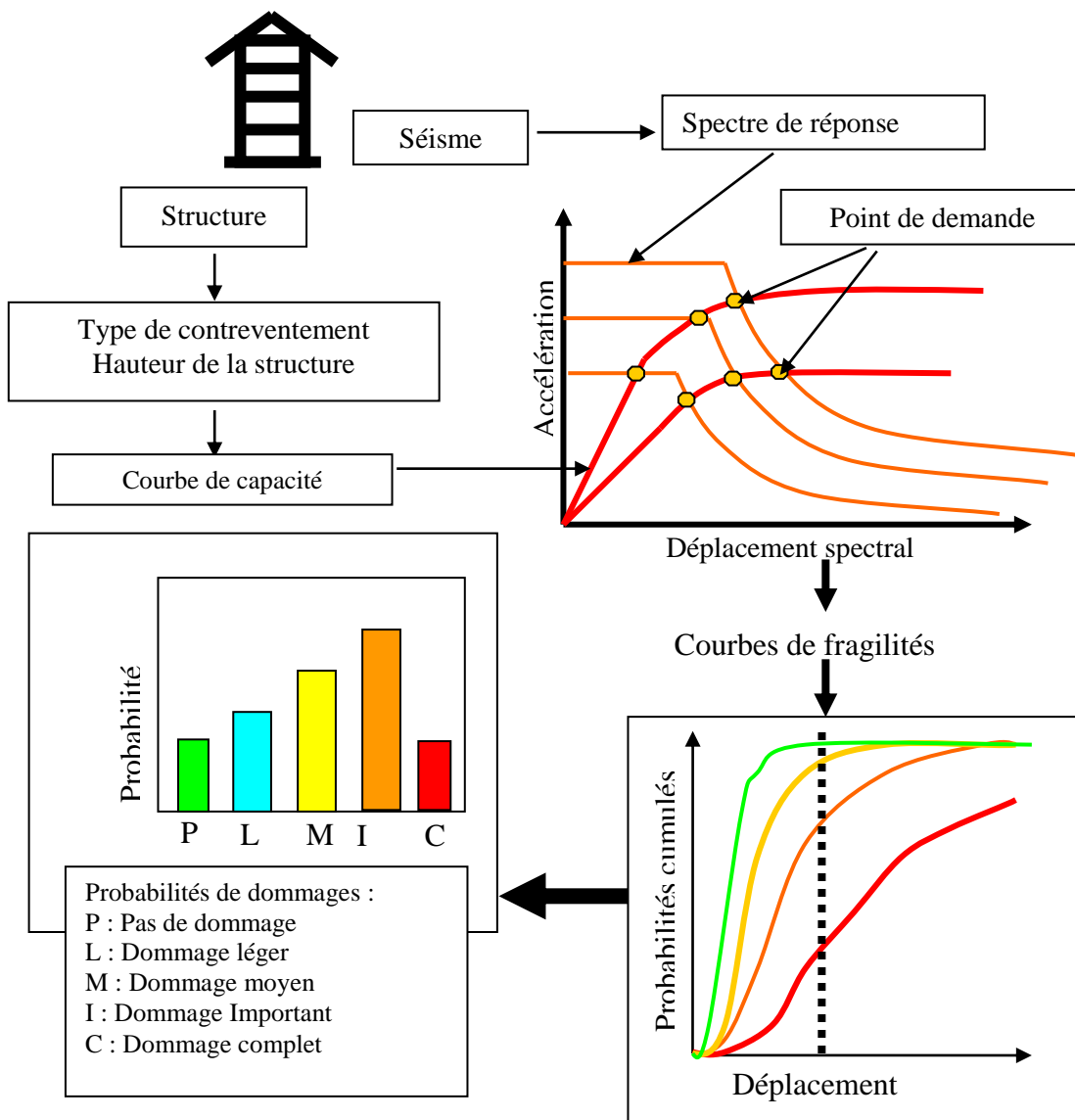


Figure II-2 Schéma analytique des procédures du modèle d'estimation des dommages sismiques

II.2.1 Définition de la courbe de capacité :

La courbe de capacité a un rôle déterminant dans l'estimation des dommages car elle décrit le comportement du bâtiment face à toute sollicitation sismique. Elle conditionne ainsi, en fonction de la demande imposée au bâti, le niveau d'endommagement. Le développement des courbes de capacités requiert des analyses très fines, accessibles uniquement aux spécialistes, car cette méthode novatrice diffère complètement d'un point de vue technique des approches traditionnelles. Très peu de documents proposent aujourd'hui des courbes de capacité spécifiques à plusieurs classes de bâtiments ainsi que des courbes de fragilité adaptées. Ainsi, l'approche HAZUS est la seule méthode (du moins publique) présentant à ce jour une approche de ce type. Pour cela nous allons utiliser les courbes de capacité issues de HAZUS. Il est tout à fait clair que le recours aux courbes de capacité établies par HAZUS n'est pas restrictif dans le sens où l'utilisateur de la présente méthodologie peut utiliser ses propres courbes de capacité. Le paragraphe II.2.5 va nous permettre de définir les courbes de capacité issues de HAZUS utilisées dans le présent travail.

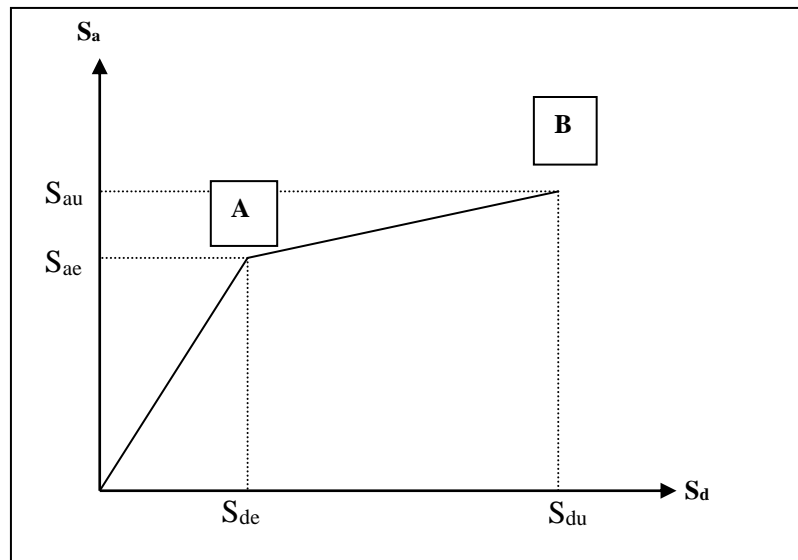


Figure II-3 Forme simplifiée de la courbe de capacité

La forme simplifiée de la courbe de capacité est définie par deux points principaux (Figure II.3), un point $A(S_{ae}, S_{de})$ qui définit la capacité élastique et un point $B(S_{au}, S_{du})$ qui définit la capacité ultime.

S_a : Chargement sismique sous forme de spectre d'accélération.

S_d : Comportement de la structure sous forme de spectre de déplacement.

II.2.1.1 Classification des structures :

La classification des structures est basée sur le type de contreventement ainsi que la hauteur des constructions. Nous avons choisi les types de contreventements définis dans le RPA99 (version modifiée 2003) les plus répandus dans notre Pays (Algérie). C'est à dire les structures en béton armé et les structures en maçonneries. Pour plus de détail le Tableau (II-1) présente la classification des bâtiments choisis.

Tableau II-1 Classification des structures

N°	Acronyme	Type de contreventement	Hauteur (m)			
			Etages		Typique	
			Nom	Nombre	Etages	Mètres
1	BA1	Ossature poteaux – poutres en béton armé	Hauteur basse	1 – 2	2	6,10
2	BA2		Hauteur Moyenne	3 – 7	5	15,24
3	BA3		Hauteur élevée	+ 8	13	36,6
4	BA4	Voile en Béton Armé	Hauteur basse	1 – 2	2	6,10
5	BA5		Hauteur Moyenne	3 – 7	5	15,24
6	BA6		Hauteur élevée	+ 8	13	36,6
7	M1	Maçonnerie non renforcée (murs porteurs)	Hauteur basse	1 - 2	1	4,60

Il est à noter que le choix des courbes de capacité issues de HAZUS a été mené en prenant en compte le contexte du bâti en Algérie. En effet, nous n'avons pas utilisé les courbes de capacité issues de HAZUS qui ne reflètent pas ce contexte. A titre d'exemple, la structure en bois rarement utilisée en Algérie, et caractérisée par sa propre courbe de capacité par HAZUS, n'est pas utilisée dans la présente étude.

II.2.2 Définition du scénario sismique :

La définition du scénario sismique peut être représentée par un signal accélérométrique enregistré durant un séisme, par la sollicitation de référence proposée dans la norme de construction ou encore par un événement avec une probabilité d'occurrence choisie, conformément au zonage sismique. La méthode du spectre de capacité, que nous allons utiliser ici, considère comme sollicitation donnée le spectre d'accélération sismique. Nous allons utiliser

le spectre de référence donné par les règles parasismiques algérienne RPA99 (version modifiée 2003). Il est donné sous la forme suivante :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 0.3s \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II-1})$$

A : coefficient d'accélération de zone (Tableau II.2)

η : facteur de correction d'amortissement (quand l'amortissement est différent de 5%)

$$\eta = \sqrt{7 / (2 + \xi)} \geq 0.7$$

ξ : pourcentage d'amortissement critique (Annexe1 - tableau A.2)

R : coefficient de comportement de la structure (Annexe1 - tableau A.3)

T₁, T₂ : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (Annexe1 - tableau A.4)

Q : facteur de qualité (Annexe1 - tableau A.5)

g : accélération de la pesanteur.

Dans une première étape on prend en considération le spectre élastique avec un coefficient d'amortissement égal à 5%. Ensuite, on introduit les modifications de passage au spectre inélastique qui seront présentées en détail au niveau du paragraphe (II.3.2.1).

Le spectre élastique est obtenu en remplaçant R, η et Q par une valeur égale à 1. Donc il se présente sous la forme suivante (équation II-2) :

$$\frac{S_{ae}}{g} = \begin{cases} 1,25 \times A \times \left(1 + 1,5 \frac{T}{T_1}\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 3,125 \times A & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 3,125 \times A \times \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 0,3s \dots\dots (II-2) \\ 3,125 \times A \times \left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T}\right)^{\frac{5}{3}} & T > 0,3s \end{cases}$$

II.2.2.1 Coefficient d'accélération de zone :

Le facteur principal qui caractérise l'événement sismique est le coefficient d'accélération de zone (**A**). Pour cela deux méthodes sont utilisées pour la détermination de ce facteur.

- La première se base sur le zonage sismique défini dans le RPA99 (version modifiée 2003). Les coefficients sont présentés dans le Tableau II.2.

Tableau II-2 Coefficients d'accélération de zone

Groupe d'usage	ZONE			
	I	IIa	IIb	III
1A	0,15	0,25	0,30	0,40
1B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

La deuxième méthode considère que l'événement sismique est caractérisé avec une magnitude connue ou bien par une faille dont les caractéristiques sont connues. La relation de *Wells et Coppersmith* (1994) (voir équation II-3) définie dans le modèle HAZUS est utilisée pour le calcul de la magnitude en fonction de la longueur de la faille. Ensuite, pour le calcul du PGA (*Peak ground acceleration*) on utilise la loi d'atténuation établie par Ambraseys (Benouar.D1998), équation (II-4). Le PGA calculé est défini comme le nouveau coefficient d'accélération de zone (**A**).

- La relation de Wells et Coppersmith (1994)

$$M = \frac{\log_{10}(L) - a}{b} \dots\dots\dots(\text{II-3})$$

L : est la longueur de la faille en Kilomètres.

M : est la magnitude du séisme.

a et b coefficient en relation avec le type de la faille. (Profonde ou de surface).

Tableau II-3 Coefficients en relation avec le type de la faille. (Profonde ou de surface)

Type de la rupture	a	b
Surface (< 50 Km de profondeur)	-3,22	0,69
Profonde (plus de 50 Km)	-2,44	0,59

- Loi d'atténuation d'Ambraseys (Benouar.D 1998) :

$$\log_{10}(PGA) = -1,43 + 0,2455 \times M_s - 0,786 \times \log_{10}(R) - 0,0010 \times (R) \dots\dots\dots(\text{II-4})$$

R : est la distance hypocentrale (Km). $R = \sqrt{D^2 + H^2}$

D : distance épacentrale. (km)

H : profondeur focale. (km)

II.2.3 Obtention du point de demande :

Nous allons déterminer ensuite la position du «point de demande», défini par le croisement de la courbe de capacité avec la sollicitation sismique (figure II-5). Nous rappelons que sur la courbe de capacité, la position de ce point détermine un certain niveau de dommage (figure II-4). Ainsi, plusieurs niveaux d'endommagement (**Nd**) peuvent être distingués à travers cette représentation graphique. Ces niveaux de dommages sont définis dans le (Tableau II-4).

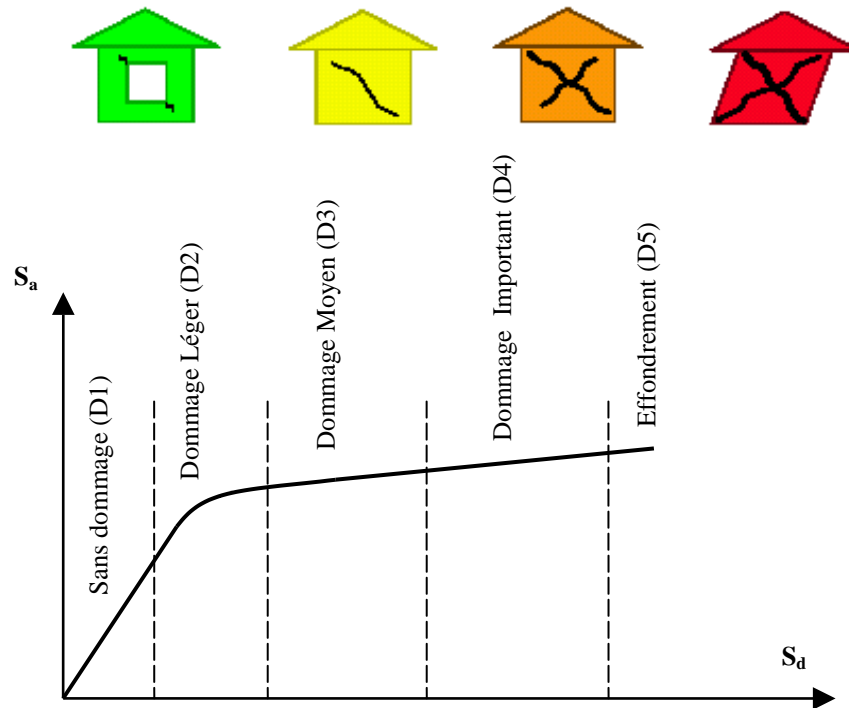







Figure II-4 Niveau de dommage d'une structure

Tableau II-4 Niveaux de dommages des structures

Niveau de dommage (Nd)	Acronyme	Description	
	Pas de dommage	D1	Comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception parasismique habituel.
	Domage Léger	D2	Niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais toutefois un endommagement mineur est susceptible de se développer.
	Domage Moyen	D3	état d'endommagement Moyen, la stabilité de la structure étant en danger
	Domage Important	D4	Etat d'endommagement important. La structure est irrécupérable.
	Domage complet	D5	La structure est susceptible de s'effondrer, ne présentant plus de capacité de résistance.

II.2.3.1 Etapes de détermination du point de demande :

a- Construction du spectre de demande sismique :

Le spectre de demande sismique élastique est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae}(T) \dots \dots \dots (II-5)$$

Ensuite on trace la courbe qui représente S_{ae} en fonction de S_{de} . Cette courbe représente le spectre de demande élastique avec un coefficient d'amortissement de 5% (Figure II-5).

b – Représenter la courbe de capacité du type de bâtiment à étudier dans le même plan.

c – Calculer le déplacement initial S_{di} qui présente l'intersection entre le prolongement du segment élastique de la courbe de capacité et le spectre élastique.

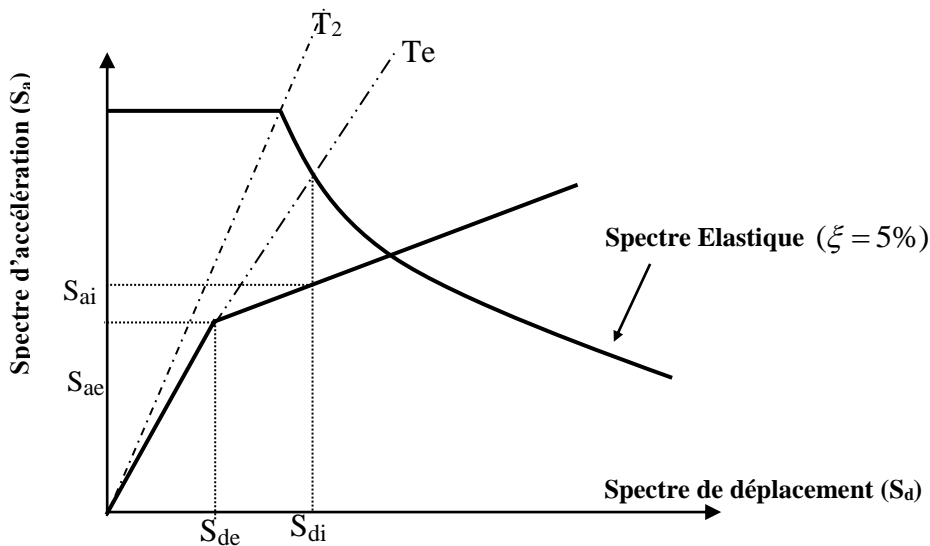


Figure II-5 Obtention du point de demande sismique

d – Calculer le facteur de ductilité. $\mu_i = \frac{S_{di}}{S_{de}}$

e – Calculer le facteur de réduction R_{μ_i} en utilisant la relation suivante :

$$\begin{cases} R_{\mu_i} = (\mu_i - 1) \frac{T}{T_2} + 1 & T < T_2 \\ R_{\mu_i} = \mu_i & T \geq T_2 \end{cases} \dots \dots \dots (II-6)$$

f – Calculer et tracer le nouveau spectre de demande sismique réduit (S_{ai} , S_{di}).

$$S_{ai}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_{\mu i}} \dots\dots\dots(II-7)$$

$$S_{di}(T) = \frac{\mu_i}{R_{\mu i}} S_{de}(T) = \mu_i \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ai}(T) \dots\dots(II-8)$$

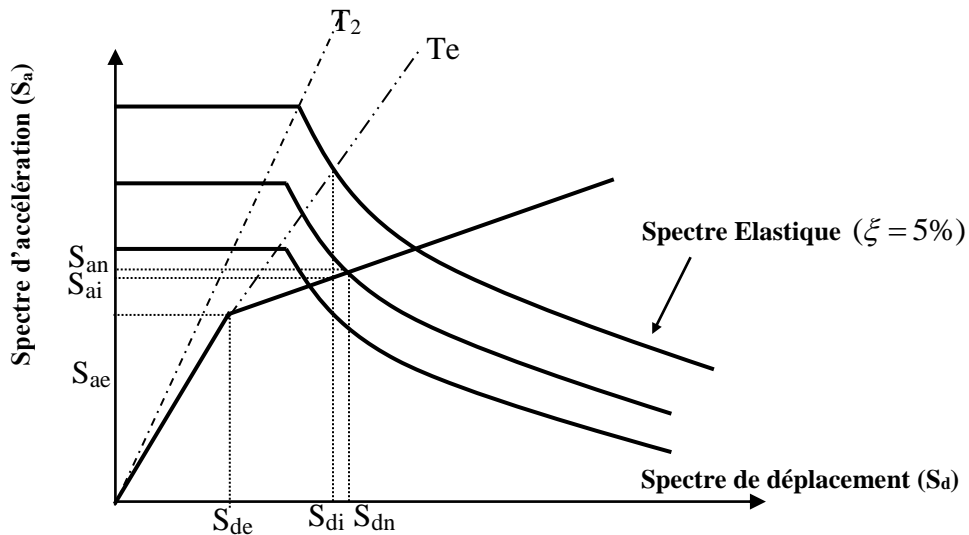


Figure II-6 Obtention du point de demande sismique

g – Calculer le nouveau point d’intersection de la courbe de capacité et du spectre de demande inélastique (S_{an} , S_{dn}). Si $0,95 \times S_{di} \leq S_{dn} \leq 1,05 \times S_{di}$ le nouveau point (S_{an} , S_{dn}) est le point de performance recherché où la demande est égale à la capacité. Sinon reprendre les étapes de **(d)** à **(g)** avec comme déplacement initial S_{di} égal à S_{dn} .

