



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



N° d'ordre : M ...../GCA/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière :** Génie Civil

**Spécialité :** Structures

### *Thème*

*Analyse Sismique des Anciens Minarets par la Méthode  
Dynamique Histoire Temporelle*

**Présenté par :**

- DAHMANE Asmaa
- BOUMEDIENE Dalel

***Soutenu le 27 / 08 / 2020 devant le jury composé de :***

<b>Président :</b>	SABEUR Bendhiba	M.A.A
<b>Examineur :</b>	DJILALI Nassira	M.A.A
<b>Encadreur :</b>	BOURDIM Sidi Mohammed El-Amine	M.C.A

**Année Universitaire : 2019 / 2020**

# Remerciements

Avant tout, louange à "Allah" ,notre créateur et mètre de l'univers, de nous avoir donner tout de courage pour terminer ce travail de recherche.

Un très grand merci à:

Notre encadreur Mr BOURDIM SIDI MOHAMED pour nous avoir encadrés et orientés tout au long de cette recherche.

Nous remercions chaleureusement nos familles respectives pour toute l'aide et soutien, moral et économique, qu'ils nous ont apporté tout au long de nos études .Nous espérons être à la hauteur de leurs espérances et nous montrer dignes de leurs confiances et de leurs encouragements.

Nous adressons nos remerciements chaleureusement à tous les professeurs qui nous ont enseignés au cours des études universitaire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur. Toute personne ayant contribué de près ou de loin à achever ce travail,

En fin, no vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.

Et pour finir, un dernier remerciement à toute la promotion 2019-2020 de Génie Civil de l'université ABDELHAMID IBN BADIS , tout en leurs souhaitons un avenir plein de réussite.

# Dédicace

Tout d'abord, louange à « ALLAH » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remerciements à mes chers parents , qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin , qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'Allah me les garde durant toute ma vie.

Ma mère qui a toujours crue en moi et mes études .

Mon père qui m'a toujours encouragé , et guidé , et qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis , je lui confirme mon profond respect .

A mes chères sœurs : Zahira , Karima , Aicha et Hafssa ,mes chères tantes et toute ma famille .

A mon amie et mon binôme Dalel qui n'a pas cessé et m'encourager tout le temps et sa respectueuse famille .

A ma chère amie et soeur Hasnaa qui est toujours à mes cotés.

A toute personne qui a su être présente lorsque j'en avais besoin.

Dahmane Asmaa

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qui ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

A ma mère qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aurait pas eu lieu.

A mon père, qui est toujours disponible pour nous, et prêt à nous aider. Je lui confirme mon attachement et mon profond respect.

A ma grande mère mima « Haja Aicha » pleines d'affection et tendresse

A mes sœurs : Douniased et Yousra et mes chers frères Ali et Ibrahim.

A mon mari Rabie

A mon amie et mon binôme Asma qui n'a pas cessé et m'encourager tout le temps et sa respectueuse famille

Ainsi qu'à toutes personnes qui m'ont encouragé ou aidé au long de mes études.

## Résumé :

L'analyse dynamique linéaire est une méthode favorite pour l'évaluation de la performance sismique des structures vis à vis la réglementations. Cette nouvelle méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments tente, plus particulièrement , de développer des procédures objectives et techniques indépendantes.

Dans ce projet de fin d'études, nous avons étudié la stabilité des minarets des mosquées de Kobaa , Elbadr ,et la mosquée Tabbana implantés à Mostaganem .

L'objectif de cette recherche est d'effectuée l'analyse dynamique linéaire sur les trois minarets à l'aide du code de calcul ETABS et d'estimer leurs niveaux de performance sous des excitations sismiques réelles en utilisant la méthode dynamique en histoire temporelle.

Les résultats obtenue après cette analyse montre que nos cas d'étude (minaret de la mosquée El-Badr, minaret de la mosquée Kobaa et le minaret de la mosquée Tabbana), sont en état de sécurité et ils ne subiront pas de dommages s'il y a lieu des séismes de même magnitude que celui utilisé dans les calculs qui est une fraction de 60% de Boumerdes 2003 .

**Mot clés :** Analyse histoire temporelle, Séisme Boumerdes 2003, Excitation sismique, Minaret, ETABS.

## **Abstract :**

Linear dynamic analysis is a preferred method for evaluating the seismic performance of structures against regulations. This new methodologies for assessing the seismic vulnerability of buildings attempts, more particularly, to develop independent objective and technical procedures.

In this project, we studied the stability of the minarets of the mosques of Kobaa, Elbadr, and Tabbana located in Mostaganem.

The objective of this research is to perform linear dynamic analysis on the three minarets using the ETABS computer code and estimate their performance levels under real seismic excitations using the dynamic time history method.

The results obtained after this analysis show that our case studies (minarets of El-Badr mosque, Kobaa mosque and Tabbana mosque), are in safety stat and they will not suffer any damage if there is earthquakes of the same magnitude as that used in the calculations which is a fraction of 60% of Boumerdes 2003.

Keywords: Time history analysis, Boumerdes earthquake 2003, Seismic excitation, Minaret, ETABS.

## ملخص

يعد التحليل الديناميكي الخطي طريقة مفضلة لتقييم الأداء الزلزالي للهياكل من ناحية القوانين. تحاول هذه المنهجيات الجديدة لتقييم الضعف الزلزالي للمباني ، بشكل أكثر تحديداً ، تطوير إجراءات موضوعية وتقنية مستقلة.

في مشروع التخرج هذا، قمنا بدراسة استقرار بعض المآذن في مساجد قباء، البدر ومسجد طبانة الواقعة في مستغانم.

الهدف من هذا البحث هو إجراء تحليل ديناميكي خطي على المآذن الثلاث باستخدام برنامج الحساب ETABS وتقدير مستويات أدائها في ظل إثارة زلزالية حقيقية باستخدام الطريقة الديناميكية في التاريخ الزمني.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بعد هذا التحليل أن دراسات الحالة لدينا (مئذنة مسجد البدر ، مئذنة مسجد القبة ، مئذنة مسجد التبانة) ، في حالة أمانة ولن تتعرض لأضرار في حال وقوع زلازل بنفس القوة المستخدمة في الحسابات والتي قدرت بـ 60% من حجم زلزال بومرداس 2003.

**الكلمات المفتاحية:** تحليل التاريخ الزمني ، زلزال بومرداس 2003 ، الإثارة الزلزالية ، مئذنة ، ETABS.

# SOMMAIRE

Introduction générale	2
<b>Chapitre I : Généralités et recherche bibliographique</b>	<b>3</b>
I. Introduction	4
II. Les mosquées au monde	5
II.1. La mosquée Quba, Arabie Saoudite	5
II.2. La mosquée Al Haram, Arabie Saoudite	5
II.3. La mosquée de Kufa, Irak	6
II.4. La Mosquée des Omeyyades, Syrie	6
II.5. La Mosquée Al Aqsa, Jérusalem	7
III. Les mosquées d'Europe	7
III.1. la mosquée de Rome	7
III.2. La mosquée de Grenade	8
III.3. La mosquée suédoise de Malmö	8
III.4. La mosquée Madani de Bradford	9
III.5. La mosquée de paris	9
IV. Les mosquées de Maghreb	9
IV.1. Les mosquées en Tunisie	9
IV.1.1. La Grande Mosquée de Kairouan	10
IV.2. Les Mosquées en Egypte	11
IV.2.1. Les La Mosquée Ibn Touloun	11
IV.3. Les mosquées au Maroc	11
IV.3.1. La Mosquée de Casablanca Hassan II	11
IV.4. Les mosquées d'Algérie	12
IV.4.1. <i>La mosquée de Sidi Ghanem à Mila</i>	12
IV.4.2. La Grande Mosquée d'Alger, Algérie	13
IV.4.3. Les Mosquées de Mostaganem	14
IV.4.3.1. La Mosquée de Kobaa	14
IV.4.3.2. La Mosquée "Sayida Khadidja" ou "Masjed El Atik"	14
IV.4.3.3. La Mosquée de Tabbana	15
IV.4.3.4. La Mosquée de Badr	15
V. Les minarets	16
V.1. Introduction	16

V.2. Avènement des minarets	17
V.3. Types des minarets	<b>17</b>
V.3.1. Les minarets de forme carrée	17
V.3.1.1. Le minaret de La Grande Mosquée de Kairouan ( Tunis)	17
V.3.1.2. Les minarets de La mosquée de omeyyades (Damas)	18
V.3.2. Les minarets de forme cylindrique	19
V.3.2.1. Le minaret de Qutb Minar	19
V.3.2.2. La Grande Mosquée d'Ispahan ( Iran )	20
V.3.3. Les minarets en spirale	20
V.3.3.1. Le minaret de La Mosquée de Samarra ( Iraq )	20
V.3.4. Les minarets combinés	21
V.3.4.1. Le minaret de La Mosquée de Ahmed ibn Touloun ( égypt.)	21
VI. Vulnérabilité sismique	22
VI.1. Introduction	22
VI.2. Rôle d'étude de la vulnérabilité sismique	23
VI.3. Expérience Algérienne dans l'évaluation de la vulnérabilité Sismique des constructions	23
VI.4. Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité d'un mur d'un minaret	23
VI.5. Risque de vulnérabilité sismique	24
VI.6. Effets des séismes sur des minarets	24
VI.7. Les essais utilisés pour la vérification de la stabilité , résistance et vulnérabilité des structures	26
VI.7.1. Les essais par ultrason	26
VI.7.1.1. But de l'essai	27
VI.7.1.2. Principe d'utilisation des ultrasons	27
VI.7.1.3. Description de l'appareil « ultrason »	29
VI.7.1.4. Fonctionnement de l'appareil	30
VI.7.1.5. Conclusion	30
VI.7.2. Vibration ambiante	30
VI.7.2.1. Introduction	30
VI.7.2.2. Aménagements d'équipements et des mesures	31
VI.7.2.3. Analyse des données et résultats préliminaires	31
VI.8. Évaluation des dommages du système structurel	31
VI.9. Conclusion	32
VI. La méthode push-over pour l'analyse non linéaire	33
VII.1. Introduction	33

VII.2. But de l'essai	33
VII.3. La méthode de l'analyse non linéaire	33
VII.4. Conclusion	33
<b>Chapitre II : Les travaux réalisés sur les minarets</b>	34
I. Introduction	35
II. En Turquie	35
II.1. Le minaret	35
II.2. Analyse dynamique des minarets de maçonnerie en pierre	36
II.3. Conclusion	40
III. En Roumanie	41
III.1. L'évaluation sismique de la mosquée royale "Carol I" à Constanta	41
III.2. Mesures des vibrations ambiantes	42
III.2.1. Dispositions de l'équipement et de mesures	42
III.2.2. Analyse des données et résultats préliminaire	42
III.3. Évaluation des dommages du système structurel	44
III.3.1. Indice de degré de dommage pour le minaret RC	44
III.4. Conclusion	46
IV. En Egypte. (Qusun )	46
IV.1. Le minaret	46
IV.2. Analyse modale	48
IV.3. Analyse modale de PUSHOVER	48
IV.4. ANALYSE DES PERFORMANCES	49
IV.5. Conclusion	51
V. les minarets en Inde ( Qutb minar )	52
V.1. Le minaret	52
V.2. Modélisation numérique	52
V.2.1. Modélisation géométrique	53
V.2.1.1 Modélisation de faisceaux 3D	53
V.2.1.2. Modélisation solide	53
V.2.2. Modélisation des matériaux	53
V.3. Analyse structurelle	54
V.3.1. Analyse de faisceau 3D	54
V.3.1.1. Analyse modale	54
V.3.1.2. Analyse du spectre de réponse	54
V.3.1.3 Discussions	55

