



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Civil engineering department



N° d'ordre : M/GC/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

**Evaluation de la vulnérabilité sismique des anciennes
structures en maçonnerie**

Présenté par :

- BELMEHDI KHAYRA
- DAMENE WAFA

Soutenu le // devant le jury composé de :

Président : Mr BENSOUA Mohamed

Examineur : Mr SADEK Bahar

Encadrant : Mr ZELMAT Yassine

Année Universitaire : 2021 / 2022

REMERCIEMENT

Tous d'abord on remercie le bon dieu de nous avoir aidé jusqu'à la fin de nos études.

Nous tenons en premier à adresser nos vifs remerciements accompagnés par des sentiments les plus dévoués à notre encadreur Mr ZELMAT YASSINE. Pour son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous adressons nos remerciements à tous les gens qui ont contribué de près ou de loin dans ce modeste travail.

En fin toute nos gratitudes aux membres du jury qui nous font l'honneur de jury ce travail.

Résumé

Le patrimoine immobilier de l'ancienne bâtisse en maçonnerie ne cesse d'être réhabilité, avec les matériaux de construction qui font une meilleure amélioration pour avoir une meilleure durée de vie particulièrement en zones sismiques.

Au début de Cette mémoire est essentiellement les notions essentielles sur le risque sismique et sur la vulnérabilité des structures. Par la suite les approches proposées par les différents auteurs ont été décrites, et il a été possible de regrouper de manière rationnelle, les différents 'modèles/méthodes' existants pour évaluer la vulnérabilité sismique des structures, à travers des caractéristiques communes mises en évidence par celles-ci.

Pour le cas concret des anciens édifices en maçonnerie, sélectionnant l'approche considérée comme la plus appropriée pour le groupe. Et ayant choisi une approche analytique, la performance sismique des mosquées de la vieille ville de Ténès ont été évaluée. L'étude a été réalisée par la méthode GNTD II.

Après avoir analysé les caractéristiques des édifices et évalué leurs comportements sismique, les courbe de capacité et de fragilité ont été réalisé avec les répartitions dommages.

Mots-clés : vulnérabilité sismique, courbes de fragilité, courbes de capacité, édifices en maçonnerie, patrimoine immobilier, rénovation, réhabilitation.

المخلص

يستمر إعادة تأهيل التراث العقاري لمبنى البناء القديم ، ب مواد البناء التي تعمل على تحسين أفضل للحصول على عمر أفضل ، لا سيما في المناطق الزلزالية.

في بداية هذه الذاكرة توجد في الأساس المفاهيم الأساسية حول مخاطر الزلازل وهشاشة الهياكل. بعد ذلك ، تم وصف الأساليب التي اقترحتها المؤلفون المختلفون ، وكان من الممكن تجميع "النماذج / الأساليب" المختلفة الموجودة معًا بشكل عقلائي لتقييم الضعف الزلزالي للهياكل ، من خلال الخصائص المشتركة التي أبرزتها هذه.

بالنسبة للحالة المحددة لمباني البناء القديمة ، حدد النهج الأكثر ملاءمة للمجموعة. وبعد اختيار المنهج التحليلي ، تم تقييم الأداء الزلزالي لمساجد مدينة تينس القديمة. أجريت الدراسة بطريقة GNTD II.

بعد تحليل خصائص المباني وتقييم سلوكها الزلزالي، تم إنتاج منحنيات السعة والهشاشة مع توزيعات الضرر.

الكلمات المفتاحية: الضعف الزلزالي، منحنيات الهشاشة، منحنيات السعة، مباني البناء،

التراث العقاري، التجديد، إعادة التأهيل

Abstract

The real estate heritage of the old masonry building continues to be rehabilitated, with building materials that make a better improvement to have a better lifespan, particularly in seismic zones.

At the beginning of this memory is essentially the essential notions on the seismic risk and on the vulnerability of the structures. Subsequently, the approaches proposed by the various authors were described, and it was possible to rationally group together the various existing 'models/methods' to assess the seismic vulnerability of structures, through common characteristics highlighted by these.

For the specific case of old masonry buildings, selecting the approach considered most appropriate for the group. And having chosen an analytical approach, the seismic performance of the mosques of the old city of Ténès were evaluated. The study was carried out by the GNTD II method.

After analyzing the characteristics of the buildings and evaluating their seismic behavior, the capacity and fragility curves were produced with the damage distributions.

Keywords: seismic vulnerability, fragility curves, capacity curves, masonry buildings, real estate heritage, renovation, rehabilitation.

SOMMAIRE

RESUME.....	i
SOMMAIRE	v
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
CHAPITRE 1 - Introduction Générale	1
1. Problématique	2
CHAPITRE 2 - NOTION DU RISQUE SISMIQUE	4
1. Notion du risque sismique.....	5
1.1. Risque sismique	6
1.2. Vulnérabilité.....	7
1.3. Exposition	7
2. Mesures d'atténuation des risques sismiques	8
CHAPITRE 3 - MODELES D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE.....	9
1. Introduction.....	10
1.1. Différentes approches	10
1.2. Méthodes empiriques.....	13
1.2.1. Matrices de probabilité de dommages.....	14
1.3. Méthode de l'indice de vulnérabilité.....	19
1.3.1. Autres méthodes empiriques.....	25
1.4. Méthodes analytiques	26
1.5. Courbes de fragilité.....	27
CHAPITRE 4 - CAS D'ETUDE	33
1. Introduction.....	34
2. Méthodologie simplifiée proposée pour l'évaluation de la vulnérabilité	36
3. les mosques de la vieille ville du Ténès.....	37
3.1. Présentation de la ville du Ténès.....	38
3.2. Vieux Ténès 'Ténès el Lahdar'	39
4. Les mosquées	40
4.1. La Mosquée de Sidi Maiza.....	40
4.2. Transformation de la mosquée Sidi Maiza	43
4.2.1. La mosquée avant 1954.....	43

4.2.2. <i>La mosquée après 1954</i>	44
4.2.3. <i>L'enveloppe extérieure de la mosquée</i>	45
4.3. La Mosquée de Lalla Aziza	47
4.4. La Mosquée de Sidi Bel Abbas.....	49
5. Conclusions.....	52
CHAPITRE 5 - RESULTATS ET INTERPRETATION	53
1. Introduction.....	54
2. La vulnérabilité des mosquées	56
2.1. Évaluation de la vulnérabilité sismique	56
2.2. Analyse des paramètres évalués pour l'indice de vulnérabilité calculé	56
2.3. Courbes de vulnérabilité	58
3.. Conclusions.....	61
CHAPITRE 6 - Conclusions Générales	62
Conclusions.....	63
References Bibliographiques.....	64

LISTE DES FIGURES

Fig. 2.1 - Composantes du risque sismique et aspects à prendre en compte dans leur évaluation (Vicente, 2008). 05

Fig. 3.2 - Première approche mentionnée (Vicente, 2008 ; Vicente et al, 2014)..... 11

Fig. 3.3 - Deuxième approche mentionnée. Approche proposée par (Corsanego et Petrini, 1990) 11

Fig. 3.4 - Troisième approche référée. 13

Fig. 3.5 - Différenciation du type de bâtiments dans les classes de vulnérabilité, selon l'échelle macrosismique EMS-98 (Grüntal, 1998)..... 16

Fig. 3.6 - Plage de valeurs pour chacun des niveaux de quantité définis par l'EMS-98 (Grüntal, 1998). 18

Fig. 3.7 - Fonctions de vulnérabilité pour relier l'accélération maximale du sol avec le facteur de dommage (d) en utilisant l'indice de vulnérabilité (Calvi et al, 2006)..... 20

Fig. 3.8 - Facteurs de modification (Vicente et al, 2008). 22

Fig. 3.9 - Courbes de vulnérabilité définie en fonction du niveau moyen de dommage et de l'intensité macrosismique (Vicente et al, 2014)..... 24

Fig. 3.10 - Courbe de fragilité (Vicente et al, 2014)..... 25

Fig. 3.11 - L'organigramme des composantes du calcul des courbes de fragilité et la matrice probabilité de dommages à l'aide d'une procédure analytique (Calvi et al, 2006) 27

Fig. 3.12 - Courbes de fragilité de chaque probabilité pour un décalage spectral X donné (Vicente, Varum et Costa, 2009). 32

Fig. 3.1 - Carte administrative de Chlef..... 38

Fig. 3.2 - Vu sur la vieille ville de Ténès..... 39

Fig. 3.3 - Plan de situation de la mosquée Sidi Maiza..... 41

Fig. 3.4 - La Mosquée Sidi Maiza du Vieux Ténès daterait du 9^{ème} Siècle..... 42

Fig. 3.5 - La Mosquée Sidi Maiza du Vieux Ténès 43

Fig. 3.6 - Plan et coupe initiale de la mosquée Sidi Maiza..... 43

Fig. 3.7 - Plan de masse de la mosquée..... 44

Fig. 3.8 - plan de la mosquée Sidi Maiza..... 45

Fig. 3.9 - Plan de coup de la mosquée Sidi Maiza 45

Fig. 3.10 - Façades extérieures..... 46

Fig. 3.11 - Vues d'intérieures..... 46

Fig. 3.12 - Vus de la toiture..... 46

Fig. 3.13 - Plan de mosquée Lalla Aziza..... 47

Fig. 3.14 - Plan de façade principale de la mosquée Lalla Aziza..... 47

Fig. 3.15 - Façades extérieures..... 48

Fig. 3.16- Vues d'intérieures.....	48
Fig. 3.17 - Vus de la toiture.	49
Fig. 3.18 - Plan de masse mosquée Sidi Bel Abbas.....	49
Fig. 3.19 - Plan de la mosquée Sidi Bel Abbas.....	50
Fig. 3.20 - Plan de façade principale de la mosquée Sidi Bel Abbas.	50
Fig. 3.21 - Façades extérieures.....	51
Fig. 3.22 - Vues d'intérieures.....	51
Fig. 3.23 - Vus de la toiture.	51
Fig. 3.24 - <i>Corrélation entre les courbes de vulnérabilité pour la valeur maximale, moyenne et minimale d'I_v</i>	59
Fig. 3.25 - Courbe de vulnérabilité des mosquées.	60
Fig. 3.26 - Probabilité d'effondrement et inutilisables pour différents indices de vulnérabilité, a) une probabilité d'effondrement; b) probabilité d'inutilisable.	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Matrice de probabilité de dommages proposée par Whitman (Calvi et al, 2006)	15
Tableau 3.2 - Exemple de matrice de probabilité de dommages pour la classe de vulnérabilité B définie à l'aide de l'échelle EMS-98 (Barbat et al, 2008).....	17
Tableau 3.3 - Classification et description des dommages pour les bâtiments en maçonnerie, d'après [EMS98].....	17
Tableau 3.4 - Échelle de vulnérabilité définie par Benedetti et Petrini (adapté de Barbat et al, 1995).....	20
Tableau 3.5 - Paramètres proposés et indice de vulnérabilité (Vicente et al, 2008).....	21
Tableau 4.1 - Indice de vulnérabilité (I_v)	37
Tableau 4.2 - Interpretation des dommages, D_k (Giovinazzi 2005)..	56

Introduction générale

1. Problématique

Malgré le grand progrès technologique dont la société actuelle, la préservation des monuments historiques en maçonnerie tout au long de sa vie représente un héritage culturel, artistique et scientifique fut un grand défi. Elles subissent des endommagements, des fissurations, ou des faiblesses liées aux chargements appliqués.

Le patrimoine immobilier de l'ancienne construction en maçonnerie ne cesse d'être réhabiliter, avec des matériaux de construction qui font une meilleure amélioration pour augmenter sa durée de vie. La préservation et la rénovation de ces monuments dépend de leur niveau de vulnérabilité, qui peut être un problème de matériaux ou de structure. Les problèmes de structures se caractérisent par l'endommagement dû aux charges excessives, effondrement de sol, forces sismiques et de vent. Ces problèmes doivent être traités pour assurer la stabilité de ces monuments.

L'analyse des anciens édifices, nécessite une méthodologie d'intervention pour réduire le niveau d'endommagement et nécessite des informations précises sur sa géométrie, les détails des sections et les techniques de construction de l'époque. Il importe aussi d'analyser les comportements et les propriétés des matériaux et de leur évolution et d'analyser le comportement mécanique des éléments de structure.

Outre la valeur inestimable de la vie humaine, ces catastrophes peuvent également avoir des conséquences profondes sur l'économie nationale d'un pays, s'il doit supporter intégralement les pertes qui en résultent (Calvi et al, 2006).

Il convient de noter que les dommages ne sont pas directement liés à l'ampleur du mouvement sismique mais aussi aux caractéristiques intrinsèques du site affecté et du parc immobilier existant.

Pour les tremblements de terre de magnitude considérable, les pertes peuvent ne pas se produire ou se produire à petite échelle, dans les endroits où il y a un souci de concevoir des bâtiments capables de résister à l'action sismique, (par exemple, en appliquant les méthodologies recommandées par L'EUROCODE 8 (CEN, 2004)) ; renforcer les bâtiments existants qui n'ont pas la capacité de résister à l'action sismique ; préparer des plans d'urgence et réaliser une bonne planification du réseau urbain des villes (en accordant une attention particulière aux zones du centre historique).

Inversement, dans les zones où les mesures précitées n'ont pas été mises en œuvre, dans la même mesure, les conséquences peuvent se traduire par d'énormes pertes, tant en termes

de dommages aux structures que de vies humaines.

Le risque sismique est associé à l'aléa local, à la vulnérabilité de la bâtisse et au degré d'exposition. La principale composante du risque sismique est la vulnérabilité, non seulement en raison des conséquences physiques évidentes sur la bâtisse en cas d'événement sismique, mais parce qu'en intervenant avec des solutions de renforcement adéquates, il est possible d'améliorer les conditions de sécurité des personnes et le comportement structurel des bâtisses pour réduire le niveau de vulnérabilité sismique et, par conséquent, le niveau des dommages et pertes physiques possibles.

Afin d'obtenir un modèle permettant une évaluation correcte du risque sismique, et comme la vulnérabilité sismique est sa principale composante, il est impératif de disposer de méthodes suffisamment fiables pour évaluer cette composante. Ces méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique font une partie d'une étude dans cette thèse. Celles-ci ont été développées au cours des 40 à 50 dernières années, avec plusieurs méthodologies allant d'empirique plus faillible et rapide, à l'analytique, plus fiable, coûteuse et longue. Bien que certaines méthodologies développées prévoient leur application à n'importe quelle structure, quel que soit le matériau qui les constitue, d'autres ont été développées essentiellement pour un type particulier de bâtiments.

Ce ne sera que sur les méthodologies applicables aux bâtiments en maçonnerie que cette thèse sera couverte. Ces méthodologies sont considérées comme un sujet d'actualité et intéressant. À ce facteur, s'ajoute la forte récession économique que traverse le pays, qui a déclenché, au cours de la dernière décennie, un ralentissement prononcé de la construction de nouveaux bâtiments, au détriment d'un investissement accru dans la réhabilitation et le renforcement des structures existantes, l'importance de développer des 'méthodes/modèles' qui permettent d'estimer avec précision et confiance la probabilité de survenance de certains dommages lorsque les structures sont soumis à une action sismique, afin de permettre une intervention plus concrète et efficace, visant à garantir la sécurité des structures les plus vulnérables.

Notion du risque sismique

1. Notion du risque sismique :

Le risque sismique représente une mesure des pertes attendues résultant de la survenance d'un séisme qui pourrait se produire dans le futur, dans une période de temps et dans une zone. Cela permet d'évaluer/estimer les conséquences économiques, sociales et environnementales de ce événement donné.

Le risque sismique 'risque absolu', résulte de l'interaction complexe entre trois composantes (figure 2.1): l'aléa local, la vulnérabilité du bâtiment et le degré d'exposition (Vicente et al, 2005); il peut être défini par l'expression mathématique suivante:

$$R_{ie/T} = |(H_i \otimes V_E \oplus E)|_T \quad (1.1)$$

Puisque R représente la probabilité de dépasser un certain niveau de perte d'un élément exposé e , en raison de la survenue d'un séisme d'intensité i , H correspond à la probabilité de dépasser un certain niveau d'activité sismique d'intensité i , pendant un temps return T . V représente la vulnérabilité et E définit l'exposition des éléments à risque, reflétant la valeur des éléments exposés. La vulnérabilité V peut être définie comme la prédisposition intrinsèque d'un élément particulier à subir des dommages dus à un séisme d'intensité i (par exemple Lazzali et Farsi, 2012).

Notez que le risque sismique ne résulte pas du produit des trois composantes définies ci-dessus, mais de leur convolution mathématique (\otimes dans l'équation 1.1, il représente l'opération de convolution).

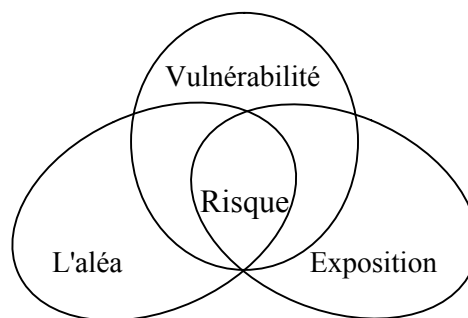


Fig. 2.1 – Composantes du risque sismique et aspects à prendre en compte dans leur évaluation (Vicente, 2008)

Après avoir présenté les concepts qui constituent le risque sismique, il est jugé intéressant de faire quelques réflexions sur la relation entre eux.

Comme mentionné pour que le risque sismique soit élevé, les trois composantes qui le définissent doivent être élevées. Afin de mieux comprendre ce phénomène, imaginez une zone où il y a très peu de maisons, par conséquent les structures existantes seront peu nombreuses (éléments exposés) et les impacts facilement minimisés.

Même si cette zone est soumise à des séismes de forte intensité, le risque sismique sera réduit. L'exemple d'un cas extrême qui permet de clarifier facilement cette situation est la survenue d'un séisme dans le désert.

Il n'en va plus de même si un séisme de même gravité atteint un endroit où il y a plusieurs bâtiments avec des éléments vulnérables et surtout s'ils sont importants, tant en termes de culture que de prestation de services. Dans ce cas, imaginez un endroit où il y a une énorme concentration de bâtiments avec des éléments avec peu de résistance sismique (grande vulnérabilité) ou des endroits où il y a, par exemple, des hôpitaux et des quartiers de pompiers qui, en raison de dommages, ne peuvent plus fournir leurs services (forte exposition).