II.2.4 Application des courbes de fragilité

Nous allons ensuite appliquer des courbes de fragilité (ou d’endommagement) afin de calculer la probabilité d’endommagement associée à différents niveaux de dégâts. Ces courbes sont des relations issues de HAZUS, développées essentiellement sur la base d’extrapolations des données liées aux dommages observés, sur dires d’experts ainsi que sur des tests de laboratoire. A partir des coordonnées du point de demande, nous allons obtenir la probabilité

d'endommagement d'un type de bâtiments donné, en fonction de plusieurs niveaux de dommages.

La probabilité du dommage qui correspond à un déplacement (S_d) par rapport à un niveau de dommage (N_d) est calculée par la formule suivante :

$$P[N_d / S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{N_d}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,N_d}} \right) \right] \dots\dots\dots(\text{II-9})$$

\bar{S}_{d,N_d} est la valeur moyenne de déplacement pour le niveau d'endommagement (N_d). (Tableaux II-10 à II-13).

β_{N_d} est l'écart type du déplacement pour le niveau d'endommagement N_d . (Tableaux II-10 à II-13).

Φ Est la loi de Distribution normale Standard.

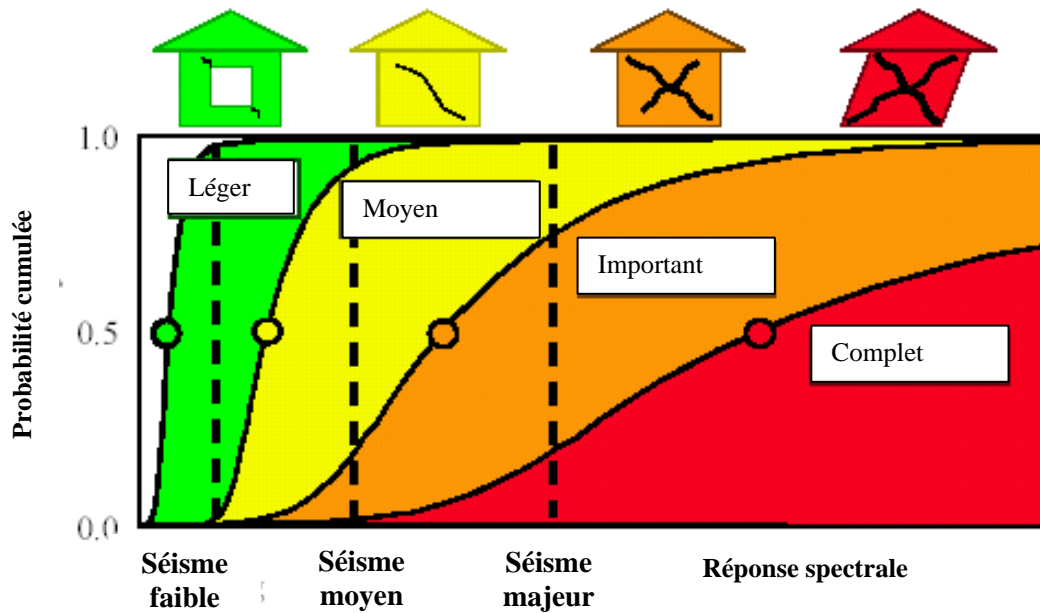


Figure II-7 Exemple d'une courbe de fragilité

Les valeurs utilisées sont celles développées et utilisées dans la méthodologie HAZUS. Ces valeurs varient en fonction des différents codes des états unis (Haut code – code modéré – bas code et pré code) utilisés pour la conception des ouvrages suivant le UBC (zonage sismique propre aux états unis). Les différents codes sont présentés dans le tableau II.5.

Tableau II-5 Guide de choix des fonctions de dommages pour les structures typiques en se basant sur le UBC Zonage sismique et l'âge des structures (source : HAZUS)

UBC Zonage sismique	Post –1975	1941 - 1975	Pre-1941
Zone 4	Haut code	Code modéré	Pré code
Zone 3	Code modéré	Code modéré	Pré code
Zone 2B	Code modéré	Bas code	Pré code
Zone 2A	Bas code	Bas code	Pré code
Zone 1	Bas code	Pré code	Pré code
Zone 0	Pré code	Pré code	Pré code

Dans le cas de l'Algérie, nous avons choisi les courbes de fragilité et de capacité du Pré code pour les constructions individuelles en béton armé et en maçonnerie (type BA1-BA4 et M1 voir tableau II.1). Généralement, ces types de structures n'ont aucune conception parasismique, elles sont réalisées par les citoyens qui n'appliquent aucun code parasismique. Pour le reste des structures (Type BA2 - BA3 - BA5 et BA6 voir tableau II.1) qui sont les bâtiments de plus de 3 étages nous avons utilisé les courbes de fragilité et de capacité du bas code. Généralement, ces constructions sont réalisées avec une conception parasismique.

II.2.4.1 Probabilités totales de dommages :

Après le calcul des probabilités pour chaque zone et pour les différents types de structures. On peut calculer les probabilités totales pour chaque zone de la ville en utilisant la formule (II-10) suivante :

$$PT[Nd / Sd] = \left(\sum_{i=1}^n (Pi[Nd / Sd] \times Si) \right) / \sum_{i=1}^n Si \quad (II.10)$$

$Pi[Nd/Sd]$: Probabilité de dommage du type de structure (i) pour un niveau (Nd) et un déplacement spectral Sd.

$PT[Nd/Sd]$: Probabilité total de dommage pou un niveau (Nd) et un déplacement spectral Sd.

Si : Surface partiel du type de Bâtit i.

II.2.5 Valeurs des courbes de capacités et de fragilités :

Les tableaux suivant présentent les valeurs des courbes de capacité et de fragilité issues de Hazus.

- Valeurs des courbes de capacité (Tableau II.6 à II.9).

Tableau II-6 Courbe de capacité – [Pré code]

Type de la structure	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
	S _{de} (cm)	S _{ae} (g)	S _{du} (cm)	S _{au} (g)
BA1	0,25	0,062	4,47	0,187
BA2	0,74	0,052	8,78	0,156
BA3	1,27	0,024	11,47	0,073
BA4	0,30	0,100	4,57	0,250
BA5	0,66	0,083	6,60	0,208
BA6	1,88	0,063	13,98	0,159
M1	0,61	0,200	6,09	0,400

Tableau II-7 Courbe de capacité – [Code bas]

Type de la structure	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
	S _{de} (cm)	S _{ae} (g)	S _{du} (cm)	S _{au} (g)
BA1	0,25	0,062	3,73	0,187
BA2	0,74	0,052	7,31	0,156
BA3	1,27	0,024	9,57	0,073
BA4	0,30	0,100	3,81	0,250
BA5	0,66	0,083	5,48	0,208
BA6	1,88	0,063	11,65	0,159
M1	0,61	0,200	6,09	0,400

Tableau II-8 Courbe de capacité – [Code modéré]

Type de la structure	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
	S _{de} (cm)	S _{ae} (g)	S _{du} (cm)	S _{au} (g)
BA1	0,51	0,125	8,25	0,375
BA2	1,47	0,104	17,54	0,312
BA3	2,56	0,049	22,97	0,147
BA4	0,61	0,200	9,14	0,500
BA5	1,32	0,167	13,17	0,417
BA6	3,73	0,127	27,97	0,317
M1				

Tableau II-9 Courbe de capacité – [Haut Code]

Type de la structure	Point de capacité élastique		Point de capacité ultime	
	S _{de} (cm)	S _{ae} (g)	S _{du} (cm)	S _{au} (g)
BA1	0,99	0,250	23,83	0,749
BA2	2,92	0,208	46,80	0,624
BA3	5,10	0,098	61,24	0,293
BA4	1,22	0,400	24,34	1,000
BA5	2,64	0,333	35,13	0,833
BA6	7,46	0,254	74,59	0,635
M1				

- Valeurs des courbes de fragilité (Tableau II.10 à II.13) :

Tableau II-10 Courbe de fragilité – [Pré Code]

Type de la structure	DÉPLACEMENT SPECTRAL S _d (cm)							
	Léger		Moyen		Important		Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
BA1	1,83	0,98	2,92	0,94	7,31	0,90	18,27	0,97
BA2	3,05	0,73	4,87	0,77	12,18	0,83	30,46	0,98
BA3	4,39	0,71	7,00	0,80	17,54	0,94	43,86	1,01
BA4	1,47	1,11	2,79	1,09	7,21	1,07	18,27	0,93
BA5	2,44	0,86	4,64	0,83	12,03	0,80	30,46	0,98
BA6	3,50	0,73	6,70	0,75	17,31	0,92	43,86	0,97
M1	0,81	1,15	1,65	1,19	4,11	1,20	9,59	1,18

Tableau II-11 Courbe de fragilité – [Bas Code]

Type de la structure	DÉPLACEMENT SPECTRAL S _d (cm)							
	Léger		Moyen		Important		Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
BA1	2,28	0,95	3,65	0,91	9,14	0,85	22,84	0,97
BA2	3,81	0,70	6,09	0,74	15,23	0,86	38,07	0,98
BA3	5,48	0,70	8,78	0,81	21,93	0,89	54,82	0,98
BA4	1,83	1,04	3,48	1,02	9,01	0,99	22,84	0,95
BA5	3,05	0,82	5,81	0,81	15,02	0,81	38,07	0,99
BA6	4,39	0,68	8,38	0,73	21,65	0,84	54,82	0,95
M1	1,04	0,99	2,06	1,05	5,15	1,10	12,00	1,08

Tableau II-12 Courbe de fragilité – [Code modéré]

Type de la structure	DÉPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Léger		Moyen		Important		Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
BA1	2,28	0.89	3,96	0.90	10,66	0.90	27,41	0.89
BA2	3,81	0.70	6,60	0.70	17,77	0.70	45,68	0.89
BA3	5,48	0.66	9,49	0.66	25,58	0.76	65,78	0.91
BA4	1,83	0.91	3,86	0.97	10,58	1.03	27,41	0.87
BA5	3,05	0.81	6,42	0.77	17,64	0.73	45,68	0.91
BA6	4,39	0.66	9,24	0.68	25,38	0.70	65,78	0.87
M1								

Tableau II-13 Courbe de fragilité – [Haut code]

Type de la structure	DÉPLACEMENT SPECTRAL S_d (cm)							
	Léger		Moyen		Important		Complet	
	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β	\bar{S}_d	β
BA1	2,28	0.81	4,57	0.84	13,71	0.86	36,55	0.81
BA2	3,81	0.68	7,61	0.67	22,84	0.68	60,91	0.81
BA3	5,48	0.66	10,96	0.64	32,89	0.67	87,71	0.78
BA4	1,83	0.81	4,57	0.84	13,71	0.93	36,55	0.92
BA5	3,05	0.74	7,61	0.77	22,84	0.68	60,91	0.77
BA6	4,39	0.68	10,96	0.65	32,89	0.66	87,71	0.75
M1								

Pour une bonne visualisation de ces courbes, nous les présenterons dans le cas des deux codes retenus (le bas code et le pré code) sous formes de graphes (figure II-8 et II-9).

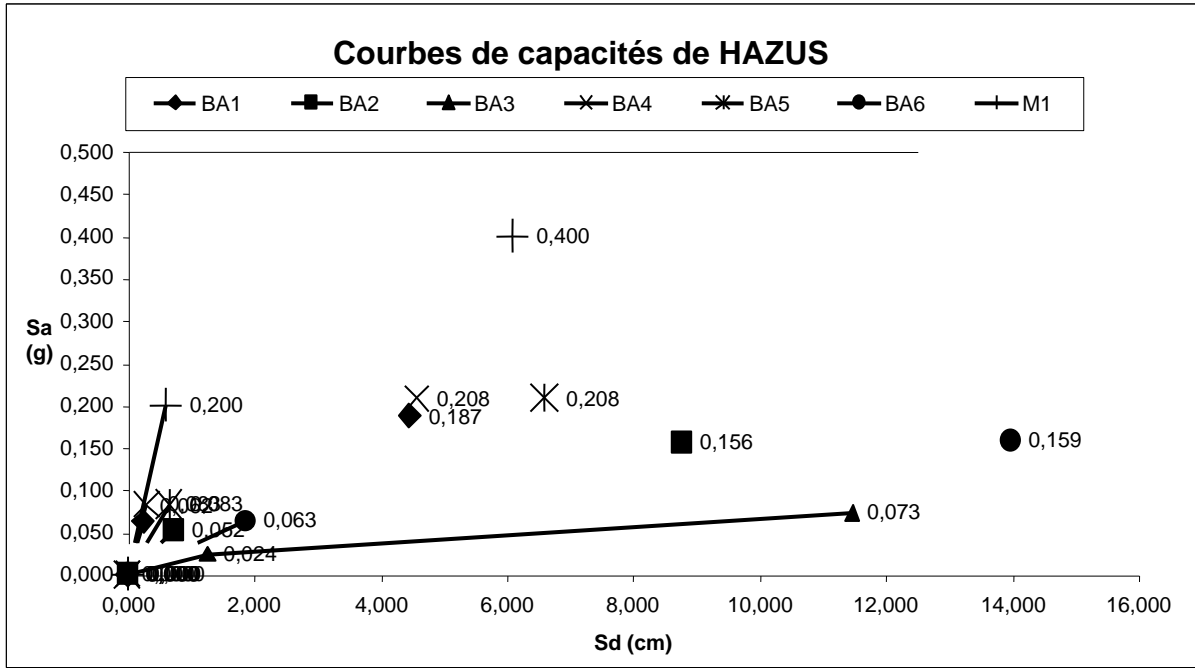


Figure II-8 Courbes de capacité du pré code

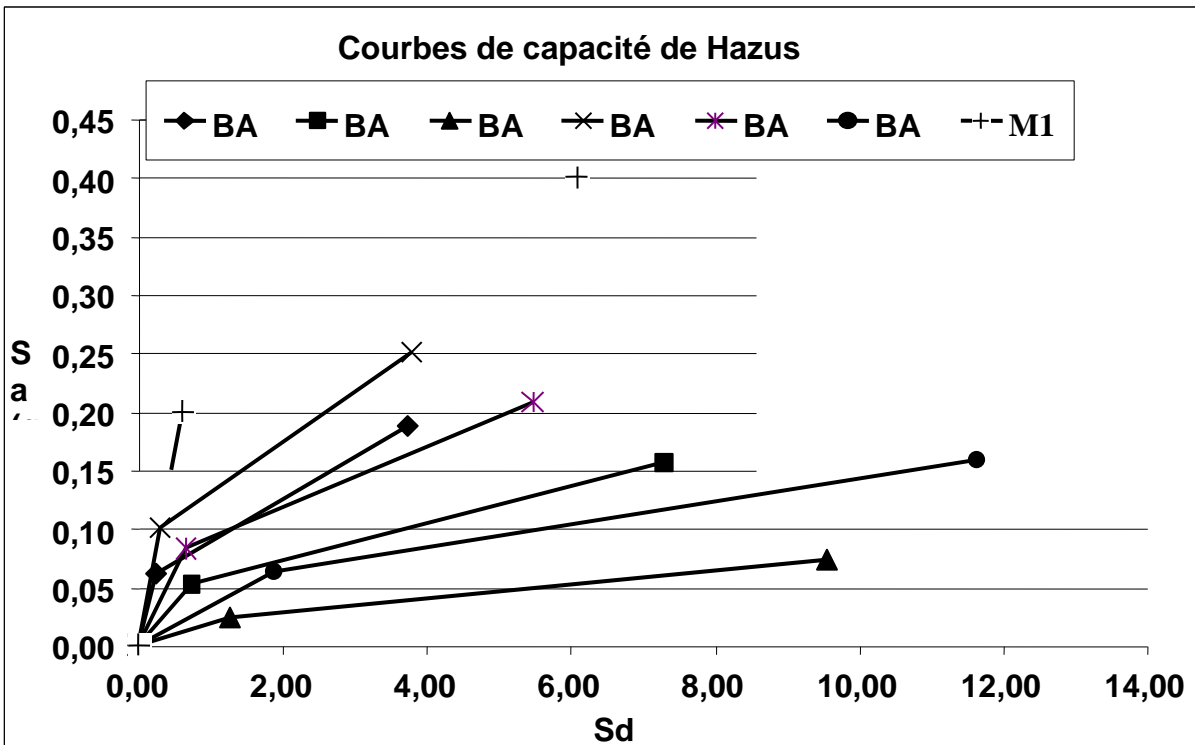


Figure II-9 Courbes de capacité du bas code

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini les étapes nécessaires pour l'estimation des dommages sismiques. L'application de cette méthodologie sur un site urbain nécessite une base de données importante qui intègre tout les données et les paramètres nécessaires à une étude post sismique, en plus d'un nombre important de calculs et d'itérations à effectuer. Pour cela il fallait développer un outil qui facilite cette tâche. Dans le chapitre suivant nous présenterons l'outil numérique nécessaire au traitement des données et à la visualisation des résultats.

CHAPITRE III

LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES (SIG)

UTILISATION DANS L'ESTIMATION DU RISQUE

SISMIQUE

III.1 Introduction :

Après la description de la méthodologie d'estimation de dommages sismiques, nous remarquons que son application nécessite un outil numérique qui facilitera la saisie des données, leurs analyses ainsi que la visualisation des résultats. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser un logiciel à base de systèmes d'information géographique (SIG). Le logiciel choisi est « Mapinfo ». C'est un logiciel qui permet la numérisation des cartes urbaines et la création des bases de données liées à elles. Son interface est présentée dans la figure III-1.

Ce logiciel peut être personnalisé en écrivant de nouvelles fonctions ou macro afin d'exécuter des tâches spécifiques. On programme alors en utilisant un langage, le « MapBasic », qui s'exécute sous Mapinfo et qui exploite toutes ses capacités. Dans ce qui suit, nous allons décrire le module d'estimation du risque sismique que nous avons introduit dans Mapinfo.



Figure III-1 Interface du logiciel Mapinfo

III.2 Outil de modélisation de dommages sismiques :

L'outil créé à l'aide de « MapBasic » est un ensemble de modules ou de programmes. Chaque module a une tâche bien spécifique dans l'estimation des dommages sismiques. Dans ce qui suit on présente l'outil informatique développé et les différentes étapes de la simulation qui sont :

- ✓ Introduction de la carte urbaine.
- ✓ Introduction des données liées à cette carte.
- ✓ Introduction de l'événement sismique.
- ✓ Analyse des données.
- ✓ Présentation des résultats.

Le langage de programmation « MapBasic » est un ensemble de commandes qui facilitent la structuration d'un programme informatique. On a des commandes de déclaration comme la commande « *Declare sub* » pour déclarer une procédure ou la commande « *Global as string* » pour déclarer la nature des variables. On dispose des commandes pour effectuer des opérations d'itération comme la commande « *If Then Else End if* », et d'autres commandes qu'on essaiera de présenter au cours de ce chapitre.

III.2.1 Interface de la simulation

Le premier module a comme objectif le changement de la barre de menu du logiciel « Mapinfo » et la création d'une nouvelle barre propre à la simulation. Cela est réalisé à l'aide de la commande : « *Create menu Bar as* »

Exemple :

```
Create menu Bar as "Fichier", "DONNEES", "SEISME", "ANALYSE"
```

L'interface de la simulation est présentée dans la figure III-2. Le nouveau menu est composé d'une barre d'état contenant les rubriques suivantes : « DONNEES », « SEISME », « ANALYSE » et « RESULTATS ». En plus des deux rubriques « FICHER et FENETRE » propres au logiciel Mapinfo et qui contiennent des applications nécessaires comme l'ouverture et la fermeture des fichiers, leurs enregistrement, ...etc

La rubrique «DONNEES» permet évidemment d'introduire les données. Elle contient trois sous rubriques. La première est la sous rubrique « REGION ». Elle est utilisée pour l'introduction de la carte numérisée. La deuxième est « STRUCTURE », elle est utilisée pour l'introduction des données liées aux structures. La troisième est appelée « TYPE DE SOL » et elle est utilisée pour la saisie des données liées aux sols.

La rubrique «SEISME» permet la définition et l'introduction de l'événement sismique. Elle contient deux sous rubrique. La première est nommée « ZONE SISMIQUE ». Elle est utilisée pour choisir une classe de zonage pour le site étudié. La deuxième est nommée « FOYER » et elle sert à l'introduction des données liées aux foyer causant le séisme.