V.3.2. Analyse solide 3D	56
V.3.2.1. Analyse modale	56
V.3.2.2 Analyse du spectre	57
V.4. Conclusion	58
VI. En Algérie	59
VI.1. Définition	59
VI. 2. Proposition	60
VI.3. Conclusion	62
<b>Chapitre III : Analyse dynamique linéaire sur le code de calcul ETABS</b>	63
I. Introduction	64
II. Aperçu sur l'analyse dynamique	64
II.1. Analyse dynamique d'un problème de séisme	64
II.1.1. La méthode pseudo dynamique	65
II.1.2. Les méthodes dynamiques modales	65
III. Hypothèses de calcul	67
IV. Excitation Sismique utilisée	67
V. Analyse dynamique des minarets	69
V.1. Le minaret de Kobaa	69
V.1.1. Propriétés des matériaux	70
V.1.2. modèle numérique du minaret Kobaa	71
V.1.3. Analyse histoire temporelle	72
V.1.4. Discussion	74
V.2. Minaret de la mosquée El-Badr	75
V.2.1. Propriétés des matériaux	75
V.2.2. modèle numérique du minaret El-Badr	76
V.2.3. Analyse histoire temporelle	78
V.2.4. Discussion	80
V.3. Minaret de la mosquée Tabana	80
V.3.1. Propriétés des matériaux	80
V.3.2. Analyse dynamique modale du minaret Tabana	81
V.3.3. Analyse histoire temporelle	82
V.3.4. Discussion	83
VI. Conclusion	84
<b>Chapitre IV : Conclusions générales</b>	85
Conclusions générales	86
Références bibliographique	87

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : La mosquée de Quba	5
<b>Figure I.2</b> : La mosquée Al Haram	6
<b>Figure I.3</b> : La Mosquée de Kufa	6
<b>Figure I.4</b> : La Mosquée des Omeyyades	7
<b>Figure I.5</b> : La Mosquée Al Aqsa	7
<b>Figure I.6</b> : La Mosquée de Rome	8
<b>Figure I.7</b> : La Mosquée de Grenade	8
<b>Figure I.8</b> : La Mosquée de Malmö	8
<b>Figure I.9</b> : La Mosquée de Bradford	9
<b>Figure I.10</b> : La Mosquée de Paris	9
<b>Figure I.11</b> : La Mosquée de Kairouan	10
<b>Figure I.12</b> : La Mosquée Ibn Touloun	11
<b>Figure I.13</b> : La Mosquée de Casablanca Hassan II	12
<b>Figure I.14</b> : La Mosquée de Sidi ghanem	13
<b>Figure I.15</b> : La grande Mosquée d'Alger	14
<b>Figure I.16</b> : La Mosquée de kobaa	14
<b>Figure I.17</b> : La Mosquée de sayida khadija	15
<b>Figure I.18</b> : La mosquée de tabbana	15
<b>Figure I.19</b> : La mosquée de badr	16
<b>Figure I.20</b> : Le Minaret de La Grande Mosquée de Kairouan	18
<b>Figure I.21</b> : Les Minarets de La mosquée des omeyyades	19
<b>Figure I.22</b> : Le Minarets de La Mosquée de Qutb minar	19
<b>Figure I.23</b> : Les Minarets de La Mosquée d'Ispahan	20
<b>Figure I.24</b> : Le Minaret de La Mosquée de Samarra	21
<b>Figure I.25</b> : Le Minaret de La Mosquée de Ahmed ibn Touloun	21
<b>Figure II.26</b> : méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique	23
<b>Figure I.27</b> : Mosquée de Boudouaou – Minaret effondré Séisme de 2003, Boumerdes, Algérie	24
<b>Figure I.28</b> : La Mosquée de la ville de Zemmouri -minaret effondre séisme 2003 Boumerdes	25
<b>Figure I.29</b> : Solutions proposées pour les irrégularités en élévations	25
<b>Figure I.30</b> : Une Mosquée qui possède deux minarets indépendants du reste de la structure, séisme de 2003, Boumerdes (Ville de SIDI DAOUD), Algérie.	26
<b>Figure. I.31</b> : appareil d'ultrason	29
<b>Figure II.1</b> : Exemples de minarets de briques de maçonnerie historiques en Turquie: (a) HacıBayrammosque, Ankara, (b) Semsi Ahmet Pasa mosque, Bolu	36
<b>Figure II.2</b> : Minarets de maçonnerie en pierre historiques en Turquie (a) Mosquée Selimiye photo: Ö. Iskender Tuluk, Edirne, (b) Mosquée Kadi, Bolu	36
<b>Figure II.3</b> : Propriétés géométriques et en coupe des modèles de minarets	37
<b>Figure II.4</b> : Mouvements du sol (a) du 12 novembre Duzce et (b) du 17 août tremblements de terre de Kocaeli	37
<b>Figure II.5</b> : Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-I soumis à (a) Duzce et (b) tremblements de terre de Kocaeli	38
<b>Figure II.6</b> : Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-II soumis à (a) Duzce, et (b) tremblements de terre de Kocaeli	38

<b>Figure II.7</b> : Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-III soumis à (a) Duzce et (b) tremblements de terre de Kocaeli	39
<b>Figure II.8</b> : Contours de stress pour Minaret-I: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records	39
<b>Figure II.9</b> : Contours de stress pour Minaret-II: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records	39
<b>Figure II.10</b> : Contours de stress pour Minaret-III: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records	40
<b>Figure II.11</b> : Vue générale de la mosquée royale «Carol I» à Constanța, Roumanie	41
<b>Figure II.12</b> : Mesures des vibrations ambiantes - dispositions des capteur	42
<b>Figure II.13</b> : Exemple d'enregistrements de vitesse dans le temps - capteurs Disposition 2	43
<b>Figure II.14</b> : Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 1	43
<b>Figure II.15</b> : Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 2	43
<b>Figure II.16</b> : 16 Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 3	44
<b>Figure II.17</b> : Fissures mineures dans la couche extérieure de revêtement du minaret RC de la mosquée	45
<b>Figure II.18</b> : Fissures dans la couche de plâtre des poutres RC qui supportent le toit du balcon du minaret	45
<b>Figure II.19</b> : Qusun minaret	47
<b>Figure II.20</b> : Répartition des contraintes dans différentes formes de mode	48
<b>Figure II.21</b> : Cisaillement de la base par rapport au déplacement du point supérieur en raison de l'analyse de Pushover	49
<b>Figure II.22</b> : Excitations au sol utilisées mises à l'échelle à un PGA de 0,30 g.	50
<b>Figure II.23</b> : Courbes de capacité et de demande pour les tremblements de terre examinés avec différents PGA	50
<b>Figure II.24</b> : L'élévation sectionnelle et le plan du Minar à chaque étage.	52
<b>Figure II.25</b> : spectre de réponse spécifique au site	53
<b>Figure II.26</b> : Ligne de poussée du Minar sous charge sismique et gravimétrique calculée	56
<b>Figure II.27</b> : les deux premières formes de mode du Minar	57
<b>Figure II.28</b> : Résultats de l'analyse du spectre de réponse d'une analyse de modèle solide 3D	58
<b>Figure II.29</b> : vue en 3D du minaret	59
<b>Figure II.30</b> : vue du minaret	59
<b>Figure II.31</b> : Disposition du profile (vue en 3D)	60
<b>Figure II.32</b> : système d'assemblage	61
<b>Figure III.1</b> : Enregistrement du séisme de Boumerdes 2003, composante Est Ouest, PGA=0,34g	67
<b>Figure III.2</b> : Fraction de 60% de l'enregistrement du séisme de Boumerdes 2003, PGA=0,2g	68
<b>Figure III.3</b> : Spectre de réponse du chargement dynamique utilisé pour amortissement de 5%, 7% et 10%	69
<b>Figure III.4</b> : Vue de la mosquée Kabaa, Cité Mon-plaisir Mostaganem	70
<b>Figure III.5</b> : Géométrie et détails du modèle 3-D en EF du minaret	71
<b>Figure III.6</b> : Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis	72
<b>Figure III.7</b> : Déplacement horizontal au sommet du minaret	72
<b>Figure III.8</b> : Accélération horizontale au sommet du minaret	73
<b>Figure III.9</b> : Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement	73
<b>Figure III.10</b> : Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement	74
<b>Figure III.11</b> : Vue de la mosquée El-Badr, ancienne église Saint-Jean-Baptiste, au centre de la ville de Mostaganem	75
<b>Figure III.12</b> : Géométrie et détails du minaret El-Badr	76
<b>Figure III.13</b> : Modèle 3-D en EF du minaret El-Badr	77

<b>Figure.III.14</b> : Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis	77
<b>Figure.III.15</b> : Déplacement horizontal au sommet du minaret	78
<b>Figure.III.16</b> : Accélération horizontale au sommet du minaret	78
<b>Figure.III.17</b> : Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement	79
<b>Figure.III.18</b> : Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement	79
<b>Figure .III.19</b> : Vue de la mosquée de Tabana	80
<b>Figure .III.20</b> . Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis	81
<b>Figure .III.21</b> . Déplacement horizontal au sommet du minaret	82
<b>Figure .III.22</b> . Accélération horizontale au sommet du minaret	82
<b>Figure.III.23</b> . Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement	83
<b>Figure .III.24</b> . Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement	83

## Liste des Tableaux

<b>Tableau II.1 :</b> Les sept premiers modes et leurs facteurs de participation	38
<b>Tableau II.2 :</b> Enregistrements de séismes sélectionnés	49
<b>Tableau II.3 :</b> Résultats de l'analyse push over	51
<b>Tableau II.4 :</b> Les paramètres mécaniques calculés pour la maçonnerie	54
<b>Tableau II.5 :</b> Les propriétés dynamiques de la tour pour les paramètres des matériaux rigides	55
<b>Tableau II.6 :</b> Les propriétés dynamiques de la tour pour les paramètres des matériaux flexibles	55
<b>Tableau II.7 :</b> Comparaison des résultats d'analyse modale des modèles poutre et solid	57
<b>Tableau III.1 :</b> Les caractéristiques mécaniques utilisées pour le minaret de Kobaa	70
<b>Tableau III.2 :</b> Les caractéristiques mécaniques utilisées pour le minaret de Badr	76
<b>Tableau III.3 :</b> Les caractéristiques mécaniques utilisées pour le minaret de Tabana	81

### Liste des symboles :

$v$  : La vitesse d'onde

$\rho$  : La masse volumique

$E_d$  : Module d'élasticité dynamique

$\mu$  : Le coefficient de poisson

$L$  : Distance parcourue  $p$

$T$  : Temps de propagation de l'onde

$M$  : est le moment de flexion dû à la charge sismique

$W$  : est le poids propre du structure.

$E$  : Module d'élasticité

$G$  : Module de cisaillement

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

Depuis quelques années, les autorités et pouvoirs publics ainsi que la communauté scientifiques s'intéressent de plus en plus au risque sismique et à ses répercussions sur la société en Algérie .

Les pertes encourues lors des différents évènements sismiques qu'a connu le pays, surtout dans les zones à forte sismicité et qui sont les plus densément peuplées, ont mis en évidence la nécessité de réduire les dommages potentiels des structures et d'évaluer leur vulnérabilité aux séismes, leurs performance et ce dans le but de réduire le risque sismique existant.

Plusieurs méthodes d'analyse et de calcul des structures soumises à des sollicitations sismiques ont été développées pour améliorer le comportement des structures contre le séisme .

Pour la plupart des structures du génie civil, le comportement du sol et le comportement de la structure peuvent être investigués de manière dissociée, ce qui facilite grandement l'analyse, tout en permettant d'atteindre les buts visés.

A cet égard, des projets de recherche dans le cadre de renforcement des structures ont développés de nouvelles génération de méthodes de conception sismique, parmi les quelles, l'analyse dynamique en histoire temporelle .

L'analyse en histoire temporelle est une analyse dynamique linéaire est la méthode favorite pour l'évaluation de la performance sismique des structures en matière de réglementations et de code de réhabilitation. Cette nouvelle génération de méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments tente, plus particulièrement , de développer des procédures objectives et techniques indépendantes de l'intervention des experts.

Ce projet, a pour objectif d'analyser ,d'étudier l'évaluation sismique , la performance et la stabilité de trois minarets des mosquées à Mostaganem .

Trois chapitres sont présentés dans ce mémoire dont :

Le premier est consacré à l'étude bibliographique constitue principalement à la recherche sur les mosquées et minarets un peu partout dans le monde ,la vulnérabilité sismique , et les méthodes de calculs qui existe .

Dans Le deuxième chapitres nous présentons des travaux réalisés sur les minarets dans le monde .

Dans le troisième chapitre nous présentons l'analyse linéaire et non linéaire dans le code de calcul ETABS et les résultats obtenus .

Enfin nous avons terminé notre travail par une conclusion générale .

# **CHAPITRE I:**

## **Généralités**

## I. Introduction :

**Les Mosquées** sont des endroits de dévotion, où se réunissent les musulmans pour les pratiques religieuses. Ce sont les principales institutions de l'Islam

Les plus anciennes avec le waqf et les madrasas. Institution primordiale en islam.