1.1. Risque sismique

Comme le terme l'indique, l'aléa sismique fait référence à un danger ou à une menace et est directement lié à l'événement sismique. De préférence, cela devrait décrire l'exposition d'un emplacement donné à tous les effets résultant d'un événement sismique tels que la liquéfaction, les glissements de terrain, les tsunamis, la survenue de failles et les vibrations du sol. Cependant, dans les modèles de perte, seul le dernier phénomène est pris en compte car il s'agit généralement du phénomène de conditionnement qui caractérise l'action sismique. L'aléa sismique est quantifié en termes probabilistes et correspond à la probabilité qu'un niveau donné d'un paramètre sismique (intensité, accélération ou vitesse) soit dépassé d'un certain niveau pour un temps de retour donné, comme mentionné précédemment (Calvi et al, 2006 ; Ferreira, 2012).

Il convient de noter que dans la littérature trouvée en anglais, le terme utilisé pour décrire le danger ou la menace est «Hazard».

L'intensité d'un séisme à un endroit donné peut être mesurée en utilisant un certain nombre de paramètres sismiques différents, comme mentionné précédemment. Ces paramètres peuvent être divisés en deux types principaux :

- l'intensité définie à partir des observations (également connue sous le nom d'intensité macrosismique) ;
- l'intensité mesurée à partir d'instruments, tels que les accélérographes ou les sismographes.

Les paramètres qui sont essentiellement basés sur les observations faites à un endroit donné, après qu'un séisme donné se produit, ne sont pas vraiment une mesure de la dimension du séisme (comme c'est la magnitude) mais de l'effet, dans un endroit donné, du mouvement du sol. Les échelles d'intensité ont été créées au début du 19^e siècle. L'évolution historique des échelles d'intensité est décrite par Coburn & Spence (2002). Les échelles principales, encore utilisées, sont l'échelle de Mercalli modifié (MM), utilisée sur le continent américain, et l'échelle Medvedev - Karnik - Sponheuer (MSK) utilisée dans la plupart des pays européens.

L'échelle MSK a récemment été remplacée par l'échelle macrosismique européenne (Grünthal, 1998), connue sous l'acronyme EMS-98. Les échelles MM, MSK et EMS-98, ainsi que d'autres échelles, définissent les différents niveaux d'intensité à partir de:

- i) la vibration ressentie par l'homme,
- ii) Le mouvement des objets,
- iii) Les dommages observés dans les bâtiments,
- iv) Des changements dans le sol.

1.2. Vulnérabilité

La vulnérabilité sismique est définie comme la prédisposition intrinsèque d'une structure à subir des dommages lorsqu'elle est touchée par un séisme, c'est-à-dire qu'elle quantifie le degré de dommages et l'étendue des dommages causés aux éléments. Cela dépend des caractéristiques de la structure telles que la typologie de construction (maçonnerie, béton, etc.), la configuration des systèmes structurels (nombre d'étages, dimensions et forme dans le plan, disposition en hauteur, distribution de masse), les dispositions de dimensionnement de la conception, la qualité de la construction, les matériaux et les techniques de construction appliqués au moment de la construction de la structure.

Parmi les trois composantes qui permettent de définir le risque sismique, la vulnérabilité sismique est celle qui assume un rôle plus important car c'est principalement sur celle-ci que l'ingénierie peut avoir une intervention prépondérante dans l'atténuation du risque sismique.

1.3. Exposition

L'exposition représente la valeur économique ou humaine des éléments exposés à l'action sismique. Il tient compte des coûts directs des éléments physiques (structurels et non structurels), des coûts indirects causés par l'interruption des services et des

communications, des coûts sociaux et des coûts de temps. Pour le parc bâti, la détermination de ces coûts dépend de plusieurs caractéristiques, telles que, par exemple, l'emplacement des éléments, l'accessibilité, le niveau et le type d'occupation, l'existence de biens économiques et la valeur historique / culturelle (Vicente, 2008).

À titre d'exemple, on peut mentionner que, dans le centre-ville de Lisbonne, une valeur d'exposition élevée sera associée, car il s'agit d'une zone d'activité et de services commerciaux élevés ainsi que d'une valeur patrimoniale et culturelle élevée.

2. Mesures d'atténuation des risques sismiques

En général, dans le but de contextualiser le sujet du risque sismique et de démontrer l'importance de son évaluation adéquate, certaines des solutions dans lesquelles l'ingénierie peut agir, visant à l'atténuation du risque sismique, dont il sera question ici. Maintenant, et puisque les trois composantes principales qui constituent le risque sismique (aléa, vulnérabilité et exposition) ont déjà été succinctement définies, les actions possibles et souhaitables sont présentées pour chacune d'elles. Comme ça :

- En termes de danger, il n'est pas possible d'améliorer les conditions du sol dans les endroits où il y a déjà des constructions, mais d'agir au niveau de la planification, en évitant la construction de nouveaux bâtiments dans des endroits où ils sont sensibles à la liquéfaction, aux glissements de terrain et aux implantations, ainsi qu'aux zones où il y a une forte probabilité de tremblements de terre, par exemple près des endroits où il y a des failles actives.
- En termes de vulnérabilité, pour les bâtiments anciens, une évaluation des dommages attendus pour une intensité sismique donnée peut et doit être réalisée et déterminer quels bâtiments sont les plus vulnérables afin de les renforcer. Pour les nouvelles constructions, elles doivent être conçues et exécutées conformément aux réglementations sismiques en vigueur.
- En termes d'exposition, le seul élément de perte qui peut être atténué de manière efficace est la perte de vies humaines, grâce à la promotion de campagnes visant à sensibiliser et à informer les citoyens sur les procédures et les comportements à adopter avant, pendant et après un séisme de haute intensité.

Méthode d'évaluation de la vulnérabilité

1. Introduction

Les différentes approches développées afin de regrouper les modèles/méthodes à travers des caractéristiques communes partagées entre elles seront présentées dans une première phase. Par la suite, en fonction de l'approche jugée la plus appropriée pour le cas particulier des bâtiments anciens en maçonnerie, les étapes essentielles des principales méthodologies de chaque groupe seront décrites. Dans la mesure du possible, une tentative sera faite de présenter l'évolution des méthodes au fil des ans. Il convient de noter que les modèles d'évaluation de la vulnérabilité sismique présentés dans ce chapitre incluent uniquement ceux qui ont été développés pour l'évaluation des bâtiments en maçonnerie ou lorsqu'ils ont été développés pour évaluer divers types de structures, parmi lesquels le type mentionné qui fait l'objet d'étude de cette thèse. En plus des modèles présentés, il y en a d'autres qui, parce qu'ils n'ont pas les caractéristiques mentionnées ci-dessus, ne seront pas abordés, comme la méthode japonaise de l'indice sismique (JBDPA, 1990), DBELA (Pinho et al, 2002) ou la méthode développée par Cosenza et al, (2005), entre autres.

Les modèles d'évaluation de la vulnérabilité sismique sont des méthodes qui corrélerent la gravité du séisme avec ses effets, c'est-à-dire qui constituent des corrélations de cause à effet dans lesquelles le séisme est la cause et les dommages subis en sont l'effet.

1.1. Différentes approches

Différents auteurs ont présenté différentes approches en ce qui concerne la classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Il est important de faire un choix approprié par rapport à la méthodologie à utiliser pour évaluer la vulnérabilité d'une zone donnée, et ce choix doit être fait en fonction de l'échelle (par exemple, un bâtiment, un bloc ou une ville), la nature et la fonction des bâtiments (par exemple, s'il s'agit d'un bâtiment en maçonnerie et s'il a une valeur culturelle élevée ou non) et en termes de temps, en fonction de la disponibilité des ressources économiques et humaines et du niveau de rigueur recherché.

La première approche de classification en regroupant les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique est basée sur le niveau de détail, l'échelle d'évaluation et l'utilisation des données. Cette forme de différenciation méthodologique comprend trois niveaux (figure 2.2) (Vicente, 2008 ; Vicente et al, 2014).

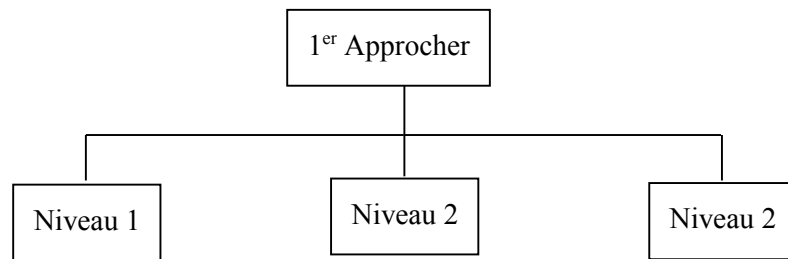


Fig. 2.2 - Première approche mentionnée (Vicente, 2008 ; Vicente et al, 2014).

Le premier niveau (niveau 1) fait référence à des méthodologies qui permettent d'évaluer la vulnérabilité sismique à grande échelle, comme une ville, en utilisant une quantité considérable d'informations.

Le deuxième niveau de méthodologies (niveau 2), qui sont appliquées aux agrégats de bâtiments, tels que les blocs, est basé sur des modèles mécaniques caractérisés par des informations sur la géométrie des bâtiments et les propriétés mécaniques, de haute qualité.

Enfin, le troisième niveau (niveau 3) regroupe les méthodologies appliquées aux bâtiments isolés, qui sont des méthodologies qui utilisent des données issues de recherches approfondies sur les caractéristiques de ce même bâtiment puis appliquées dans des techniques de modélisation numérique.

La seconde approche de la classification par le regroupement des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique, proposée par Corsanego et Petrini (1990), est basée sur le fait que les méthodologies permettent de déterminer directement ou non la vulnérabilité, c'est-à-dire qu'elles dirigent directement l'action sismique vers les dommages subis par la structure (figure 2.3). On distingue quatre catégories de méthodes différentes.

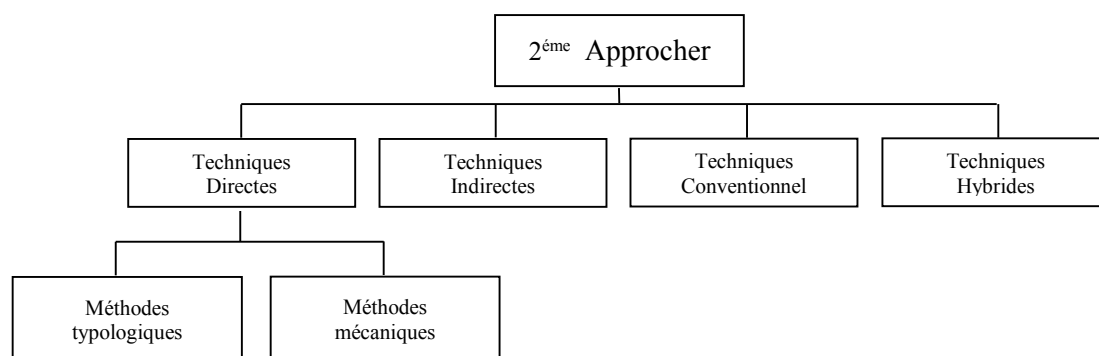


Fig. 2.3 - Deuxième approche mentionnée. Approche proposée par (Corsanego et Petrini, 1990).

La première catégorie de méthodes, connue sous le nom de Techniques directes, regroupe les méthodes qui permettent d'estimer directement les dommages causés aux bâtiments, en se subdivisant en deux catégories différentes, les méthodes typologiques et les méthodes mécaniques. Les méthodes typologiques identifient les bâtiments comme

appartenant à une classe typologique en fonction des caractéristiques qui influencent la réponse sismique de ces structures. A travers les dégâts observés et enregistrés dans les enquêtes réalisées après un séisme, la probabilité que chaque type de bâtiment subisse un certain niveau de dégâts est évaluée. Les méthodes mécaniques permettent de prédire l'effet du séisme sur les structures grâce à l'utilisation de modèles mécaniques.

La deuxième catégorie de méthodes, appelées Techniques indirectes, regroupe des méthodes qui ne relient pas directement le paramètre utilisé pour caractériser les vibrations du sol (par exemple, Peak Accélération - PGA) avec les dommages causés à la structure. La relation entre eux se fait à travers une étape intermédiaire, le calcul d'un indice de vulnérabilité.

La troisième catégorie de méthodes, connues sous le nom de techniques conventionnelles, regroupe des méthodes basées sur des avis d'experts, avec la prédiction du niveau de dommages prédits par un indice de vulnérabilité.

Enfin, la quatrième catégorie de méthodes, appelées Techniques Hybrides, comme son nom l'indique, consiste en l'utilisation conjointe de méthodes appartenant aux autres groupes.

La dernière approche de classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique (figure 2.4) présentée dans ce texte est la plus appropriée pour distinguer les méthodologies des bâtiments situés dans les centres historiques (Vicente et al, 2014), c'est-à-dire les endroits où il y a un grand nombre d'anciens bâtiments en maçonnerie, comme c'est le cas dans la ville de Lisbonne. Le critère utilisé dans cette approche est basé sur la façon dont les estimations des dommages sont obtenues, que ce soit à travers les dommages observés et les avis d'experts ou à travers des modèles structurels.

Ainsi, trois catégories différentes sont distinguées : les méthodes empiriques, les méthodes analytiques et les méthodes hybrides. Plus loin dans ce texte, les méthodes hybrides seront traitées plus en détail. Pour chacune des catégories, une brève présentation des méthodes les plus importantes sera faite, par ordre chronologique, dont certaines seront choisies pour une description plus approfondie.

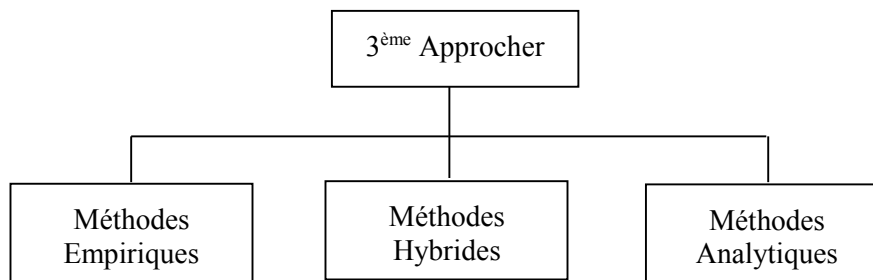


Fig. 2.4 - Troisième approche référée.

En général, le paramètre utilisé pour caractériser le mouvement du sol (c.-à-d. L'action sismique) est, dans le cas des méthodes empiriques (ou des statistiques basées sur l'observation des dommages et des jugements d'experts), l'intensité macrosismique et l'accélération du sol (PGA), alors que dans le cas de méthodes analytiques (ou théoriques basées sur des calculs structurels), le spectre de réponse est utilisé (Calvi et al, 2006 ; Lang, 2012).

En plus des approches de classification présentées, qui permettent de regrouper les différentes méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité sismique, d'autres ont également été proposées, comme celle développée par Dolce et al, (1994) comme mentionné dans Vicente (2008).

1.2. Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques ont été les premières méthodes utilisées pour évaluer la vulnérabilité sismique. Ces méthodes sont basées sur des données recueillies en observant les dommages aux bâtiments existants causés par des tremblements de terre dans le passé. Ce type de méthodes est particulièrement adapté aux endroits où l'enregistrement des tremblements de terre et des dommages causés aux bâtiments a été effectué de manière systématique au fil des ans, c'est-à-dire où les connaissances sur ces questions sont étendues, ce qui permet d'avoir confiance dans les valeurs attendues, calculées à partir de ces méthodes (Vicente et al, 2014).

Le paramètre utilisé pour caractériser le mouvement vibratoire du sol, dans ce type de méthodes, est, dans la grande majorité des cas, l'intensité macrosismique. Plus récemment, dans certaines situations, Accélération du sol (PGA) a également commencé à être utilisé (Lang, 2012). On distingue deux principaux types de méthodes empiriques, les matrices de probabilité de dommages et les fonctions de vulnérabilité, qui sont décrites ci-dessous.

1.2.1. Matrices de probabilité de dommages

Les matrices de probabilité de dommages sont le type de méthodes empiriques les plus utilisées pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments lorsque l'aléa sismique est défini en fonction de l'intensité. Ces matrices (tableau 2.1) servent à exprimer discrètement la probabilité conditionnelle que, pour chaque classe de vulnérabilité, un certain niveau de dommage j soit obtenu, du fait d'une intensité sismique i , $P[D = j|i]$ (Calvi et al, 2006; Lang, 2012). Les bâtiments, en fonction de leurs caractéristiques par rapport à la typologie structurale, sont associés à une classe de vulnérabilité, comme le montre la figure 2.5.

Pour une meilleure compréhension du processus de construction de la matrice, consultez l'exemple suivant :

P_{32} représente la probabilité d'atteindre le niveau d'endommagement D3 dans la structure en cas de séisme I_2 .

Pour tout séisme d'intensité i (chaque colonne), l'équation 1.2 est vérifiée (OPS, 1998).

$$P_{1i} + P_{2i} + P_{3i} + P_{4i} = 100\% \quad (1.2)$$

Dans cet exemple (tableau 2.1), seuls quatre niveaux de dommages ont été pris en compte, mais les niveaux de dommages souhaités peuvent être pris en compte.

Les échelles d'intensité les plus largement utilisées sont l'échelle de Mercalli modifiée (Wood et Neumann, 1931), l'échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik, MSK (Medvedev et Sponheuer, 1969) et l'échelle macrosismique européenne, EMS - 98 (Grünthal, 1998).

Après avoir défini le concept de matrice de probabilité de dommages, les principales utilisations de cette méthodologie sont présentées dans le temps.

Ce type de matrices a été utilisé pour la première fois il y a environ 40 ans, aux États-Unis d'Amérique, dans le but de prévoir la probabilité de dommages subis dans les bâtiments par l'action sismique. Whitman et coll. (1973) ont élaboré des matrices pour différentes typologies structurales, basées sur des données relatives aux dommages observés dans les bâtiments, causés par le séisme de San Fernando en 1971 (Calvi et al, 2006).

Tableau 2.1 - Matrice de probabilité de dommages proposée par Whitman (Calvi et al, 2006)

Degré de dommages	Dommages structuraux	Dommages non structuraux	Ratio de dommages (%)	Intensité sismique			
				V	VI	VII	VIII
0	Aucun	Aucun	0 – 0.05	---	---	---	---
1	Aucun	Mineurs	0.05 – 0.3	---	---	---	---
2	Aucun	Localisés	0.3 – 1.25	---	---	---	---
3	Non observables	Etendus	1.25 – 3.5	---	---	---	---
4	Mineurs	Substantiels	3.5 – 4.5	---	---	---	---
5	Substantiels	Majeurs	7.5 – 20	---	---	---	---
6	Majeurs	Presque totaux	20 – 65	---	---	---	---
7	Bâtiment condamné		100	---	---	---	---
8	Effondrement		100	---	---	---	---
Pourcentage cumulatif				100%	100%	100%	100%
Ratios de dommages moyens (MDF)				---	---	---	---

En Europe, Braga et al, (1982) ont été parmi les premiers à utiliser ces matrices sur la base des données collectées concernant les dommages causés aux bâtiments, dus au séisme d'Irpinia, en adoptant une distribution binomiale pour le calcul des probabilités, en utilisant l'échelle d'intensité MSK et en adoptant seulement trois classes de vulnérabilité. L'utilisation de cette distribution a l'avantage de ne nécessiter qu'un seul paramètre, qui varie entre 0 et 1, mais elle a l'inconvénient que la moyenne et l'écart-type dépendent tous deux de ce paramètre unique (Calvi et al, 2006).