La rubrique «ANALYSE » qui lance les opérations de calcul. C'est-à-dire lance l'analyse à proprement parler.

Enfin, la rubrique «RESULTATS » qui permet la récupération des résultats de l'analyse. Elle est composée de trois sous rubriques. La sous rubrique « CARTE DE SOL » qui permet la visualisation de la répartition des sols sur la carte urbaine. Les sous rubrique «HISTOGRAMMES DE DOMMAGES » utilisée pour l'affichage des résultats de probabilités de dommages sous formes d'histogrammes et en dernier la sous rubrique « CARTES DE DOMMAGE » qui sert a la visualisation des cartes de dommages.

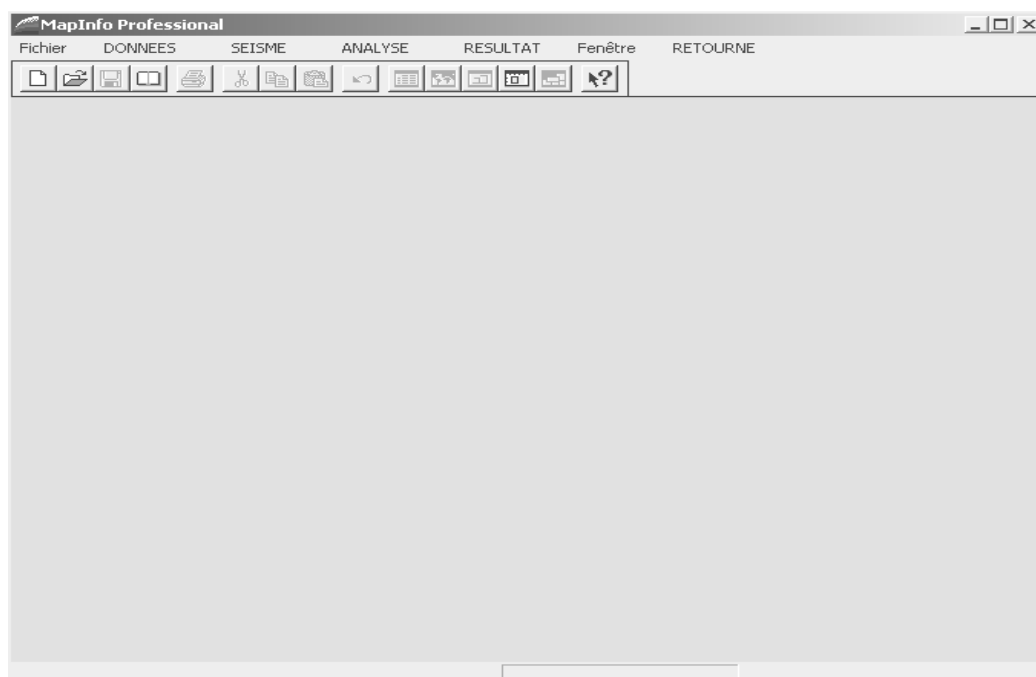


Figure III-2 Interface de la simulation

III.2.2 Introduction des données :

III.2.2.1 Introduction de la carte urbaine :

La première étape consiste à introduire la carte urbaine à analyser. Pour faciliter l'étude, on la modélise en plusieurs secteurs urbains, soit en quartiers, en communes ou en zones délimitées et cela suivant la superficie du site, les types de sols et le niveau de précision des résultats souhaité. En cliquant sur la sous rubrique « REGION », on exécute un module a l'aide de la commande « *Run application* » qui génère une boite de dialogue crée à l'aide des commandes « *Dialog* » et « *Control* ». Dans cette boite, il faut spécifier le chemin de la carte urbaine à analyser (voir figure III-3).

Exemple :

```
Run Application "C:\MAPINFO\MODULE\Région.mbx"
```

Exemple 2:

```
Dialog  
Title "Carte de Données"  
Width 340  
Height 70  
Control StaticText  
Title "Entrer le nom de la carte à analyser :Position 10,15"  
Control EditText  
Value "C:\MAPINFO\ALGESIS\REGION\Tlemcen.Tab"
```

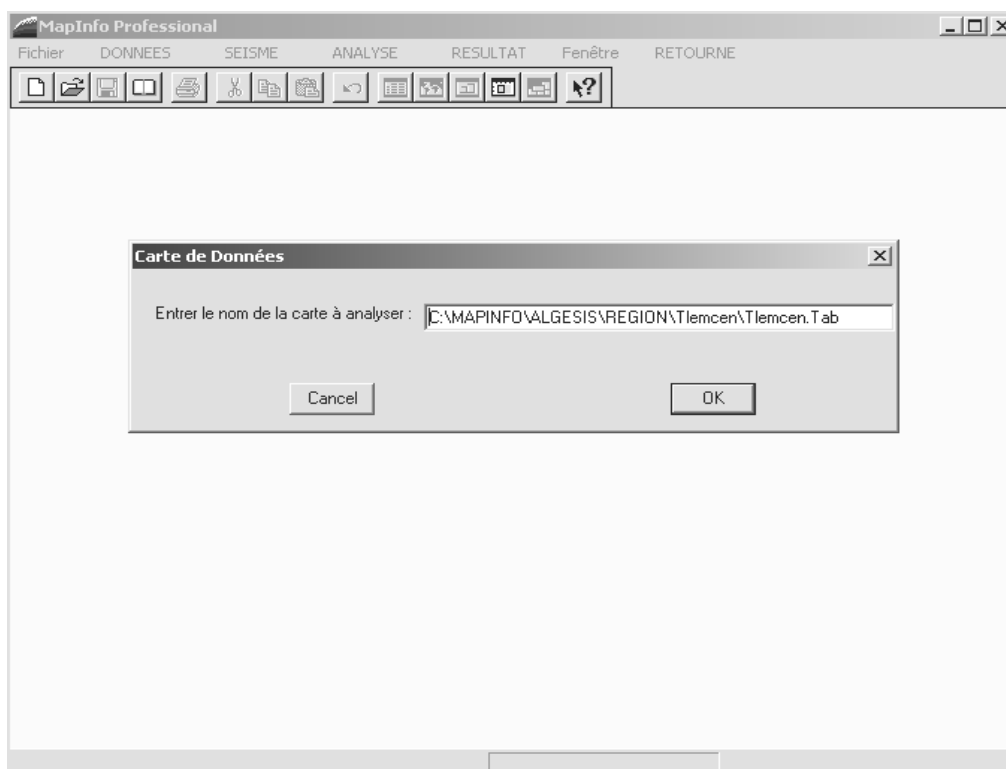


Figure III-3 Introduction de la carte urbaine

En cliquant sur le bouton « *OK* », ce module crée une base de données liée à la carte urbaine à l'aide de la commande « *Creat table* »

Exemple :

```
Creat table BLDCNTSO as "C:\MAPINFO\ALGESIS\REGION\"+carte+"
```

La figure III-4 présente un modèle schématique (forme simplifiée) d'une carte urbaine modélisée et la base de données liée à elle.

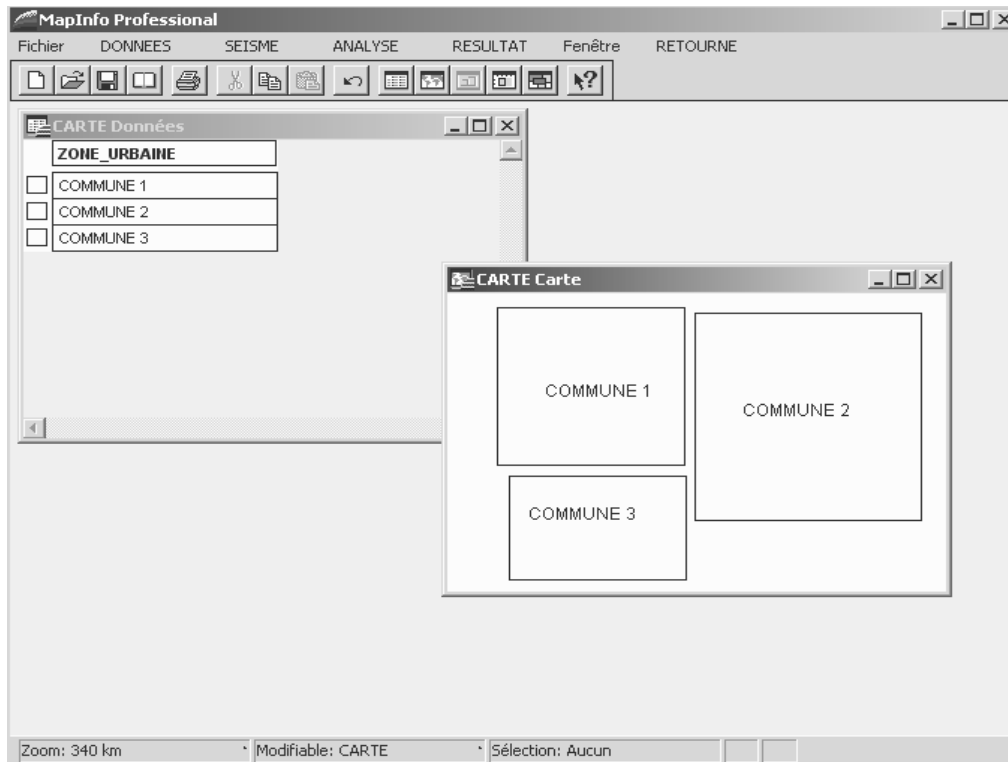


Figure III-4 Modélisation de la carte urbaine

III.2.2.2 Données liées aux structures :

Après la modélisation du site urbain, on passe à l'introduction des données nécessaires à l'étude. Pour chaque zone délimitée, on introduit les différents pourcentages des structures définies dans le chapitre II (Tableau II-1). La figure III-5 présente une table des différents pourcentages des structures liées au quartier 1.

La sous rubrique « structure » exécute un module qui ouvre toutes les tables de la base de donnée liées aux données des structures. Cette opération est faite à l'aide de la commande « *Open Table* ».

Exemple :

```
Open table "C:\MAPINFO\Fichier\Structure.Tab"
```

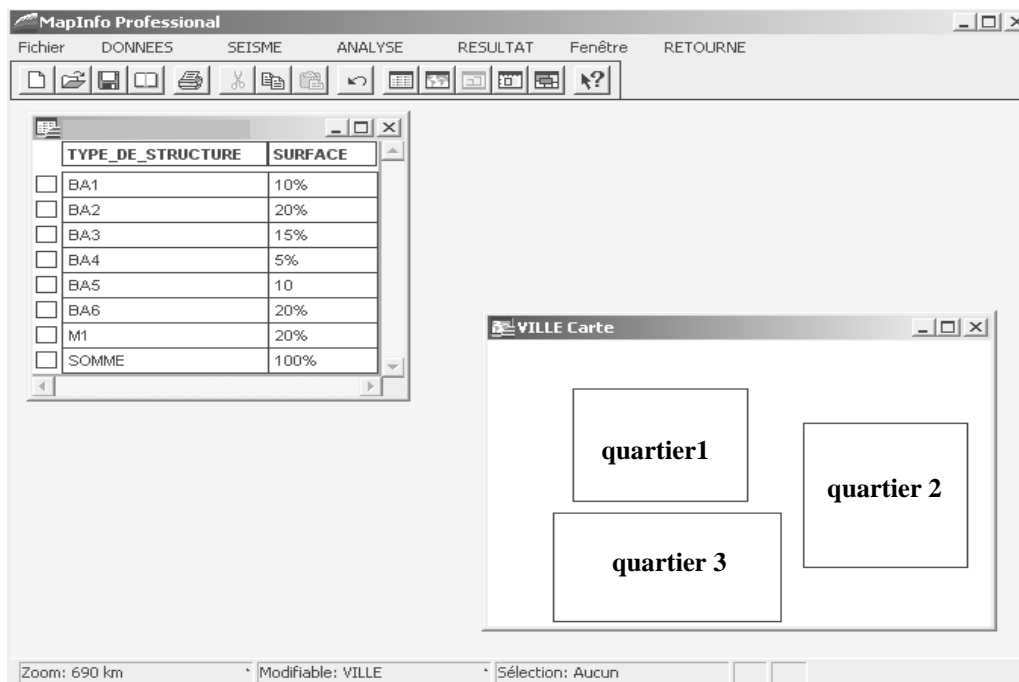


Figure III-5 Introduction des données des structures

III.2.2.3 Données liées aux sols :

On introduit les différents types de sol qui composent le site urbain. Pour chaque zone délimitée on spécifie un type de sol. La figure III-6 montre la liaison entre une base de donnée qui définit les différents types de sols et la carte urbaine. En cliquant sur la sou rubrique « Type de sol », un module est exécuté qui permet l'ouverture de toutes les tables liées aux données des sols a l'aide de la commande « *Open Table* »

Exemple :

```
Open table "C:\MAPINFO\Fichier\Sol.Tab"
```

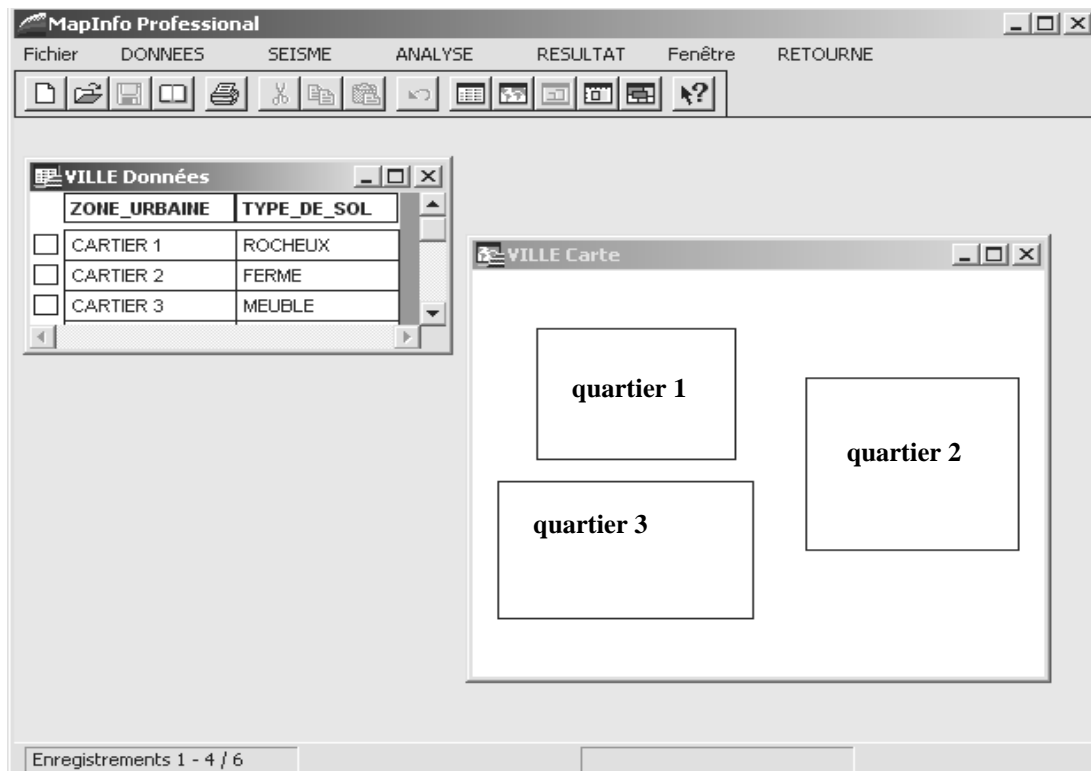


Figure III-6 Introduction des données des types de sol

III.2.3 Evénement sismique :

On passe à la rubrique «SEISME » qui sert à l'introduction de l'événement sismique. Cela peut être fait de deux façons :

III.2.3.1 Sous forme d'une zone sismique :

L'événement sismique est introduit sous forme d'une zone sismique définie dans le RPA99 (version modifiée 2003) pour toute la carte urbaine. Nous avons donc un seul PGA pour toutes les zones. La figure III-7 présente une boîte de dialogue qui permet l'introduction de la zone sismique choisie. Cette boîte est générée en cliquant sur la sous rubrique « zone sismique » qui permet d'exécuter le module lié à elle.

Exemple :

```
sub seisme
Create Table Tract (Region Char(10),ZONE_SISMIQUE Smallint)
File "C:\MAPINFO\ALGESIS\REGION\"+carte+"\ZONE\"+Tract
Insert Into Tract (Region, ZONE_SISMIQUE) Values (CARTE, i)
Commit table Tract
Close table Tract
end sub
```

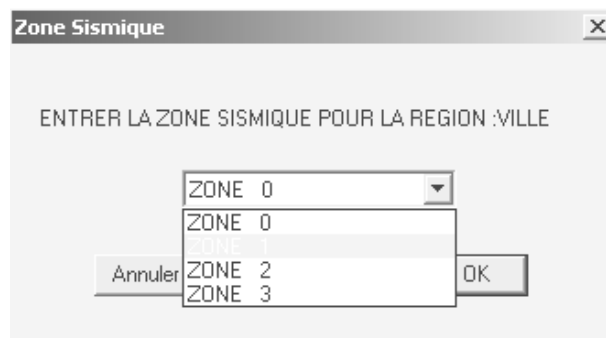


Figure III-7 Introduction de la zone sismique

III.2.3.2 Sous forme d'un foyer :

L'événement sismique est introduit en spécifiant un foyer et cela en introduisant sa localisation par rapport à la carte (latitude, longitude et profondeur), en plus de la longueur de la faille ou la magnitude du séisme. La figure III-8 présente une boîte de dialogue où sont saisies les données liées au foyer. Après l'introduction de ces données une carte apparaît montrant la localisation de l'épicentre sur la carte (figure III-9).



Figure III-8 Introduction des coordonnées du foyer

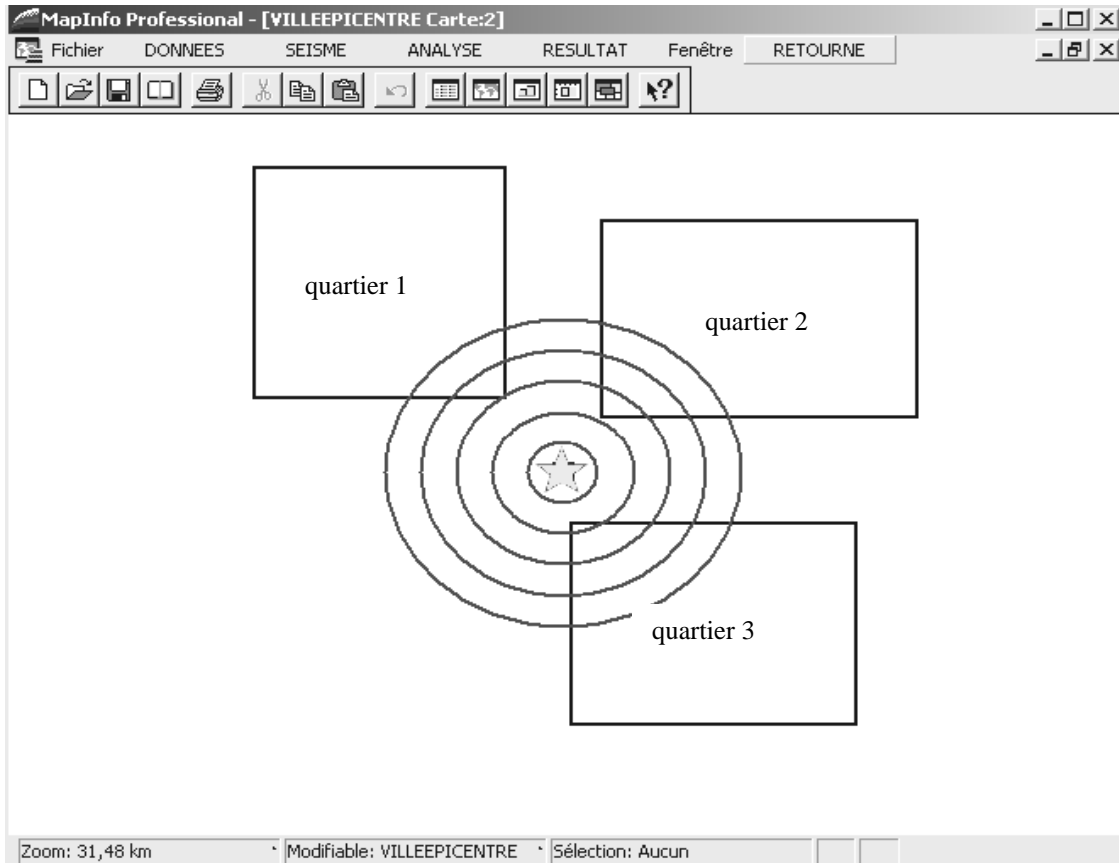


Figure III-9 Visualisation de l'épicentre

III.2.4 Analyse sismique :

Cette étape est celle où on applique la méthodologie d'estimation du risque sismique aux données introduite précédemment, rubrique «ANALYSE ». Toutes les étapes de la méthodologie d'estimation de dommages sismiques détaillées dans le chapitre précédent seront appliquées aux données introduites. Les commandes présentée précédemment sont utilisées en plus d'autres comme la commande de test : « *Do Loop while* » ou la commande d'insertion des données dans un tableau : « *insert into Values()* ».