Les mosquées sont le symbole même de la foi, de l'identité et de la civilisation islamique, pour le moins dans l'univers sunnite. C'est dans et autour des mosquées que continue à se construire l'idéal unitaire du monde musulman. Lieu de prière, elles sont également espace de vie et noyau central des cités de l'islam dont l'importance se mesure souvent au nombre et à la somptuosité de leurs mosquées.

L'architecture des Mosquées arabes est basée sur le même concept, un modèle plus ou moins spirituel. Le plan est identique pour tous les édifices. Il est appelé «hypostyle», ce qui signifie que l'espace est clos et le plafond maintenu par des colonnes. Les Mosquées sont de formes rectangulaires ou carrées. Elles sont dotées d'une cour à portique et d'une salle de prière.

Les Mosquées se composent d'un Minaret qui est généralement assez élevé, et qui surplombe tous les autres bâtiments, afin d'être repéré de tout le monde. Il sert d'appel à la prière, qui peut être fait par hauts parleurs. Ils peuvent être cylindriques, carrés, en spirale, octogonaux, massifs ou fins. Les dômes sont cylindriques et recouvrent toute la zone de prière. La coupole est généralement décorée, et certaines sont vraiment d'une grande beauté. La salle de prière se doit d'être sobre. Elle ne contient ni images, ni sculptures. Les hommes se placent devant les femmes pour la prière. Cependant dans de nombreux pays, les hommes et les femmes sont séparés. Des tapis sont disposés sur le sol en direction de la Mecque. Le mihrab, qui est un pupitre ou un siège, est consacré le plus souvent à la prière du vendredi. Il est interdit de parler dans une mosquée. Il faut enlever ses chaussures avant de rentrer pour respecter la pureté des lieux. Les non musulmans n'ont pas le droit de pénétrer dans ces lieux de cultes.

## **II. Les mosquées au monde :**

La Mosquée présente une architecture combinant les influences et éléments des différentes et anciennes cultures présentes dans la ville ; en citant quelques mosquées parmi les plus anciennes au monde :

### **II.1. La mosquée Quba, Arabie Saoudite (622) :**

*La mosquée Quba est la première construite aux premiers temps de l'hégire.* Elle se trouve à proximité du centre-ville de Médine. Après avoir été chassé de la Mecque, le Prophète Mohamed trouva refuge aux abords de Médine où il y construisit sa maison et cette mosquée. Le prophète Mohamed y a passé plus de 20 ans. L'édifice a fortement évolué à travers le temps et fait désormais 6.000 m<sup>2</sup>. Il dispose de quatre minarets de 42 mètres de hauteur et possède 62 coupoles.

Selon le Hadith Nabawi rapporté par Ahmad Ibn Hanbal, An-Nassai, Ibn Maja et Hakim Al Nishaburi, une prière effectuée au sein de cette mosquée équivaut à



**fig I.1 : La Mosquée de Quba**

### **II.2. La mosquée Al Haram, Arabie Saoudite (638) :**

C'est la plus importante des mosquées pour les musulmans du monde entier. C'est la mosquée qui entoure la Kaâba. Sa première extension qui permettra d'accueillir les premiers pèlerins date de 638.

Un mur fût construit autour de la Kaâba afin de délimiter une zone de prière. Depuis, la mosquée n'a cessé de grandir et peut accueillir aujourd'hui près de 1 millions de fidèles pour la prière.



**Fig I.2 :La Mosquée Al Haram**

### **II.3. La mosquée de Kufa, Irak (639) :**

Cette mosquée fut construite en 639 et couvre une surface de 11 000 m<sup>2</sup>. La ville située à 156 km au Sud de Bagdad était réputée pour son art et la science, Jaber Ibnou Haya « *le père de la chimie* » y avait étudié.



**Fig I.3 :La Mosquée de Kufa**

### **II.4. La Mosquée des Omeyyades, Syrie (706-715) :**

Connu sous le nom de « Mosquée des Omeyyades » en référence à la dynastie musulmane qui la fit bâtir. Cette mosquée est dans le patrimoine mondial depuis 1979, elle a été construite sur l'ancienne ville romaine de Damas en Syrie.



**Fig I.4 :La Mosquée des Omeyyades**

Elle est particulière dans son architecture, différents styles la composent et elle se distingue notamment avec ses trois minarets ayant chacune son style.

### **II.5. La Mosquée Al Aqsa, Jérusalem (709-715) :**

Considéré comme le troisième lieu saint de l'islam, la plus grande mosquée de Jérusalem peut accueillir des centaines de milliers de fidèles. Souvent confondue avec le Dôme du Rocher de couleur jaune, la mosquée Al Aqsa se situe à quelques mètres de cette dernière. On dit aussi que c'est la mosquée aux sept arcades et aux sept portes.



**Fig. I.5 :La Mosquée Al Aqsa**

### **III. Les Mosquées d'Europe :**

**III.1. la Mosquée de Rome :** l'une des plus grandes d'Europe. Construit en 1995 avec le soutien de 23 pays musulmans, le centre islamique de Rome allie avec succès modernité et tradition. Son minaret, haut de 38 mètres, reflète la grandeur du lieu de culte.



**Fig. I.6 : La Mosquée de Rome**

**III.2. La Mosquée de Grenade** : est récente. Son minaret, édifié en 2003, s'élève à 13 mètres. Malgré sa taille plus modeste devant les minarets de Rome ou de Stockholm, les membres du jury ont choisi ce lieu parmi la cinquantaine de photographies qu'ils ont reçus.



**Fig. I.7: La Mosquée de Grenade**

**III.3. La Mosquée suédoise de Malmö** : a ouverte ses portes aux fidèles en 1984. Ses minarets, de 22,5 mètres de hauteur, et son école ont ouvert en 2002. Détruite par un pyromane en avril 2003, le centre a finit par être entièrement reconstruite en 2005.



**Fig I.8 :La Mosquée de Malmö**

**III.4. La Mosquée Madani de Bradford** : au nord de l'Angleterre, a gagné le concours du plus beau minaret du continent européen, organisé par le Cojep et soutenu par le Conseil de l'Europe. Ses minarets, hauts de 22,5 mètres, ont été dessinés par Alan Priests puis construits en 2009.



**Fig. I.9 :La Mosquée de Bradford**

**III.5. La Mosquée de Paris** : En 1926, la première mosquée de France métropolitaine voit le jour : c'est la Grande mosquée de Paris . Il s'agit de la plus grande mosquée de France. De style hispano-mauresque avec un minaret de 33 mètres de haut, elle a été construite pour rendre hommage aux musulmans morts.



**Fig I.10:La Mosquée de Paris**

#### **IV. Les Mosquées de Maghreb :**

##### **IV.1. Les Mosquées en Tunisie :**

Les mosquées font partie du paysage urbain et architectural tunisien et témoignent de la richesse de l'architecture islamique. Leur édification a commencé vers l'an 650 avec la conquête musulmane du Maghreb. Celle de Kairouan, par exemple, témoigne de l'importance de l'islam en Tunisie puisqu'il s'agit de l'un des sanctuaires les plus anciens et les plus prestigieux de l'Occident musulman. La plupart des mosquées en Tunisie reprennent la

typologie des mosquées andalouses ou celle de la période omeyyade avec du marbre ou du gypse gravé, d'autres sont creusées dans la terre comme celles de Tataouine. En effet, les mosquées chez nous ont chacune leurs spécificités architecturales en fonction de la région. Il suffit de voir les photos des différentes mosquées à travers les villes et les villages pour se rendre compte des maintes influences.

#### **IV.1.1. La Grande Mosquée de Kairouan :**

La Grande Mosquée de Kairouan a été érigée en 670, ce qui correspond à l'an 50 de l'hégire, le calendrier musulman. La Grande Mosquée, telle qu'on la connaît aujourd'hui, a été reconstruite en 836 par le prince Ziyadat Allah I. Par contre, sa coupole n'a été ajoutée qu'en 1316 par l'imam du moment. Depuis sa construction, elle est considérée comme l'une des 3 portes du Paradis, avec la Mecque et la mosquée Al Aqsa en Palestine.

La Grande Mosquée de Kairouan se situe dans une enceinte rectangulaire de 125 mètres de long et 75 mètres de large. La mosquée est construite en pierre taillée et apparaît comme une forteresse avec 8 portes, des tours et des bastions.

Elle renferme de nombreux vestiges archéologiques comme ses colonnes antiques ou le plus ancien minbar du monde musulman. Sa salle des prières est ornée d'anciens carreaux de faïence, mais aussi de portes en cèdre du Liban. Dans la cour couverte de marbre s'érige un minaret de 3 étages. Situé dans la cour, un cadran solaire monumental permet d'indiquer l'heure des prières.



**Fig. I.11.: La Mosquée de Kairouan**

## **IV.2. Les Mosquées en Egypte :**

### **IV.2.1. La Mosquée Ibn Touloun :**

Elle a été la troisième mosquée construite en Égypte, mais comme elle est la seule qui ait subsisté, elle est considérée comme la plus ancienne. Par ses dimensions, elle est aussi la plus grande. Sa construction fut ordonnée en 876 par l'une des grandes figures de l'histoire musulmane égyptienne. C'est en effet sous le règne d'Ahmad Ibn Touloun que l'Égypte passe du statut de province du califat abbâside à celui d'état indépendant.



**Fig. I.12 : La Mosquée Ibn Touloun**

La mosquée a connu par la suite quelques vicissitudes. Elle fut transformée en ateliers, puis en asile pour infirmes avant d'être restaurée au début du XX<sup>e</sup> siècle. Vous serez frappé par l'immensité de sa cour qui est comme un sas de tranquillité dans le bruit incessant des souks voisins. Dominant le côté nord de la cour, son minaret est doté d'un escalier extérieur hélicoïdal qui est typique de l'architecture mésopotamienne.

## **IV.3. Les Mosquées au Maroc :**

**IV.3.1. La Mosquée de Casablanca Hassan II :** est en partie construite sur la mer. Son minaret mesure environ 210 mètres de haut, la mosquée est de couleur blanche et son toit est vert. Ce n'est pas simplement un lieu de prières, mais également un lieu de culture et de vie sociale. En effet, elle est assise sur une surface de 9 hectares et on peut y trouver, une salle de bibliothèque, un musée qui retrace son histoire, une école où l'on étudie le coran, des bains, une salle d'ablutions. Elle possède un toit ouvrant et sa salle de prières peut accueillir jusqu'à 25 000 pratiquants.



**Fig. I.13: La Mosquée de Casablanca Hassan II**

#### **IV.4. Les Mosquées d'Algérie :**

##### **IV.4.1. la mosquée Sidi Ghanem à Mila :**

*Elle serait la plus ancienne d'Algérie et la seconde au Maghreb après la Grande Mosquée de Kairouan en Tunisie. Construite en 678 après J.C. sur les ruines d'un ancien forum romain et les fondations d'une basilique chrétienne byzantine, la mosquée Sidi Ghanem située à Mila au nord-est de l'Algérie serait la plus ancienne du pays et la seconde plus ancienne au Maghreb après la Grande Mosquée de Kairouan en Tunisie.*

Elle aurait été bâtie par Abou al Mouhadjir Dinar, Emir temporaire de la province de l'Ifriqiya durant la dynastie des Omeyyades. La mosquée présente une architecture combinant les influences et éléments des différentes cultures présentes dans la ville, des colonnes romaines aux chapiteaux décorés en passant par les arcs islamiques. De nombreuses parties de l'édifice nécessitant une protection sont encore enfouies, dans une zone riche en vestiges de l'antique Milev. La mosquée porte le nom de Sidi Ghanem, un saint de la région vénéré pour son savoir. Elle a subi de maintes modifications durant la colonisation française. Parmi celles-ci, la destruction de son minaret et la réutilisation de ses pierres pour la construction d'une nouvelle église et d'un bureau de poste. La mosquée est alors d'abord transformée en annexe militaire et en étable, puis en hôpital, tandis que sa toiture est remplacée par des tuiles. La mosquée fait aujourd'hui l'objet d'efforts de réhabilitation mais demeure menacée de détérioration. Son jardin mitoyen abrite de multiples pièces archéologiques dont une statue de marbre d'origine numide appelée « Milo ».