En 2005, Di Pasquale et al, (2005) ont mis à jour les matrices définies selon l'échelle MSK et ont commencé à être définies par l'échelle Mercalli-Cancani-Sieberg. En 2003, Dolce et al, (2003) ont mis à jour les matrices initialement proposées par Braga et al, (1982), en utilisant l'échelle EMS-98 et en ajoutant aux classes de vulnérabilité A, B, C, qui avaient été définies dans la version originale, une nouvelle classe D pour envisager des bâtiments à renfort sismique ou déjà conçus avec des codes sismiques (Calvi et al, 2006).

En 1985, le Conseil de la technologie appliquée (ATC), parrainé par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA), a présenté des matrices de probabilité de dommages basées sur des opinions et des opinions fournies par des experts. Ces spécialistes ont été invités à fournir des estimations de qualité "inférieure" (faible), "moyenne" (meilleure) et "supérieure" (élevée) du facteur de dommage (quotient entre les pertes et le coût de réparation, exprimé en pourcentage) pour les intensités. De Mercalli Modifié des niveaux VI à XII et pour les bâtiments de 36 classes différentes. Avec ces valeurs et en utilisant une distribution log-normale, il a été possible de définir les matrices pour chaque niveau d'intensité et pour chaque classe de bâtiment (ATC, 1985).

Giovanazzi et Lagomarsino (2001, 2004) ont proposé une méthode macrosismique qui a conduit à la définition de fonctions de probabilité de dommages sur la base de l'échelle EMS-98. Pour cinq niveaux de dommages et pour les intensités entre les niveaux V et XII, les descriptions quantitatives sont attribuées «Peu» (Peu), «Beaucoup» (Beaucoup) et «La plupart» (La plupart), pour six classes de vulnérabilité différentes (classe A à les plus vulnérables, classe F les moins vulnérables). (Calvi et al, 2006). Il est à noter que les différents types de bâtiments en maçonnerie, à l'échelle EMS-98, appartiennent aux classes de vulnérabilité illustrées à la figure 2.5 et le tableau 2.2 montre un exemple de matrice de probabilité de dommages pour la classe de vulnérabilité B, définie à l'aide de l'échelle EMS-98.

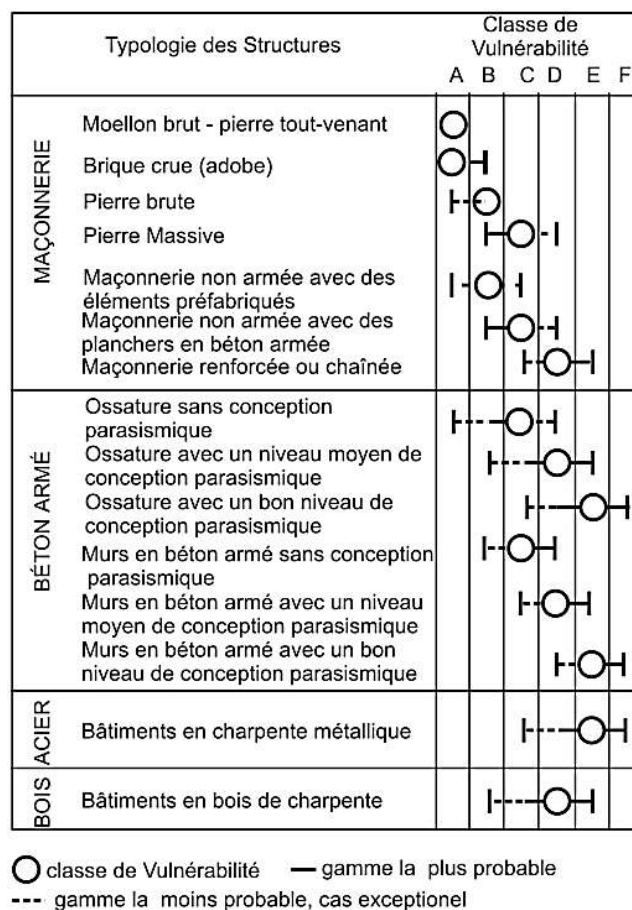







Fig. 2.5 - Différenciation du type de bâtiments dans les classes de vulnérabilité, selon l'échelle macrosismique EMS-98 (Grüntal, 1998).

Tableau 2.2 - Exemple de matrice de probabilité de dommages pour la classe de vulnérabilité B définie à l'aide de l'échelle EMS-98 (Barbat et al, 2008).

Class B					
Degré de dommages	1	2	3	4	5
Intensité					
V	Peu				
VI	Beaucoup	Peu			
VII		Beaucoup	Peu		
VIII			Beaucoup	Peu	
IX				Beaucoup	Peu
X					Beaucoup
XI					Plus
XII					

L'échelle EMS 98 comprend 5 degrés de dommage. Le tableau 2.3 donnent la définition de ces 5 degrés de dommage pour les bâtiments en maçonnerie. Purement qualitative, elle décrit la nature des dommages observables.

Tableau 2.3 - Classification et description des dommages pour les bâtiments en maçonnerie, d'après [EMS98].

Classification des dégâts aux bâtiments en MAÇONNERIE	
	Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux) Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rare cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.
	Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés) Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grand morceau de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.
	Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants) Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles se détachent du toit. Fracture des cheminées à la jonction avec le toit. Défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons).
	Degré 4 : Dégâts très importants (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants) Défaillance sérieuse des murs, défaillance structurale partielle des toits et planchers.
	Degré 5: Destruction (Dégâts structuraux importants) Effondrement total ou presque total.

La définition du montant des dommages est donnée par l'échelle quantitative mentionnée ci-dessus et est assez subjective, n'étant pas caractérisée par une seule valeur pour chacun des trois niveaux, mais plutôt par des plages de pourcentages continus, comme le montre la figure 2.6, sous la forme de régime (Lang, 2012).

Cependant, l'utilisation de cette méthodologie pose des problèmes du fait qu'elle est vague et incomplète.

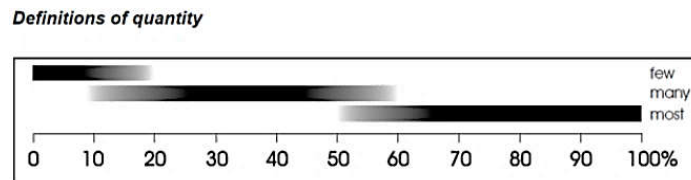


Fig. 2.6 - Plage de valeurs pour chacun des niveaux de quantité définis par l'EMS-98 (Grüntal, 1998).

Pour résoudre le manque d'informations sur la totalité des niveaux de dommages pour un niveau d'intensité donné, une distribution des dommages bêta a été supposée, définie dans l'équation 1.2 (Calvi et al, 2006 ; Barbat et al, 2008).

$$PDF: P_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-t}(b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad (1.3)$$

$$\mu_x = a + \frac{r}{t}(b-a)$$

Où a, b, t et r représentent les paramètres de distribution ; est la valeur moyenne de la variable continue x, qui varie entre a et b et $\Gamma(r)$ est la fonction gamma.

Ensuite, nous allons illustrer pour un bâtiment en pierre simple, dont la classe de vulnérabilité devrait être B figure 2.5 et le tableau 2.2 montre que pour un séisme d'intensité VI, «de nombreux» bâtiments subiront des dommages de type léger (léger), correspondant au niveau 1 de l'échelle de dégâts et «peu» subiront des dommages de type modéré, correspondant au niveau 2. Cela signifie que le pourcentage de dommages survenant au niveau 1 est de 20% à 50% et le niveau 2 est inférieur à 10% (Giovanazzi et Lagomarsino, 2004). De manière générale, l'utilisation de matrices de probabilité de dommages basées sur l'intensité a permis d'évaluer le risque sismique de manière rentable et efficace et, grâce à l'utilisation des données collectées qui caractérisent les dommages subis, il devient possible d'utiliser les matrices créé pour prédire de façon très réelle les dommages causés par les futurs tremblements de terre qui affectent des régions aux caractéristiques similaires (Calvi et al, 2006).

1.3. Méthode de l'indice de vulnérabilité :

La méthode de l'indice de vulnérabilité est une méthode qui permet d'obtenir la vulnérabilité sismique grâce à l'utilisation d'une étape intermédiaire, qui consiste à définir un indice qui relie l'action sismique aux dommages subis par la structure.

La méthode de l'indice de vulnérabilité a été initialement proposée par Benedetti et Petrini en 1984 (Benedetti et Petrini, 1984), après avoir été adoptée par le GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) en 1993 (GNDT Level II Approach). L'indice de vulnérabilité IV est calculé à partir des données obtenues par une enquête de terrain réalisée individuellement sur chaque bâtiment, sur un certain nombre de paramètres (en général 11) qui permettent une caractérisation rapide des bâtiments par rapport aux principales caractéristiques qui sont directement liés à la capacité de résister à un séisme. Une classe de vulnérabilité croissante sera associée à chacun des paramètres: A (optimal), B, C, D (défavorable). Les données collectées sur le bâtiment sont comparées à des valeurs définies empiriquement qui permettent, pour chaque paramètre, de déterminer à quelle classe appartient le bâtiment. À titre d'exemple, les valeurs définies pour le paramètre lié à la distance maximale entre les murs (S) sont affichées. Si le bâtiment ou (L représente la dimension du bâtiment en plan et S la distance maximale entre les murs, dans la même direction que L), il appartiendra à la classe A, B, C ou D, respectivement.

Chaque classe se voit attribuer une valeur. Un poids est associé à chaque paramètre, qui a des valeurs plus élevées plus le paramètre est important pour décrire la résistance structurelle à une action sismique (Calvi et al, 2006).

L'indice de vulnérabilité, utilisé comme étape intermédiaire pour déterminer les dommages causés à une structure soumise à une action sismique, est ensuite calculé en ajoutant les produits entre les poids et les valeurs associées aux classes de vulnérabilité (équation 1.4). Cet indice est souvent normalisé pour que I_v soit compris entre 0 et 100, permettant ainsi une plus grande facilité d'utilisation.

$$I_v = \sum_{i=1}^n K_i * W_i \quad (1.4)$$

Benedetti et Petrini ont défini onze paramètres, auxquels ont été attribuées des valeurs pour chaque classe de vulnérabilité (K_i) entre 0 et 45 et des poids définis (W_i) entre 0,25 et 1,5. Par conséquent, la plage de valeurs possibles pour l'indice de vulnérabilité non normalisé, I_v , peut varier de 0 à 382,5.

En utilisant les données des tremblements de terre précédents, les fonctions de

vulnérabilité sont calibrées qui relient l'indice de vulnérabilité, I_v , avec un facteur de dommage global pour les bâtiments de la même typologie, d , pour la même intensité macrosismique ou l'accélération maximale du sol (PGA) - Figure 2.7. Ce facteur d'endommagement global représente le quotient entre les coûts de réparation et les coûts d'une nouvelle construction et varie de 0 (dommages négligeables) à 1 (effondrement du bâtiment).

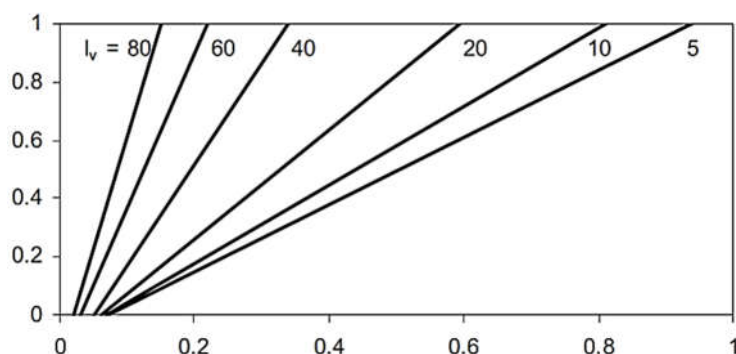


Fig. 2.7 - Fonctions de vulnérabilité pour relier l'accélération maximale du sol avec le facteur de dommage (d) en utilisant l'indice de vulnérabilité (Calvi et al, 2006).

Les onze paramètres mentionnés ci-dessus, définis par Benedetti et Petrini, sont: le type de système structurel; la qualité du système structurel; résistance conventionnelle; l'emplacement et les conditions du sol; diaphragmes horizontaux; la configuration de l'usine; configuration en hauteur; la distance maximale entre les murs; le type de couverture; les éléments non structuraux et l'état de conservation (tableau 2.3).

Tableau 2.4 - Échelle de vulnérabilité définie par Benedetti et Petrini (adapté de Barbat et al, 1995).

Paramètre	Classe (K_i)				Poids (W_i)
	A	B	C	D	
1 Type et organisation du système résistant	0	5	20	45	1.00
2 Qualité du système résistant	0	5	25	45	0.25
3 Résistance conventionnelle sous chargement horizontal	0	5	25	45	1.50
4 Localisation de la structure et fondations	0	5	25	45	0.75
5 Caractéristiques des planchers	0	5	15	45	1.00
6 Irrégularité en plan	0	5	25	45	0.50
7 Irrégularité en élévation	0	5	25	45	1.00
8 Distance entre murs	0	5	25	45	0.25
9 Caractéristiques des toitures	0	15	25	45	1.00
10 Éléments non-structuraux	0	0	25	45	0.25
11 Etat de conservation	0	5	25	45	1.00

En analysant le tableau, on peut voir que le paramètre «3. La résistance conventionnelle» est le paramètre le plus important pour le contrôle des dommages car il a un poids plus élevé que les autres paramètres. Les paramètres 2, 8 et 10 seront les paramètres les moins influents.

Par la suite, certaines variantes ont été développées, basées sur cette méthodologie. C'est le cas de la méthode développée dans le cadre du projet Risk_UE, qui impliquait l'application de la méthode à sept âges européens et le cas du «Projet Catane» mentionné dans Faccioli et al, (1999) et dans GNDT (GNDT, 2000).

Cette méthode est basée sur la formulation de l'indice de vulnérabilité adopté dans l'approche GNDT Niveau II (GNDT, 1994), avec de légères améliorations, notamment grâce à un plus grand niveau de détail dans l'évaluation de certains paramètres, la redéfinition et l'ajustement des critères classification des paramètres d'origine et introduction de trois nouveaux paramètres considérés comme fondamentaux dans la vulnérabilité des constructions en maçonnerie (Vicente, 2008).

Les trois paramètres mentionnés, qui ont été ajoutés à la méthodologie d'origine (composée de onze paramètres), sont: le nombre d'étages (P5), l'interaction entre les bâtiments adjacents (P7) et les ouvertures et alignements de la façade (P10). Comme dans la version originale, chaque paramètre est associé à l'une des quatre classes de vulnérabilité « et poids » correspondant respectivement à et dont les valeurs, différentes de celles adoptées dans la version de l'approche GNDT, sont illustrées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.5 - Paramètres proposés et indice de vulnérabilité (Vicente et al, 2008).

Paramètre group	Paramètre	Class (K_i)				Weight (W_i)	Vulnerability index
		A	B	C	D		
1. Structural building system	P1 Type of resisting system	0	5	20	50	0.75	$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} K_i W_i$ $0 \leq I_v^* \leq 650$ Normalized index $0 \leq I_v^* \leq 100$
	P2 Quality of the resisting system	0	5	20	50	1.00	
	P3 Conventional strength	0	5	20	50	1.50	
	P4 Maximum distance between walls	0	5	20	50	0.50	
	P5 Number of floors	0	5	20	50	1.50	
	P6 Location and soil conditions	0	5	20	50	0.75	
2. Irregularities and interactions	P7 Aggregate position and interaction	0	5	20	50	1.50	
	P8 Irregularity in plan	0	5	20	50	0.75	
	P9 Irregularity in elevation	0	5	20	50	0.75	
3. Floor slabs and roofs	P10 Wall façade openings and alignments	0	5	20	50	0.50	
	P11 Horizontal diaphragms	0	5	20	50	1.00	
4. Conservation status and other elements	P12 Roofing system	0	5	20	50	1.00	
	P13 Fragilities and conservation state	0	5	20	50	1.00	
	P14 Non-structural elements	0	5	20	50	0.50	

Il est à noter que les poids, ont été définis selon des avis d'experts (Vicente et al, 2014). Pour la méthodologie appliquée à l'échelle urbaine, en raison du nombre élevé de bâtiments

à inspecter, une stratégie a été définie pour déterminer l'indice de vulnérabilité en deux phases. Dans une première phase, des données sont collectées sur les bâtiments pour lesquels il existe des informations détaillées (informations géométriques et morphologiques, plans de construction, entre autres), l'indice de vulnérabilité étant calculé pour chacun d'entre eux. Dans une deuxième phase, pour les bâtiments restants, une évaluation plus rapide est réalisée, dans laquelle les caractéristiques des bâtiments en maçonnerie sont considérées comme homogènes dans la région. Par cette hypothèse, comme valeur initiale, la valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité obtenue à partir de l'analyse des bâtiments considérés dans la première phase (qui est considérée comme représentant la typologie structurale) est retenue. En considérant les facteurs de modification, qui augmentent ou diminuent la valeur de l'indice de vulnérabilité pour la typologie structurale, l'indice de vulnérabilité pour chaque bâtiment de deuxième phase est calculé. Les facteurs de modification pour chaque paramètre sont déterminés à l'aide de l'expression 1.5.

$$Fact\ de\ modifecation = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^7 p_i} * (C_{vi} - \bar{C}_{vi}) \tag{1.5}$$

Depuis le poids associé au paramètre i , C_{vi} la valeur associée à la classe de vulnérabilité de la figure 2.7 et \bar{C}_{vi} la valeur associée à la classe de vulnérabilité moyenne, résultant de la première analyse de phase. La figure 2.8 présente les facteurs de modification résultant de l'étude réalisée dans la ville de Coimbra en 2008, obtenue grâce à l'utilisation de l'équation 1.5 (Vicente, 2008).