III.2.5 Présentation des Résultats :

Enfin, on passe à la récupération des résultats, rubrique «RESULTAT ». Ils sont présentés sous forme de cartes, de tableaux ou d'histogrammes. On peut visualiser la carte des différents types de sol du site urbain étudié (Figure III-10) en utilisant la commande d'ouverture de cartes « *Map from* ».

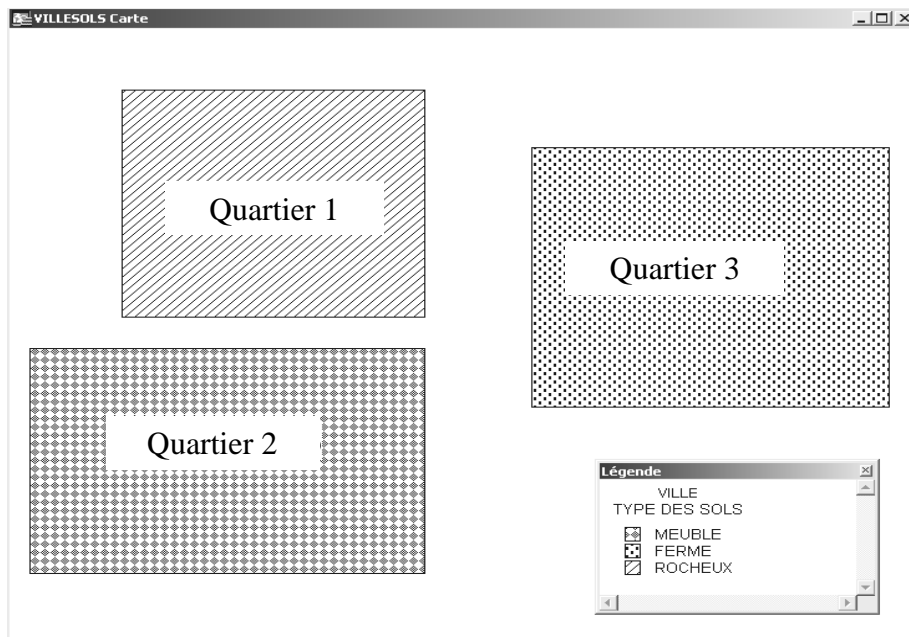


Figure III-10 Présentation de la carte des types de sols

Pour chaque zone de la carte urbaine, on peut présenter les histogrammes qui montrent les pourcentages de chaque état de dommage en fonction des types de structures (figure III-11).

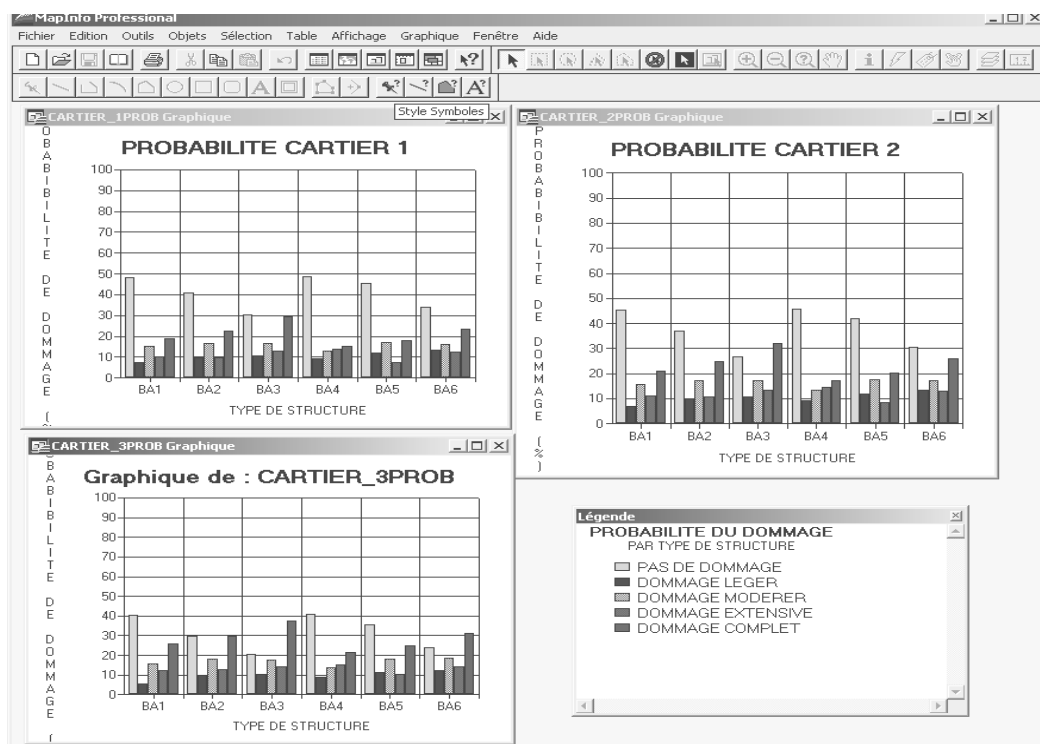


Figure III-11 Pourcentages des dégâts en fonction des types de structures

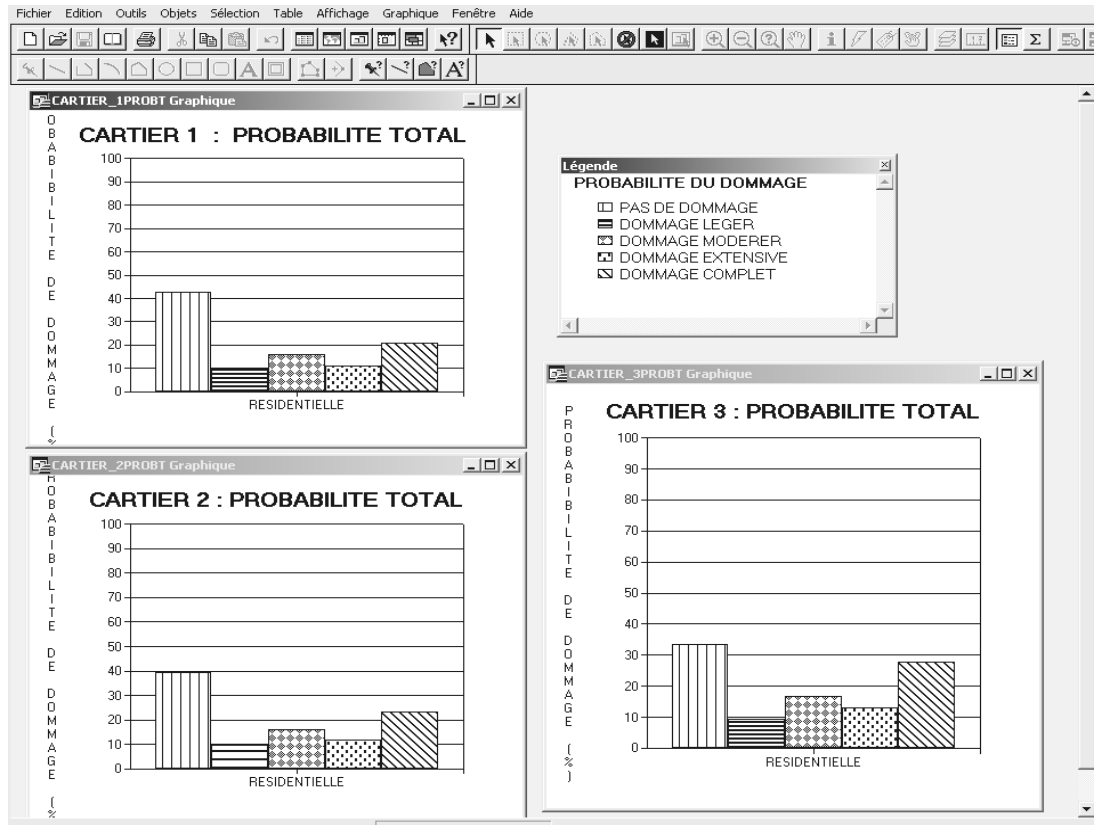


Figure III-12 Pourcentages totaux des dégâts

On peut visualiser aussi une carte thématique qui présente la répartition des pourcentages des dégâts pour chaque zone de la carte (Figure III-13). L'analyse thématique est créé en utilisant la commande « Shade 'carte' With 'Table' ».

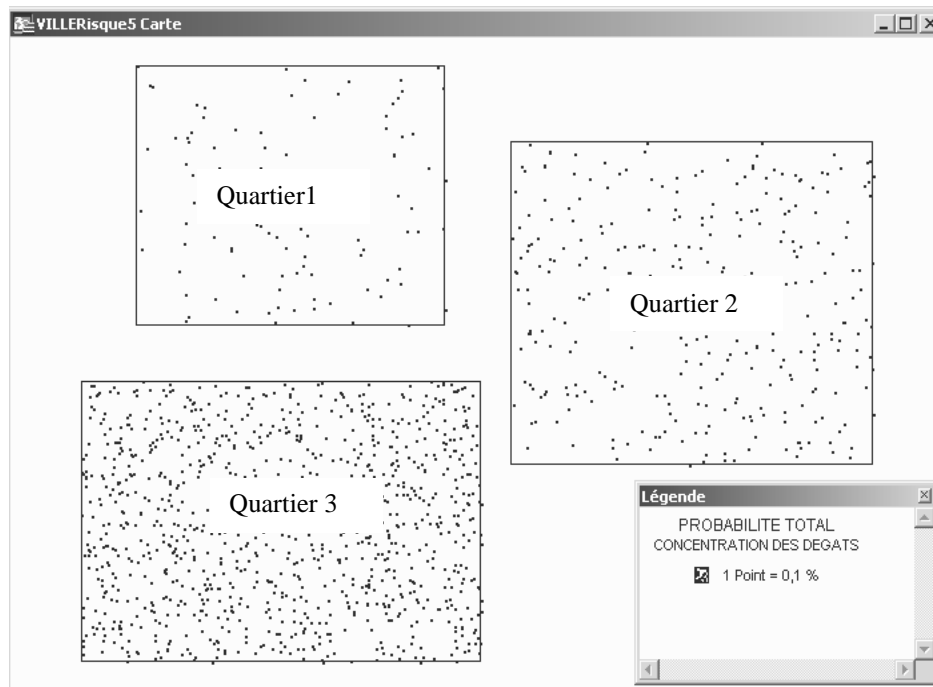


Figure III-13 Répartition cartographique des pourcentages des dégâts

III.3 Conclusion :

L'utilisation des systèmes d'information géographiques et de l'outil informatique développé dans l'analyse du risque sismique sur les zones urbaines est une solution efficace pour la programmation de toutes les étapes numériques d'estimation de dommages, la réduction du temps de calcul, la facilité d'introduction des données et de la visualisation des résultats sous forme de cartes ou de graphes.

Pour avoir une idée sur les résultats donnés par cet outil, il faut faire des applications sur des sites urbains. Dans le prochain chapitre, on appliquera cet outil à la ville de Tlemcen, et dans le dernier chapitre à la Wilaya de Boumerdes (Algérie) ébranlée par un violent séisme le 21 Mai 2003. Nous essayerons alors de comparer les dégâts réels avec les dégâts simulés.

CHAPITRE IV

APPLICATION DE LA METHODOLOGIE D'ESTIMATION DE DOMMAGES SISMIQUES –CAS DE LA VILLE DE TLEMCCEN-

IV-1 Introduction :

Après la description de la méthodologie d'estimation du risque sismique sur une agglomération urbaine et la présentation de l'outil informatique utilisé pour son application, nous passons à une étude pratique. Pour cela, nous avons choisi la ville de Tlemccen (Carte IV-1) [Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire -ANAT-, Révision du P.D.A.U, 2004], une ville qui se situe au nord-ouest algérien. Le découpage administratif comporte trois daïra : la daïra de Tlemccen, de Mansourah et de Chetouane. Cette ville est classée en zone I selon le RPA99 version modifiée 2003.

IV-2 Données de l'étude :

La ville est modélisée en 21 zones (Tableau IV-1) qui représentent soit un quartier, une commune ou une daïra. La figure IV-1 présente la répartition géographique du tissu urbain et le nom de chaque zone délimitée de la ville.

IV.2.1 Données des structures :

Pour chaque zone de la ville, nous avons calculé les différents pourcentages surfaciques de chaque type de structure en respectant la classification présentée dans le Tableau (II-1) et en se basant sur les données de la répartition géographique du bâti de la carte urbaine (V-1). Cela est réalisé à l'aide du logiciel Mapinfo. Après l'insertion de la carte IV-1 dans l'environnement de ce logiciel, on détermine les surfaces bâties de chaque zone de la ville. Puis, pour chaque zone, on détermine les surfaces de chaque type de structures telles que définis dans le Tableau II-1. Enfin, nous calculons les pourcentages par rapport à la surface totale du bâti. Les résultats de ce travail sont donnés dans le Tableau IV-2.

IV.2.2 Données liées au sol :

Pour les données des types de sols qui composent la ville, nous avons utilisé la carte géotechnique IV-2 (Bekkouche.A et al 1999). Le Tableau IV-3 présente les types de sols (selon la classification des RPA) affectés à chaque zone de la ville. Leur répartition géographique est présentée dans la figure IV-2.

Tableau IV-1 Différentes zones qui composent la ville de Tlemcen [ANAT - 2004]

NUMERO	Nom du quartier
1	CHAMP DE TIR
2	ZONE INDUSTRIELLE
3	AIN DEFLA
4	AIN ELHOUT
5	SAF SAF
6	KIFANE
7	IMAMA
8	FEDAN SBAA
9	ABOU TACHFINE
10	HAI ZITOUNE
11	CHETOUANE
12	EL ATTAR
13	BOUDGHENE
14	SIDI EL HALOUI
15	OUZIDANE
16	SIDI AISSA
17	AGADIR
18	MANSOURAH
19	CENTRE VILLE
20	OUJLIDA
21	EL KOUDIA

Tableau IV-2 Répartition des pourcentages du bâti sur les différentes zones de la ville de Tlemccen

NOM DE LA ZONE	Pourcentages surfaciques des structures suivant leurs types de contreventement(%)						
	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6	M1
SIDI EL HALOUI	33,6	22,5	0	0	0	0	43,9
HAI ZITOUNE	78,5	11	0	0	0	0	10,5
OUZIDANE	45,5	0	0	0	0	0	54,5
AIN DEFLA	85,6	14,4	0	0	0	0	0
IMAMA	22,3	38,2	0	34,2	0	0	5,3
SIDI AISSA	51	0	0	0	0	0	49
CHETOUANE	23,5	25,5	0	0	0	0	51
OUJLIDA	55	40	0	0	5	0	0
CHAMP DE TIR	48,5	22,3	0	0	18,3	0	10,9
AGADIR	27	9,8	0	0	0	0	63,2
SAF SAF	35,2	0	0	0	0	0	64,8
KIFANE	68,7	10,3	0	0	5,2	0	15,8
EL KOUDIA	17,3	5,6	0	0	0	0	77,1
CENTRE VILLE	32,2	18,5	0	0	5,3	0	44
ABOU TACHFINE	65,2	10,3	0	0	0	0	24,5
EL ATTAR	15	0	0	0	0	0	85
BOUDGHENE	39,2	5,5	0	0	0	0	55,3
ZONE INDUSTRIELLE	48,6	15,3	0	25,5	10,6	0	0
AIN EL HOUT	18,8	5,7	0	0	0	0	75,5
FEDAN SBAA	14,4	0	0	0	0	0	85,6
MANSOURAH	21,4	5,7	0	0	0	0	72,9

Tableau IV-3 Différents types de sol de la ville de Tlemccen (selon la classification des RPA)

Nom de la zone	Type de sol
SAF SAF	TRES MEUBLE
ABOU TACHFINE	TRES MEUBLE
AGADIR	TRES MEUBLE
CHAMP DE TIR	MEUBLE
ZONE INDUSTRIELLE	MEUBLE
AIN DEFLA	MEUBLE
AIN EL HOUT	MEUBLE
KIFANE	MEUBLE
IMAMA	MEUBLE
FEDAN SBAA	MEUBLE
HAI ZITOUNE	MEUBLE
CHETOUANE	MEUBLE
SIDI EL HALOUI	MEUBLE
MANSOURAH	MEUBLE
CENTRE VILLE	MEUBLE
EL ATTAR	FERME
OUZIDANE	FERME
BOUDGHENE	ROCHEUX
SIDI AISSA	ROCHEUX
OUJLIDA	ROCHEUX
EL KOUDIA	ROCHEUX

IV.2.3 Données liées à l'événement sismique :

Dans le cas de la simulation appliquée à la ville de Tlemcen, nous avons choisi de considérer l'événement sismique de deux façons différentes :

1- Première étude :

Conformément à la classification des RPA, nous considérons un PGA égale à 0,1g. C'est celui utilisé pour le dimensionnement des constructions ordinaires (groupe d'usage 2). Pour plus de détail voir tableau II-2.

2- Deuxième étude :

Dans ce cas, nous envisageons la possibilité de la mise en activité d'une faille sismique située près de la ville. Sur la carte IV-3 nous avons retenu la plus longue, elle se trouve au nord ouest (longitude = 1.2149°- Latitude = 34.6799°) et elle s'étale sur une distance de 10 Km (figure IV-3). Comme nous n'avons pas d'indication sur la profondeur, nous avons alors considéré une profondeur variable du foyer de 5 à 30 Km. Pour l'estimation des PGA, on utilise la formule de Wells et Coppersmith (équation II-3) donnant la magnitude en fonction de la longueur de la faille, ensuite, on fait usage de la loi d'atténuation d'Ambraseys (équation II-4) pour le calcul des PGA.

Tableau IV-4 : Localisation de l'épicentre

N° Foyer	Longitude (degrés)	Latitude (degrés)	Longueur de la faille (Km)	Profondeur du foyer (Km)
1	1.2149°	34.6799°	10	5
2	1.2149°	34.6799°	10	10
3	1.2149°	34.6799°	10	30

Après introduction de ces diverses données, l'application développée fournit des résultats sous forme de probabilités de dommages.

IV-3 Résultats de l'analyse :

IV.3.1 Résultats de la première étude :

Les tableaux IV-5 à IV-8 présentent les résultats des probabilités de dommages en fonction des types de structures. Chacun des ces tableaux correspond à un type de sol. Le tableau IV-5 donne les probabilités pour les zones qui ont un type de sol très meuble comme les zones de SAF SAF et AGADIR, le tableau IV-6 pour les zones qui ont un type de sol meuble comme AIN DEFLA et AIN EL HOUT, le tableau IV-7 pour les zones avec un type de sol ferme comme la zone de OUZIDANE, et enfin le tableau IV-8 pour les zones rocheuse comme la zone d'EL KOUDIA.