En 2012, une étude a été lancée pour établir un plan permanent de protection et de restauration du patrimoine de la ville, notamment son vieux quartier, vestige d'une histoire riche



(a) Ancienne photo

(b) Etat actuel

Fig. I.14 :La mosquée de Sidi ghanem

#### IV.4.2. La Grande Mosquée d'Alger, Algérie :

Construite sur une surface de 370 000 m<sup>2</sup>, Djamaâ el Djazaïr est la troisième plus grande mosquée de l'Histoire, derrière celles du Masjid al-Haram à La Mecque et du Masjid al-Nabawi à Médine. Elle comprend une douzaine de bâtiments principaux.

La salle de prière d'une superficie de 22 000 m<sup>2</sup> est composée de 618 colonnes octogonales blanches. Les 32 plus grands piliers ont une longueur de 34 m pour un diamètre de 1,62 m. L'esthétisme et l'implantation des piliers donnent à la mosquée, malgré ses dimensions gigantesques, une allure aérée et inondée de lumière. La mosquée est dotée d'une coupole d'un diamètre de 50 m qui culmine à une hauteur de 70 m. Elle compte plusieurs salles d'ablutions d'une superficie de 4 200 m<sup>2</sup>, abritant des fontaines et une centaine de robinets. Le minaret de 265 m, ancré sur un radier à 50 m de profondeur, se divise en divers secteurs fonctionnels desservis par deux ascenseurs panoramiques. La mosquée est dotée d'une salle de conférence de 1 500 places. D'une superficie de l'ordre de 8 000 m<sup>2</sup>, ce centre culturel comprend un hall d'exposition, une bibliothèque, une médiathèque, une vidéothèque, une filmothèque, des amphithéâtres, des espaces de projection, un pôle informatique et une cafétéria.

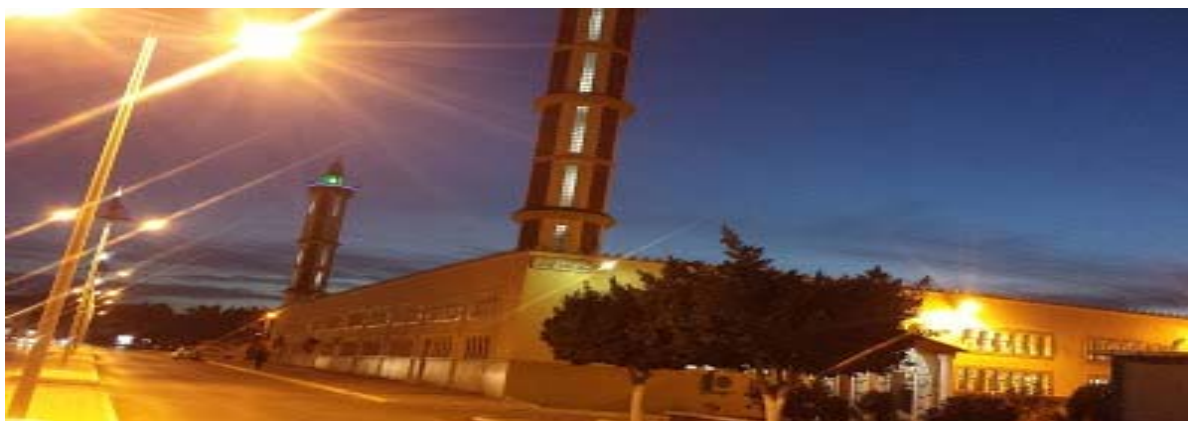


**Fig. I.15: La grande Mosquée d'Alger**

#### **IV.4.3. Les Mosquées de Mostaganem :**

##### **IV.4.3.1. La mosquée de Kobaa :**

De toutes les mosquées de la wilaya de Mostaganem, la mosquée "KOBA" implantée au quartier de Montplaisir est l'une des plus grandes par sa superficie qui est d'environ 5000 m<sup>2</sup> et que la salle de prière à elle seule avoisine les 3000 m<sup>2</sup> sauf qu'en raison de l'insuffisance d'aides financières de la part de la tutelle.



**Fig. I.16 : La Mosquée de kobaa**

##### **IV.4.3.2. La Mosquée "Sayida Khadidja" ou "Masjed El Atik" :**

De la localité de Mazaghran vient d'être incluse dans la liste des biens culturels de la wilaya de Mostaganem, a-t-on appris mardi auprès de la direction locale de la culture. "Ce lieu culturel et historique remonte à la période islamique. Il est situé dans le quartier d'El Qalâa, dans la commune de Mazaghrane, à trois kilomètres au sud-ouest de la ville de Mostaganem", a précisé à l'APS Laïd Bouaaza, chef du service patrimoine culturel de ladite direction. Cette opération permettra la préservation et la protection de ce site, témoin vivant

de la bataille de Mostaganem qui a opposé les forces algériennes aux troupes espagnoles (août 1558) ou encore la fameuse bataille de Mazaghran menée par l'armée de l'Emir Abdelkader contre les forces d'occupation françaises, menées par le capitaine Lelièvre (février 1840).



**Fig I.17: La Mosquée de sayida khadija**

#### **IV.4.3.3. La Mosquée de Tobbana :**

la plus vieille mosquée de Mostaganem , C'est sous le règne de l'Almoravide Youssef Ibn Tachfin (1061-1106) que l'on attribue, en 1082, la fondation de bordj El Mehal, l'ancienne citadelle de Mostaganem. Après lui, Mostaganem appartient aux .. Mostaganem appartient aux Zyanides de **Tlemcen**, puis aux Mérinides de Fès, dont l'un d'eux, Abou El Hassene Ali Ibn Abi Said, fit construire la grande mosquée en 1340.... son minaret est de forme hexagonale .



**Fig. I.18 : La mosquée de tabbana**

#### **IV.4.3.4.La Mosquée El Badr :**

L'ancienne Eglise Saint-Jean Baptiste, de style Romain très personnalisée avec un maillage de croix qui a été construite aux alentours de 1839 sur la base d'une ancienne Mosquée. Depuis 1970, l'Eglise a été convertie en Mosquée « al Badr » et, à cet effet, elle a

dû subir des modifications par le rajout de 2 volumes cubiques symétriques à l'entrée principale dont l'un, servant d'assise pour Minaret et l'autre comme salle d'ablution. La centralité d'un tel édifice public dans une zone noble du centre ville de Mostaganem ne peut en aucun cas s'accommoder d'une laideur flagrante par l'offre d'un décor hideux.



**Fig . I.19 .la mosquée d'Elbadr .**

## **V. Les minarets :**

### **V. 1.Introduction :**

Les minarets sont des tours de forme variée, à plusieurs étages, à escalier le plus souvent intérieur et ayant une ou plusieurs galeries extérieures dont celle du sommet est fréquemment portée en encorbellement . Dans une mosquée, le minaret est une tour élevée dépassant tous les autres bâtiments de la mosquée. Au sommet de cette tour, le muezzin appelle les fidèles (musulmans) à la prière. En général, chaque mosquée a un seul minaret. Mais les grandes mosquées ont plusieurs minarets : deux, trois parfois quatre.

L'origine du mot « minaret »

Le minaret, mot dérivé de l'arabe « manara » ou plus généralement « mi'dhana »( *phare*) est un élément architectural des mosquées . Son origine est chrétienne, les musulmans la copient après leur arrivée à Damas en voyant l'Église Saint-Jean le Baptiste (actuelle Mosquée des Omeyyades) dotée d'un minaret. Ils y copièrent aussi l'appel aux vêpres des chrétiens.

Le terme s'appliqua d'abord aux tours à feu avant de désigner les tours près des mosquées. Il s'agit généralement d'une tour élevée dépassant tous les autres bâtiments. Son but est de fournir un point élevé au muezzin pour les cinq appels la prière .

## **V.2. Avènement des minarets :**

Au début, les premières Mosquées dont celle de Médine, étaient bâties d'une façon très simple et ne comportaient pas de minarets.

Ce n'est qu'ultérieurement quand l'Islam s'est répandu sur une grande partie du monde, et en particulier pendant l'empire Omeyyade - que les musulmans -, s'inspirant des tours construites sur les églises, ont commencé à construire les premiers minarets.

Le nombre de minarets par mosquée n'était pas figé : à l'origine, il n'était édifié qu'un seul minaret par édifice, puis le constructeur en érigea plusieurs. Les raisons tiennent de l'esthétique, de la symétrie, de la volonté de ponctuer un élément fort, ainsi que d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

## **V.3. types des minarets :**

Les minarets ont des formes très variées (en général ronds, carrés, en spirale ou octogonaux) en fonction du génie de chaque architecture).

Les minarets ont pris la forme carrée inspirée des tours du temple romain de Damas comme le confirment la majorité des historiens qui ont étudié l'art islamique et surtout les orientalistes d'entre eux. Comme il se peut que les arabes ont adopté ce type pour sa simplicité dans la construction et la forme. Plusieurs formes sont apparues après, elles changent suivant les différences politiques à travers le monde islamiques, ou encore suivant les conditions naturelles des divers emplacements. Nous allons citer ci-après quelques exemples .

### **V.3.1. les minarets de forme carré :**

#### **V.3.1.1. Le minaret de La Grande Mosquée de Kairouan ( Tunis) :**

Ce minaret, le plus ancien conservé au Maghreb, se dresse au milieu du portique nord de la cour. Le géographe al-Bakri attribue sa construction au règne du calife omeyyade Hicham Ibn Abd al-Malik (724-743) mais la plupart des archéologues sont convaincus qu'elle est l'œuvre de Ziyadat Allah I<sup>er</sup> ( 817-838). Ceci est corroboré par le fait que l'entrée actuelle du minaret se trouve au même niveau que le reste de la mosquée de Ziyadat Allah, et que des fouilles menées à la base du minaret n'ayant pas révélé l'existence d'aucune structure antérieure, tout rehaussement de la cour est ainsi exclu.. Il est surmonté de merlons arrondis, en usage en Ifriqiya depuis l'Antiquité, attestés déjà dans l'architecture assyrienne.

Aux premières assises, (blocs de pierre arrachés aux monuments antiques) succèdent des murs en moellons taillés, appareillés avec soin et percés du côté de la cour de trois fenêtres et d'une porte (1,85 m de haut, 1 m de large, au linteau et aux piédroits en marbre sculpté d'époque romaine) surmontée d'un arc de décharge outrepassé. Le deuxième étage,

haut de 5 m et large de 7,65 m, est meublé, sur chacun de ses quatre côtés, de trois niches à fond plat surmontées d'arcs outrepassés. Le troisième étage, probablement remanié à l'époque hafside (1228-1574), est constitué d'un lanternon de 5,45 m de haut coiffé d'une coupole sur trompes côtelée.

À l'intérieur, couvert d'une voûte en berceau, un escalier de 129 marches tournant autour d'un pilier central permet d'accéder aux terrasses et au premier étage. Alors que la façade sur cour est percée de fenêtres éclairant et aérant l'intérieur, les autres sont percées d'ouvertures en meurtrières, ce qui confirme le rôle militaire assigné au minaret, à côté de sa fonction ordinaire de tour d'appel à la prière.



**Fig. I.20 :Le Minaret de La Grande Mosquée de Kairouan**

### **V.3.1.2. Les Minarets de La mosquée des omeyyades (Damas) :**

La grande mosquée des omeyyades à Damas a été implantée à l'emplacement d'un vaste temple romain, elle était construite entre 705 et 715. La Mosquée possède trois minarets, deux sont carrés, le troisième fort gracieux, est octogonal à galeries superposées et se termine en haut par une boule et un croissant. Les minarets de la Mosquée Omeyyade sont le type original qui a été suivi dans tous les pays islamiques et surtout dans les pays du Maghreb.