Vulnerability modifier factors	Vulnerability classes, C_{vi}			
	0	5	20	50
P5 - Number of floors	-4.1	-3.1	0.0	6.2
P6 - Location and soil conditions	-0.5	0.0	1.6	4.7
P7 - Aggregate position and interaction	-1.0	0.0	3.1	9.3
P8 - Plan configuration	-2.1	-1.6	0.0	3.1
P9 - Regularity in height	-2.1	-1.7	0.0	3.1
P12 - Roof system	-2.8	-2.1	0.0	4.1
P13 - Fragilities and conservation state	-2.8	-2.1	0.0	4.1
Maximum modifier range, ΣI_v	-15.3	-10.5	4.7	34.7

Modifier score: $\frac{p_i}{\sum_{i=1}^7 p_i} * (C_{vi} - \bar{C}_{vi})$

p_i : Parameter, i , weight assigned

$\sum_{i=1}^7 p_i$: Sum of parameter weights

C_{vi} : Modifier factor vulnerability class

\bar{C}_{vi} : Average vulnerability class of parameter, i .

* - defined by the detailed analysis (410 buildings)

Fig. 2.8- Facteurs de modification (Vicente et al, 2008)

Pour les bâtiments évalués dans la deuxième phase, l'indice de vulnérabilité final est déterminé à l'aide de l'équation 1.6 (Ferreira et al, 2013).

$$I_v = \bar{I}_v + \sum \Delta I_v \tag{1.6}$$

En tant qu'indice de vulnérabilité final, l'indice de vulnérabilité moyen est déterminé à partir des données collectées lors de l'évaluation détaillée (première phase) et est la somme des facteurs de modification (Vicente, 2008).

Après avoir calculé les indices de vulnérabilité, une corrélation est établie entre les indices référencés qui ont été déterminés par un processus similaire à celui proposé dans l'approche GNDT niveau II et l'indice de vulnérabilité, de la méthodologie macrosismique. Cette corrélation a été établie à l'aide de l'équation 1.7:

$$V = 0.592 + 0.0057 * I_v \quad (1.7)$$

$$V = 0.56 + 0.0064 * I_v \quad (1.8)$$

L'indice de vulnérabilité V , est ensuite utilisé pour déterminer la valeur du degré de dommage moyen μ_D , qui peut varier entre 0 et 5. Il est calculé à l'aide de l'expression 1.9, proposée par (Bernardini et al, 2007) qui dépend du danger (décrit en termes d'intensité macrosismique I), en plus de l'indice V (Ferreira et al, 2013).

$$\mu_D = 2.5 * \left[1 + \tanh \left(\frac{I+6.25*V-12.7}{Q} \right) \right] \quad (1.9)$$

Le paramètre est un facteur de ductilité qui peut varier entre 1 et 4 (Ferreira et al, 2013).

Cette expression a été utilisée pour évaluer la vulnérabilité sismique du centre historique de la ville de Coimbra en 2008 (Vicente, 2008) et dans le centre historique de la ville de Seixal en 2010 (Ferreira et al, 2013). Cependant, récemment, dans le document de Vicente et al, (2014) l'équation 1.10 est suggérée, ce qui présente de légers changements par rapport à l'équation précédente.

$$\mu_D = 2.5 + 3 * \tanh \left(\frac{I+6.25*V-12.7}{Q} \right) * f(V, I) \quad (1.10)$$

$$f(V, I) = \begin{cases} e^{\frac{V}{2} * (I-7)} & I \leq 7 \\ 1 & I > 7 \end{cases} \quad (1.11)$$

Ainsi, après avoir calculé l'indice de vulnérabilité V , les valeurs moyennes μ_D du niveau de dommage sont déterminées, pour les différentes intensités macrosismiques (I), définissant ainsi chacune des courbes de vulnérabilité, comme le montre la figure 2.9. Cette figure montre la courbe de vulnérabilité pour une valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité, et pour les valeurs supérieures et inférieures ($I_{v,mean} - 2\sigma$; $I_{v,mean} - 1\sigma$; $I_{v,mean} + 1\sigma$; $I_{v,mean} + 2\sigma$). Notez que le paramètre Q définit la pente de la fonction de vulnérabilité, tandis que l'indice de vulnérabilité, détermine la position de la courbe (Ferreira et al, 2013).

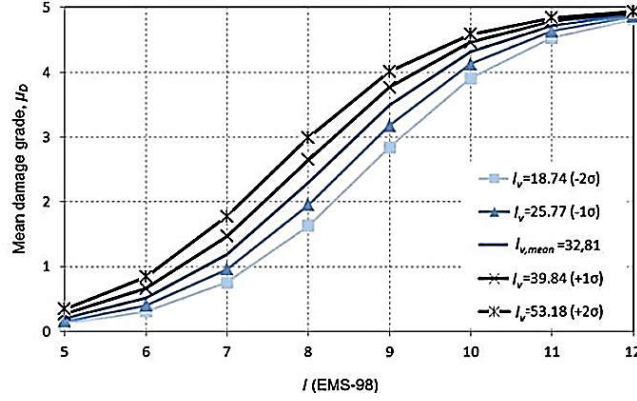


Fig. 2.9 - Courbes de vulnérabilité définie en fonction du niveau moyen de dommage et de l'intensité macrosismique (Vicente et al, 2014).

À partir des valeurs moyennes μ_D , il est possible de représenter les dommages de différents histogrammes avec leur distribution pour différentes intensités de l'action sismique et en utilisant une approche statistique. L'une des méthodes les plus utilisées consiste à définir des courbes de fragilité.

Dans cette méthode, la probabilité de dépasser un certain niveau de dommage D_K , (avec $\in [0,5]$ représentant l'un des cinq niveaux de dommage) est déterminée directement à partir de la distribution des dommages du bâtiment, définie à partir de la fonction de probabilité bêta pour une typologie donnée (Vicente, 2008).

Dans les équations 1.12, 1.13 et 1.14, les fonctions utilisées pour déterminer la probabilité associée à chacun des différents niveaux de dommages sont présentées, D_K et les équations 15 et 16 définissent les paramètres t et r .

$$P(D_0) = p(0) = \int_0^{0.5} k(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \quad (1.12)$$

$$P(D_k) = p(k) = \int_{k-0.5}^{k+0.5} k(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \quad (1.13)$$

$$P(D_5) = p(5) = \int_{4.5}^5 k(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \quad (1.14)$$

À titre d'exemple, nous présentons les courbes de fragilité (figure 2.10) obtenues par la méthodologie référencée, pour la valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité $I_{v,mean}$ (Vicente, 2008).

$$t = \mu_x (5 - \mu_x) / \sigma_x^2 \quad (1.15)$$

$$r = t \mu_x / 5 \quad (1.16)$$

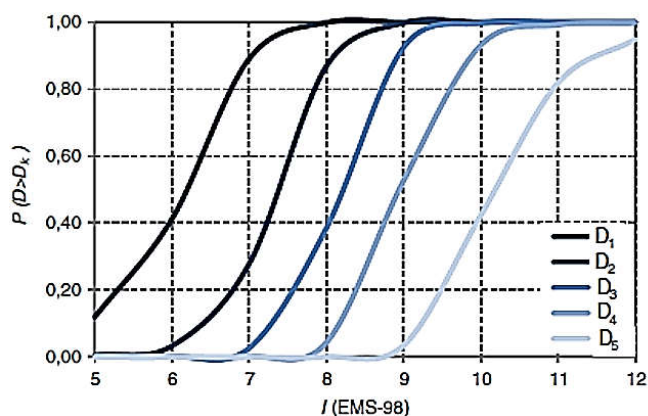


Fig. 2.10 - Courbe de fragilité (Vicente et al, 2014).

1.3.1. Autres méthodes empiriques

En plus des deux types de méthodes empiriques déjà présentées (matrices de probabilité de dommages et méthode de l'indice de vulnérabilité), d'autres ont été développées qui étaient moins pertinentes pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie, telles que les courbes de vulnérabilité méthodes et méthodes de dépistage. Les courbes de vulnérabilité sont apparues après les matrices de probabilité de dommages et sont des fonctions empiriques (déterminées en observant les dommages aux bâtiments, après un séisme) qui sont continuées et expriment la probabilité de dépasser un certain état de dommage pour une valeur donnée action sismique (Colombi et al, 2008). Différentes courbes ont été définies, en utilisant des données collectées dans différents pays et en utilisant différents paramètres pour considérer l'action sismique, mettant en évidence certaines des études dans lesquelles les courbes pour les bâtiments en maçonnerie ont été dérivées: Spence et al, (1992); Sabetta et al, (1998); Orsini (1999); Rota et al, (2006), Colombi et al, (2008), Karababa et Pomonis (2011), Jaiswal et al, (2011), entre autres (Hancilar et al, 2012).

Les méthodes de dépistage sont des méthodes développées essentiellement pour vérifier, de manière simplifiée, quels bâtiments prioritaires renforcer (Calvi et al, 2006). Celles-ci reposent sur le remplissage de formulaires avec des données obtenues lors d'inspections visuelles effectuées sur les bâtiments à l'étude. Ces méthodes ont le grand avantage de permettre d'évaluer rapidement la vulnérabilité sismique des bâtiments, ce qui permet à l'utilisateur d'évaluer un grand nombre de bâtiments en un temps relativement court (Achs et Adam, 2012).

Dans la littérature consultée, il a été observé que pour cette méthode, les principaux développements ont été faits pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique dans les bâtiments en béton, dont les suivants se distinguent :

JBPDA (1990), Hassan et Sozen (1997), Yakut (2004) et Ozdemir et al, (2005). Cependant, des méthodes de criblage ont également été développées dans lesquelles les bâtiments en maçonnerie ont été pris en compte, comme la méthode de «dépistage visuel rapide des bâtiments pour les risques sismiques potentiels» (ATC, 1988; ATC, 2002) et Achs et Adam (2012).

1.4. Méthodes analytiques :

Les méthodes analytiques pour évaluer la vulnérabilité sismique sont des méthodes théoriques qui impliquent le calcul mécanique de la réponse structurale du système. Ces types de méthodes sont plus rigoureux dans la représentation de la réponse des structures et donc, pour leur application, elles nécessitent des informations très détaillées sur les structures, au niveau géométrique, les matériaux qui la constituent et les techniques de construction. Afin d'obtenir toutes ces données, il est nécessaire de collecter de la documentation, d'analyser et d'envisager le dimensionnement, ce qui peut parfois rendre ce type de méthodologies économiquement irréalisable (Ferreira, 2012).

Selon Calvi et al, (2006), ce type de méthodes permet de réaliser des études de sensibilité et d'étalonnage de nombreuses méthodes empiriques et hybrides déjà développées pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments.

On peut considérer, comme l'affirme Sandi (1982), que contrairement aux méthodes empiriques qui permettent de déterminer la vulnérabilité observée, les méthodes analytiques permettent de déterminer la vulnérabilité calculée (Coburn et Spence, 2002).

Contrairement aux méthodes empiriques, dans lesquelles l'action sismique est généralement représentée par l'intensité macrosismique ou l'accélération maximale du sol, les méthodes analytiques utilisent préférentiellement des paramètres physiques tels que l'accélération spectrale, S_a ou les déplacements spectraux, S_d (Lang, 2012).

Le processus de détermination des courbes de fragilité et des matrices de probabilité de dommages, à l'aide de méthodes analytiques, peut être résumé par les étapes indiquées dans la figure 2.11.

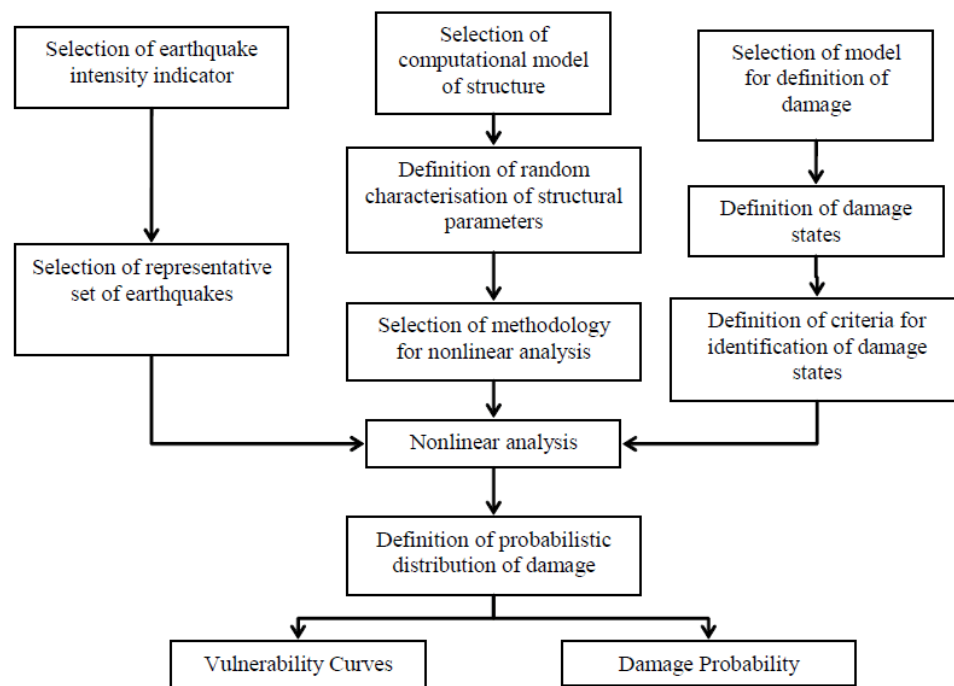


Fig. 2.11 – L’organigramme des composantes du calcul des courbes de fragilité et la matrice probabilité de dommages à l'aide d'une procédure analytique (Calvi et al, 2006).

Un exemple de méthode analytique est la méthode mise en œuvre dans TREMIR (Lagomarsino et al, 2012), qui sera utilisée dans le chapitre. Cette méthode nécessite une connaissance détaillée des structures, compte tenu d'un grand nombre de données et d'un traitement très minutieux des structures. Ce n'est certainement pas la méthode appropriée pour évaluer la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville.

Dans le sous-chapitre qui suit, les différentes approches pour définir les courbes de fragilité sont mentionnées.

1.5. Courbes de fragilité :

Les courbes de fragilité sont un élément essentiel pour l'évaluation du risque sismique car elles relient la probabilité qu'une structure atteigne ou dépasse un certain état de dommage pour une intensité sismique donnée (Kaynia et al, 2013).

Il existe plusieurs approches qui permettent d'obtenir des courbes de fragilité, qui peuvent être regroupées en: courbes empiriques, courbes basées sur un jugement d'expert, courbes analytiques et courbes hybrides. (Kaynia et al, 2013) Comme son nom l'indique ; 1) les courbes empiriques sont déterminées sur la base des évaluations des tremblements de terre dans le passé, 2) les courbes basées sur le jugement des experts sont déterminées par l'expérience accumulée et l'opinion de experts, 3) les courbes analytiques définies par calcul analytique et à l'aide d'analyses non linéaires statiques ou dynamiques et 4) les

courbes hybrides sont déterminées en combinant les trois autres groupes d'approche. Dans cette thèse, et dans cette section particulière, une attention particulière sera portée aux courbes de fragilité obtenues analytiquement.

Comme mentionné, les courbes de fragilité obtenues analytiquement sont déterminées par des analyses statiques ou dynamiques non linéaires de modèles structurels, l'action sismique étant représentée par un spectre de réponse dans le premier cas et des accélérogrammes dans le second (Kaynia et al, 2013).

Dans l'élaboration des courbes de fragilité, certaines étapes principales peuvent être distinguées, telles que: la typologie structurale à considérer, la définition des états d'endommagement ainsi que les paramètres permettant de déterminer les états limites d'endommagement, le paramètre pour mesurer l'intensité sismique et tenir compte des incertitudes.

Dans une région donnée, de nombreux facteurs affectent la définition des courbes de fragilité tels que: les bâtiments avec des caractéristiques différentes, non seulement au niveau géométrique mais aussi à la sévérité structurelle, matérielle, sismique prise en compte dans la conception de la structure, entre autres. Le processus d'évaluation de la vulnérabilité sismique inhérente aux structures appartenant à cette même région, s'il était effectué individuellement pour chaque structure, serait extrêmement long et coûteux. Pour simplifier le processus, il est nécessaire de définir des typologies structurelles. La typologie structurale vise à regrouper les bâtiments qui ont des caractéristiques structurelles similaires et qui sont dans des endroits avec des conditions géotechniques similaires par le biais de classes structurelles, car il est prévu que les structures qui présentent les similitudes mentionnées présentent une performance/un comportement similaire lorsqu'elles sont soumises. À une action sismique (Kaynia et al, 2013a).

Plusieurs taxonomies ont été développées, comme celle présentée dans la méthode Hazus (FEMA, 2013a) (qui sera présentée plus loin dans cette thèse), la taxonomie définie dans le projet européen RISK-UE (Mouroux et al, 2004) (qui considère 23 classes principales selon le matériau utilisé et la fonction que ce matériau joue dans le bâtiment, les classes étant réparties en sous-classes selon trois niveaux de hauteur) ou la taxonomie récemment développée par le projet Syner-G, qui considère 10 catégories principales (Kaynia et al, , 2013).

La détermination des courbes de fragilité à l'aide des méthodes analytiques et statiques non linéaires est précédée de la définition du spectre de réponse, de la détermination de la courbe de capacité et du point de performance de la structure. Ensuite, le processus général d'obtention du point de performance de la structure qui permet son évaluation sismique pour un certain niveau d'intensité de l'action sismique est brièvement présentée.

Les courbes de capacité, comme son nom l'indique, sont des représentations graphiques de la capacité résistante de la structure. Il existe plusieurs types d'analyses à travers lesquelles il est possible de déterminer la capacité résistante de la structure, généralement utilisée, l'analyse statique non linéaire (Analyse Pushover) en raison de la capacité à tenir directement compte de certains effets de la réponse non linéaire de la structure et du fait que être une analyse un peu complexe par rapport aux analyses dynamiques non linéaires (Lang, 2002; Varum, 2003). L'analyse de poussée est basée sur l'application d'une distribution ou d'un déplacement latéral des forces, incrémental, résultant dans le cas des bâtiments, dans une courbe qui reflète la variation de l'effort transversal à la base et le déplacement du haut de la structure (Bento, 2011).

L'action sismique est définie par le spectre de réponse inélastique, dans le format d'accélération spectrale S_a - déplacement spectral S_d .

Le point de performance de la structure, pour un état limite donné, est une valeur obtenue en interceptant la courbe de capacité avec le spectre de réponse correspondant. Ce point représente le décalage spectral maximal attendu, d'une structure, pour une intensité donnée d'action sismique. Il convient de noter que, pour obtenir le point de performance par l'intersection de la courbe de capacité avec le spectre de réponse, il est nécessaire que les deux courbes soient définies selon les mêmes paramètres, en l'occurrence l'accélération spectrale et le déplacement spectral, en ordonnées et les abscisses, respectivement. Il faut aussi qu'ils soient définis pour un système de degré de liberté et qu'ils prennent en compte le comportement non linéaire de la structure.