*Tableau IV-5 Probabilités par type de structures
(Sol très meuble)*

Type de structure	Pourcentage de dommage (%)				
	Pas de dommage	Dommage léger	Dommage Moyen	Dommage important	Dommage complet
BA1	44,96	19,29	27,69	6,82	1,24
BA2	80,18	12,27	6,48	0,91	0,16
BA3	58,42	19,39	17,97	3,61	0,62
BA4	47,19	22,52	22,41	7,45	0,43
BA5	81,18	14,28	4,33	0,16	0,05
BA6	64,63	24,53	9,46	1,21	0,17
M1	41,03	23,73	22,45	9,75	3,05

*Tableau IV-6 Probabilités par type de structures
(Sol meuble)*

Type de structure	Pourcentage de dommage (%)				
	Pas de dommage	Dommage léger	Dommage Moyen	Dommage important	Dommage complet
BA1	78,27	12,25	8,64	0,77	0,08
BA2	85,21	9,56	4,54	0,59	0,10
BA3	69,10	15,34	13,00	2,22	0,34
BA4	76,16	14,37	8,16	1,29	0,02
BA5	86,19	10,93	2,78	0,08	0,03
BA6	74,54	18,79	5,93	0,66	0,09
M1	56,69	20,97	15,85	5,30	1,20

*Tableau IV-7 Probabilités par type de structures
(Sol ferme)*

Type de structure	Pourcentage de dommage (%)				
	Pas de dommage	Dommage léger	Dommage Moyen	Dommage important	Dommage complet
BA1	84,40	9,56	5,63	0,38	0,04
BA2	89,58	7,01	2,99	0,36	0,06
BA3	75,10	12,75	10,33	1,60	0,23
BA4	82,34	11,40	5,55	0,71	0,01
BA5	89,80	8,33	1,81	0,04	0,02
BA6	81,03	14,56	3,96	0,40	0,05
M1	61,71	19,50	13,73	4,21	0,86

*Tableau IV-8 Probabilités par type de structures
(Sol Rocheux)*

Type de structure	Pourcentage de dommage (%)				
	Pas de dommage	Dommage léger	Dommage Moyen	Dommage important	Dommage complet
BA1	87,05	8,24	4,43	0,26	0,02
BA2	94,44	3,95	1,44	0,16	0,02
BA3	82,08	9,47	7,32	1,00	0,13
BA4	84,57	10,22	4,66	0,55	0,00
BA5	93,37	5,61	1,00	0,02	0,01
BA6	88,61	9,16	2,03	0,18	0,02
M1	65,16	18,35	12,28	3,54	0,67

Pour le niveau de dommage complet, le pourcentage le plus important est celui des structures en maçonnerie (M1) et pour un type de sol très meuble (Tableau IV-5). Ce pourcentage est égal à 3.05 %. La probabilité d'un tel dommage est pratiquement nulle pour les structures en voiles en béton armé (BA4) fondées sur un sol rocheux.

Pour le niveau « PAS DE DOMMAGE », le plus grand pourcentage des structures non endommagées (94,44%) est celui des structures poteau - poutre en béton armé (BA2) et pour un type de sol rocheux (Tableau IV-8). Le pourcentage le plus bas (41.03%) est celui des structures en maçonnerie (M1) pour un sol très meuble (Tableau IV-5).

Nous avons choisi de présenter ensuite les probabilités totales de dommages pour chaque zone de la ville (Tableau IV-9).

Tableau IV-9 Répartition des probabilités totales de dommages par zones de la ville

NUMERO	NOM DE LA ZONE	Pas de dommage	Dommmage léger	Dommmage Moyen	Dommmage important	Dommmage complet
1	SAF SAF	42,4	22,2	24,3	8,7	2,4
2	AGADIR	45,9	21,4	22,3	8,1	2,3
3	ABOU TACHFINE	47,6	19,7	24,2	6,9	1,6
4	FEDAN SBAA	59,8	19,7	14,8	4,6	1,0
5	MANSOURAH	61,3	19,1	14,3	4,3	1,0
6	AIN EL HOUT	62,4	18,7	13,9	4,2	0,9
7	ELATTAR	65,1	18,0	12,5	3,6	0,7
8	CHETOUANE	69,0	16,0	11,3	3,0	0,7
9	SIDI EL HALOUI	70,4	15,5	10,9	2,7	0,6
10	CENTRE VILLE	70,0	15,6	11,0	2,6	0,6
11	ELKOUDIA	70,6	15,8	10,3	2,8	0,5
12	OUZIDANE	72,0	15,0	10,0	2,5	0,5
13	BOUDGHENE	75,4	13,6	8,6	2,1	0,4
14	SIDI AISSA	76,3	13,2	8,3	1,9	0,3
15	KIFANE	76,0	13,3	9,1	1,4	0,3
16	HAIZITOUNE	76,8	12,9	9,0	1,2	0,2
17	CHAMP DE TIR	78,9	12,4	7,4	1,1	0,2
18	IMAMA	82,5	11,2	5,5	0,7	0,1
19	AIN DEFLA	79,3	11,9	8,1	0,7	0,1
20	ZONE INDUSTRIELLE	79,6	12,2	7,3	0,8	0,1
21	OUJLIDA	90,3	6,4	3,1	0,2	0,0

Les probabilités totales les plus importantes des quatre niveaux de dommages léger, moyen, important et complet sont enregistrées pour la zone de SAFSAF et AGADIR ainsi que le pourcentage le plus faible des structures non endommagés (42.4%). Tandis que la zone de OUDJLIDA enregistre les pourcentages de dommages les plus faibles ainsi que le plus grand pourcentage des structures non endommagées (90.3%) (voir tableau ci dessus). Pour une bonne visualisation des dommages complets la figure IV-4 représente une répartition cartographique de ce niveau de dommage.

IV.3.2 Résultats de la seconde étude :

Nous allons donner les résultats de la deuxième étude (utilisation de la carte des failles). Nous commençons par les résultats correspondant à une profondeur de faille de 5Km (foyer1), puis on donne ceux relatifs aux profondeurs de 10 Km (foyer 2) et 30 Km (foyer 3).

a) Résultats du premier Foyer 1 :

Après introduction des données liées au premier foyer (profondeur =5 Km et longueur de la faille =10 Km) et l'utilisation de l'outil d'estimation de dommages sismiques développé, nous avons récupéré les résultats de l'analyse. Le premier type de résultats correspond aux PGA calculés au centre de chaque zone de la ville. Elles sont présentées par ordre décroissant dans le tableau (V-10). Et le deuxième type correspond aux probabilités totales de dommages pour chaque zone de la ville, elles sont présentées par ordre décroissant dans le tableau (V-11).

Tableau IV-10 FOYER 1 PGA CALCULES PAR ZONE

Nom de la zone	PGA (g)
HAI ZITOUNE	0,32
FEDAN SBAA	0,30
ZONE INDUSTRIELLE	0,29
ABOU TACHFINE	0,29
SAF SAF	0,27
SIDI EL HALOUI	0,26
IMAMA	0,25
SIDI AISSA	0,25
AGADIR	0,25
AIN DEFLA	0,25
EL KOUDIA	0,24
KIFANE	0,23
CENTRE VILLE	0,21
CHAMP DE TIR	0,21
CHETOUANE	0,18
OUDJLIDA	0,17
MANSOURAH	0,16
BOUDGHENE	0,16
AIN EL HOUT	0,15
EL ATTAR	0,13
OUZIDANE	0,12

Le PGA le plus important est enregistré pour le quartier de HAI ZITOUNE (0.32 g). Les zones les moins sollicitées sont EL ATTAR et OUZIDANE (0,12g et 0,13g). Pour une bonne visualisation de ces résultats la figure (IV-5) présente la répartition des PGA sur toute la ville.

Tableau IV-11 FOYER 1 PROBABILITES TOATALES (%)

NUMERO	NOM DE LA ZONE	Pas de dommage	Domage léger	Domage Moyen	Domage important	Domage complet
1	SAF SAF	4,36	8,51	25,42	30,81	30,89
2	AGADIR	6,93	10,73	26,67	28,22	27,45
3	ABOUTACHFINE	5,43	8,04	27,17	32,37	26,99
4	FEDANSBAA	12,79	17,1	30,74	23,74	15,63
5	HAIZITOUNE	15,18	14,35	36,48	23,93	10,05
6	SIDIELHALOUI	25,5	20,92	31,82	15,43	6,33
7	ZONEINDUSTRIELLE	22,61	18,92	34,47	18,47	5,52
8	ELKOUDIA	34,15	22,56	25,93	12,41	4,96
9	MANSOURAH	35,66	22,53	25,46	11,83	4,53
10	KIFANE	28,78	19,54	33,31	13,97	4,41
11	CHETOUANE	36,09	22,41	26,44	10,97	4,1
12	CENTRE VILLE	34,67	21,6	28,14	11,26	4,02
13	AIN DEFLA	27,71	18,18	35,41	14,74	3,96
14	SIDI AISSA	41,06	20,85	24,78	9,7	3,61
15	AIN EL HOUT	41,23	22,66	23,27	9,63	3,21
16	EL ATTAR	45,9	22,49	20,9	8,24	2,47
17	IMAMA	36,42	24,86	28,09	8,19	2,43
18	CHAMP DE TIR	42,46	22,3	25,95	7,34	1,95
19	BOUDGHENE	52,9	20,31	18,81	6,2	1,77
20	OUZIDANE	58,17	19,33	16,53	4,79	1,18
21	OUDJLIDA	68,29	16,68	12,95	1,81	0,27

Les dégâts causés par le premier foyer sont importants. Le pourcentage le plus élevé du niveau des dommages complets est enregistré pour la zone de SAF SAF (30.89%) et un pourcentage de structures non endommagées de 4,36%. On peut donc dire que cette zone est

sérieusement touchée. Tandis que le quartier de OUDJLIDA a subi le moins de dégâts, 0.27 % de dommages complets et 68.29% de structures non endommagées. La figure (IV-6) présente le niveau de dommages complets pour chaque zone de la ville.

b) Résultats du deuxième foyer 2 :

Le deuxième foyer est caractérisé par une Profondeur de 10 Km. Après analyse des données, on présente les mêmes types de résultats que ceux de la section précédente. Les PGA classés par ordre décroissant sont présentés dans le tableau (V-12) et les probabilités totales de dommages sous forme de pourcentages sont présentées dans le tableau (V-13).

Tableau IV-12 FOYER 2 PGA CALCULES PAR ZONE

Nom de la zone	PGA (g)
HAI ZITOUNE	0,19
FEDAN SBAA	0,18
ZONE INDUSTRIELLE	0,18
ABOU TACHFINE	0,18
SAF SAF	0,18
SIDI EL HALOUI	0,17
IMAMA	0,17
SIDI AISSA	0,17
AGADIR	0,17
AIN DEFLA	0,17
EL KOUDIA	0,17
KIFANE	0,17
CENTRE VILLE	0,16
CHAMP DE TIR	0,16
CHETOUANE	0,15
OUDJLIDA	0,14
MANSOURAH	0,14
BOUDGHENE	0,14
AINELHOUT	0,13
ELATTAR	0,12
OUZIDANE	0,11

Le PGA le plus important est enregistré pour la même zone du premier foyer (quartier de HAI ZITOUNE) mais avec une grande diminution de sa valeur (de 0,32g à 0,19g). Tandis que pour la zone de OUZIDANE qui est plus loin de l'épicentre que la zone de HAI ZITOUNE, la valeur de l'accélération maximale n'a pas beaucoup diminué (de 0,12g à 0,11g). Cela est dû à la distance hypocentrale qui n'a pas beaucoup changé. La figure IV-7 présente une répartition des accélérations maximales sur toute la ville.

Tableau IV-13 FOYER 2 PROBABILITES TOATALES (%)

NUMERO	NOM DE LA ZONE	Pas de dommage	Domage léger	Domage Moyen	Domage important	Domage complet
1	SAF SAF	10,96	14,64	31,77	26,03	16,59
2	AGADIR	14,50	16,24	30,94	23,5	14,82
3	ABOU TACHFINE	14,29	13,62	33,53	25,31	13,25
4	FEDAN SBAA	28,84	22,61	27,95	14,52	6,09
5	SIDI EL HALOUI	39,48	21,80	25,57	9,78	3,39
6	MANSOURAH	41,35	22,48	23,06	9,78	3,33
7	AINELHOUT	44,65	22,16	21,59	8,77	2,85
8	ELKOUZIA	46,06	22,10	20,91	8,32	2,61
9	CENTRE VILLE	45,95	21,12	22,31	7,73	2,59
10	CHETOUANE	47,32	21,67	21,18	7,48	2,34
11	HAIZITOUNE	40,61	20,12	28,61	8,57	2,1
12	SIDI AISSA	52,96	19,96	19,12	6,15	1,81
13	EL ATTAR	52,22	21,53	18,17	6,41	1,67
14	KIFANE	51,01	20,04	21,93	5,56	1,46
15	AIN DEFLA	46,36	19,70	26,36	6,4	1,18
16	BOUDGHENE	61,46	18,43	14,77	4,3	1,04
17	CHAMP DE TIR	55,37	20,64	18,82	4,13	1,03
18	IMAMA	53,47	22,55	18,95	4,04	0,99
19	OUZIDANE	62,46	18,13	14,4	4,05	0,96
20	ZONE INDUSTRIELLE	48,03	21,25	23,79	5,98	0,95
21	OUJLIDA	75,11	13,82	9,73	1,17	0,16

Les pourcentages de dommages complets ont diminué à peu près de la moitié par rapport aux pourcentages de dégâts causés par le premier foyer. Par exemple, pour la zone de SAF SAF, le pourcentage est passé de 30,89% à 16,59%. La figure (IV-8) présente la répartition de dommages complets sur toute la ville.

c) Résultats du troisième foyer :

Le troisième foyer est caractérisé par une profondeur de 30Km et la même longueur de la faille (10 Km). Les PGA au centre de chaque zone des villes classées par ordre décroissant sont données dans le tableau (V-14) et les probabilités totales de dommages sont présentées dans le tableau (V-15).

Tableau IV-14 FOYER 3 PGA CALCULES PAR ZONE

Nom de la zone	PGA (g)
HAIZITOUNE	0,075
FEDAN SBAA	0,075
ZONE INDUSTRIELLE	0,075
ABOU TACHFINE	0,075
SAF SAF	0,075
SIDI EL HALOUI	0,075
IMAMA	0,075
SIDI AISSA	0,075
AGADIR	0,075
AIN DEFLA	0,075
EL KOUDIA	0,074
KIFANE	0,074
CENTRE VILLE	0,074
CHAMP DE TIR	0,074
CHETOUANE	0,073
OUDJLIDA	0,072
MANSOURAH	0,072
BOUDGHENE	0,072
AINELHOUT	0,070
ELATTAR	0,069
OUZIDANE	0,067

Pour cette profondeur du foyer, on remarque que les valeurs des PGA sont plus faibles et deviennent de plus en plus rapprochés. Elles tendent vers une accélération constante approximativement égale à 0,08g pour toute la ville. Cette accélération est proche de celle donnée dans le RPA 99 pour la zone I et pour les types de constructions ordinaires qui correspondent au groupe d'usage 2 ($A=0,08g$). Dans la version modifiée du règlement (RPA99 version 2003), cette valeur a été un peu augmentée. La nouvelle valeur est égale à 0,1g (voir tableau II-2).

Tableau IV-15 FOYER 3 PROBABILITES TOATALES (%)

NUMERO	NOM DE LA ZONE	Pas de dommage	Domage léger	Domage Moyen	Domage important	Domage complet
1	SAFSAF	47,68	21,56	22,01	7,06	1,69
2	AGADIR	51,15	20,76	20,05	6,47	1,57
3	ABOU TACHFINE	50,43	19,37	22,90	6,06	1,24
4	FEDAN SBAA	61,57	19,23	14,07	4,24	0,90
5	MANSOURAH	65,41	17,77	12,49	3,60	0,74
6	AIN EL HOUT	66,91	17,15	11,87	3,38	0,69
7	EL ATTAR	67,27	17,26	11,60	3,25	0,63
8	EL KOUDIA	70,40	15,85	10,40	2,82	0,53
9	CHETOUANE	71,91	14,86	10,11	2,59	0,52
10	SIDI EL HALOUI	72,10	14,76	10,19	2,45	0,49
11	CENTRE VILLE	71,79	14,88	10,25	2,33	0,46
12	OUZIDANE	74,67	13,93	8,90	2,11	0,39
13	SIDI AISSA	76,12	13,27	8,36	1,90	0,35
14	BOUDGHENE	77,44	12,56	7,74	1,91	0,35
15	KIFANE	76,97	12,82	8,68	1,31	0,22
16	HAIZITOUNE	77,03	12,73	8,88	1,18	0,18
17	CHAMP DE TIR	80,87	11,26	6,75	0,96	0,16
18	IMAMA	84,95	9,70	4,66	0,60	0,10
19	AIN DEFLA	79,74	11,59	7,88	0,72	0,08
20	ZONE INDUSTRIELLE	81,37	11,28	6,62	0,67	0,05
21	OUJLIDA	92,95	4,87	2,05	0,12	0,01

Les pourcentages des dégâts complets sont beaucoup plus inférieurs que le cas précédent (Foyer 2). Pour la zone de SAF SAF le pourcentage des dommages complets a passé de 16,59% à 1,69%. Cela est logique, plus le foyer est profond plus les dégâts sont inférieurs. La figure IV-9 présente la répartition des dommages complets. On remarque aussi que les pourcentages des dégâts sont un peu inférieurs mais similaires à ceux de la première étude basée sur le RPA99 version 2003, ou nous avons pris un PGA égal à 0,1 pour toutes les zones de la ville (Tableau IV-9).

IV-4 Conclusion

Le but de ce chapitre était d'utiliser l'application développée (sous un système d'informations géographiques) pour évaluer le risque lié à un événement sismique probable dans le cas du groupement urbain de la ville de Tlemcen (le grand Tlemcen). Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé les informations disponibles concernant le bâti existant et les conditions de sol de fondation. Pour ce qui est du séisme, nous avons d'abord considéré l'accélération maximum du sol préconisée par les règles parasismiques algériennes (RPA99 version 2003) pour la zone I, conformément à la classification de la Wilaya de Tlemcen selon ces mêmes règles. Nous avons ensuite utilisé une carte des failles sismique recensées dans la région. Nous avons alors envisagé l'éventualité que la plus longue d'entre elles (10Km de faille) entre en mouvement. Comme nous ne disposons d'aucune information sur la profondeur focale, nous l'avons considérée variable (de 5 Km à 30 Km). Les PGA estimés dans le cas d'un séisme superficiel (le plus catastrophique) sont évidemment les plus grands. Nous avons calculé un maximum de 0,32g pour le quartier de HAI ZITOUNE. La probabilité de dommage totale des constructions qui est directement liée à la probabilité des pertes en vies humaines (du moment que ce sont les constructions qui généralement sont à l'origine de pertes en vies humaines) a atteint dans ce cas 31% dans la commune de SAF SAF (PGA de 0,27g associé à de mauvaises conditions de sol). Ce risque est de 6,5 % pour l'ensemble du groupement urbain. Concernant les dommages moyens et important qui eux conditionnent plutôt le coût des réparations, leurs probabilités cumulées a atteint 56% dans la commune de SAF SAF et 40,3% pour l'ensemble du groupement de Tlemcen.

Un autre scénario envisagé est celui d'un PGA uniforme de 0,1g pour l'ensemble du grand Tlemcen conformément au zonage des règles parasismiques algériennes RPA99 version 2003. Nous avons constaté que ce cas conduit à peu près aux mêmes PGA que lorsqu'on fait

l'hypothèse de la mise en activité de la faille de 10Km citée ci dessus en considérant une profondeur focale de 30Km (PGA calculé de 0,08g). ce scénario qui a notre sens, est plus probable que celui d'une faille située à une profondeur très faible de 5 km (mais possible) à donné une probabilité cumulée de dommages moyens et importants qui fixe le coût des réparations éventuelles de 12,5 %.

Les résultats de cette simulation peuvent évidemment être exploités autrement (ou mieux exploitées). On peut les utiliser par exemple pour mettre en place les plans ORSEC ou encore pour arrêter les plans directeurs du développement de la ville.

Les résultats de cette étude de risque qui reste évidemment une simulation nous ont semblé fort raisonnables. Pour les étayer nous avons pensé appliquer la même démarche mais à un site déjà touché par un séisme important. C'est à dire un site où les dommages ont été mesurés et chiffrés et qui sont donc bien réels. Nous avons choisi le séisme qui vient de toucher l'algerie dans sa chair : celui de Boumerdes du 21 Mai 2003.

Chapitre V

Application de la méthodologie d'estimation de dommages sismiques

Cas de la Wilaya de Boumerdes (Séisme du 21 mai 2003)

V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons utilisé l'application développée à l'estimation du risque lié au séisme pour le cas de la ville de Tlemcen. Pour quantifier la qualité des prédictions du risque fournies par cette application, nous avons décidé de l'utiliser sur un site déjà touché par un événement sismique. Nous avons retenu la Wilaya de Boumerdes qui a été ébranlée par un séisme d'une magnitude de 6,8 sur l'échelle de Richter, le 21 Mai 2003. Nous avons choisi toute la Wilaya (et uniquement la Wilaya de Boumerdes) car les inventaires d'expertise des dégâts consécutifs au séisme dont nous disposions était ceux de cette Wilaya. Ils étaient publiés sur le site Internet de l'organisme de contrôle des constructions de la région centre (www.ctc-centre.dz).