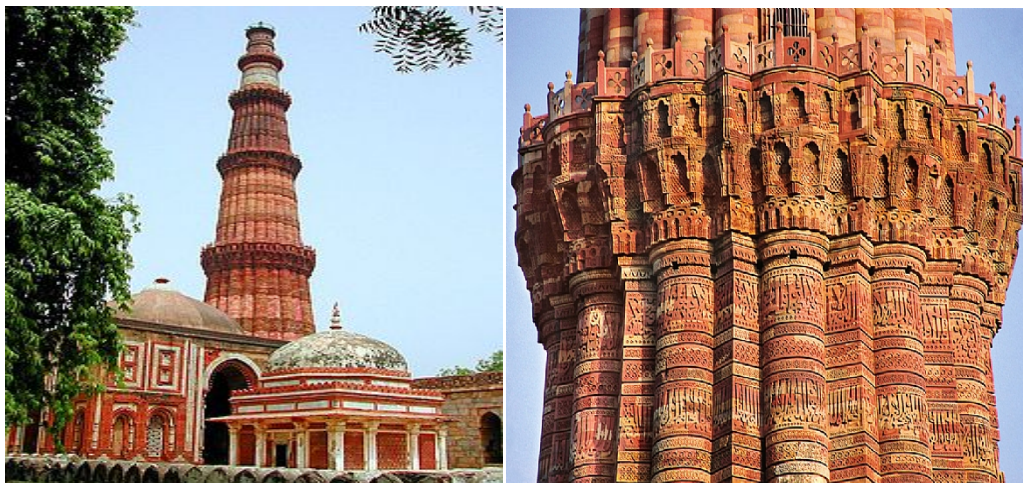


**Fig. I.21: Les Minarets de La mosquée des omeyyades**

### **V.3.2. Les Minarets de forme cylindrique :**

#### **V.3.2.1. Le Minaret de Qutb Minar :**

Le Qutb Minar (tour de la victoire) est le minaret le plus haut en Inde après la Mosquée de Hassan 2 de Casablanca, C'est aussi l'un des points de repère les plus reconnaissables de Delhi ..Construit au début du XIIIe siècle , Son hauteur, à l'origine de 80 m, est actuellement de 72,6 m. Son diamètre va en s'amincissant de bas en haut ; il varie de 14,3 m à la base à 2,7 m au dernier étage. On accède à son sommet par un escalier comportant 379 marches, le minaret est bâti sur 5 niveaux avec des balcons en saillie décoré d'inscriptions coraniques ses trois premiers niveaux construits en grès rouge et les deux derniers en marbre blanc, ce minaret est la plus haute tour de pierre de l'inde et l'un des bâtiments musulmans les plus réussis. Il est orné de motifs décoratifs et de vers coraniques calligraphiés.



**Fig. I.22 : Le Minarets de La Mosquée de Qutb minar**

### V.3.2.2. La Grande Mosquée d'Ispahan ( Iran ) :

La Grande Mosquée d'Ispahan, Mosquée du Vendredi (Masdjid-i Djouma) est devenue un immense ensemble architectural couvrant quelque 21 000 mètres carrés et mesurant approximativement 160 mètres de long sur 135 mètres de large.

La Grande Mosquée bâtie entre 1612 et 1630 par les architectes Muhibb al-Din al-Kula et ustad Ali Akbar Isfahani, est un chef-d'œuvre de l'architecture safavide et un modèle de l'architecture persane avec ses arcs, ses quatre grands iwans, ses quatre minarets et son grand bulbe bleu.



Fig.I.23 : Les Minarets de La Mosquée d'Ispahan

### V.3.3. Les Minarets en spirale :

#### V.3.3.1. Le Minaret de La Mosquée de Samarra ( Iraq ) :

la mosquée de samara et son minaret ont été construit en 838-889 au début règne d'al-Mutawakkil durant la dynastie des abbassides.

Le minaret est de forme spirale ou hélicoïdale d'où son nom : malwiya .

Il y a une forme inspiration de la civilisation mésopotamienne « la ziggourat »

Il est bâti sur un socle carrée de 30 à 33 mètre de coté. La hauteur de minaret est d'envions 50 à 53 m au dessus du socle sa forme rappelle l'influence du mazdéisme, un culte soleil , qui existe en Iran . La forme hélicoïdale du minaret de Samarra, est à l'origine de celui de la Mosquée d'Ibn Touloun, une des plus anciennes du Caire, construite entre 876 et 879.



**Fig. I.24 : Le Minaret de La Mosquée de Samarra**

#### **V.3.4. Les Minarets combinés :**

Ces minarets sont la combinaison de deux ou trois des types que nous avons cités plus haut. Le Caire constitue un musée naturel pour ces différents types de minarets.

##### **V.3.4.1. Le minaret de La Mosquée de Ahmed ibn Touloun ( égypt. ) :**

Le minaret de la Mosquée d'Ibn Touloun est bien plus modeste que son illustre prédécesseur, celui de la Mosquée de Samarra. Le minaret actuel consiste en un étage inférieur de base carrée surmonté par un autre de forme cylindrique. Il est couronné d'un sommet octogonal avec un petit dôme cannelé. La structure mesure au total 40 mètres de haut. La partie inférieure est nue, à l'exception des entrées, tandis que la partie supérieure dispose d'une rangée de fenêtres avec des grilles en stuc aux designs variés et datant de diverses périodes, alternant avec des niches à toit cannelé. Le tout est couronné d'un sommet, comme sur les murs des extensions.



**Fig. I.25 : Le Minaret de La Mosquée de Ahmed ibn Touloun**

## **VI. Vulnérabilité sismique :**

### **VI.1. Introduction :**

La vulnérabilité, est le degré de perte ou d'endommagement d'un élément donné exposé au risque, résultant de l'occurrence d'un phénomène naturel de magnitude donnée et s'exprimant sur une échelle de 0 (absence de dommages) à 1 (perte totale).

La vulnérabilité au sens commun, concerne le milieu construit (vulnérabilité structurale).

La vulnérabilité d'une construction ou d'une catégorie de construction représente la perte proportionnelle (en%) exprimant le rapport du coût des dommages subis à la valeur de la construction.

Elle dépend de l'intensité locale de la secousse:

- Sensiblement nulle pour une intensité inférieure ou égale à VI.
- Proche de 100% pour une intensité supérieure ou égale à XI [9].

Le terme « vulnérabilité sismique » est utilisé pour exprimer les différences de réaction des bâtiments, voir des ouvrages de génie civil, aux secousses sismiques. Si deux groupes d'ouvrages sont soumis exactement à la même secousse sismique et que l'un d'entre eux se comporte mieux que l'autre, alors on dira que les ouvrages qui ont été le moins endommagés avaient une vulnérabilité plus faible au tremblement de terre que ceux qui ont été plus endommagés [10]. La « vulnérabilité sismique » d'une structure représente le comportement intrinsèque de cette dernière vis-à-vis de la probabilité d'occurrence d'un séisme.

Mathématiquement, la vulnérabilité d'une construction est définie comme le rapport du coût des dommages attendus pour un séisme d'une intensité donnée au coût de la construction, exprimé en pourcentage.

On retrouve dans la littérature d'autres définitions de la vulnérabilité, comme celle que donne Calgaro [18], lorsqu'il la définit comme étant le produit d'un aléa (probabilité de l'évènement) par le montant des dommages qu'il provoque".

$$V = P \text{ aléa} \times C \text{ dommage}$$

La vulnérabilité s'exprime généralement en unité monétaire ou parfois en degré de dommages. Elle prend en compte la densité de population, la présence ou non de bâtiments calculés aux normes antisismiques, la vétusté des bâtiments, les pertes économiques probables. Dans le document de travail du programme national de fiabilité des infrastructures essentielles du gouvernement du Canada, on définit la vulnérabilité comme: "une caractéristique d'un élément de la conception, de la mise en œuvre ou du fonctionnement des infrastructures essentielles qui la rend susceptible d'être détruite ou perturbée par une menace. La vulnérabilité est synonyme de faiblesse." [9]

## VI.2. Rôle d'étude de la vulnérabilité sismique :

L'estimation des pertes encourues suite à un séisme, allant de l'interruption du service aux pertes en vie humaines, est un champ d'expertise en plein développement. Il s'agit d'une préoccupation importante pour les régions du monde où la probabilité d'occurrence de séisme de forte intensité est beaucoup plus élevée qu'ailleurs. La connaissance du risque sismique permet de mettre en place des mesures de mitigation pour diminuer les dommages potentiels tout en considérant la variable économique de l'équation. Ces mesures portent essentiellement sur la prévention contre les effets d'un possible désastre sismique.

La prévention a pour objectif de réduire le risque sismique, et d'empêcher un impact négatif qu'aurait un tremblement de terre sur le développement économique.

## VI.3. Expérience Algérienne dans l'évaluation de la vulnérabilité Sismique des constructions :

Au cours des 250 dernières années des tremblements de terre de magnitude moyenne à élevée se sont produits dans le nord de l'Algérie au moins une douzaine de fois. Alors qu'en Algérie, l'activité sismique est essentiellement concentrée sur une bande côtière de largeur allant jusqu'à 400 Km, la réglementation relative à la conception parasismique des constructions est relativement récente.

Le dernier événement sismique qui a touché les wilayas d'Alger et de Boumerdes en 2003 dont les effets ont été les plus violents, a fait preuve du non respect de cette réglementation pour les constructions nouvelles [12]. Cet état de fait, a poussé l'état ainsi que des institutions scientifiques à s'engager dans des études d'évaluation du risque sismique. Citons ici les villes d'Alger et de Boumerdesse ayant fait l'objet de quelques études à niveau de quartier ou de structure spécifique pour l'évaluation de leur vulnérabilité sismique.

## VI.4. Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité d'un mur d'un minaret :

La méthodologie utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'un minaret se décompose en trois étapes, décrites sur la figure 1.3. Les deux premiers éléments en sont la capacité à résister aux contraintes (courbe de capacité) et les contraintes sur la structure dues à la sollicitation sismique (demande sismique) ; la courbe de vulnérabilité est obtenue à partir de la comparaison de la courbe de capacité et de la courbe de demande .

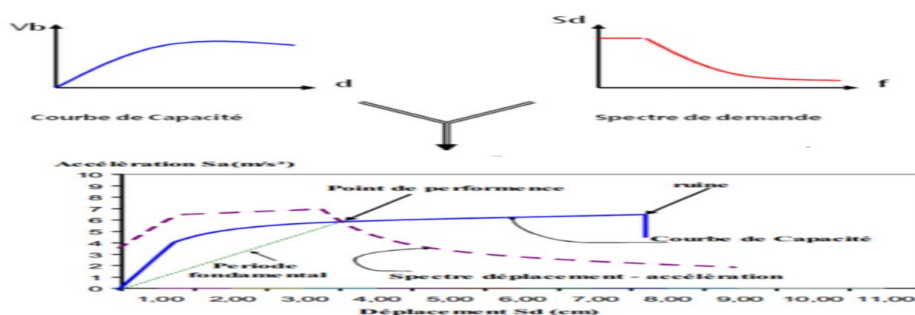


Fig.I.26. méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique

### **VI.5. Risque et vulnérabilité sismique :**

On entend par Risque sismique le degré de pertes, de destructions ou de dégâts sur une période de référence (en général un an) sur une région donnée. Les pertes se réfèrent aux vies humaines et aux biens exposés.

On définit la Vulnérabilité sismique par le degré d'endommagement pour différents événements. La vulnérabilité dépend des caractéristiques physiques et géométriques des bâtiments. Enfin on définit la valeur, le terme représentant la valeur de l'élément exposé. Cette valeur est de nature socio-économique. Dans le cas d'un danger sismique naturel, la valeur exposée au risque est avant tout celle du bâtiment, de leurs occupants, de leurs contenus ainsi que de leurs coûts.

Finalement, le risque peut être exprimé comme le produit de l'aléa sismique (probabilité d'occurrence), de la vulnérabilité (degré d'endommagement) et de la valeur de l'élément exposé.

$$\text{Risque sismique} = \text{Vulnérabilité sismique} \times \text{Aléa sismique} \times \text{Valeurs}$$

### **VI .6. Effets des séismes sur des minarets :**

#### **Domages provoqués par les séismes :**

Les figures 26 et 27 illustrent des cas pathologique typiques du dommage dans les angles rentrants dans le plan vertical dus aux oscillations différentielles.

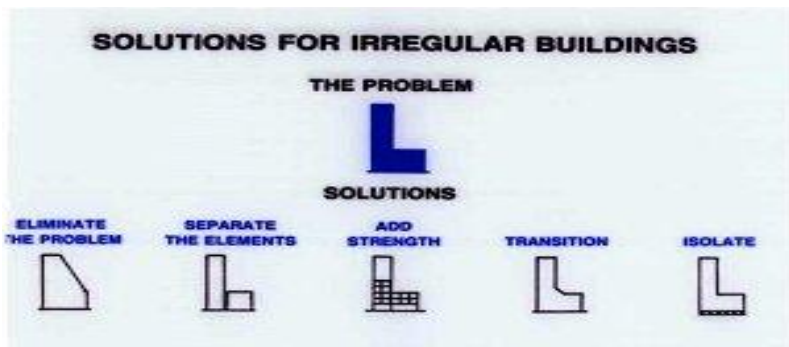


**Fig. I.27 : Mosquée de Boudouaou – Minaret effondré Séisme de 2003, Bumerdes, Algérie**



**Fig. I.28 : La Mosquée de la ville de Zemmouri -minaret effondre séisme 2003  
Boumerdes**

Les solutions proposées pour ces cas pathologiques sont les suivantes :



**Fig. I.29 : Solutions proposées pour les irrégularités en élévations**

La figure 29 montre une mosquée qui possède deux minarets indépendants du reste de la structure. C'est la raison pour laquelle ils sont restés intacts durant le séisme de 2003, Boumer des (Ville de SIDI DAOUD), Algérie. La base n'a été que partiellement endommagée surtout au niveau des remplissages en briques .