L'attention est attirée sur le fait qu'il existe deux méthodes de référence qui permettent de déterminer le point de performance sismique de la structure, et par conséquent son évaluation sismique, à l'aide d'analyses statiques non linéaires: la méthode *N2* (Fajfar et Fischinger, 1998), proposée dans L'Eurocode 8 et la Capacité Spectrum Method, introduits par Freeman (Freeman et al, 1975; Freeman, 1998) et recommandés dans ATC40 (1996).

Les courbes de fragilité représentent la probabilité de dépasser un état limite d'endommagement en fonction d'un paramètre représentatif de l'action sismique, une mesure d'intensité (IM - Intensity Measure), qui peut être l'accélération maximale du sol (PGA), la vitesse au sol maximale (PGV), déplacement au sol maximal (PGD), accélération spectrale (Sa), vitesse spectrale (Sv) ou déplacement spectral (Sd) (Kaynia et al, 2013).

La probabilité qu'un état de dommage soit dépassé est généralement obtenue en utilisant une distribution cumulative log-normale, calculée analytiquement en utilisant l'équation 1.17.

$$P[ds_k | IM] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds_k}} * \ln \left(\frac{IM}{IM_k} \right) \right] \quad (1.17)$$

Étant:

ds_k - état des dommages de référence ;

$\ln \left(\frac{IM}{IM_k} \right)$ - fonction de distribution log-normale cumulative;

β_{ds_k} - écart type du logarithme népérien de la mesure d'intensité sismique pour l'état d'endommagement ds_k ;

IM - Mesure de l'intensité sismique;

- valeur moyenne de la mesure d'intensité sismique pour laquelle chaque structure atteint le seuil de l'état d'endommagement, ds_k .

Associée à la détermination des courbes de fragilité se trouvent la définition des états d'endommagement à considérer et par conséquent des états limites d'endommagement. Les états d'endommagement permettent d'adapter une valeur donnée du paramètre de mesure d'intensité sismique aux dommages subis dans la structure. Cinq états de dommages sont généralement pris en compte: aucun dommage, léger/mineur, modéré, étendu et effondrement. Cependant, différents auteurs/méthodologies ont défini un nombre différent d'états de dommages. Les échelles de dommages les plus fréquentes sont les suivantes: HCR (Rossetto et Elnashai, 2003), HAZUS-MH 2.1 (FEMA, 2013a), Vision2000 (SEAOC, 1995), EMS98 (Grunthal, 1998) et ATC-13 (ATC, 1985) (Kaynia et al, 2013).

La frontière entre deux états de dommage consécutifs est définie par un état limite de dommage. Dans une méthodologie dans laquelle les états de dommages sont pris en compte, les états limites de dommages seront pris en compte. Les valeurs et / ou les critères

qui permettent de définir les valeurs de la mesure d'intensité sismique pour chacun des états limites de dommages considérés diffèrent également selon les méthodologies existantes.

À titre d'exemple, les critères présentés par Giovinazzi (2005) sont présentés. Cela considère le déplacement spectral comme un paramètre de la mesure d'intensité sismique et considère cinq états de dommage (dont l'un correspond à l'état de non-dommage), ce qui implique l'existence de quatre états limites de dommage. Les valeurs de décalage spectral (calculées à l'aide des équations 1.18, 1.19, 1.20 et 1.21) qui caractérisent les états limites d'endommagement $S_{d,k}$, k augmentant en fonction de la gravité de l'endommagement, sont fonction des changements de rendement (d_y) et du déplacement dernier (d_u) qui définit la courbe de capacité bilinéaire (Giovinazzi, 2005).

$$S_{d,1} = 0.7 * d_y \quad (1.18)$$

$$S_{d,2} = 1.5 * d_y \quad (1.19)$$

$$S_{d,3} = 0.5 * (d_y + d_u) \quad (1.20)$$

$$S_{d,4} = d_u \quad (1.21)$$

Pour les valeurs proposées par Lagomarsino et Cattari (2013), le paramètre c_2 varie entre les valeurs 1,2 et 2. Ce paramètre varie en fonction du degré de complexité et d'irrégularité présenté par le bâtiment, correspondant à des valeurs d'autant plus élevées qu'elles se produisent ces deux caractéristiques. Le paramètre c_3 varie entre les valeurs 0,3 et 0,5 (Lagomarsino et Cattari, 2013).

Après avoir défini la courbe de fragilité, il est possible de déterminer la probabilité que la structure subisse chacun des états d'endommagement définis en utilisant la valeur du paramètre de la mesure d'intensité sismique (qui peut être, par exemple, le déplacement spectral) correspondant au point de performance déterminé de l'intersection entre le spectre de réponse et la courbe de capacité. La détermination de la probabilité discrète de l'apparition d'un état de dommage donné (puisque la courbe de fragilité est définie en fonction de la probabilité cumulative) est obtenue en utilisant l'équation 1.22, qui représente la différence entre les probabilités cumulatives (Vicente, 2008).

$$P(D_k = d) = P[D_k \geq d] - P[D_{k+1} \geq d] \quad (1.22)$$

Il convient de noter que k correspond à chaque état de dommage, avec une valeur croissante en fonction de la gravité de l'état, par exemple, un léger état de dommage aura une valeur $k=1$ et un état de dommage d'effondrement une valeur de k plus élevée.

À titre d'exemple, afin de rendre plus claire l'interprétation d'une courbe de fragilité, considérons que le paramètre Mesure d'intensité sismique est le décalage spectral, Supposons qu'une structure donnée soit caractérisée par les courbes de fragilité illustrées à la figure 2.12. Il est admis que la structure présente une certaine valeur X de déplacement spectral par rapport au point de performance pour l'intensité de l'action sismique considérée. Aussi bien que la probabilité d'obtenir chacun des états d'endommagement pour le décalage spectral de la valeur X est indiquée dans la figure.

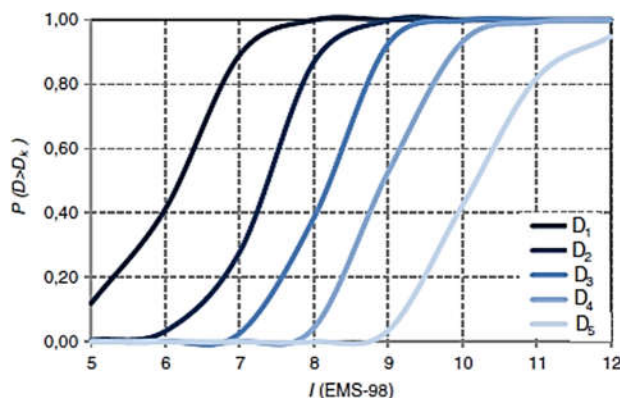


Fig. 2.12 - Courbes de fragilité de chaque probabilité pour un décalage spectral X donné (Vicente, Varum et Costa, 2009).

L'incertitude, qui ne peut être négligée, est inhérente au processus de détermination des valeurs des paramètres nécessaires pour définir les courbes de fragilité. Compte tenu de ce fait, lors du calcul de la probabilité d'atteindre ou de dépasser un certain état de dommage, ces facteurs sont pris en compte à l'aide du coefficient β_{ds} .

Cas d'étude

1. Introduction :

Dans ce chapitre, l'évaluation sismique des mosquées de la vieille ville du Ténès est faite, l'évaluation des performances sismiques des édifices étudiés est réalisée par l'application de la méthode N2. La méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique utilisées dans ce chapitre elle est appliquée à un édifice isolé et utilisent des données issues de la recherche sur les caractéristiques de ce édifice, puis appliquées à des techniques de modélisation numérique. Ces méthodes d'évaluation correspondent donc au niveau 3 de la 1^{ère} approche tel que mentionné dans le chapitre I «Différentes approches».

Puisqu'il est destiné à évaluer le comportement non linéaire de l'édifice soumis à une action sismique, les informations pertinentes sur l'édifice à l'étude sont fournies, à savoir sur ses caractéristiques géométriques. Les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs de la structure sont fournies, pour le cas de référence.

De manière générale, la vulnérabilité mesure la quantité de dommages causés par un séisme d'intensité donnée sur une structure (Orduña et al, 2008). Cependant, la quantité de dommages et l'intensité sismique sont des concepts sans définition numérique claire et rigoureuse. Selon Sandi (1986), la vulnérabilité sismique est une propriété intrinsèque de la structure, une caractéristique de son propre comportement dû à l'action d'un séisme décrit à travers une loi de cause à effet, où la cause est l'action sismique et l'effet est les dégâts. Cependant, l'ampleur des dommages identifiés dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments dépend de nombreux facteurs tels que l'intensité de l'action sismique, les conditions du sol, les matériaux de construction, les éléments structurels et l'état de conservation. Corsanego & Petrini (1990) ont classé les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité structurelle en quatre groupes :

1. Direct, qui estime de manière simple les dommages causés dans une structure par un séisme donné (par exemple FaMIVE et les fonctions de vulnérabilité ou matrices de probabilité de dommages (DPM) développées par Whitman et al. (1994)) ;
2. Indirect, qui détermine d'abord un indice de vulnérabilité de l'ouvrage puis évalue la relation entre dommage et intensité sismique (par exemple ATC-21 (1988)) ;
3. Conventionnelle, qui est essentiellement une méthode heuristique, introduisant un indice de vulnérabilité indépendant de la prédiction des dommages (ATC-13 (1985) et HAZUS (1999) sont des exemples de ce type) ;
4. Hybride, qui combine des éléments des méthodes précédentes avec des jugements d'experts (la méthode macrosismique conçue par Lagomarsino & Giovinazzi (2004) est un exemple de ce type).

Dolce et al. (1994) classe les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique en quatre groupes principaux en fonction des informations disponibles :

1. Empirique, qui évalue au moyen d'un questionnaire d'évaluation et d'inspection visuelle (exemples : EMS-98 (Grünthal, 1998) et GNDT II (GNDT-SSN, 1994) ;
2. Analytique, qui évalue au moyen d'analyses numériques sur un modèle 3D de structure développé par des outils informatiques ;
3. Expérimental, qui évalue au moyen d'essais déterminant les caractéristiques mécaniques et dynamiques d'une structure existante ;
4. Hybride, qui correspond à la combinaison de l'empirique, de l'analytique et de l'expérimental.

Il est possible d'évaluer la vulnérabilité sismique d'un grand groupe de bâtiments de manière assez générale (grossièrement) en suivant des méthodologies simples (qualitatives), ou de n'évaluer qu'un seul bâtiment de manière détaillée au moyen de méthodologies raffinées (quantitatives). Les méthodologies qualitatives permettent d'obtenir une qualification des bâtiments ou du groupe de bâtiments en termes de vulnérabilité sismique pouvant aller de faible à élever, tandis que les quantitatives en termes numériques (par exemple, force ultime et capacité de déplacement). Cependant, le choix de l'une de ces méthodes dépend des objectifs de l'étude, du type de résultats requis et des informations disponibles. D'autre part, les fonctions de fragilité, les matrices de probabilité de dommages et les fonctions de vulnérabilité obtenues à partir des dommages structurels observés lors de séismes passés dans une zone sismique étaient les outils privilégiés dans les études de risque sismique réalisées dans le passé (Benedetti & Petrini, 1984).

L'évaluation de la vulnérabilité sismique est une question de la plus haute importance à l'heure actuelle et est un concept largement utilisé dans les travaux liés à la protection des bâtiments. La vulnérabilité sismique représente la quantité de dommages qui pourraient être présents dans un bâtiment à la suite de la survenance d'un séisme d'une certaine intensité. Cependant, peu de travaux de recherche sont menés sur le développement d'outils d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages en maçonnerie. L'approche GNDT II est couramment utilisée pour identifier et caractériser les déficiences sismiques potentielles d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments au moyen d'une qualification par points pour chaque composant significatif de la structure. Cela permet à l'utilisateur de déterminer un indice de vulnérabilité sismique, *I_v*. L'une des méthodes les plus connues habituellement trouvées dans la littérature pertinente correspond à celle développée par Benedetti et Petrini

et al. (1984) et le GNDT-1990 (1990). Cette méthode a été largement utilisée en Italie au cours des dernières années et a été améliorée à la suite de l'expérimentation continue et des dommages observés de certains types de structures (principalement des bâtiments en maçonnerie non armée) après des tremblements de terre de différentes intensités, résultant en une vaste base de données de dommages et vulnérabilité.

2. Méthodologie simplifiée proposée pour l'évaluation de la vulnérabilité

Il existe une variété de méthodologies proposées par différents auteurs pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Le choix d'une certaine méthodologie d'évaluation dépend des aspects suivants : nature et objectif de l'étude, informations disponibles, caractéristiques du bâtiment ou groupe de bâtiments étudiés, méthodologie d'évaluation appropriée (qualitative ou quantitative), et de l'organisme qui recevra les résultats de l'étude (par exemple, gouvernement, organisations scientifiques, entreprises, etc.).

La formulation de l'indice de vulnérabilité proposée dans ce chapitre est basée essentiellement sur l'approche de niveau GNDT II, présentée dans GNDT-SSN (1994), pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un édifice en maçonnerie. Dans cette approche, la vulnérabilité globale est calculée comme la somme pondérée de 12 paramètres (tableau 3.1) utilisés dans la formulation de l'indice de vulnérabilité sismique. Ces 12 paramètres sont regroupés en quatre groupes. Le premier groupe comprend des paramètres, caractérisant le système de résistance du bâtiment et le type et la qualité de la maçonnerie, à partir du matériau (taille, forme et type de pierre), du tissu de maçonnerie et de la disposition et de la qualité des connexions entre les murs, de la capacité de résistance au cisaillement de la structure, évalue le rapport d'élancement des structures et les conditions de fondation du sol. Le deuxième groupe de paramètres se concentre principalement sur l'emplacement relatif des bâtiments et sur son interaction avec d'autres bâtiments, évalue l'irrégularité du plan et de l'élévation et identifie le nombre, la taille et l'emplacement des ouvertures murales, en raison de son importance dans le chemin de charge. Le troisième groupe de paramètres évalue les systèmes structuraux horizontaux, à savoir le type de connexion des planchers en bois et la nature impulsive des systèmes de toiture en pente. Enfin, le quatrième groupe de paramètres évalue les fragilités structurelles et le niveau de conservation des structures, ainsi que l'influence négative des éléments non structuraux avec de mauvaises conditions de connexion au système structurel principal.

Tableau 3.1 - Indice de vulnérabilité (I_v)

Paramètre group	Paramètre	Class (K_i)				Weight (W_i)	Vulnerability index
		A	B	C	D		
1. Structural building system	P1 Type of resisting system	0	5	20	50	0.75	$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} K_i W_i$ $0 \leq I_v^* \leq 650$ Normalized index $0 \leq I_v \leq 100$
	P2 Quality of the resisting system	0	5	20	50	1.00	
	P3 Conventional strength	0	5	20	50	1.50	
	P4 Maximum distance between walls	0	5	20	50	0.50	
	P5 Number of floors	0	5	20	50	1.50	
	P6 Location and soil conditions	0	5	20	50	0.75	
2. Irregularities and interactions	P7 Aggregate position and interaction	0	5	20	50	1.50	
	P8 Irregularity in plan	0	5	20	50	0.75	
	P9 Irregularity in elevation	0	5	20	50	0.75	
	P10 Wall façade openings and alignments	0	5	20	50	0.50	
3. Floor slabs and roofs	P11 Horizontal diaphragms	0	5	20	50	1.00	
	P12 Roofing system	0	5	20	50	1.00	
4. Conservation status and other elements	P13 Fragilities and conservation state	0	5	20	50	1.00	
	P14 Non-structural elements	0	5	20	50	0.50	

Ces 12 paramètres d'évaluation de la vulnérabilité sont liés à 4 classes de vulnérabilité croissante : A, B, C et D. Selon le paramètre et la classe choisie, la méthode attribue une valeur numérique (K_i) allant de 0 à 50, qui est affectée par un coefficient d'importance (Poids ' W_i '). Un poids (W_i) est attribué à chaque paramètre, allant de 0,25 pour les paramètres les moins importants (en termes de vulnérabilité structurelle) jusqu'à 1,5 pour les plus importants. Il reflète l'importance de chaque paramètre dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique de la structure élancée. Dans une dernière étape, l'indice de vulnérabilité sismique (I_v) de la structure sera obtenu à l'aide de l'équation présentée dans le tableau 3.1. L'indice de vulnérabilité obtenu comme la somme pondérée des 12 paramètres varie initialement entre 0 et 650, avec la valeur alors normalisé pour se situer dans la plage $0 \leq I_v \leq 100$. L'indice de vulnérabilité calculé peut ensuite être utilisé pour estimer les dommages structurels après une intensité spécifiée d'un événement sismique. La définition de chaque classe de paramètres et de leur poids est effectuée en tenant compte des travaux des auteurs précédents, de l'avis d'experts, de l'observation des dommages post-sismiques et de l'analyse paramétrique.

3. Cas d'étude les mosques de la vieille ville du Ténès :

Dans cette partie l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un édifice est une prospection qui s'inscrit dans le cadre de la gestion du risque sismique et ayant comme objectif principal de réduire ce risque. La réduction du risque sismique nécessite la mise en œuvre d'une série d'action préventives et de surveillance ainsi qu'une identification de la vulnérabilité des enjeux. Par conséquent une étude de la vulnérabilité sismique des édifices doit permettre l'estimation de leur faiblesse structurelle, vis à vis d'un événement sismique d'intensité donnée. D'autant plus qu'elle servirait à l'établissement d'une stratégie d'action

d'intervention sur ces bâtisses, visant l'augmentation de leur durée de vie et l'amélioration de leur comportement aussi bien post sismique que lors de la secousse sismique elle-même

3.1. Présentation de la ville du Ténès :

Ténès est une ville côtière de la mer Méditerranée, située au nord de l'Algérie, à mi-distance d'Alger (à environ 215 km à l'est et d'Oran 230 km à l'ouest, à 53 km au nord de Chlef, chef-lieu de la wilaya. Dans une région de forte sismicité, elle a été dévastée par deux tremblements de terre au cours du XXI^{ème} siècle. La sismicité associée à cette région résulte de l'activité sismique offshore de la région de contact des plaques africaine et euro-asiatique ainsi que de l'activité de diverses failles locales traversant le territoire (Oliveira et al, 2004).