Les informations relatives au séisme ont été obtenues grâce au cahier technique AFPS (2004) sur le séisme de Boumerdes (21 Mai 2003). Quant à celles relatives à la nature des sols déduites des cartes présentées dans ce même document.

Concernant la typologie des constructions, nous avons extrapolé les informations obtenus lors de notre étude sur Tlemcen.

V.2 Généralités sur le séisme de Boumerdes (21 Mai 2003)

Le 21 mai 2003 à 18 :44 GMT une secousse tellurique de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter a ébranlé la région centre de l'Algérie ou plusieurs wilaya ont été touchées : Alger, Boumerdes, Tizi-ouzou, Bouira et Blida (figure V-1).

Ce séisme a été largement ressenti dans les wilayas limitrophes (Médéa, Tipaza, Bejaia, Bouira, etc...) et jusqu'aux îles Baléares au nord à 300 Km de l'épicentre. Le choc principal a été suivi dans les jours suivants de certaines répliques, la plus forte atteignant une magnitude de 5,8. Les stations du réseau accélérométrique du CGS installées dans la région ont enregistré le choc principal et les principales répliques.

Les sites au niveau desquels ont été enregistrés des dégâts matériels et corporels important sont Boumerdes ville, Dellys, Zemmouri, Corso, Réghaia, Boudouaou, Bordj El Bahri, et d'autres localités encore.

Environ 7400 édifices ou habitations ont été détruits et environ 7000 autres ont été sérieusement endommagés dans la wilaya de Boumerdes. Presque 8500 logements perdus et plus de 20000 sérieusement endommagés dans la wilaya d'Alger.

Il est à déplorer par ailleurs (dernier bilan officiel) 2278 morts, plus de 10 000 blessés et environ 180 000 sinistrés.

V.2.1 Caractéristiques du séisme

Comme signalé précédemment, c'est donc le 21 mai 2003 à 18H44 G.M.T qu'une secousse tellurique de magnitude 6.8 sur l'échelle de Richter a ébranlé la région centre. Principalement Alger et Boumerdes (Figure V.1).

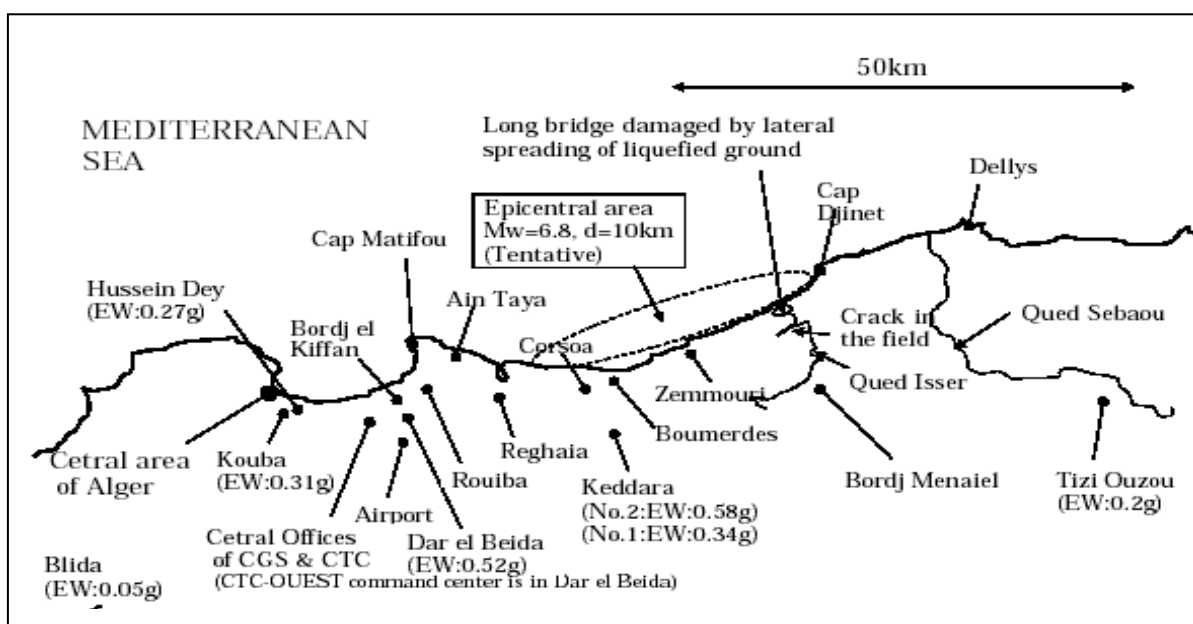


Figure V-1 Région touchée par les séisme de Boumerdes (Laouami.N et al ,2003)

Différents instituts dans le monde ont donné la magnitude et les coordonnées épicentrales (Tableau V.1):

Tableau V-1 Caractéristiques du séisme de Boumerdes 21 Mai 2003 (Belazougui et al , 2003)

Institut	Magnitude	Latitude	Longitude	Profondeur
IISEE (Japon)	6.9	36.89 N	03.78 E	10 Km
USGS	6.8	36.90 N	03.71 E	10 Km
CSEM	6.8	37.02 N	03.77 E	02 Km
CGS	7.0	36.81 N	03.53 E	-
CRAAG	6.8	36.91 N	03.58 E	-

Dans les heures qui ont suivi le choc principal, plusieurs répliques ont été enregistrées avec des magnitudes variant de 3 à 4. Ces répliques ont continué à se manifester les jours suivants sans toutefois dépasser une magnitude de 5,8.

V.2.2 Enregistrements sismiques

Pour ce qui est des mesures des mouvements forts du sol, plusieurs enregistrements ont été réalisés par le réseau national d'accélérographes du CGS. Les stations en champ libre les plus proches qui ont enregistré le choc principal se trouvent à 20 Km de l'épicentre (Keddara). Les accélérations maximales enregistrées par 6 stations sont les suivantes (Tableau V.2).

Tableau V-2 Accélérations maximales enregistrées (Belazougui et al , 2003)

Station	Composante			Distance de l'épicentre en (Km)
	E-W	Vert	N-S	
Keddara 1	0.34	0.26	0.24	20
Keddara 2	0.58	0.35	0.22	20
Hussein-Dey	0.27	0.09	0.23	36
Dar El Beida	0.52	0.16	0.46	29
Blida	0.046	0.028	0.038	72
Al Affroun	0.16	0.03	0.09	86

V.3 Evaluation et analyse des dommages

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

Dans la semaine qui a suivi le séisme, plus de 700 ingénieurs et experts étaient à pied d'œuvre sur les lieux, formant plusieurs groupes, dirigés par 2 postes de commandement, l'un à Alger et l'autre à Boumerdes.

V.3.1 Modalité de l'expertise :

Il s'agit d'inventorier les parties du patrimoine utilisables immédiatement, celles qui nécessitent des réparations et/ou des renforcements, et celles qui sont irrécupérables. Une fiche regroupant une soixantaine d'informations a été utilisée pour la circonstance (voir spécimen en annexe 2). Cette fiche qui a été déjà utilisée pour Chlef en 1980, Tipaza en 1989, Mascara en 1994, Ain Benian en 1996, Ain Temouchent en 1999, Béni Ourtilane en 2000 et sert de guide aux ingénieurs de structures qui ont eu à effectuer des expertises.

Chaque fiche a été remplie pour consigner le constat des dommages de chaque construction expertisée. L'usage de cette fiche a contribué à rendre systématique la procédure d'évaluation des dommages et à rendre homogène les appréciations des ingénieurs.

Cette fiche comporte des renseignements d'ordre général (identification, usage, nombre de niveaux, etc...), des observations concernant les problèmes de sols, une évaluation des dommages subis par les éléments secondaires, des commentaires sur les causes probables de dommages ainsi qu'une évaluation globale du niveau général de dommages des éléments de la construction et de la construction toute entière, une classification à 5 niveaux a été utilisée (Tableau V.3).

Tableau V-3 Niveaux de dommage des structures expertisées

VERT	(Niveau 1 et 2)	Pour les constructions ayant subi peu ou pas de dommage et pouvant être récupérées immédiatement
ORANGE	(Niveau 3 et 4)	Pour les constructions ayant subi des dommages et nécessitant une deuxième expertise approfondie qui permettra de décider si ces constructions peuvent ou non être récupérées, suivant l'importance des dommages et le coût des réparations.
ROUGE	(Niveau 5)	Pour les constructions ayant subi des dommages considérables et a condamner

V.3.2 Distribution des dommages :

Cette section présente les premiers résultats d'ensemble des dommages qui constituent un bilan au (30-06-2003) ainsi que les statistiques de niveaux des dommages. Le tableau V.4 présente la répartition des 97044 constructions de la zone sinistrée expertisées au 30-06-2003 parmi les cinq niveaux de dommages regroupés en trois couleurs (vert : niveau 1 et 2 ; orange : niveau 3 et 4 ; rouge : niveau 5). On constate que parmi la masse globale des constructions (97 044) le nombre de constructions d'habitation est prépondérant (91 735, soit 94.35 %).

Parmi les 97 044 édifices ou habitations expertisées on constate que :

- **53 496** ont été classées au niveaux 1 et 2 (couleur verte), c'est-à-dire parmi les bâtiments n'ayant subi pratiquement aucun dommage ou ayant subi des dommages légers nécessitant de simples réparations. Le pourcentage de cette classe représente 55.12%.
- **32 904** sont classées aux niveaux intermédiaires 3 et 4 (couleur orange), c'est-à-dire parmi les bâtiments nécessitant une étude plus approfondie en vue d'une réparation ou réparation et renforcement. Le pourcentage de cette classe représente 33.91%.
- **10644** ont été classées au niveau 5 (couleur rouge), c'est a dire parmi les constructions effondrées ou condamnés nécessitant une démolition et une reconstruction ultérieure suivant les normes parasismiques en vigueur. Cette classe représente 10.97% de l'ensemble.

Tableau V-4 Bilan des dommages arrêtés au 30/06/2003 dans les Wilaya d'Alger et Boumerdes

USAGE	NIVEAU DE DOMMAGE					TOTAL
	VERT		ORANGE		ROUGE	
	NIV.1	NIV.2	NIV.3	NIV.4	NIV.5	
HABITATIONS	18130	32352	19343	11727	10183	91735
BAT.AMINI	213	300	184	76	52	825
EQUISCOLAIRES	490	814	467	286	103	2160
EQUIHOSPITALIERS	94	114	44	23	10	285
EQUISPORTIFS OU CULTURELS	106	97	90	87	32	412
COMMERCES	189	193	140	82	137	741
EQUI.INDUSTRIELLES ET HANGARS	85	153	98	73	66	475
AUTRES	54	112	110	74	61	411
TOTALS	19361	34135	20476	12428	10644	97044
Pourcentages (%)	19.95	35.17	21.10	12.81	10.97	100
Pourcentages (%)	55.12		33.91		10.97	100

V.3.3 Résultats de l'expertise des dommages sur la ville de Boumerdes :

Les résultats de l'expertise faite sur la ville de Boumerdes sont présentés dans le tableau (V-5) sous forme de nombres de constructions pour chaque niveau de dommage, et dans le tableau (V-6) sous forme de pourcentages pour chaque niveau de dommage.

Tableau V-5 Dommages expertisés sur l'ensemble de la ville de Boumerdes

DAIRA	COMMUNE	NIVEAU DE DOMMAGE / (Nombre de structures)				
		VERT		ORANGE		ROUGE
		NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3	NIVEAU 4	NIVEAU 5
Boumerdes	Boumerdes	914	795	536	301	566
	Corso	508	780	387	172	331
	Tidjelabine	446	858	390	208	365
Boudouaou	Boudouaou	1572	2373	1309	534	767
	Boudouaou elbahri	54	191	130	58	87
	Kharrouba	55	255	59	56	5
	Keddara	220	320	168	26	7
	Ouled haddadj	683	1305	519	313	184
Khemis el Khechna	Khemis el Khechna	591	1000	690	320	190
	Ouled Moussa	174	612	368	149	99
	Larbatache	79	266	138	113	130
	Hamadi	73	384	213	113	76
	Thénia Thénia	454	930	459	292	222
	Souk el-had	113	173	103	64	47
	Beni amrane	293	949	461	437	165
	Ammal	127	326	143	60	12
Issers	Issers	643	1185	563	225	119
	Si mustapha	308	370	219	80	89
	Chabet el Ameer	304	972	507	106	38
	Timezrit	35	174	58	64	40
Borj Menaïel	Bordj menaïel	1163	1688	1294	893	865
	Legata	620	535	272	179	232
	Cap djenat	452	1046	528	554	493
	Zemouri	437	1070	631	419	948
Naciria	Naciria	666	889	467	198	107
	Ouled aïssa	107	250	204	45	44
Baghlia	Baghlia	443	1050	438	151	145
	Taourga	344	348	167	89	120
	Sidi daoud	486	808	394	193	263
	Dellys	1101	1326	616	506	540
	Afir	847	483	153	103	103
	Benchoud	263	768	193	66	66

Tableau V-6 Dommages expertisés sur l'ensemble de la ville de Boumerdes

DAIRA	COMMUNE	NIVEAU DE DOMMAGE / (Pourcentage)				
		VERT		ORANGE		ROUGE
		NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3	NIVEAU 4	NIVEAU 5
Boumerdes	Boumerdes	29%	26%	17%	10%	18%
	Corso	23%	36%	18%	8%	15%
	Tidjelabine	20%	38%	17%	9%	16%
Boudouaou	Boudouaou	24%	36%	20%	8%	12%
	Boudouaou elbahri	10%	37%	25%	11%	17%
	Kharrouba	13%	59%	14%	13%	1%
	Keddara	30%	43%	23%	4%	1%
	Ouled haddadj	23%	43%	17%	10%	6%
	Khemis el Khechna	21%	36%	25%	11%	7%
Khemis el Khechna	Ouled Moussa	12%	44%	26%	11%	7%
	Larbatache	11%	37%	19%	16%	18%
	Hamadi	9%	45%	25%	13%	9%
	Thénia	19%	39%	19%	12%	9%
	Souk el-had	23%	35%	21%	13%	9%
	Beni amrane	13%	41%	20%	19%	7%
	Ammal	19%	49%	21%	9%	2%
	Issers	24%	43%	21%	8%	4%
Issers	Si mustapha	29%	35%	21%	8%	8%
	Chabet el Ameer	16%	50%	26%	6%	2%
	Timezrit	9%	47%	16%	17%	11%
	Bordj menaïel	20%	29%	22%	15%	15%
Borj Menaïel	Legata	34%	29%	15%	10%	13%
	Cap djenat	15%	34%	17%	18%	16%
	Zemouri	12%	31%	18%	12%	27%
	Naciria	29%	38%	20%	9%	5%
Naciria	Ouled aïssa	16%	38%	31%	7%	7%
	Baghlia	20%	47%	20%	7%	7%
Baghlia	Taourga	32%	33%	16%	8%	11%
	Sidi daoud	23%	38%	18%	9%	12%
	Dellys	27%	32%	15%	12%	13%
	Afir	50%	29%	9%	6%	6%
	Benchoud	19%	57%	14%	5%	5%

V.4 Application du modèle d'estimation de dommages sismique à la ville de Boumerdes :

Dans cette étape nous appliquerons le modèle d'estimation de dommage sismique défini dans les chapitres précédent à la Wilaya de Boumerdes. La carte (V.1) présente le découpage administratif de cette wilaya.



Carte V-1 Découpage administratif de la Wilaya de Boumerdes

V.4.1 Données de l'étude :

V.4.1.1 Données liées aux structures :

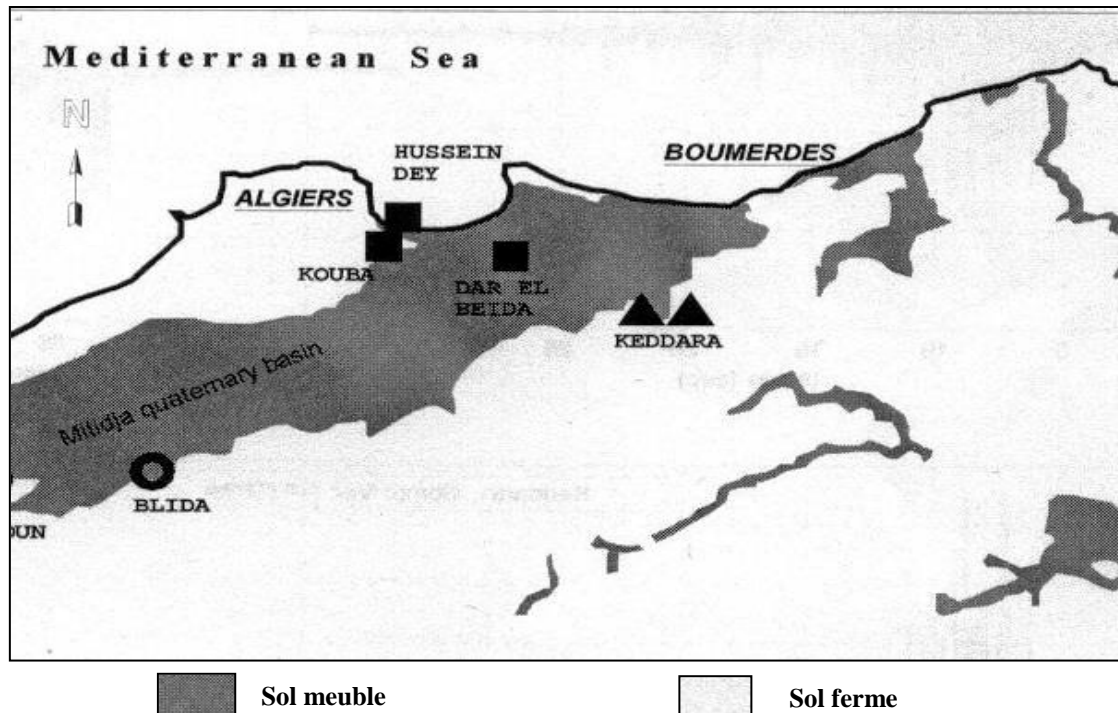
Vu la difficulté d'obtention des données liées aux structures, nous avons fait des hypothèses de distribution du bâti pour la Wilaya de Boumerdes en se basant sur la répartition des structures sur la ville de Tlemcen (Tableau V-4). Pour la ville de Boumerdes composée d'un grand nombre de Bâtiments de plus de trois étages, nous avons choisis les pourcentages de bâti du quartier Imama qui a une architecture urbaine similaire à celle de la ville de Boumerdes. Pour les Daira nous avons choisi les pourcentages de bâti du Centre ville de Tlemcen. Pour le reste des communes, nous avons choisis les pourcentages de la commune de Mansourah. Le Tableau V-6 donne les pourcentages supposés des structures pour chaque zone urbaine de la Wilaya de Boumerdes.