**Fig I.30 : Mosquée effondrée après le séisme de Boumerdes 2003 (Ville de Sidi Daoud), Algérie.**

Dans la vue en élévation, les principes de simplicité et de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure primaire, sans variation brutale de raideur. De telles variations entraînent des sollicitations locales élevées.

La vulnérabilité sismique des constructions et des ouvrages s'avère nécessaire pour déterminer leurs degrés d'endommagement en cas de secousse tellurique et par la suite établir une stratégie d'intervention visant le remplacement des éléments les plus vulnérables, la réparation ou le renforcement de ceux caractérisés par une moyenne vulnérabilité et l'entretien des moins vulnérables[6].

#### **VI.7. Les essais utilisés pour la vérification de la stabilité , résistance et vulnérabilité des structures :**

##### **VI.7.1. Les essais par ultrason :**

Le contrôle non destructif par ultrasons est une technique qui est très proche du contrôle échographique utilisé en médical. C'est un outil idéal pour établir si le béton est uniforme. Il peut être utilisé sur les deux structures existantes et en cours de construction. Il consiste à envoyer une onde ultrasonore à l'aide des transducteurs dans un matériau qui peut être métallique, composite, plastique ou céramique et à recueillir la présence ou l'absence de signaux de réflexions sur des discontinuités internes de la matière (fissure, porosité...etc.). Il s'agit d'une technique capable de localiser et de dimensionner les défauts internes. Elle peut être utilisée en manuel ou en mode automatisé

- Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures:

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel est indispensable.

- Le parcours doit être préférablement d'au moins 12 po (30 cm) de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton..

- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

- Comme toutes les techniques de contrôle non destructif, le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées. Cette méthode peut être employée à différents stades du développement de la structure considérée (fabrication, mise en service, réparation). Elle ne quantifie pas un défaut mais nécessite une comparaison avec un étalon. De plus, les limites et les probabilités de détection sont variables selon l'appareil, le matériau, la surface à inspecter et l'opérateur.

#### **VI.7.1.1. But de l'essai :**

L'appareil d'auscultation dynamique est utilisé pour mesurer la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton. Par cette méthode, il est possible d'obtenir, de manière non destructive, des informations sur :

- L'uniformité et l'homogénéité du béton.
- Présence des fissures ou des cavités.
- La détérioration due au feu .
- La détermination du module d'élasticité dynamique .
- Evaluer la résistance du béton .

#### **VI.7.1.2. Principe d'utilisation des ultrasons :**

Connu depuis longtemps, cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) laquelle est d'autant plus élevées que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde pour parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes dont la fréquence est comprise entre 10et 150Hz, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs. La vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique, est reliée au module d'élasticité dynamique,  $E_d$ , par l'expression suivante :

$$V^2 = \frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}$$

**ρ**: est la masse volumique.

**Ed** : module d'élasticité dynamique.

**μ**: est le coefficient de poisson qui n'est généralement pas connu par exactitude, cependant il est souvent compris entre 0.15 et 0.28 selon le manuel appartenant à l'ultrason utilisé ; dans le cas où on ne l'a pas, pour déterminer le coefficient de poisson dynamique, il est nécessaire de connaître au moins deux vitesses de propagation de types différents ondes longitudinales et ondes transversales:

$$V_t = \sqrt{(1-2\mu)/2(1-\mu)} \cdot V_L$$

Quant à l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y pas de relation physique entre les deux. On peut rappeler que le module d'élasticité est relié à la résistance par l'équation suivante :

$$\sigma = 16.7 \exp (Ed/122500)$$

Le module d'élasticité des granulats varie énormément, en sorte que la vitesse dépend du module d'élasticité du granulat utilisé et de la quantité que contient le béton. Cependant, pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte du ciment durci, telles qu'un changement du rapport eau/ciment qui influence le module d'élasticité de la pâte.

On admet en général, que la connaissance de la vitesse des ondes permet de porter sur le béton une appréciation sur la soit valable pour un certain béton, un étalonnage sur éprouvette est pratiquement indispensable, on le réalise par des mesures jumelées de résistance et de vitesse de effet la vitesse du son n'est pas une fonction simple de la résistance mais d'autres paramètres interviennent (densité, module d'élasticité) pour un béton de granulat léger par exemple, de résistance  $f_c=27$  MPa, la vitesse du son n'est que de 38 de granulat silico calcaire elle serait de l'ordre de 4200m/s pour une résistance ordre.

Mais pour ce béton léger la densité n'est que 1.65 le module d'élasticité instantané 18000 MPa (au lieu de 33000 MPa pour

On peut aussi trouver la résistance du béton à partir de la nature des granulats qui le constituent (calcaire ou siliceux) en utilisant l'abaque des résistances à la compression en fonction des vitesses du son. La vitesse de propagation sera calculée en transmission directe et semi-directe selon la formule suivante :

$$V=L/T$$

Avec :

V : vitesse de propagation de l'onde.

L : distance parcourue p

T : temps de propagation de l'onde

### VI .7.1.3. Description de l'appareil « ultrason » :

Les caractéristiques de conception fondamentales de tous les unités disponibles dans le commerce sont très semblables, constitué d'un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions.

L'ultrason utilisé dans cette étude est de type 58-E0048, il comprend :

- Le testeur ultrasonique 58-E0048 .
- Une tête de transmission et une de réception (54Khz).
- Deux câbles de connexion.
- Un barreau de calibrage.
- Un flacon de gel contact (gel de paraffine) pour assurer un bon contact du béton avec les transducteurs.
- Deux piles alcalines 1,5V type « D ».



Fig. I.31 : Appareil d'ultrason

#### **VI.7.1.4. Fonctionnement de l'appareil :**

Pour la mise en route de l'appareil il faut :

- S'assurer que les piles
- Connecter les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur et transducteur, avec deux câbles.
- Mettre l'appareil en marche

L'appareil est maintenant prêt à l'essai, par seconde.

- Choisir la surface à tester, de préférence lisse et sans crevasses. Le mode d'osculation pourra être direct, semis direct ou indirect
- Etendre une fine couche de produit couplant sur chaque transducteur.
- Placer et appuyer les transducteurs sur la surface. L'opérateur déplacera légèrement les sondes en maintenant la pression pour obtenir la valeur stable la plus faible sera considérée comme valeur à retenir.
- Relever les valeurs affichées et répéter l'

#### **VI.7.1.5. Conclusion :**

Il est évident que les essais non destructifs, en raison de leur simplicité, de leur coût et de la possibilité qu'elles confèrent à l'ingénieur d'ausculter à volonté, sur ouvrage ou sur éprouvette, à n'importe qu'elles âge du béton, suscitent un intérêt particulier chez les chercheurs, qui tentent d'établir des relations empiriques entre les résultats d'essai non destructif (indice scolérométrique vitesse de propagation des ultrasons) et la résistance à la compression obtenue par écrasement, sous presse hydraulique.

L'utilisation de ses essais a augmenté le niveau de sécurité de la construction et contribue également à améliorer sa planification. Tout cela, garde son économie dans les limites considérables.

#### **VI.7.2. Vibration ambiante :**

##### **VI.7.2.1. Introduction :**

La protection sismique abstraite des constructions du patrimoine culturel est une priorité dans les pays exposés aux tremblements de terre, en raison de leur importance culturelle, historique et touristique.

Le concept de la méthode de vibration ambiante a été introduit dans les années 30 par l'US Coast and Geodetic Survey (Carder 1937) et est devenu de plus en plus utilisée. Un certain nombre de mesures ont été effectuées en France depuis la moitié des années 90 .

Ce qui est aujourd'hui nouveau , c'est l'accroissement des essais dynamiques réalisés sur les ouvrages a des fins de meilleure évaluation ou pour la surveillance de leur comportement structural.

Les mesures de vibrations sont effectuées a des fins diverses : l'amélioration des connaissances sur le comportement dynamique des structures, la vérification de modèles, l'évaluation de l'intégrité structurale, la surveillance de l'état structural, ou la vérification de l'aptitude au service. L'amélioration des capacités d'acquisition et de traitement des données dynamiques a conduit au développement d'algorithmes puissants pour la détermination des caractéristiques mécaniques.

Des relations empiriques linéaires entre les paramètres dynamiques (période, amortissement) et les caractéristiques géométriques sont obtenues dans différentes régions du monde et sont compilées dans le tableau 1.



**Fig.1.32. Équipement de mesure des vibrations ambiantes - capteur de vitesse et station d'acquisition**

#### **VI.7.2.2. Aménagements d'équipements et des mesures :**

L'équipement de mesure des vibrations ambiantes utilisé se compose d'un système d'acquisition de 24 bits et de capteurs de vitesse de 1 s (bande passante de fréquence 1 à 20 Hz) produits par Buttan Service-Tokyo - Tokyo Soil Research Co , Ltd , Fig. 4. Les mesures des vibrations ambiantes sont effectuées à l'aide de trois dispositions d'élimination du capteur, Fig. 5, utilisant simultanément des capteurs de vitesse de 6 à 8.

Pour chaque mise en page de mesure, deux échantillons de 3 min sont enregistrés à l'aide d'une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

#### **VI.7.2.3. Analyse des données et résultats préliminaires :**

Une analyse spectrale fourier est utilisée pour estimer les fréquences modales de l'ouvrage à partir des enregistrements d'historique des vibrations ambiantes.

Cette approche dans le domaine des fréquences est utilisée pour identifier les caractéristiques modales (Iiba et coll. 2004; Kohler et coll. 2005; Demetriu et coll. 2012). Dans Fig. 6 est présenté un exemple d'enregistrements de vitesse temporelle de la mise en page 2. Les spectres d'amplitude Fourier pour les enregistrements obtenus dans les systèmes d'élimination des capteurs

## **VI.8. Évaluation des dommages du système structurel :**

Les premières dispositions relatives à l'évaluation sismique des bâtiments existants ont été appliquées par deux chapitres du code sismique P100-1992 qui a été principalement utilisé pour la conception sismique de nouvelles structures. Sur la base de ces dispositions, une activité soutenue d'évaluation sismique a été réalisée pour un grand nombre de structures, en particulier pour ceux qui appartiennent à des institutions publiques.

Selon P100-3/2008, la catégorie de risque sismique d'un bâtiment existant est établie en fonction des valeurs de trois facteurs différents associés à trois critères d'évaluation :

l'évaluation qualitative qui vérifie les conditions sismiques du système structurel et les détails et les connexions des éléments structurels

l'évaluation des dommages qui vise à évaluer l'état de dommages existants induit par les tremblements de terre précédents et/ou d'autres actions .

(iii) l'évaluation quantitative, basée sur l'analyse sismique structurelle et les vérifications explicites de la force et de la capacité de déformabilité des éléments structurels en ce qui concerne les besoins sismiques.

## **VI.9. Conclusion :**

La vulnérabilité sismique des bâtiments peut être évaluée pour un ensemble de structures par des méthodes d'évaluation à l'échelle urbaine ; parmi ces méthodes la vibration ambiante qui sert à évaluer l'état de dommages induit par les tremblements de terre et estimer les fréquences modales de l'ouvrage à partir des enregistrements historiques .

## **VII. La méthode push-over pour l'analyse non linéaire :**

### **VII.1. Introduction :**

Parmi les plusieurs méthodes d'analyse de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une structure, l'analyse statique non linéaire en poussée progressive « push-over » inspirée de l'ATC 40 est la méthode idéale vue sa simplicité.

Cette méthode est innovante par rapport aux méthodes statiques ou dynamiques linéaires décrites dans le Règlement Parasismique Algérien. Cette innovation fut établie à partir du constat que lors de sollicitations sismiques, l'importance des dommages est davantage fonction des déplacements dans la structure que des forces.