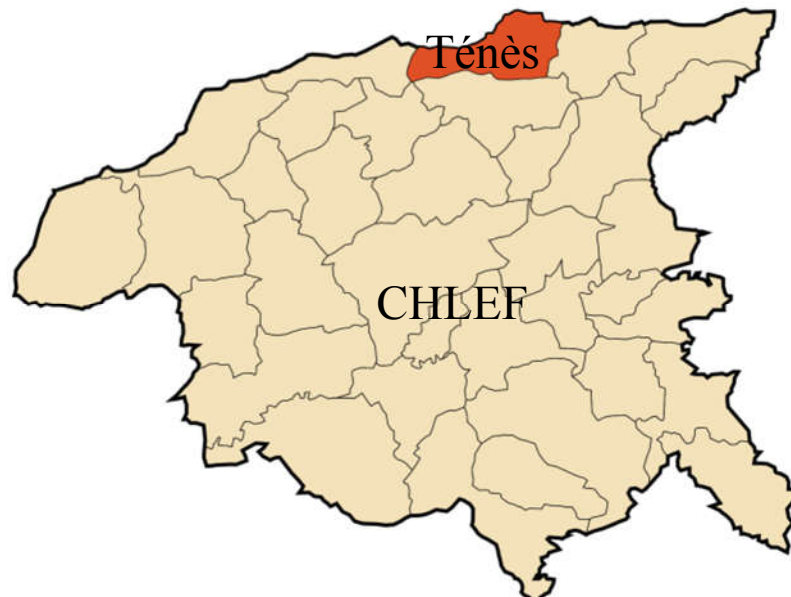


Fig. 3.1 - Carte administrative de Chlef.

La ville de Ténès est reconnue nationalement pour sa visibilité touristique et a un impact substantiel sur l'économie de la région. Elle est bordée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la chaîne montagneuse du Dahra, dont Jebel Sidi Marwan ou Ras Ténès. Rahman, qui protège naturellement les abords de la ville. L'urbanisation de la ville islamique est concentrée à environ deux kilomètres de la mer, sur un plateau dont la hauteur varie d'un côté à l'autre.

3.2. Vieux Ténès 'Ténès el Lahdar' :

Ténès créée au 9^{emé} siècle av. j-c, avec les occupations successives, les puniques, les berbères, les romains, les vandales, les byzantins, les arabes, les turcs et les français. Vers le VIII^e siècle av. j-c., les phéniciens fondent à Ténès un comptoir d'échanges commercial avec la population berbère. Les tombeaux existent à ce jour sur la côte de la ville. À partir de ce moment la ville porta le nom de Cartenna. Au III^e siècle av. j-c., située à l'ouest de le Numidie orientale, elle est placée sous le commandement de Syphax. Sous la domination carthaginoise, elle est délivrée par Massinissa à la fin de siècle. En l'an 30 av. j-c, selon l'historien romain Pline l'ancien, auguste y installe les soldats de la deuxième légion romaine. Aujourd'hui son découvert les vestiges datant de cette époque comme par exemple les mosaïques avec les inscriptions romaines : Caius, Fulcinius, Optatus, soldat de la deuxième légion, ou bien celle de victoria.



Fig. 3.2 - Vu sur la vieille ville de Ténès.

Ténès el Lahdar, ou vieux Ténès, correspond à la partie ancienne de la ville de Ténès ; En 1302 commencent la construction de Ténès el Lahdar par des marins andalous. La cité fut peuplée alors essentiellement pas des Andalous et des Berbères, appelée plus tard «vieux Ténès» par les colons français, où se trouve la mosquée de Sidi Maiza considérée comme la troisième mosquée du pays datant de début de X^{ème} siècle. Ténès devient alors une ville universitaire et certains géographes arabes tels que el Bakri (1068) ou al Yaakoubi viennent y travailler. Elle fut placée sous le commandement d'un prince 'Ibrahim Ben Mohamed ben Solaiman'. Cette ville est connue pour sa mosquée Sidi Bou Maiza bâtie au IX^e siècle.

4. Les mosquées :

La mosquée a acquis une position distinguée dans la communauté islamique car elle est liée à la pratique du culte puisqu'elle est la maison de Dieu dans laquelle la prière a lieu, jusqu'à ce que son nombre atteigne parfois plus que le besoin, et sur la base de son emplacement, les rues principales sont déterminées, les plans de quartier sont achevés et les principales installations de la ville sont distribuées.

On ne peut négliger le rôle que la mosquée jouait dans tous les aspects de la vie au sein de la cité islamique, en particulier dans les premiers siècles de l'État islamique : c'était un lieu d'enseignement d'adultes et enfants des sciences religieuses et d'autres sciences, et un moyen d'organiser les activités quotidiennes et la prise de rendez-vous pour la population par l'appel à la prière. Et c'est une obligation qui prévaut encore à ce jour, où les gens prennent leurs rendez-vous avant et après la prière, et il est utilisé comme un lieu d'hospitalité, car il est étrange que la maison de Dieu ait été la première destination, quels que soient ses besoins, que ce soit pour chercher des connaissances ou pour combler ses besoins dans la ville, sans négliger sa position dans l'organisation des affaires politiques et judiciaires du pays .

4.1. La Mosquée de Sidi Maiza :

Quant à la mosquée de la vieille ville de Tennis dans la province de Chlef, est l'une des plus anciennes mosquées anciennes d'Algérie. Elle a été classée comme la troisième plus ancienne mosquée en 1905 après la mosquée Sidi Okba à Biskra et la mosquée Sidi Bou Mediene à Tlemcen. Elle est située du côté nord-est, à l'écart de son centre, et occupe une position estimée à une hauteur de 46m au-dessus du niveau de la mer, ce qui lui permet de surveiller tous les bâtiments situés en contrebas. La hauteur du minaret sert de guide aux visiteurs de la ville de l'extérieur et de l'intérieur. Il est difficile de déterminer la date de la construction de cette mosquée car aucun document écrit ne l'indique, la seule date que l'on puisse déterminer à cet égard est qu'elle était présente à l'époque d'al-Bakri (d. 1094/ 487 AD), lorsqu'il dit dans le cadre de sa description de la ville et elle a une mosquée. Selon Marçais et Berque, elle remonte au IV^e siècle de l'Hégire correspondant au IX^e siècle de notre ère.

Elle a été connue sous le nom de « Mosquée Sidi Ma'iza 'Sidi Ahmed Boumaza' », et malgré son association avec ce nom, tous ceux qui s'y référaient pour décrire la ville ou l'étudier ne la mentionnaient pas et ne mentionnaient qu'une mosquée, la Mosquée Jami, ou

l'ancienne Mosquée du Ténès dans l'étude architecturale et archéologique menée par 'Dosso Lamar' en 1924: elle s'appelait 'La Mosquée de vieux Ténès'.

Elle occupait un espace complètement irrégulier en raison de l'émergence de certains de ses éléments architecturaux, tels que le minaret, les portes et le mihrab dans la saillie du minaret. Quant à la cour ouverte qui lui est attenante, elle est située au nord, et ses dimensions sont irrégulières en largeur, commençant par 6,90 m du côté ouest et diminuant progressivement jusqu'à atteindre 1,00 m à ses bords est, tandis que sa longueur atteint son extension maximale à 31,50 m, qui est la longueur de la mosquée en elle-même, et réduite en bas à 23,20 m.

La mosquée se compose d'un groupe de sections réparties dans cet espace, accessible par une porte qui la relie à la rue, et à partir de là, la salle de prière qui contient le mur de la qibla composé de l'ouverture du mihrab et d'un petit l'ouverture adjacente à l'est sert à placer la chaire et deux portes secondaires. La plus petite d'entre elles permet d'entrer dans la salle de prière des femmes, et dans le mur opposé au mur de la qiblah, il y a un minaret dans l'angle nord-ouest, et une porte qui mène à la cour arrière ouverte. Le toit de la mosquée est élevé sur un groupe de colonnes reliées entre elles par des arcs à travers lesquels se forment des rangées parallèles horizontales qui se croisent dans la zone centrale et des deux côtés avec des rangées verticales.

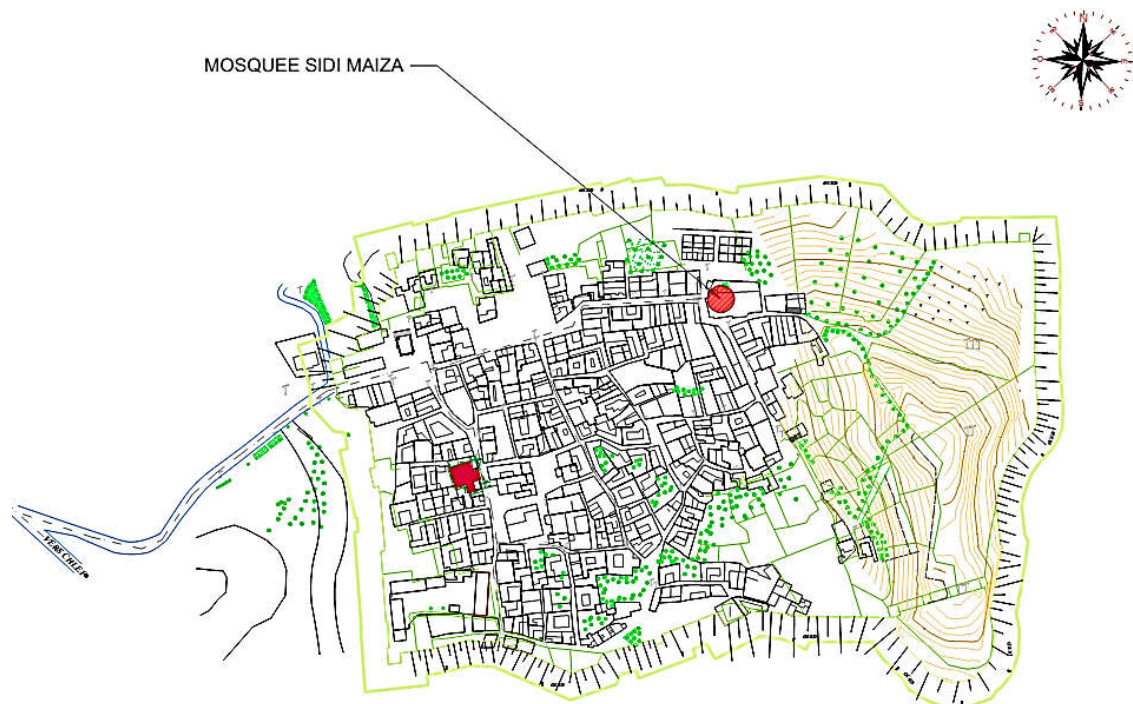


Fig. 3.3 - Plan de situation de la mosquée Sidi Maiza.

Bien qu'elle ait subi d'importants dégâts lors du grand séisme de 1954, ce qui a nécessité des travaux de réhabilitation qui ont modifié le plan original, la mosquée a, une nouvelle fois, été endommagée suite au séisme de 1980. Une étude de protection provisoire est alors menée mais ce n'est qu'en 1996 que l'Agence nationale d'archéologie procède à des travaux de réhabilitation.

Considérée par le Pr Rachid Bourouiba comme la plus ancienne mosquée d'Algérie encore intacte, la mosquée Sidi Bou Maïza a été construite dans un style s'inspirant de la Grande mosquée de Damas. Cet édifice religieux « de par ses nefs parallèles au mur de la qibla s'apparente à la première mosquée de Médine que le Prophète aurait aidé à édifier de ses propres mains et dont le modèle fut repris à Damas (705-715) ».

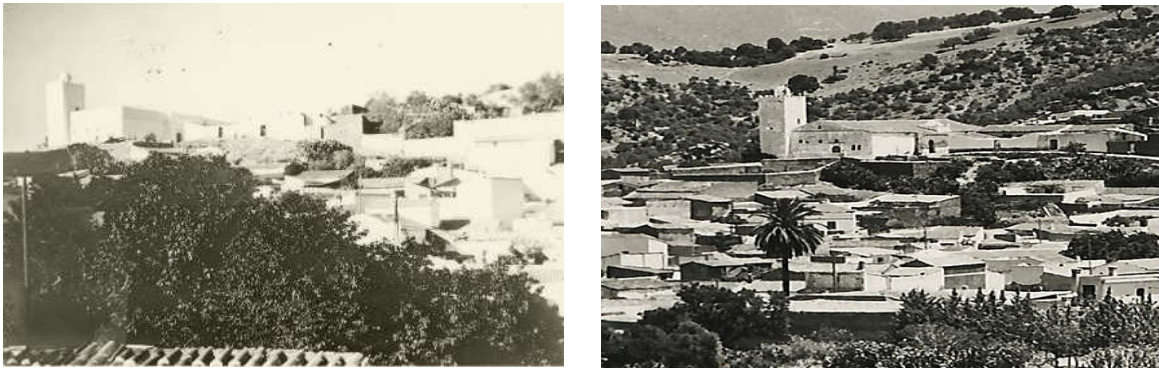


Fig. 3.4 - La Mosquée Sidi Maïza du Vieux Ténès daterait du 9^{ème} Siècle.

Lorsqu'on pénètre à l'intérieur de cet édifice séculaire, on retrouve accolé à la façade nord de la mosquée une salle d'ablutions et une petite cour dans laquelle se trouve le tombeau de cheikh Sidi M'ammâr. Puis, en empruntant une petite entrée légèrement en biais, on accède à la salle de prières. Celle-ci ressemble par son style à celle des mosquées de Damas, Cordoue, Kairouan ou la mosquée al-Hassan de Rabat.

Outre ses cinq nefs parallèles au mur qibli, divisés en onze travées dont quatre supportant des arcs perpendiculaires au mur de la qibla, la mosquée possède un mihrâb sur plan polygonal avec une niche octogonale. Un modèle que l'on retrouve dans toutes les mosquées médiévales de l'Ouest algérien et qui ressemble fortement à celui des grandes mosquées de Kairouan et de Cordoue. A la seule différence que le mihrâb de Ténès est « décalé d'une nef vers l'est et est précédé d'une coupole qui émerge du toit avec une calotte écrasée et quatre merlons d'angle ». Selon R. Bourouiba « ce décalage aurait été volontaire à l'origine dans un souci de respect du type médinois ».



Fig. 3.5 - La Mosquée Sidi Maiza du Vieux Ténès.

La mosquée Sidi Maiza constitue un lieu d'intersection de parcours d'implantation et le 3^{ème} parcours de consolidation. Elle est entourée par des habitations. Sa localisation nous permettrons de la repéré même si on est loin de la ville.

4.2. Transformation de la mosquée Sidi Maiza :

4.2.1. La mosquée avant 1954 :

À l'origine, cette salle était couverte de terrasses, mode de couverture que certains auteurs renvoient à l'époque romaine, alors que d'autres y voient que la toiture de la mosquée Sidi Maiza est de même style que la toiture de la mosquée de Omar Ibn El Khatab à Ténès. La toiture a subi plusieurs modifications et restaurations depuis l'occupation de la ville par les français en 1843.

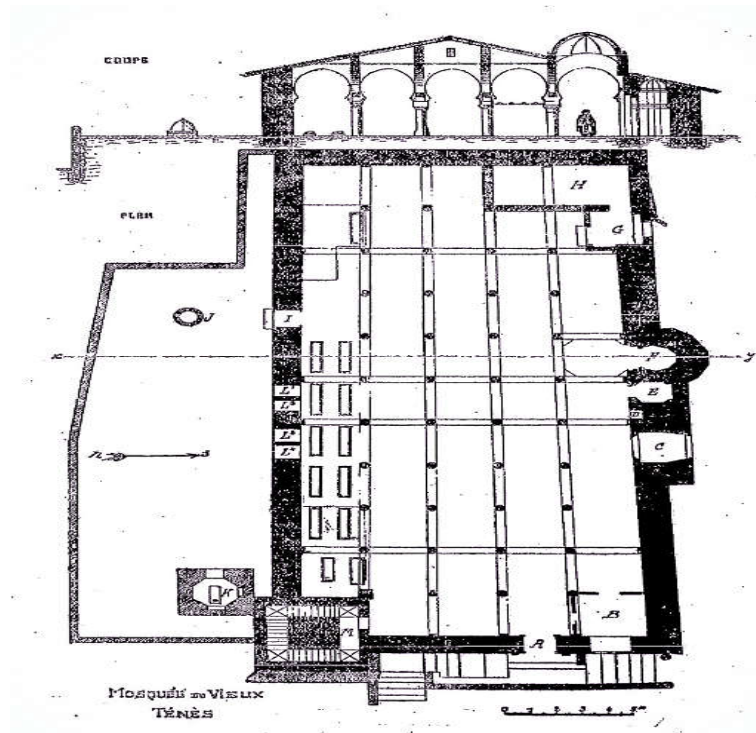


Fig. 3.6 - Plan et coupe initiale de la mosquée Sidi Maiza.

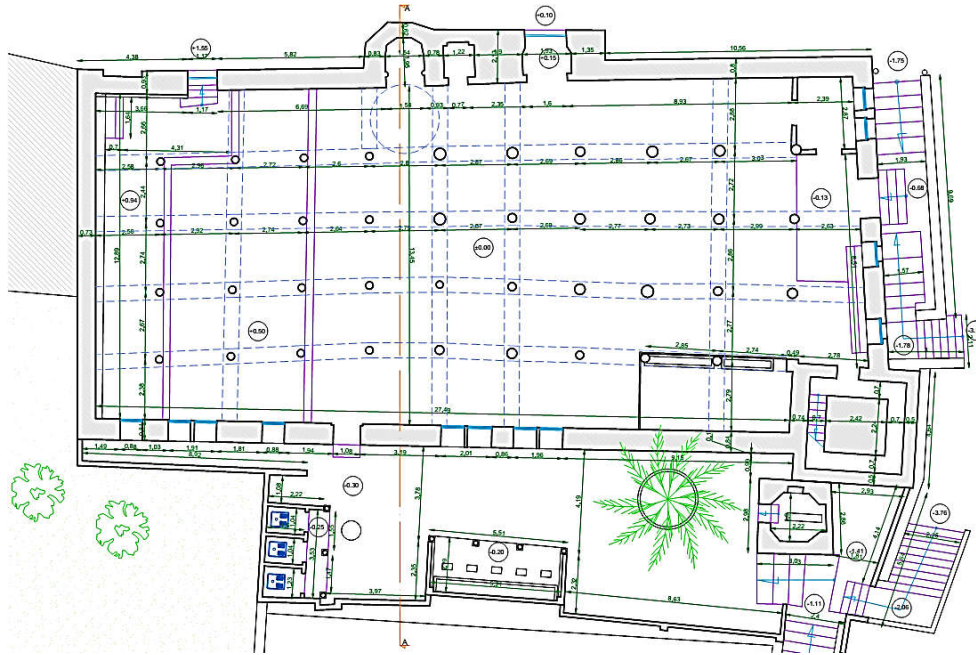


Fig. 3.8 - Plan de la mosquée Sidi Maiza.