Tableau V-7 Données liées aux structures

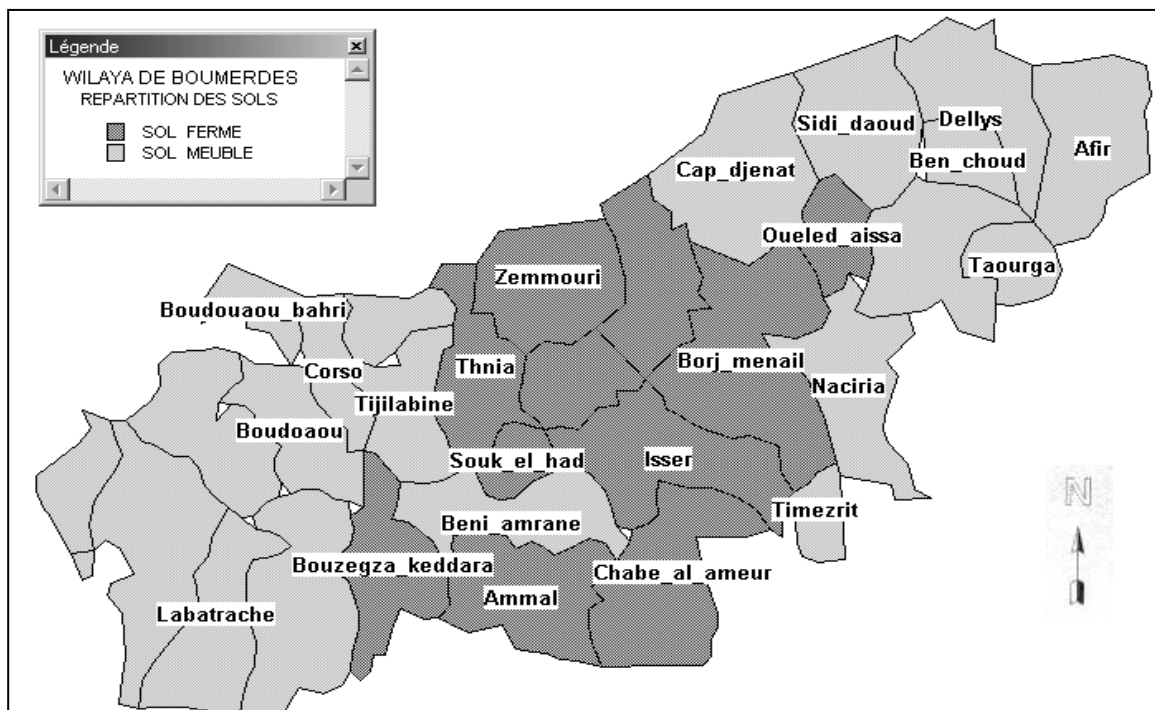
NOM DE LA ZONE	Pourcentages surfaciques des structures suivant leurs types de contreventement (%)						
	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6	M1
Ville							
Boumerdes	22,3	38,2	0	34,2	0	0	5,3
Daira							
Naciria							
Baghlia							
Issers							
Boudouaou	32,2	18,5	0	0	5,3	0	44
Khemis el khechna							
Borj menail							
Commune							
Keddara							
Ouled moussa							
Chabet al ameur							
Ouled Aissa							
Cap djenat							
Si mustpha							
Corso							
Boudouaou bahri							
Thénia							
Dellys							
Larbatache							
Tidjelabine							
Legata	21,4	5,7	0	0	0	0	72,9
Sidi daoud							
Kharouba							
Taourga							
Beni – amrane							
Ben choud							
Ammal							
Afir							
Souk el had							
Hammadi							
Zemouri							
Timezrit							

V.4.1.2 Données liées aux sols :

Concernant les données liées au sols, nous avons utilisé la carte V-2. Elle représente deux types de dépôts quaternaires, dépôt ferme et dépôt meuble. Nous avons donc supposé deux types de sols pour la Wilaya de Boumerdes (sol ferme et sol meuble). La carte V-3 présente la répartition des sols utilisés dans l'étude.



Carte V-2 Carte de distribution de dépôts quaternaires dans la région d'Alger-Boumerdes (Laouami.N et al ,2003)



Carte V-3 Répartition des sols appliqués à la Wilaya de Boumerdes

V.4.1.3 Données liées à l'événement sismique :

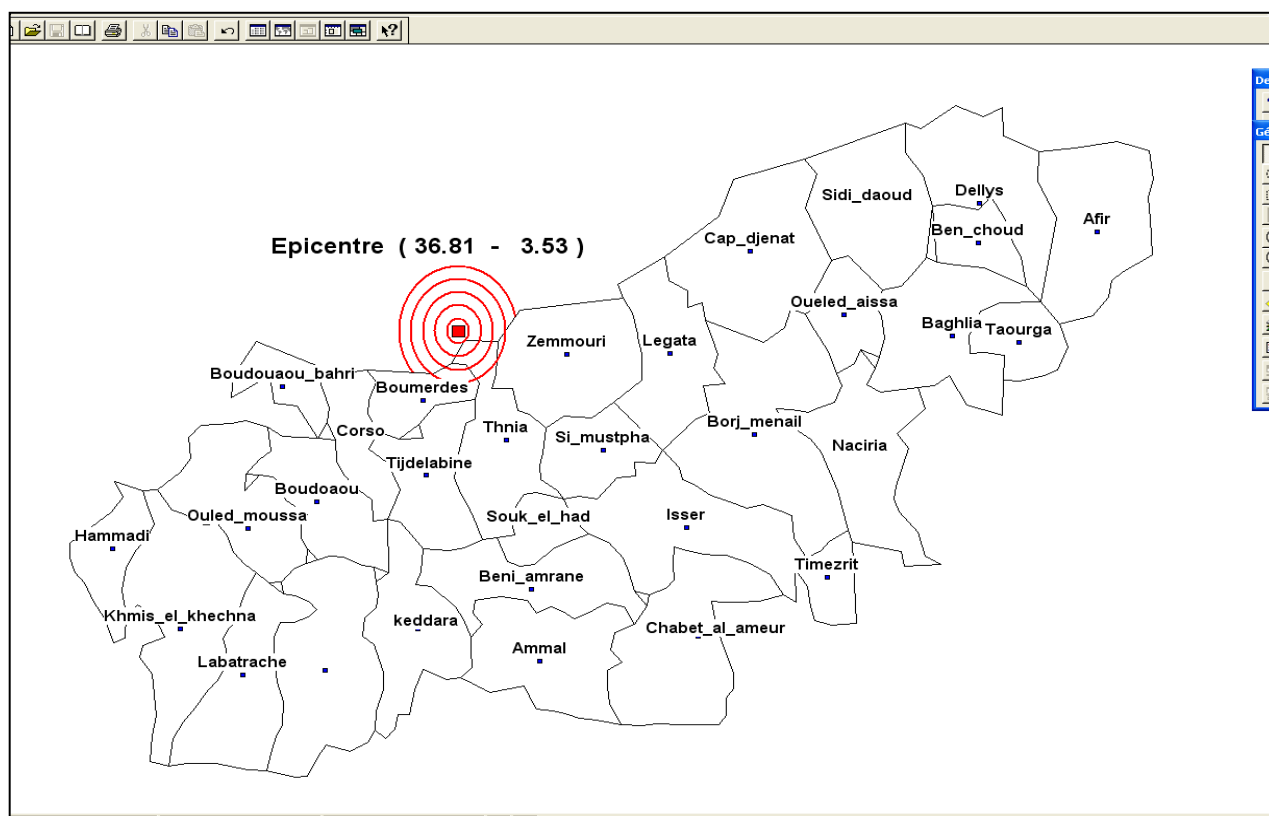
Concernant l'événement sismique, on utilise les caractéristiques enregistrées par les différents laboratoires sismiques (Tableau V.1). La carte (V-4) présente une localisation de cet épiceutre.

- On utilise la latitude et la longitude calculées par le CGS :

Latitude = 36.81° Nord

Longitude = 3.53° Est

- La profondeur calculée par USGS : Profondeur = 10 Km.



Carte V-4 Localisation de l'épicentre du séisme

V.4.2 Résultats de l'analyse :

Après l'analyse des données, on passe à la récupération des résultats. Les résultats sont présentés sous forme de pourcentages de probabilités de dommages pour chaque commune de la Wilaya. Le tableau (V-7) donne une comparaison entre les pourcentages réels calculés en fonction des résultats de l'expertise Tableau (V-6) et les probabilités simulées calculées en utilisant l'outil d'estimation de dommages développé.

Tableau V-7 Pourcentages réels et simulés de dommage pour chaque commune

Commune	Pourcentages	Pourcentages de dommages (%)				
		Pas de dommage (D1)	Dommage Léger (D2)	Dommage Moyen (D3)	Dommage Important (D4)	Dommage Complet (D5)
Zemouri	Réels	12,5	30,5	18,0	12,0	27,0
	Simulés	17,1	18,5	31,3	20,6	12,6
Timezrit	Réels	9,4	46,9	15,6	17,3	10,8
	Simulés	43,8	22,4	22,1	8,8	2,9
Tidjelabine	Réels	19,7	37,8	17,2	9,2	16,1
	Simulés	12,0	16,2	31,5	24,1	16,1
Thénia	Réels	19,3	39,5	19,5	12,4	9,4
	Simulés	17,2	18,5	31,2	20,5	12,6
Taourga	Réels	32,2	32,6	15,6	8,3	11,2
	Simulés	53,5	21,0	17,9	6,0	1,6
Souk el-had	Réels	22,6	34,6	20,6	12,8	9,4
	Simulés	28,9	22,2	28,5	14,3	6,1
Sidi daoud	Réels	22,7	37,7	18,4	9,0	12,3
	Simulés	42,8	22,6	22,7	8,9	2,8
Si mustapha	Réels	28,9	34,7	20,5	7,5	8,3
	Simulés	23,7	20,8	29,9	17,0	8,7
Ouled Moussa	Réels	12,4	43,7	26,2	10,6	7,1
	Simulés	30,6	22,5	28,1	13,5	5,4
Ouled aissa	Réels	16,5	38,5	31,4	6,9	6,8
	Simulés	37,2	22,6	25,0	11,1	4,1
Naciria	Réels	28,6	38,2	20,1	8,5	4,6
	Simulés	48,1	21,8	21,6	6,6	2,0
Legata	Réels	33,7	29,1	14,8	9,7	12,6
	Simulés	25,4	21,2	29,3	16,1	7,9
Larbatache	Réels	10,9	36,6	19,0	15,6	17,9
	Simulés	42,5	22,5	22,7	9,3	3,1
Khemis el Khechna	Réels	21,2	35,8	24,7	11,5	6,8
	Simulés	48,5	21,6	21,2	6,7	2,1
Kharrouba	Réels	12,8	59,3	13,7	13,0	1,2
	Simulés	40,5	22,8	23,8	9,7	3,2
Keddara	Réels	29,7	43,2	22,7	3,5	0,9
	Simulés	36,0	22,5	25,4	11,7	4,5
Issers	Réels	23,5	43,3	20,6	8,2	4,4
	Simulés	41,8	22,3	24,5	8,5	3,0

Hamadi	Réels	8,5	44,7	24,8	13,2	8,8
	Simulés	42,3	22,7	22,9	9,1	2,9
Dellys	Réels	26,9	32,4	15,1	12,4	13,2
	Simulés	47,7	21,9	20,4	7,8	2,4
Corso	Réels	23,3	35,8	17,8	7,9	15,2
	Simulés	11,6	15,9	31,4	24,4	16,6
Chabet el Aneur	Réels	15,8	50,4	26,3	5,5	2,0
	Simulés	45,5	22,2	21,4	8,4	2,6
Cap djenat	Réels	14,7	34,0	17,2	18,0	16,0
	Simulés	30,3	22,5	28,2	13,6	5,5
Boumerdes	Réels	29,4	25,5	17,2	9,7	18,2
	Simulés	10,4	16,5	39,4	22,3	11,3
Boudouaou el bahri	Réels	10,4	36,7	25,0	11,2	16,7
	Simulés	13,3	17,0	31,7	23,3	14,6
Boudouaou	Réels	24,0	36,2	20,0	8,1	11,7
	Simulés	23,1	20,7	33,3	16,1	6,8
Bordj menaïel	Réels	19,7	28,6	21,9	15,1	14,7
	Simulés	41,8	22,2	24,5	8,5	3,0
Beni amrane	Réels	12,7	41,2	20,0	19,0	7,2
	Simulés	29,9	22,4	28,3	13,7	5,6
Benchoud	Réels	19,4	56,6	14,2	4,9	4,9
	Simulés	48,7	21,8	20,0	7,3	2,1
Baghlia	Réels	19,9	47,1	19,7	6,8	6,5
	Simulés	53,6	20,7	18,6	5,5	1,6
Ammal	Réels	19,0	48,8	21,4	9,0	1,8
	Simulés	41,9	22,5	22,9	9,4	3,2
Afir	Réels	50,1	28,6	9,1	6,1	6,1
	Simulés	57,3	20,1	16,1	5,2	1,3

Afin de faciliter la comparaison des résultats, nous les présentons sous forme d'histogrammes qui donnent les pourcentages des dégâts en fonction des niveaux de dommages. Nous comparons la somme des pourcentages des deux premiers niveaux de dommages (D1+D2) de la simulation et au niveau vert de l'expertise. La somme des deux niveaux de dommage (D3+D4), dommage moyens et dommages importants au niveau orange et enfin, les pourcentages du dernier niveau de dommage (D5), dommages complets au niveau rouge. Les figures de V-2 à V-5 présentent les histogrammes de comparaisons pour toutes les communes de la Wilaya.