### **VII.2. But de l'essai :**

L'objectif principal de cet essai est d'exposer l'analyse statique non linéaire « push-over » qui est un outil puissant et très utile qui peut permettre aux ingénieurs de structures d'évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments existants . On démontre aussi l'utilisation des résultats de cette analyse pour l'estimation des degrés de dommages que peut subir une structure sous l'effet d'un séisme.

### **VII.3. La méthode de l'analyse non linéaire :**

La méthode d'analyse statique non linéaire push-over est une méthode approximative dont laquelle la structure est assujettie à une charge latérale croissante jusqu'à atteindre un déplacement cible .l'analyse push-over consiste en une série d'analyse élastique superposées pour approximer une courbe de capacité ou courbe effort tranchant à la base déplacement au sommet.

La première étape est d'appliquer la force gravitaire et latérale qui découle d'une loi de comportement du type bilinéaire ou tri-linéaire , la charge latérale est augmentée d'une manière itérative jusqu'à atteindre une première plastification d'un élément (apparition de rotule plastique) .

### **VII.4. Conclusion :**

L'analyse push-over est une procédure dans laquelle la structure subit des charges latérales suivant un certain modèle prédéfini en augmentant l'intensité des charges jusqu'à ce que les modes de ruine commencent à apparaître dans la structure . les résultats de cette analyse sont représenté sous forme de courbe qui relie l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement du sommet de la structure .

## CHAPITRE II

### Revue bibliographique sur des travaux réalisés sur les minarets

## **Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présentons les travaux réalisés sur quelques Minarets dans le monde ,à savoir : la turquie ,la romanie , l'inde ,l'egypte et l'algerie.

Ainsi que les méthodes de calculs , les essais , et les résultats obtenues après l'étude de ces minarets .

## **II. En turquie :**

Ce travail est présenté par Adem Dogangun · Ramazan Acar · Halil Sezen · Ramazan Livaoglu en 2008.

### **II.1. Le minaret :**

Presque tous les minarets historiques en Turquie ont été construits à l'aide de pierre taillée, de blocs de maçonnerie ou de combinaison de ces deux matériaux. Les propriétés structurelles et géométriques de chaque minaret de maçonnerie, ou structure de tour mince, dépendent de nombreux facteurs, y compris les connaissances et les applications structurelles au moment de la construction, l'expérience de l'architecte ou de l'ingénieur, la sismicité de la région et la disponibilité des matériaux de construction dans cette région. Les récents tremblements de terre en Turquie ont montré que la plupart des minarets de maçonnerie dans les régions sismiques élevées sont vulnérables aux dommages structurels et à l'effondrement. Dans cette étude, afin d'étudier le comportement dynamique des minarets historiques de maçonnerie non forcés, trois minarets représentatifs avec 20,25, et 30 m de hauteur ont été modélisés et analysés à l'aide de deux mouvements au sol enregistrés lors des tremblements de terre de Kocaeli et Duzce, en Turquie en 1999. Les analyses modales des modèles ont montré que les périodes structurelles et la réponse structurelle globale sont influencées par la hauteur du minaret et les caractéristiques spectrales du mouvement des entrées. Le déplacement dynamique et les antécédents de stress axial sont calculés aux points critiques sur les minarets. Des exemples de minarets historiques avec des corps cylindriques en brique solide et avec des bases carrées en pierre ou en brique de pierre mixte sont montrés dans Fig.1. Le minaret de la mosquée Haci Bayram à Ankara (construit en 1427) a un corps de maçonnerie en brique avec trois diamètres différents et deux balcons de taille différente ou des galeries sur sa hauteur (Fig.1a). Lors des tremblements de terre de 1999Kocaeli en Turquie, plusieurs minarets historiques de maçonnerie sont tombés (Dogangun et al. 2007), dont le minaret de la mosquée Semsî Ahmet Pasa (Imaret) à Bolu (Fig.1b).



**Fig II.1. Exemples de minarets de briques de maçonnerie historiques en Turquie:**  
**(a) Hacı Bayram mosque, Ankara, (b) Semsî Ahmet Pasa mosque, Bolu**

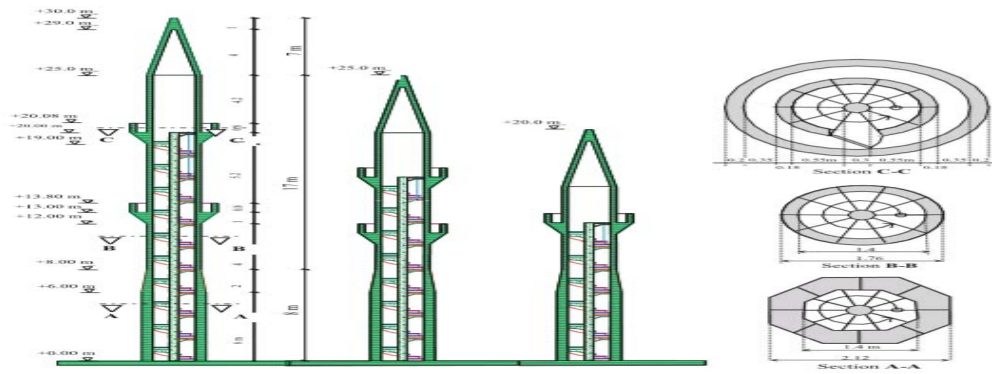
Les blocs de pierre taillée ont été utilisés plus largement pour la construction de minarets de maçonnerie historiques en Turquie. La figure 2 montre des minarets de maçonnerie en pierre historiques avec un, deux et trois balcons. La figure 2a montre le minaret de maçonnerie le plus haut de Turquie (71 + 14m), qui a été construit à côté de la mosquée Selimiye à Edirne en 1568. Le minaret de maçonnerie en pierre de la mosquée Kadi, construit au cours du XVIIe siècle à Bolu, s'est effondré lors du tremblement de terre de 1999 à Duzce (Fig.2b).



**Fig .II.2. Minarets de maçonnerie en pierre historiques en Turquie: (a) Mosquée Selimiye photo: Ö. Iskender Tuluk, Edirne, (b) Mosquée Kadi, Bolu**

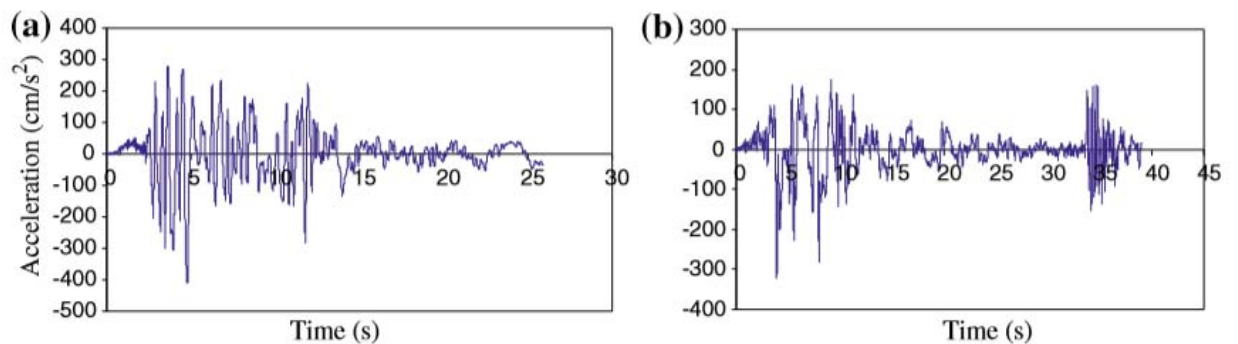
## **II.2. Analyse dynamique des minarets de maçonnerie en pierre :**

Bien que la hauteur d'un minaret en maçonnerie varie largement en fonction de nombreux facteurs, notamment l'emplacement ou les matériaux de construction utilisés, la hauteur d'un minaret typique avec un seul balcon sur sa hauteur est d'environ 20 à 25 m. Dans cette recherche, deux minarets génériques d'une hauteur de 25 et 30 m et doubles balcons (Minaret I et Minaret II) et un autre minaret de 20 m de haut avec un seul balcon (Minaret III) ont été modélisés et analysés. Comme le montre la figure 3.



**Fig. II.3. Propriétés géométriques et en coupe des modèles de minarets**

Des analyses dynamiques de l'histoire du temps sont effectuées pour chaque modèle de minaret en utilisant deux mouvements du sol enregistrés lors des tremblements de terre du 12 novembre 1999 à Duzce et du 17 août 1999 à Kocaeli (Fig.4)



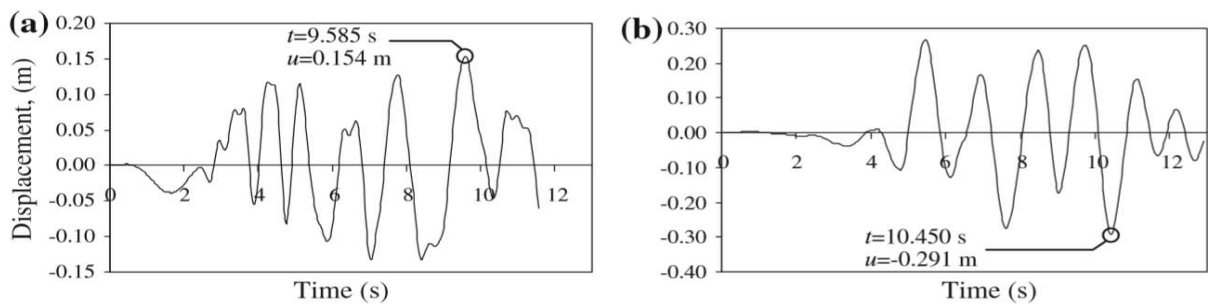
**Fig. II.4. Mouvements du sol (a) du 12 novembre Duzce et (b) du 17 août tremblements de terre de Kocaeli**

Après quelques analyses effectuées à l'aide des enregistrements complets du mouvement du sol, il a été constaté que les réponses maximales des modèles complets se produisaient dans les 12 premiers. Ainsi, des analyses dynamiques chronophages ont été effectuées et présentées pour les 12 ou 14 premières années seulement. Les sept premières périodes modales des modèles de minarets (calculées à partir de l'analyse modale) et leur contribution à la réponse dynamique totale sont présentées dans le tableau 1.

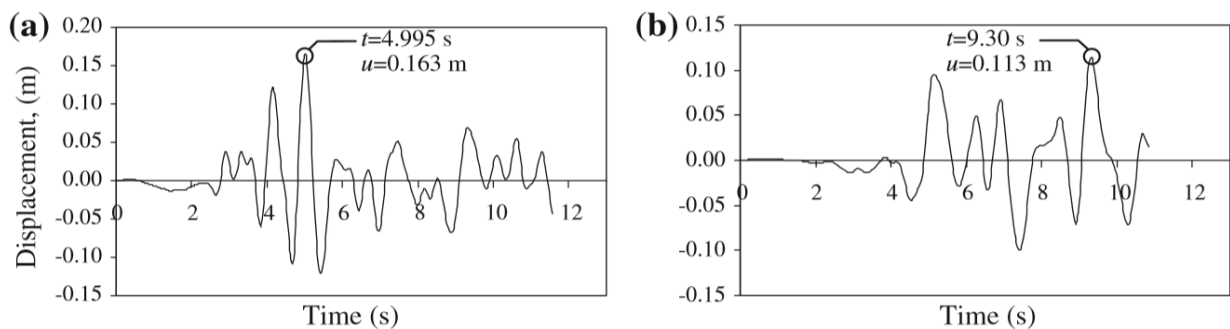
Tableau II. 1 : Les sept premiers modes et leurs facteurs de participation

Mode number		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Direction		x	y	x	y	Torsion	x	y
Minaret-I	Period (s)	1.41	1.37	0.29	0.28	0.13	0.12	0.12
	Participation factor (%)	47.16	4.79	21.49	2.26	0.00	9.12	1.09
Minaret-II	Period (s)	0.90	0.87	0.21	0.20	0.11	0.09	0.08
	Participation factor (%)	47.40	5.11	22.05	2.51	0.00	8.56	1.22
Minaret-III	Period (s)	0.51	0.49	0.12	0.12	0.07	0.06	0.05
	Participation factor (%)	49.21	5.01	21.91	2.57	0.02	8.74	1.20