4.2.3. L'enveloppe extérieure de la mosquée :

La mosquée est de forme rectangulaire, brisé par la forme de sa cour de son côté Nord. Elle se dresse dans un lieu surélevé. L'entrée principale est située dans la façade ouest, des escaliers ont été construits pour rattraper le niveau de la pente du terrain ou on trouve 2 canons ottomans planté. Deux autres entrées ont été aménagées dans la façade sud : la première sur le côté occidental du mihrab et la seconde, destinée aux femmes, est sur le côté oriental du mihrab. On trouve une autre entrée à l'angle nord-ouest qui mène directement à la cour.

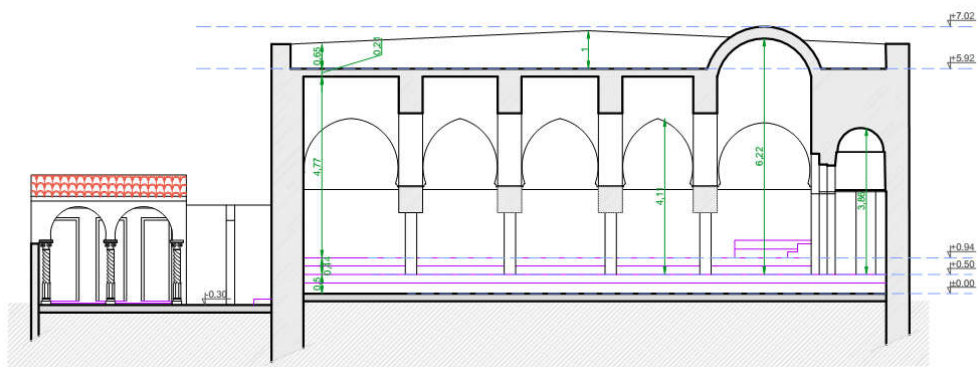


Fig. 3.9 - Plan de coup de la mosquée Sidi Maiza.

Observant les façades, nous constatons que les ouvertures sont à un nombre réduit, les murs sont presque aveugles, les façades de la mosquée contiennent plus de plein que de vide. La salle de prière s'ouvre sur l'extérieur par des petites fenêtres avec arc outrepassé,

sept Fenêtres qui donnent sur la cour et par cinq autres sur la façade ouest. La toiture actuelle est une dalle en béton.



Fig. 3.10 - Façades extérieures.



Fig. 3.11 - Vues de l'intérieures de la mosquée



Fig. 3.12 - Vus de toiture de la mosquée.

4.3. La Mosquée de Lalla Aziza :

Construite par Sidi Merouane El-Bahri, saint protecteur de la ville de Ténès, en hommage à sa fille Lalla Aziza bent Soltane, décédée très jeune, située dans la partie nord du vieux Ténès, est dotée d'une architecture simple, semblable à celle des autres mosquées de l'époque. On ne sait pas exactement à quelle période elle fut édifée, on sait seulement qu'une cruche de dix kilos de pièces en argent retrouvée à l'entrée de l'édifice religieux remonterait au Xe siècle de notre ère (4^e siècle de l'Hégire). La valeur de cette mosquée est surtout sentimentale puisque Sidi Merouane a voulu perpétuer la mémoire de sa chère fille, prématurément disparue de suite de maladie, en édifiant un lieu de culte où est évoqué quotidiennement le nom de Dieu.

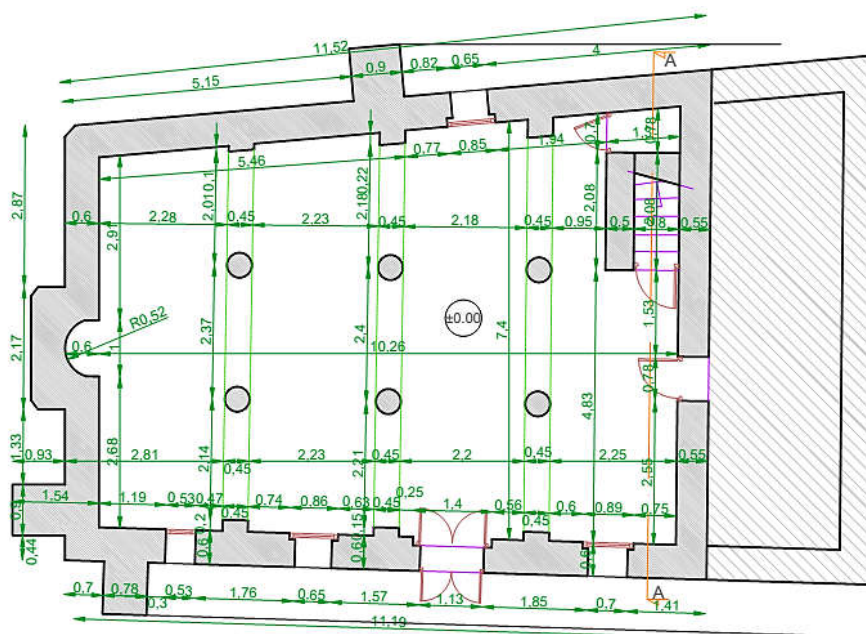


Fig. 3.13 - Plan de mosquée Lalla Aziza.

La mosquée occupe un espace régulier de 8,00 x 14,50 m auquel on accède par une porte dans le mur latéral dont la largeur est de 1,10 m. Elle se compose de deux petites salles, une petite salle située à l'arrière de la mosquée, ses dimensions sont de 2,30 m x 7,00 m, elle sert de maison d'ablution. A côté se trouve une salle de prière mesurant 7,00 x 10,70 m. Elle se compose de trois rangées de colonnes et de piliers portant des arcs parallèles au mur de la qibla, et partant d'un mihrab au milieu du mur de la qiblah. Au fond de la salle se trouve un escalier menant au plafond dont l'ouverture supérieure est couverte d'un petit minaret surmonté d'un dôme.

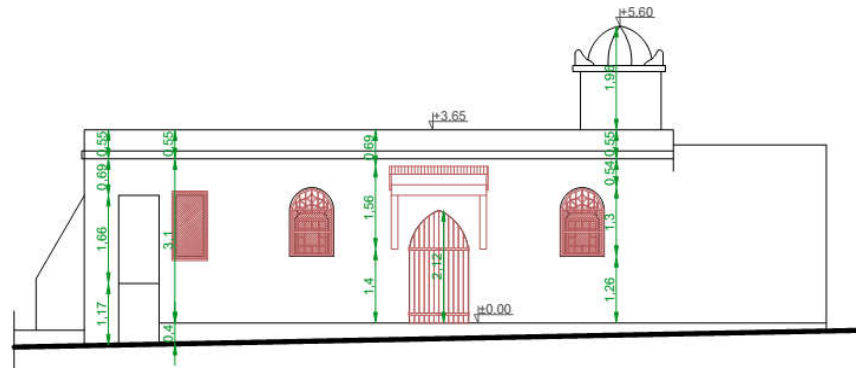


Fig. 3.14 - Plan de façade principale de la mosquée Lalla Aziza.



Fig. 3.15 - Façades extérieures.



Fig. 3.16 - Vues d'intérieures.



Fig. 3.17 - Vue de la toiture.

4.4. La Mosquée de Sidi Bel Abbas:

Située sur le parcours matrice qui relie Bab el Kabla à Bab el Khouikha, elle est considérée comme l'un des monuments historique ayant conservé son aspect original. Il s'agit d'une petite mosquée avec un plafond fait de bois et des colonnes surmontées de chapiteaux de différents types de l'époque romaine, joints entre elles par des tirants. Ce monument a subi plusieurs essais de restauration par des opérateurs non habilités, chose qui a modifié son aspect ancien. Il sert actuellement de lieu de rencontre pour les fêtes annuelles de la confrérie des «Issaouas». La ville de Ténès, anciennement Cartenna, comme l'ensemble des villes du Maghreb ancien connut différentes civilisations; Phénicienne, Romaines, berbère, médiévale, Turque et Française. En effet, les Idrissides seraient les premiers fondateurs de la ville, comme toute ville islamique la ville de Ténès à cette époque était entourée par des murailles en pierre pesés par des portes dont la mosquée était la lie le plus fréquenté et atours de laque s'organise les habitations. La mosquée de Sidi Maïza est la troisième, pour d'aucuns la deuxième, du pays du point de vue ancienneté après celle de Sidi Okba à Biskra et Sidi Boumediene à Tlemcen.



Fig. 3.18 - Plan de masse mosquée Sidi Bel Abbas.

Cette mosquée occupe un espace irrégulier, si bien que sa longueur atteint 16,90 m à son extension maximale et 14,70 m au fond, et sa largeur est de 10,80 m, et elle se compose de deux parties de 2,00 m, et sur le côté droit du hall il y a une petite salle mesurant 3,10 mx 2,00 m contenant une grande terrasse qui servait au repos, à la literie ou même au sommeil, et était utilisée dans une période antérieure comme lieu d'ablution achevé en 1957 après JC, et la deuxième section est la prière hall Sa longueur sur le côté long est de 13,00 m et sur le côté court est de 11,10m de largeur et 9,50 m. Il se compose de dix colonnes disposées en deux rangées parallèles, chacune de cinq, portant des arcs faisant face au mur de la qiblah sur lequel repose le plafond, et un mihrab au milieu du mur de la qiblah. Cette mosquée est adjacente aux côtés sud des deux côtés. Al Gharbia est une zone qui servait de cimetière selon l'ancien plan de la ville, et c'est actuellement un bâtiment démoli.

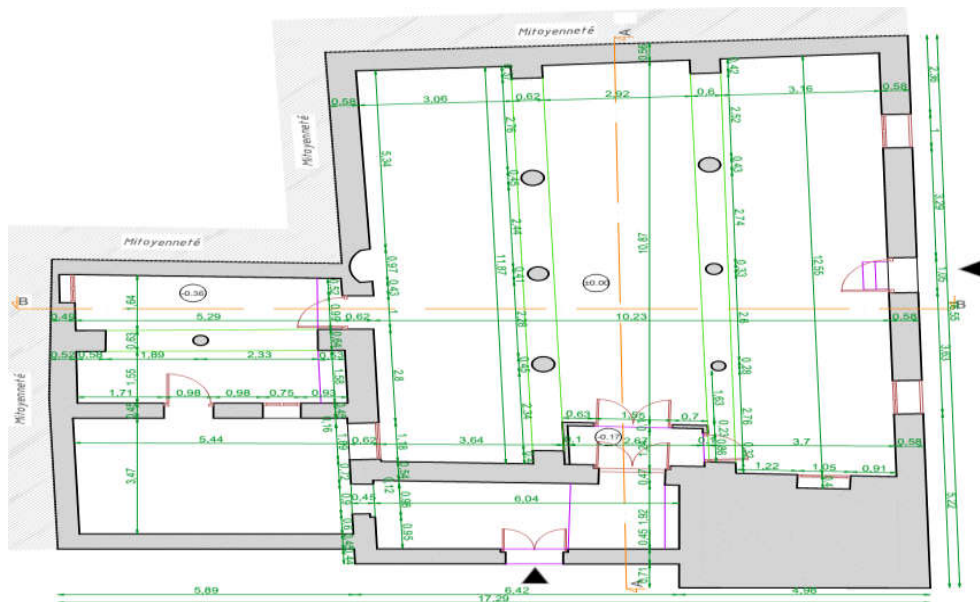


Fig. 3.19 - Plan de la mosquée Sidi Bel Abbas.

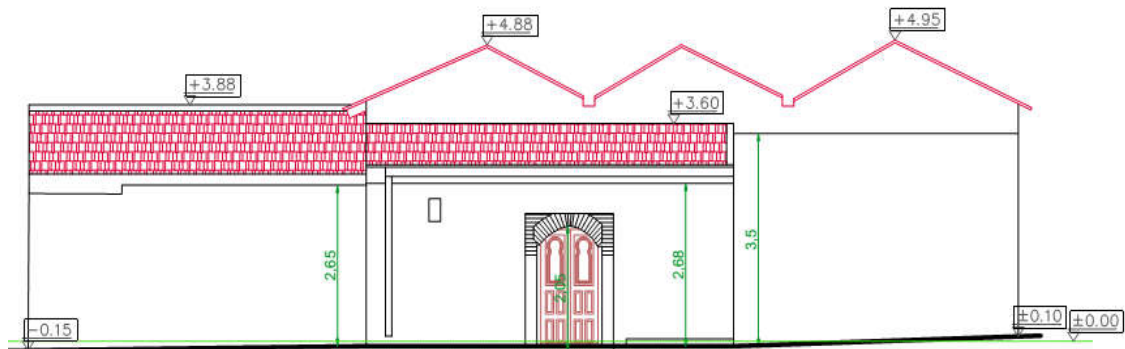


Fig. 3.20 - Plan de façade principale de la mosquée Sidi Bel Abbas.



Fig. 3.21 - Façades extérieures.



Fig. 3.22 - Vues d'intérieures.



Fig. 3.23 - Vus de la toiture.

5. CONCLUSION

La méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique adaptée dans cette étude de cas est spécialement développée pour les structures de maçonnerie, comme les mosquées. Cependant les incertitudes associées aux courbes de vulnérabilité empiriques et à la qualité des données de classification de la vulnérabilité restent des questions qui doivent être approfondies en ce qui concerne la collecte de données post-sismiques pour obtenir des résultats encore plus fiables. La corrélation de cette méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité avec la méthode macrosismique a permis le développement de scénarios de dommages et de pertes pour la réduction et la gestion des risques sismiques. L'analyse des scénarios déterministes de dommages et de pertes créés dans cette étude permet de vérifier la relation de ces scénarios avec les fragilités structurelles identifiées et les caractéristiques de construction des mosquées.

Les villes de la vallée de Ténès sont situées dans une région à fort risque sismique, par conséquent le niveau de dommages associés aux événements sismiques est considérable modérés à élevés. Le niveau de dommages estimé pour ces mosquées est un indicateur de leur faible résistance aux actions sismiques, et les valeurs modérées à élevées de dommages et de pertes obtenues pour les intensités VI et IX sont une conséquence de la grande vulnérabilité de ces mosquées. Par conséquent, des interventions axées sur l'amélioration des performances sismiques et la conservation du patrimoine culturel, assistées par la caractérisation des matériaux et la modélisation mécanique, sont nécessaires pour la réduction du risque sismique. De plus l'étude comparative présentée dans la dernière section de ce chapitre a montré l'impact et l'importance des actions de modernisation dans la réduction du risque sismique et la rentabilité.

En conclusion, une évaluation rigoureuse de la vulnérabilité et la mise en œuvre de solutions de modernisation appropriées peuvent réduire considérablement les dommages physiques et les pertes économiques résultant de futurs événements sismiques. En ce sens les études basées sur des approches macrosismiques jouent un rôle important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique du patrimoine culturel dans les régions sujettes aux séismes. Cette recherche permet le développement d'une base de données complète et un outil d'orientation pour les autorités locales responsables de la réhabilitation et de la restauration des mosquées.

Résultats et interprétation

1. Introduction :

Dans ce chapitre, l'évaluation sismique des mosquées de la vieille ville du Ténès est faite, l'évaluation des performances sismiques des édifices étudiés est réalisée par l'application de la méthode N2. La méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique utilisées dans ce chapitre elle est appliquée à un édifice isolé et utilisent des données issues de la recherche sur les caractéristiques de ce édifice, puis appliquées à des techniques de modélisation numérique. Ces méthodes d'évaluation correspondent donc au niveau 3 de la 1^{ère} approche tel que mentionné dans le chapitre I «Différentes approches».

Puisqu'il est destiné à évaluer le comportement non linéaire de l'édifice soumis à une action sismique, les informations pertinentes sur l'édifice à l'étude sont fournies, à savoir sur ses caractéristiques géométriques. Les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs de la structure sont fournies, pour le cas de référence.

De manière générale, la vulnérabilité mesure la quantité de dommages causés par un séisme d'intensité donnée sur une structure (Orduña et al, 2008). Cependant, la quantité de dommages et l'intensité sismique sont des concepts sans définition numérique claire et rigoureuse. Selon Sandi (1986), la vulnérabilité sismique est une propriété intrinsèque de la structure, une caractéristique de son propre comportement dû à l'action d'un séisme décrit à travers une loi de cause à effet, où la cause est l'action sismique et l'effet est les dégâts. Cependant, l'ampleur des dommages identifiés dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments dépend de nombreux facteurs tels que l'intensité de l'action sismique, les conditions du sol, les matériaux de construction, les éléments structurels et l'état de conservation. Corsanego & Petrini (1990) ont classé les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité structurelle en quatre groupes :

1. Direct, qui estime de manière simple les dommages causés dans une structure par un séisme donné (par exemple FaMIVE et les fonctions de vulnérabilité ou matrices de probabilité de dommages (DPM) développées par Whitman et al. (1994)) ;
2. Indirect, qui détermine d'abord un indice de vulnérabilité de l'ouvrage puis évalue la relation entre dommage et intensité sismique (par exemple ATC-21 (1988)) ;
3. Conventionnelle, qui est essentiellement une méthode heuristique, introduisant un indice de vulnérabilité indépendant de la prédiction des dommages (ATC-13 (1985) et HAZUS (1999) sont des exemples de ce type) ;
4. Hybride, qui combine des éléments des méthodes précédentes avec des jugements d'experts (la méthode macrosismique conçue par Lagomarsino & Giovinazzi (2004) est un exemple de ce type).

Dolce et al. (1994) classe les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique en quatre groupes principaux en fonction des informations disponibles :

1. Empirique, qui évalue au moyen d'un questionnaire d'évaluation et d'inspection visuelle (exemples : EMS-98 (Grünthal, 1998) et GNDT II (GNDT-SSN, 1994) ;
2. Analytique, qui évalue au moyen d'analyses numériques sur un modèle 3D de structure développé par des outils informatiques ;
3. Expérimental, qui évalue au moyen d'essais déterminant les caractéristiques mécaniques et dynamiques d'une structure existante ;
4. Hybride, qui correspond à la combinaison de l'empirique, de l'analytique et de l'expérimental.

Il est possible d'évaluer la vulnérabilité sismique d'un grand groupe de bâtiments de manière assez générale (grossièrement) en suivant des méthodologies simples (qualitatives), ou de n'évaluer qu'un seul bâtiment de manière détaillée au moyen de méthodologies raffinées (quantitatives). Les méthodologies qualitatives permettent d'obtenir une qualification des bâtiments ou du groupe de bâtiments en termes de vulnérabilité sismique pouvant aller de faible à élever, tandis que les quantitatives en termes numériques (par exemple, force ultime et capacité de déplacement). Cependant, le choix de l'une de ces méthodes dépend des objectifs de l'étude, du type de résultats requis et des informations disponibles. D'autre part, les fonctions de fragilité, les matrices de probabilité de dommages et les fonctions de vulnérabilité obtenues à partir des dommages structurels observés lors de séismes passés dans une zone sismique étaient les outils privilégiés dans les études de risque sismique réalisées dans le passé (Benedetti & Petrini, 1984).