Figure V-2 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes

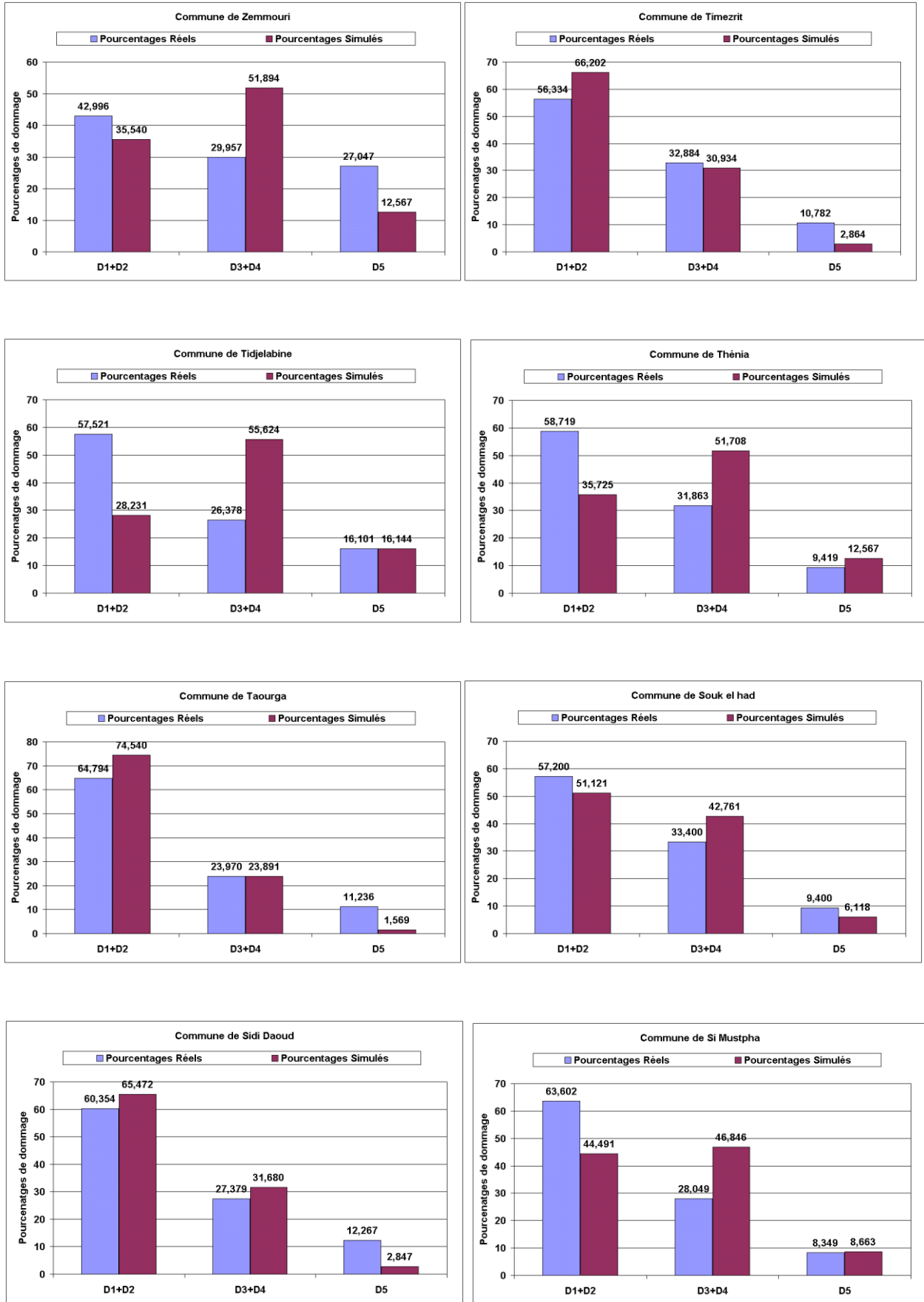


Figure V-3 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes

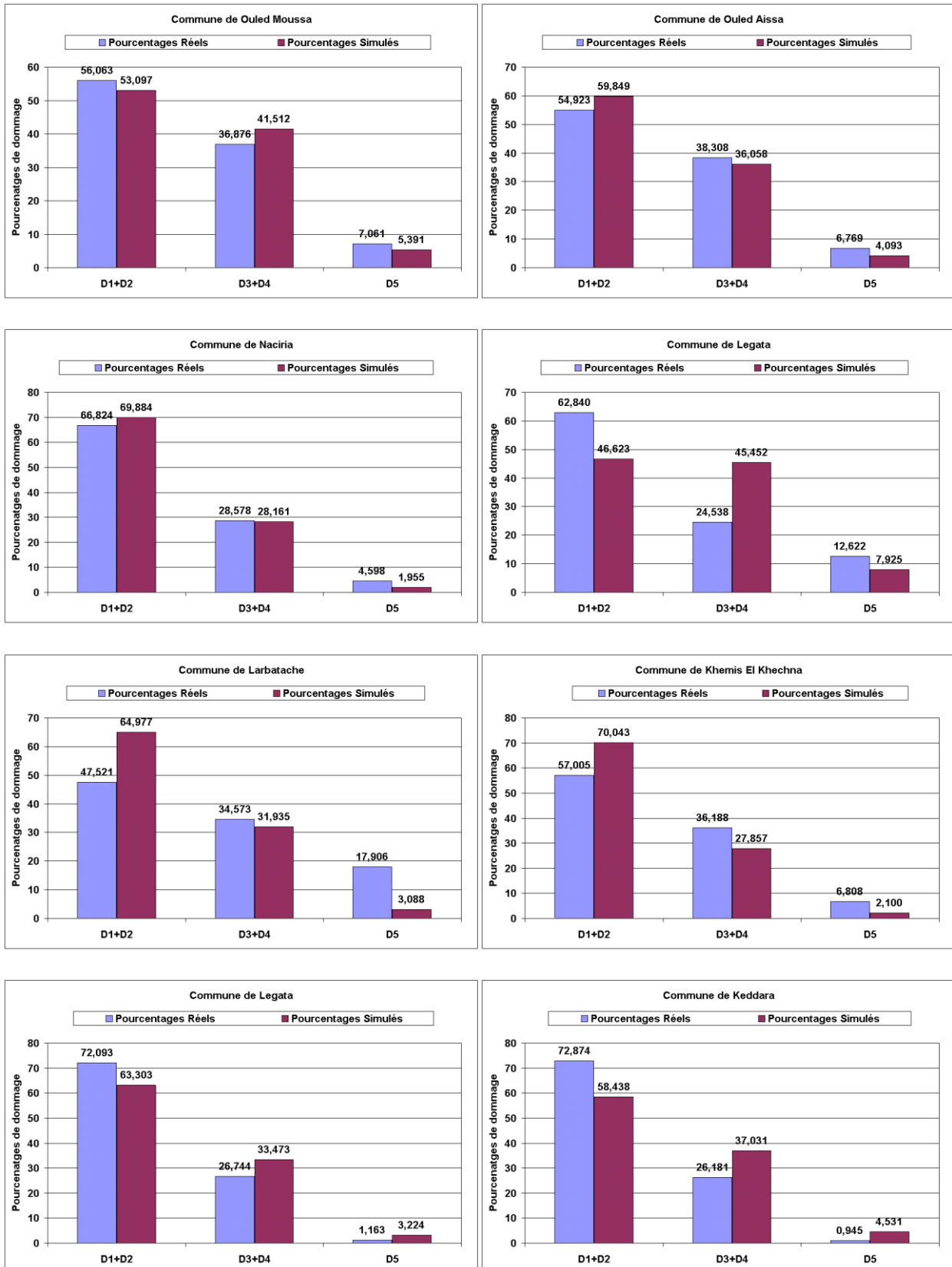


Figure V-4 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes

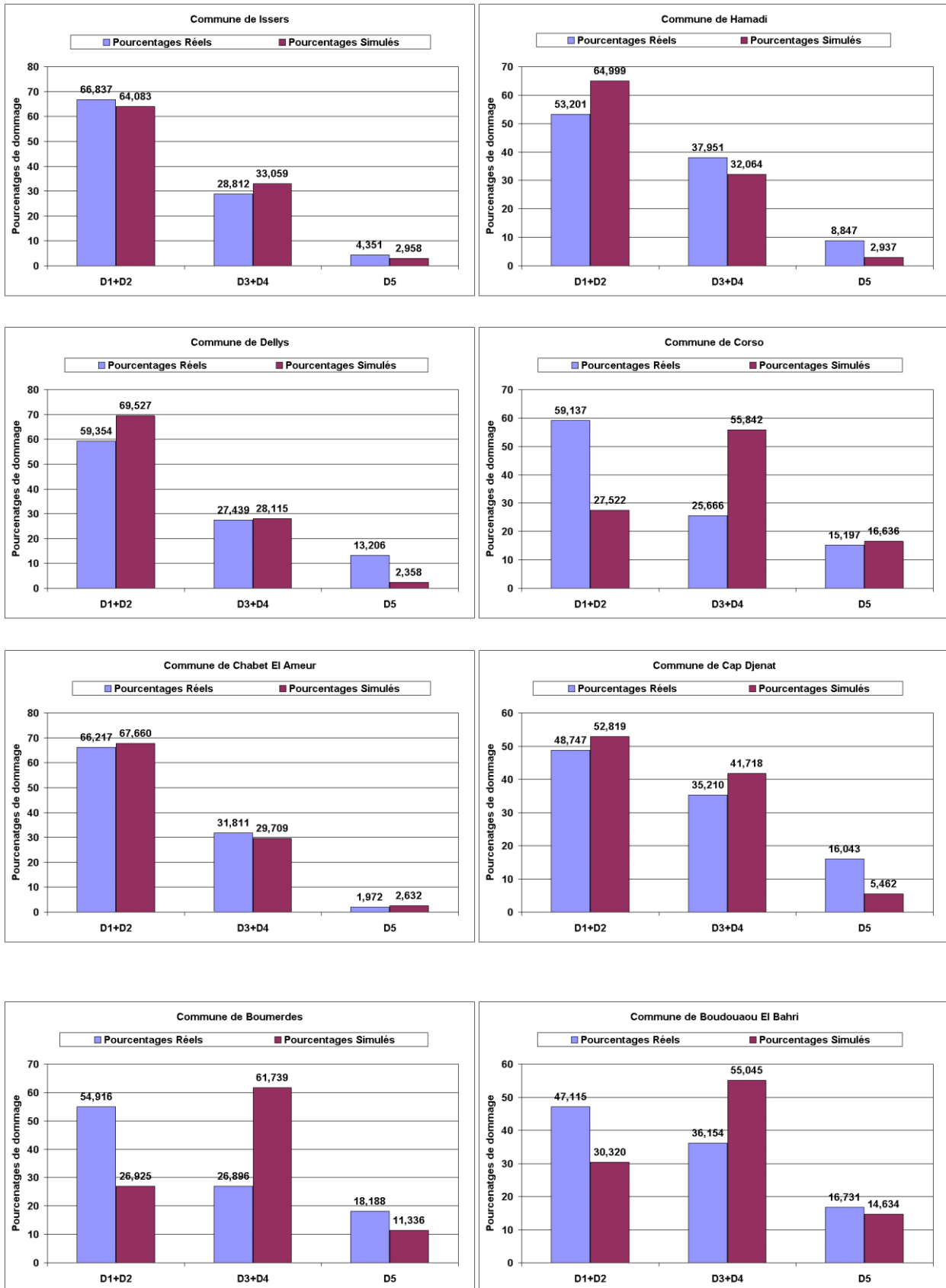
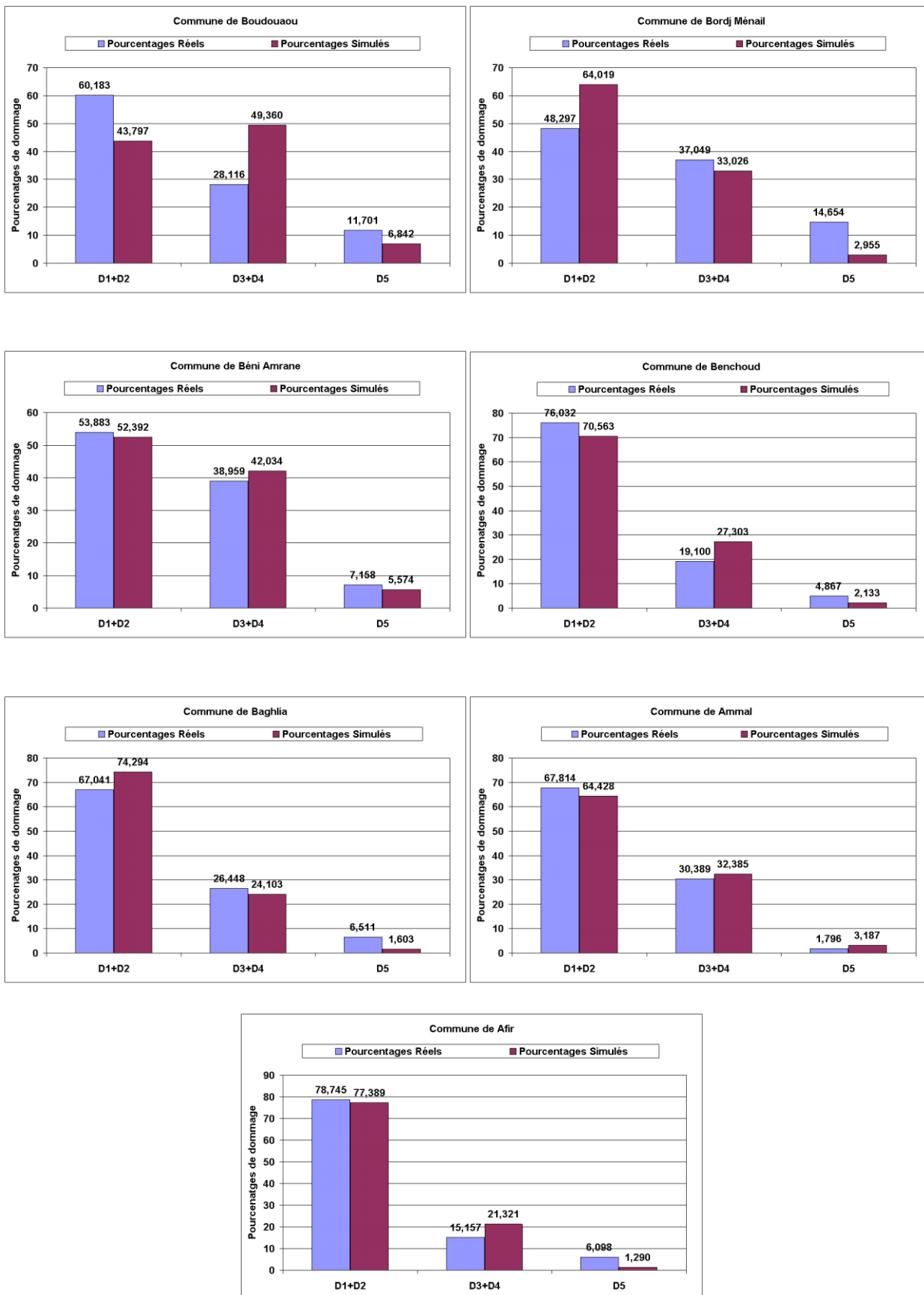


Figure V-5 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes



V.4.3 Interprétation des résultats :

La Wilaya de Boumerdes est composée de 31 communes, nous avons donc un large éventail de résultats. En comparant les résultats présentés dans les histogrammes des figures de V-2 à V-5, nous remarquons que pour certaines communes les pourcentages des dégâts réels et des dégâts simulés sont très proches, comme pour le cas des communes de Souk el Had, Issers, Ouled Moussa, Ouled Aissa, Naciria, Chabet el Aneur, Béni Amrane, Ammal, Baghliia, et Afir. Par exemple la commune de Naciria présente des pourcentages de dommages (D3+D4) très proches pour le cas réel et simulé (28,5% et 28,1%). Pour le reste des communes, on remarque que les pourcentages des dégâts sont très proches pour certains niveaux de dommages, tandis qu'ils sont un peu différents pour d'autres. On peut citer le cas des communes de Tidjelabine, Thénia, Sidi Daoud, Si mustpha, Legata, Larbatache, Corso, Delllys ou bien Boudouaou. Comme exemple la commune de Si Mustpha présente un pourcentage de dégât (D5) qui est le même pour le cas réel et simulé (D5 = 8%), tandis qu'un pourcentage différent pour les niveaux cumulés (D3+D4), 28 % pour le cas réel et 46 % pour le cas simulé. Cette différence est logique car c'est impossible de trouver les mêmes pourcentages des dégâts pour le cas réel et le cas simulé (Pourcentages égaux) sauf quelques exceptions. Mais avec un éventail de données plus détaillées et plus fiables pour les structures et pour les types de sol, une bonne définition des niveaux de dommages et l'utilisation de courbes de capacités et de fragilités caractérisant mieux le bâti algérien, nous pouvons aboutir à des résultats qui se rapprochent de plus en plus du réel.

V.5 Conclusion

Après l'application de l'outil de modélisation de dommages sismiques sur le site de Boumerdes, nous avons pu comparer les pourcentages des dégâts réels et simulés. La principale difficulté était l'obtention de données concernant les pourcentages surfaciques des structures pour chaque commune. Nous avons donc utilisé des hypothèses de répartition de bâti en se basant sur les pourcentages surfaciques de la ville de Tlemcen. Il faut également signaler la difficulté relative à la définition des niveaux de dommage. Il peut y avoir une différence substantielle entre notre définition d'un dommage (tirée de Hazus) et celle utilisée dans l'expertise. D'un autre côté, les courbes de capacité et de fragilité que nous avons utilisées sont celles de HAZUS, donc de constructions situées aux USA. Nous avons pris beaucoup de précautions à choisir des valeurs qui correspondraient au mieux au bâti algérien. Il est cependant impératif de développer dans le futur des courbes de capacités et de fragilité qui définissent au mieux le cas national. Malgré tous

ces impondérables, les résultats de la simulation peuvent être considérés comme excellents. La comparaison entre les probabilités totales réelles et simulées pour toute la Wilaya de Boumerdes a donné les pourcentages suivants

Pourcentages de dommages	Niveau vert		Niveau orange		Niveau rouge
	Pas de Dommage	Dommage léger	Dommage Moyen	Dommage Important	Dommage complet
Réels	21,5	38,0	19,4	10,3	10,5
Simulés	33,5	20,7	26,5	13,1	6,0
Réels cumulés	59,6		29,8		10,5
Simulés cumulés	54,2		39,6		6,0

Tableau V-8 pourcentages de dommages cumulés pour la ville de Boumerdes

Conclusion générale

Par ce travail nous avons essayé de se familiariser avec le domaine du risque sismique, de comprendre ce qui a été fait jusqu'à maintenant et de contribuer au développement d'un outil permettant la prédiction du risque sismique en vue de sa gestion.

Nous avons présenté dans une première partie les objectifs, le fonctionnement, les paramètres et les limites d'applications des modélisations de dommages consécutifs aux séismes. Notre analyse a porté sur les principaux modèles tels que HAZUS, GEMITIS ou encore RADIUS. La plupart des approches proposent des estimations basées sur l'utilisation de l'intensité macrosismique pour la quantification de l'endommagement. HAZUS se distingue par sa démarche claire qui permet une évaluation de dommages directement à partir du mouvement du sol, à travers des relations reliant le déplacement ou l'accélération du sol à différents niveaux d'endommagement structurel.

Dans une deuxième partie, nous avons défini les principales étapes de modélisation des dommages sismiques en se basant sur la méthodologie présentée dans le modèle HAZUS. Une méthodologie qui nécessite un large éventail de données, une bonne connaissance de la typologie des différents types de structures et des sols. Elle se base sur l'utilisation des courbes de capacité et des courbes d'endommagement pour le calcul des pertes potentielles suite à un scénario sismique. Les courbes d'endommagement relient le déplacement du bâtiment engendré par la simulation de l'action sismique à cinq niveaux de dommages structuraux (pas de dommages – légers – moyens – importants et complets).

Dans la partie suivante, nous avons développé un outil informatique à l'aide du langage de programmation « MapBasic » qui fonctionne sous le logiciel d'information géographique « Mapinfo ». Cet outil est nécessaires pour l'introduction des données liées aux structures et au types de sols, leurs analyse ainsi que la présentation des résultats sous forme de pourcentages de dommages ou de cartes de risques.

Afin d'exploiter cet outil, nous l'avons appliqué à la ville de Tlemcen. Nous avons utilisé des données réelles concernant le bâti, les types de sol et les failles sismiques existantes en se basant sur différentes cartes caractéristiques de la ville. Dans une première étude, et comme la

ville est classée en zone I selon les règles parasismiques algériennes RPA99, nous avons choisi d'introduire un événement sismique caractérisé par un $PGA=0,1g$ pour toute la ville. Dans la deuxième étude, nous avons introduit l'événement sismique sous forme d'une faille sismique avec des profondeurs variables du foyer (5 Km, 10Km et 30Km). Les probabilités de dommages ont été présentés sous forme de cartes de risques. Les résultats de probabilités de dommages de ces études peuvent être exploités par les responsables locaux afin de définir les pertes consécutives à un événement choisi, le développement de plans ORSEC ou de plans directeurs du développement de la ville.

Mais malgré son application à la ville de Tlemcen, il fallait comparer les résultats de l'outil avec des pourcentages de dommages réels. Pour cela nous avons choisi d'appliquer cet outil sur un deuxième site urbain qui est la Wilaya de Boumerdes. La seule difficulté dans cette étude était les données liées au bâti et aux types de sols. Concernant le bâti, nous avons introduit des pourcentages surfaciques du bâti calculés dans l'étude effectuée sur la ville de Tlemcen pour des zones à urbanisation similaires. Et pour la répartition des sols, nous avons utilisé une carte de répartition des sols plus ou moins détaillée (Laouami.N et al ,2003). Malgré ce manque de données, les résultats de la simulation sont proches des dégâts réels et peuvent être considérés comme excellents. Avec des inventaires de données plus précis et une esquisse géotechnique plus détaillée, nous aboutirons à des résultats plus satisfaisants.

Donc on peut dire que la méthodologie utilisée et l'outil développé donnent de bons résultats de probabilités d'estimation de dommages sismiques qui peuvent être exploités par plusieurs organismes afin d'estimer les pertes directes et indirectes engendrées par n'importe quel événement sismique.

Les perspectives d'améliorations des modélisations de dommages sismiques sont basées principalement sur le développement des courbes de capacité et des fonctions d'endommagement qui définissent mieux le bâti algérien. La réalisation des inventaires du type de bâti ainsi que des esquisses géotechniques détaillées représentent un autre élément important contribuant à l'amélioration de la fiabilité des résultats.

Liste des figures

Figure I-1 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages	5
Figure I-2 Courbes de capacité d'une structure	10
Figure I-3 Sollicitation sismique sous forme spectrale	11
Figure I-4 Détermination du déplacement S_d conditionnant l'endommagement structurel	12
Figure I-5 Courbes d'endommagement d'une structure correspondant à un déplacement S_{dx}	12
Figure I-6 Méthodologie d'estimation de dommages directs (Source : Arnal et Martin, 1999)	14
Figure I-7 Détermination de la sollicitation sismique de référence	15
Figure I-8 Schéma conceptuel du modèle RADIUS (Source : RADIUS, 2002)	16
Figure II-1 principales étapes du modèle d'estimation de dommages sismiques	18
Figure II-2 Schéma analytique des procédures du modèle d'estimation des dommages sismiques	19
Figure II-3 Forme simplifiée de la courbe de capacité	20
Figure II-4 Niveau de dommage d'une structure	25
Figure II-5 Obtention du point de demande sismique	26
Figure II-6 Obtention du point de demande sismique	27
Figure II-7 Exemple d'une courbe de fragilité	28
Figure II-8 Courbes de capacité du pré code	33
Figure II-9 Courbes de capacité du bas code	33
Figure III-1 Interface du logiciel Mapinfo	35
Figure III-2 Interface de la simulation	37
Figure III-3 Introduction de la carte urbaine	38
Figure III-4 Modélisation de la carte urbaine	39
Figure III-5 Introduction des données des structures	40
Figure III-6 Introduction des données des types de sol	41
Figure III-7 Introduction de la zone sismique	42
Figure III-8 Introduction des coordonnées du foyer	42
Figure III-9 Visualisation de l'épicentre	43
Figure III-10 Présentation de la carte des types de sols	44
Figure III-11 Pourcentages des dégâts en fonction des types de structures	44
Figure III-12 Pourcentages totaux des dégâts	45
Figure III-13 Répartition cartographique des pourcentages des dégâts	45
Figure IV-1 Répartition du bâti sur la ville de Tlemcen (ANAT 2004)	
Figure IV-2 Répartition des différents types de sols sur la ville de Tlemcen	

Figure IV-3 faille considérée pour l'introduction de l'événement sismique	
Figure V-1 Région touchée par les séisme de Boumerdes (Laouami.N et al ,2003)	63
Figure V-2 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes	75
Figure V-3 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes	76
Figure V-4 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes	77
Figure V-5 comparaison des dommages réels et simulés pour la Wilaya de Boumerdes	78

Liste des Tableaux

Tableau I-1 Types d'information fournies par les modèles d'estimation de dommages sismiques	5
Tableau II-1 Classification des structures	21
Tableau II-2 Coefficients d'accélération de zone	23
Tableau II-3 Coefficients en relation avec le type de la faille. (Profonde ou de surface)	24
Tableau II-4 Niveaux de dommages des structures	25
Tableau II-5 Guide de choix des fonctions de dommages pour les structures typiques en se basant sur le UBC Zonage sismique et l'âge des structures (source : HAZUS)	29
Tableau II-6 Courbe de capacité – [Pré code]	30
Tableau II-7 Courbe de capacité – [Code bas]	30
Tableau II-8 Courbe de capacité – [Code modéré]	30
Tableau II-9 Courbe de capacité – [Haut Code]	31
Tableau II-10 Courbe de fragilité – [Pré Code]	31
Tableau II-11 Courbe de fragilité – [Bas Code]	31
Tableau II-12 Courbe de fragilité – [Code modéré]	32
Tableau II-13 Courbe de fragilité – [Haut code]	32
Tableau IV-1 Différentes zones qui composent la ville de Tlemcen [ANAT - 2004]	48
Tableau IV-2 Répartition des pourcentages du bâti sur les différentes zones de la ville de Tlemcen	49
Tableau IV-3 Différents types de sol de la ville de Tlemcen (selon la classification des RPA)	50
Tableau IV-4 Localisation de l'épicentre	51
Tableau IV-5 Probabilités par type de structures (sol très meuble)	52
Tableau IV-6 Probabilités par type de structures (sol meuble)	52
Tableau IV-7 Probabilités par type de structures (sol ferme)	53
Tableau IV-8 Probabilités par type de structures (sol rocheux)	53
Tableau IV-9 Répartition des probabilités totales de dommages par zones de la ville	54

Tableau IV-10 Foyer 1 PGA calculé par zone	55
Tableau IV-11 Foyer 1 Probabilités totales (%)	56
Tableau IV-12 Foyer 2 PGA calculé par zone	57
Tableau IV-13 Foyer 2 Probabilités totales (%)	58
Tableau IV-14 Foyer 3 PGA calculé par zone	59
Tableau IV-15 Foyer 3 Probabilités totales (%)	60
Tableau V-1 Caractéristiques du séisme de Boumerdes 21 Mai 2003 (Belazougui et al , 2003)	63
Tableau V-2 Accélération maximale enregistrée (Belazougui et al , 2003)	64
Tableau V-3 Niveaux de dommage des structures expertisées	65
Tableau V-4 Bilan des dommages arrêtés au 30/06/2003 dans les Wilaya d'Alger et Boumerdes	66
Tableau V-5 Dommages expertisés sur l'ensemble de la ville de Boumerdes	67
Tableau V-6 Dommages expertisés sur l'ensemble de la ville de Boumerdes	68
Tableau V-7 Données liées aux structures	70
Tableau V-8 Pourcentages réels et simulés de dommage pour chaque commune	73
Tableau V-9 pourcentages de dommages cumulés pour la ville de Boumerdes	80

Liste des cartes

Carte IV-1 Carte IV-1 Groupement urbain Tlemcen – Mansourah – Chetouane	
Carte V-1 Découpage administratif de la Wilaya de Boumerdes	69
Carte V-2 Carte de distribution de dépôts quaternaires dans la région d'Alger-Boumerdes (Laouami.N et al ,2003)	71
Carte V-3 Répartition des sols appliqués à la Wilaya de Boumerdes	71
Carte V-4 Localisation de l'épicentre du séisme	72