L'évaluation de la vulnérabilité sismique est une question de la plus haute importance à l'heure actuelle et est un concept largement utilisé dans les travaux liés à la protection des bâtiments. La vulnérabilité sismique représente la quantité de dommages qui pourraient être présents dans un bâtiment à la suite de la survenance d'un séisme d'une certaine intensité. Cependant, peu de travaux de recherche sont menés sur le développement d'outils d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages en maçonnerie. L'approche GNDT II est couramment utilisée pour identifier et caractériser les déficiences sismiques potentielles d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments au moyen d'une qualification par points pour chaque composant significatif de la structure. Cela permet à l'utilisateur de déterminer un indice de vulnérabilité sismique, *I_v*. L'une des méthodes les plus connues habituellement trouvées dans la littérature pertinente correspond à celle développée par Benedetti et Petrini

et al. (1984) et le GNDT-1990 (1990). Cette méthode a été largement utilisée en Italie au cours des dernières années et a été améliorée à la suite de l'expérimentation continue et des dommages observés de certains types de structures (principalement des bâtiments en maçonnerie non armée) après des tremblements de terre de différentes intensités, résultant en une vaste base de données de dommages et vulnérabilité.

2. Évaluation de la vulnérabilité des mosquées :

2.1. Évaluation de la vulnérabilité sismique

Les mosquées de la vieille ville du Ténès ont été évaluées, chaque mosquée se voyant attribuer un indice de vulnérabilité I_v . La valeur I_v moyenne est comprise entre 40 et 41, correspondant à une typologie de construction en terre et briques anciennes et des classes de vulnérabilité A–B en ajustant la description constructive décrite par Giovinazzi et Lagomarsino (2004), en se référant à l'échelle EMS-98 (Grünthal 1998). Le tableau 3.2 montre la correspondance entre les différentes classes de vulnérabilité et la valeur calculée de la vulnérabilité moyenne, $I_{v,mean}$.

Tableau 3.2 - Interpretation des dommages, D_k (Giovinazzi 2005).

Nombre total	Intensité, IU (EMS-98)				
	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
Effondrement	0 (0%)	1 (33%)	2 (67%)	2 (67%)	3 (100%)
Inutilisables	2 (67%)	1 (33%)	1 (33%)	1 (33%)	0 (0%)

Alors qu'une évaluation détaillée de l'ensemble des mosquées a abouti à une valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité de $I_{v,mean} = 40,89$. Toutes les mosquées ont un indice de vulnérabilité supérieure à 40 (équivalent à la classe de vulnérabilité B selon EMS-98). Les valeurs maximales et minimales I_v obtenues pour l'ensemble des mosquées évalué sont respectivement de 72,31 et 9,47.

2.2. Analyse des paramètres évalués pour l'indice de vulnérabilité calculé

L'attribution de classes de vulnérabilité à chaque paramètre est considérée comme fiable, compte tenu du fait que l'inspection de toutes les mosquées a été effectuée en détail et que des informations géométriques précises étaient disponibles. Par conséquent l'incertitude de la valeur de l'indice de vulnérabilité évalué I_v , est considérée comme faible.

Les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité révèlent les caractéristiques importantes suivantes :

- Le paramètre P1 a une influence significative sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classés C ou D (c'est-à-dire en raison de l'absence de tirants ou de poutres annulaires ainsi que d'une faible connexion entre les murs orthogonaux) ;
- Le paramètre P2 a une influence intermédiaire sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classés en B ou C (c'est-à-dire en raison de la construction de ces structures avec une maçonnerie en brique de mauvaise qualité) ;
- Le paramètre P3 a une forte influence sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classés D (c'est-à-dire en raison de la capacité de résistance minimale au cisaillement).
- Le paramètre P4 présente des classes A, B, C et D bien réparties. Par conséquent, son influence sur l'indice de vulnérabilité final est faible à élever (c'est-à-dire en raison de la variation des caractéristiques géométriques entre les mosquées).
- Le paramètre P5 a une influence significative sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classés C (c'est-à-dire en raison de l'emplacement de toutes les fondations des mosquées sur un site de sol mou à moyen sur une zone de plaine).
- Le paramètre P6 présente une très faible influence sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont hautement classées en A, (c'est-à-dire en raison de la construction isolée de ces structures)
- Le paramètre P7 présente une influence faible et élevée sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classés en A ou classés en D (c'est-à-dire en raison de la taille et du nombre d'ouvertures de porte. Les mosquées avec 1 et 4 ouvertures de porte sont de classe A et avec 3 ouvertures de porte sont de classe (D).
- Le paramètre P8 présente les classes distribuées A, B, C et D, par conséquent, son influence sur l'indice de vulnérabilité final est faible à élever (c'est-à-dire en raison de la variation de l'épaisseur des parois et de la présence d'un minaret parmi les mosquées).
- (i) Le paramètre P9 est réparti entre les classes A et B. Par conséquent, son influence sur l'indice de vulnérabilité final est faible à élever (c'est-à-dire en raison de la variation de la taille, de l'emplacement et du nombre des ouvertures parmi les mosquées).
- Le paramètre P10 a une forte influence sur l'indice de vulnérabilité final, car les

mosquées sont classées comme D (c'est-à-dire en raison de toits de type déformable avec une nature de poussée).

- Le paramètre P11 est réparti entre les classes A et B. Par conséquent, son influence sur l'indice de vulnérabilité final est faible à élever (c'est-à-dire en raison de la variation de l'état de conservation entre les mosquées).
- Le paramètre P12 a une influence intermédiaire sur l'indice de vulnérabilité final, car les mosquées sont classées en B ou C (c'est-à-dire en raison de la présence d'éléments non structuraux bien à mal connectés).

2.3. Courbes de vulnérabilité

Après avoir résolu l'incomplétude à l'aide de la théorie des probabilités, l'ambiguïté et le chevauchement des définitions linguistiques sont ensuite abordés à l'aide de la théorie des ensembles flous (Giovinazzi, 2005), dans laquelle les limites supérieures et inférieures de la corrélation entre l'intensité macrosismique et le degré moyen de dommage (μ_D) de la distribution sont définis et dérivés pour chaque typologie de bâtiment et vulnérabilité. Le degré de dommage moyen (μ_D) nous permet de connaître la distribution attendue du niveau de dommage, où il représente une interprétation quantitative des conséquences causées par le séisme sur les éléments structuraux et non structuraux (Lagomarsino et al, 2004). Pour la mise en œuvre opérationnelle de la méthodologie, une expression analytique proposée par Lagomarsino et Podestà (2004) pour les églises et reprise par Curti (2007) et Balbi et al. (2005) pour la tour est adoptée. Cette expression corréle le danger avec le niveau de dommage moyen ($0 < \mu_D < 5$) de la distribution des dommages (distribution bêta discrète) en termes de valeur de vulnérabilité, comme le montre l'équation (1).

$$\mu_D = 2.5 * \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 3.4375 * V - 8.9125}{Q} \right) \right] \quad (1)$$

où I est l'aléa sismique décrit en termes d'intensité macrosismique, V l'indice de vulnérabilité utilisé dans la méthode macrosismique et Q un facteur de ductilité.

L'indice de vulnérabilité V détermine la position de la courbe, tandis que le facteur de ductilité Q détermine la pente de la fonction de vulnérabilité (le taux de dommages augmente avec l'augmentation de l'intensité). Dans cette étude un facteur de ductilité de 2 est adopté, une valeur suggérée par Curti (2007) et Balbi et al. (2005).

La figure 3.24 montre la comparaison des courbes de vulnérabilité tracées pour les valeurs maximales, moyennes et minimales possibles de l'indice de vulnérabilité en

utilisant la méthodologie proposée pour les structures de maçonnerie élancées avec les valeurs de l'indice de vulnérabilité présentées par Giovinazzi & Lagomarsino (2004) pour la topologie des bâtiments EMS-98. Bien qu'il puisse y avoir une différence entre les valeurs de l'indice de vulnérabilité entre les structures de maçonnerie élancées et les topologies de construction, il a été adopté en raison du manque d'informations suffisantes sur l'évaluation de la vulnérabilité pour les structures de maçonnerie élancées. Cependant, les valeurs de l'indice de vulnérabilité de Giovinazzi & Lagomarsino (2004), qui ressemblent étroitement au type de maçonnerie des structures élancées, ont été prises en compte (c'est-à-dire la brique non armée et la maçonnerie en pierre). De plus, la valeur moyenne adoptée ici ressemble beaucoup à la valeur présentée par Lagomarsino et al. (2004) pour les tours. Cependant, la valeur moyenne retenue ici est légèrement inférieure à la valeur présentée par Curti (2007).

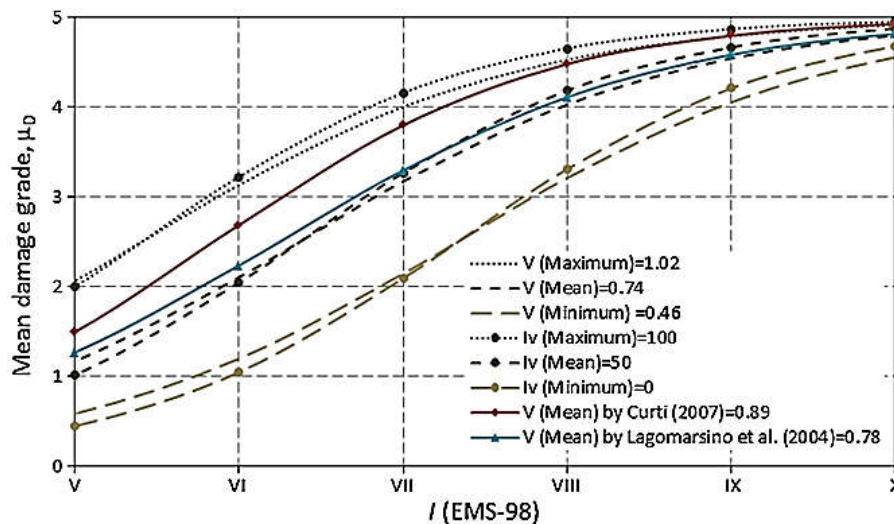


Fig. 3.24- Corrélation entre les courbes de vulnérabilité pour la valeur maximale, moyenne et minimale d' I_v .

En comparant la courbe de vulnérabilité donnée par deux méthodes différentes par rapport à une valeur moyenne centrale de dommage ($\mu_D = 2,5$), la corrélation analytique suivante a été établie entre les indices de vulnérabilité des deux méthodes :

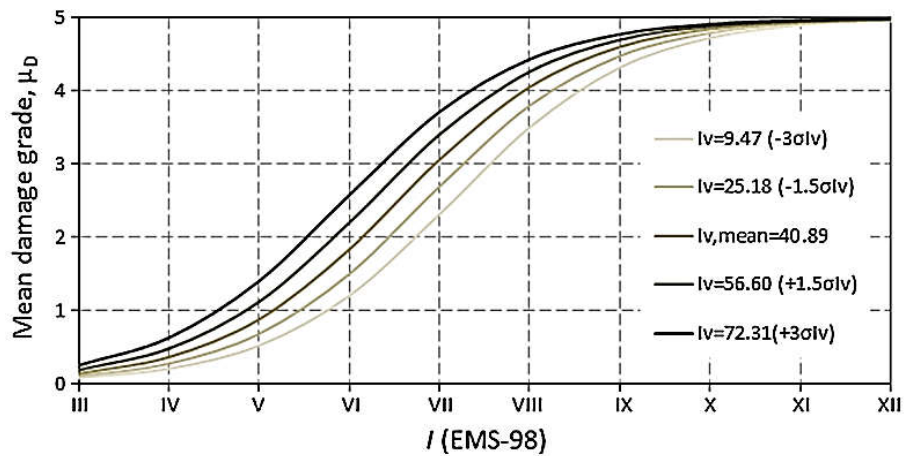
$$V = 0.46 + 0.0056I_v \quad (2)$$

Via l'équation (2) l'indice de vulnérabilité, I_v (utilisé dans l'approche GNDT II), peut être transformé en indice de vulnérabilité, V (utilisé dans la méthode macrosismique), permettant le calcul du degré moyen de dommage par l'équation (1) et par la suite l'estimation des dommages et des pertes.

La méthode proposée ici est basée sur l'approche originale du niveau GNDT II (GNDT-

SSN 1994) bien qu'avec quelques modifications (comme discuté dans la section 2). Cependant les paramètres ‘backbone’ partagés par chaque évaluation de vulnérabilité selon Combescure et al. (2005), sont essentiellement les mêmes.

De ce fait, la similitude en termes de définition de l'indice de vulnérabilité des deux méthodologies (originale et améliorée) permet d'utiliser les mêmes fonctions de vulnérabilité reliant la vulnérabilité à un indice de dommage (Benedetti et Petriani 1984). Pour la mise en œuvre opérationnelle de la méthodologie, une expression analytique proposée par Lagomarsino et Podestà (2004) pour les églises et reprise par Curti (2007) et Balbi et al. (2007) pour les tours est adopté. Cette expression met en corrélation le danger avec le degré de dommage moyen ($0 \leq \mu_D \leq 5$) de la distribution des dommages (distribution bêta discrète) en termes de valeur de vulnérabilité, comme le montre la figure



3.25.

Fig. 3.25 - Courbe de vulnérabilité des mosquées.

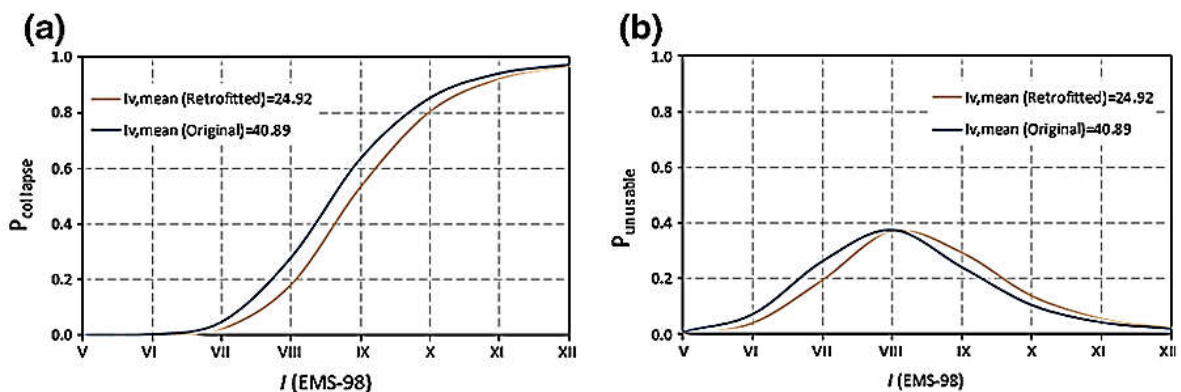


Fig. 3.28 - Comparaison de l'évaluation de la probabilité pour $I_{v, \text{mean}}(\text{Original})=40,89$ et $I_{v, \text{mean}}(\text{Retrofitted})=24,92$ (a) une probabilité d'effondrement ; (b) probabilité des mosquées inutilisables.

3. CONCLUSION

La méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique adaptée dans cette étude de cas est spécialement développée pour les structures de maçonnerie, comme les mosquées. Cependant les incertitudes associées aux courbes de vulnérabilité empiriques et à la qualité des données de classification de la vulnérabilité restent des questions qui doivent être approfondies en ce qui concerne la collecte de données post-sismiques pour obtenir des résultats encore plus fiables. La corrélation de cette méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité avec la méthode macrosismique a permis le développement de scénarios de dommages et de pertes pour la réduction et la gestion des risques sismiques. L'analyse des scénarios déterministes de dommages et de pertes créés dans cette étude permet de vérifier la relation de ces scénarios avec les fragilités structurelles identifiées et les caractéristiques de construction des mosquées.

Les villes de la vallée de Ténès elle et situées dans une région à fort risque sismique, par conséquent le niveau de dommages associés aux événements sismiques est considérable modérés à élevés. Le niveau de dommages estimé pour ces mosquées est un indicateur de leur faible résistance aux actions sismiques, et les valeurs modérées à élevées de dommages et de pertes obtenues pour les intensités VI et IX sont une conséquence de la grande vulnérabilité de ces mosquées. Par conséquent, des interventions axées sur l'amélioration des performances sismiques et la conservation du patrimoine culturel, assistées par la caractérisation des matériaux et la modélisation mécanique, sont nécessaires pour la réduction du risque sismique. De plus l'étude comparative présentée dans la dernière section de ce chapitre a montré l'impact et l'importance des actions de modernisation dans la réduction du risque sismique et la rentabilité.

En conclusion, une évaluation rigoureuse de la vulnérabilité et la mise en œuvre de solutions de modernisation appropriées peuvent réduire considérablement les dommages physiques et les pertes économiques résultant de futurs événements sismiques. En ce sens les études basées sur des approches macrosismiques jouent un rôle important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique du patrimoine culturel dans les régions sujettes aux séismes. Cette recherche permet le développement d'une base de données complète et un outil d'orientation pour les autorités locales responsables de la réhabilitation et de la restauration des mosquées.

Conclusion Générale

Conclusions générales

Nous nous intéresserons à étude de la vulnérabilité sismique

- Les premiers chapitres sont réservés à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons discuté le risque sismique et réalisé, un état de l'art approfondi sur les différentes approches et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique.

La méthode d'évaluation de la vulnérabilité développée ici s'est avérée extrêmement utile et fiable pour l'analyse des caractéristiques de construction en maçonnerie par conséquent les résultats obtenus à partir de son utilisation le sont également. L'intégration de cette technique d'évaluation de la vulnérabilité dans une méthode macrosismique a permis son application pour le développement de scénarios de dommages et de pertes pour l'atténuation et la gestion des risques. La méthode d'évaluation de la vulnérabilité proposée peut facilement être adaptée à des caractéristiques de construction spécifiques et adoptée pour l'évaluation de tout type de structures de maçonnerie élancées.

La méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique adaptée dans cette étude de cas est spécialement développée pour les structures de maçonnerie par conséquent, les résultats obtenus sont assez fiables.

L'analyse des scénarios déterministes de dommages et de pertes créés dans cette étude permet de vérifier la relation de ces scénarios avec les fragilités identifiées et les caractéristiques structurelles et de construction des mosquées. Le niveau de dommages estimé pour ces mosquées est un indicateur de leur faible résistance aux actions sismiques et les valeurs modérées à élevées de dommages et de pertes obtenues pour les intensités VI et IX sont une conséquence de la grande vulnérabilité de ces mosquées. Par conséquent des interventions axées sur l'amélioration des performances sismiques et la conservation du patrimoine culturel, assistées par la caractérisation des matériaux et la modélisation mécanique, sont nécessaires pour la réduction du risque sismique.