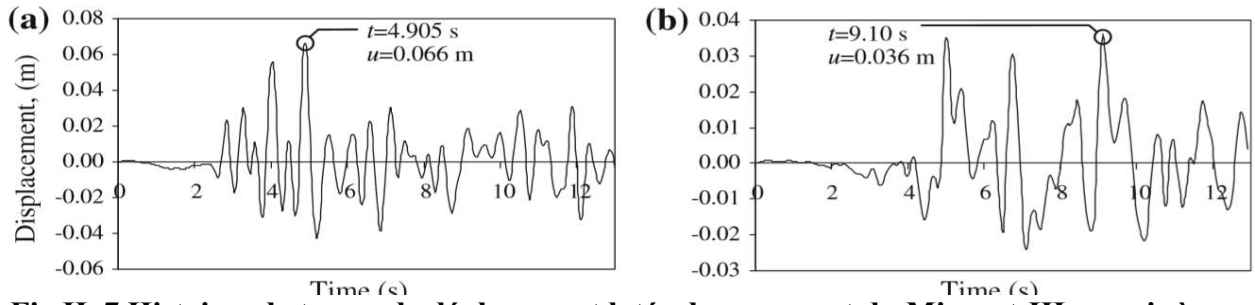
Les figures 5 à 7 montrent les déplacements latéraux élastiques calculés au sommet de trois modèles de minarets soumis aux mouvements du sol du tremblement de terre de Duzce et Kocaeli en 1999



**Fig II .5 Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-I soumis à (a) Duzce et (b) tremblements de terre de Kocaeli**

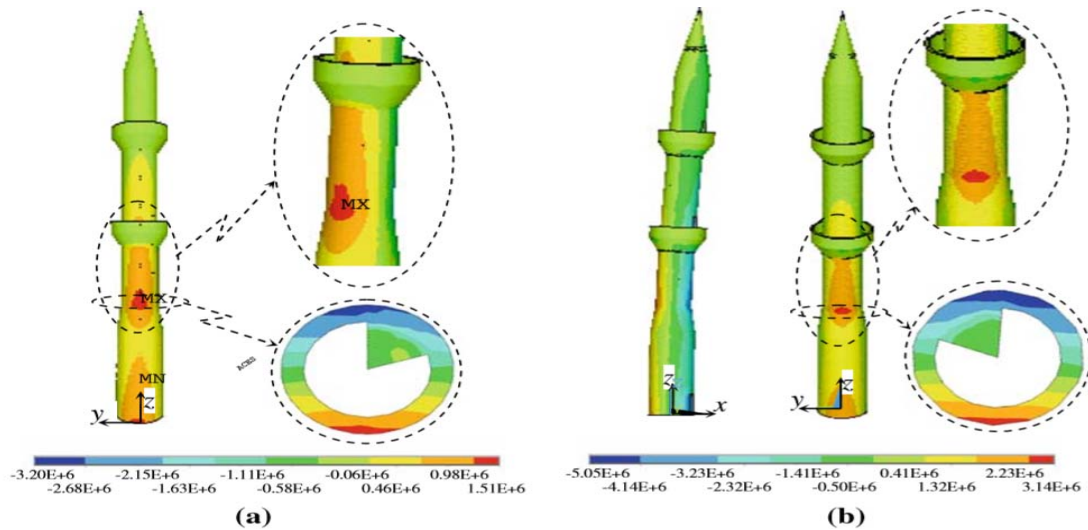


**Fig II .6 Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-II soumis à (a) Duzce, et (b) tremblements de terre de Kocaeli**

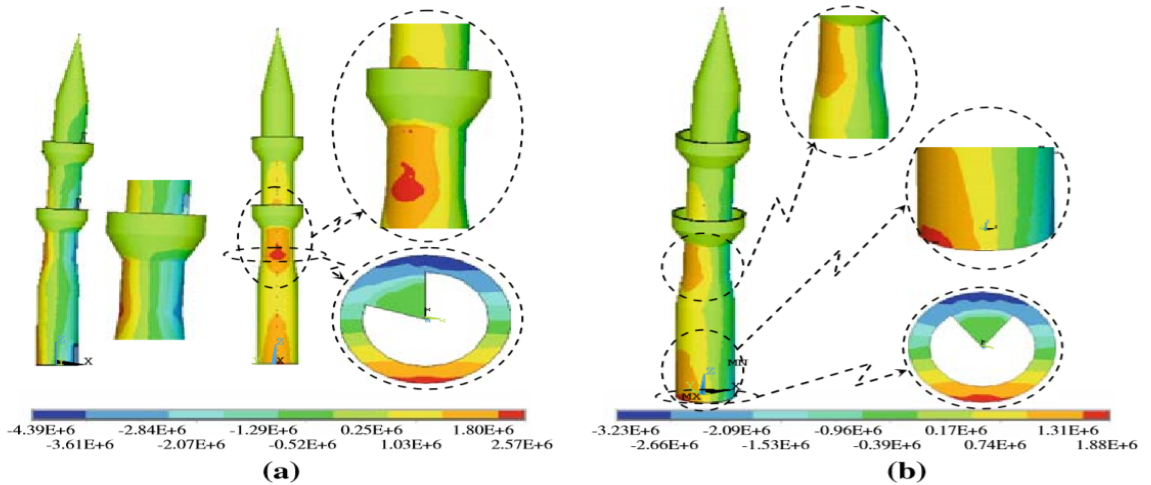


**Fig II. 7** Histoires de temps de déplacement latéral au sommet du Minaret-III soumis à (a) Duzce et (b) tremblements de terre de Kocaeli

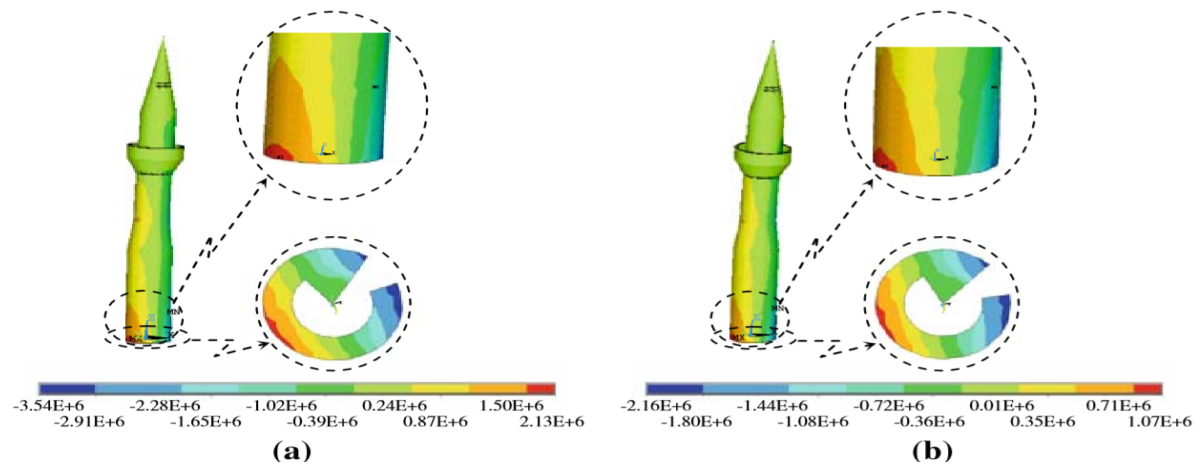
Les contours de contrainte axiale les plus critiques calculés lors de l'analyse dynamique des modèles de minarets sont présentés dans les figures 8 à 10. Notez que le mouvement d'entrée a été appliqué dans la direction x. Comme le montrent les figures, les contraintes maximales de traction et de compression se produisent à une hauteur de 8 m, immédiatement au-dessus de la zone de transition dans les minarets de 25 et 30 m de hauteur.



**Fig II.8.** Contours de stress pour Minaret-I: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records



**Fig II. 9.** Contours de stress pour Minaret-II: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records



**Fig .II.10. Contours de stress pour Minaret-III: (a) Duzce, et (b) Kocaeli records**

### II.3. Conclusions :

Trois minarets génériques de 20, 25 et 30 m de hauteur ont été modélisés et analysés à l'aide d'un programme d'analyse par éléments finis. Bien que la contribution de chaque mode structurel à la réponse totale soit très similaire, les périodes modales étaient toujours plus grandes pour les minarets plus hauts. Des analyses dynamiques de l'histoire du temps ont été effectuées pour les trois modèles soumis à deux mouvements horizontaux du sol enregistrés lors des tremblements de terre de 1999 à Kocaeli et Duzce, en Turquie. Les minarets plus hauts ont connu des déformations dynamiques plus importantes et ont eu des cycles de réponse plus longs. Les résultats des modèles de calcul indiquent que les contraintes flurales et axiales sont les plus importantes en haut du segment de transition. Combinée à d'importantes forces de cisaillement près du fond du minaret, la grande majorité des défaillances de minarets en maçonnerie se sont produites dans cette région lors de récents tremblements de terre. En outre, pour les minarets avec la base ou la botte attachée à la structure de la mosquée, une rigidité et une rigidité supplémentaires fournies par la mosquée empêchent la déformation et les dommages à l'intérieur de la base. Les contours de contrainte axiale maximale ont montré que les plus grandes contraintes de compression et de traction se produisent immédiatement au-dessus de la région de transition dans les minarets de 25 et 30 m de haut. En revanche, les contraintes axiales maximales se sont produites au fond du minaret de 20 mètres de haut. Les historiques temporels des contraintes axiales sont calculés à la section efficace critique des minarets. La contrainte de traction maximale était d'environ 3,1 MPa, ce qui était probablement suffisamment élevé pour causer des dommages importants.

### III . En Roumanie

#### III.1. L'évaluation sismique de la mosquée royale "Carol I" à Constanța :

Alexandru Aldea, Cristian Neagu, Eugen Lozinca, Sorin Demetriu, Sidi Mohammed El-Amine Bourdim et Federico Turano ont travaillé sur cet article en 2018.

La protection sismique abstraite des constructions du patrimoine culturel est une priorité dans les pays exposés aux tremblements de terre, en raison de leur importance culturelle, historique et touristique. L'article présente un premier pas vers l'évaluation sismique de la "Carol I" Mosquée Royale à Constanța, Roumanie : mesures des vibrations ambiantes et évaluation de l'État de dommages existants induit par les tremblements de terre précédents et / ou d'autres actions (index R2 selon le code roumain pour l'évaluation sismique des bâtiments existants P100-3/2008). La mosquée a été construite en 1910-1913 et a une structure de maçonnerie avec une hauteur de 26 m dôme en armé. Il une hauteur d'environ 40 m RC minaret et c'est donc entre les premières constructions civiles utilisant du béton armé en Roumanie.. La construction a connu les tremblements de terre majeurs de 1940 (MW - 7,7) et 1977 (MW - 7,5) et plusieurs autres événements de taille moyenne provenant de Vrance une source sismique sous crustale sans dommages importants. Cependant, l'agression climatique à long terme a eu un impact négatif sur la structure. Des mesures de vibration ambiante ont été exécutées dans le minaret. Les résultats seront utilisés pour l'étalonnage approprié du modèle de calcul pour l'analyse linéaire.

La mosquée royale «Carol I» est la plus grande mosquée de Roumanie, Son architecte Victor Stefanescu a utilisé un mélange de styles arabe et égyptien, Fig. 11. les mesures des vibrations ambiantes sont considéré pour l'extraction des paramètres modaux (fréquences naturelles, formes de mode et taux d'amortissement) et pour l'étalonnage des modèles numériques. Les résultats caractérisent le comportement dynamique linéaire des minarets en cas de vibrations de faible amplitude



**Fig.II.11. Vue générale de la mosquée royale «Carol I» à Constanța, Roumanie**

## III.2. Mesures des vibrations ambiantes :

### III.2.1. Dispositions de l'équipement et de mesures :

L'équipement de mesure des vibrations ambiantes utilisé se composait d'un système d'acquisition de 24 bits et de capteurs de vitesse de 1 s (bande passante de fréquence 1 à 20 Hz) produits par Buttan Service-Tokyo - Tokyo Soil Research Co., Ltd . Les mesures des vibrations ambiantes ont été effectuées en mai 2017 à l'aide de trois dispositions d'élimination du capteur, Fig. 12, utilisant simultanément des capteurs de vitesse de 6 à 8. Pour chaque mise en page de mesure, deux échantillons de 3 min ont été enregistrés à l'aide d'une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

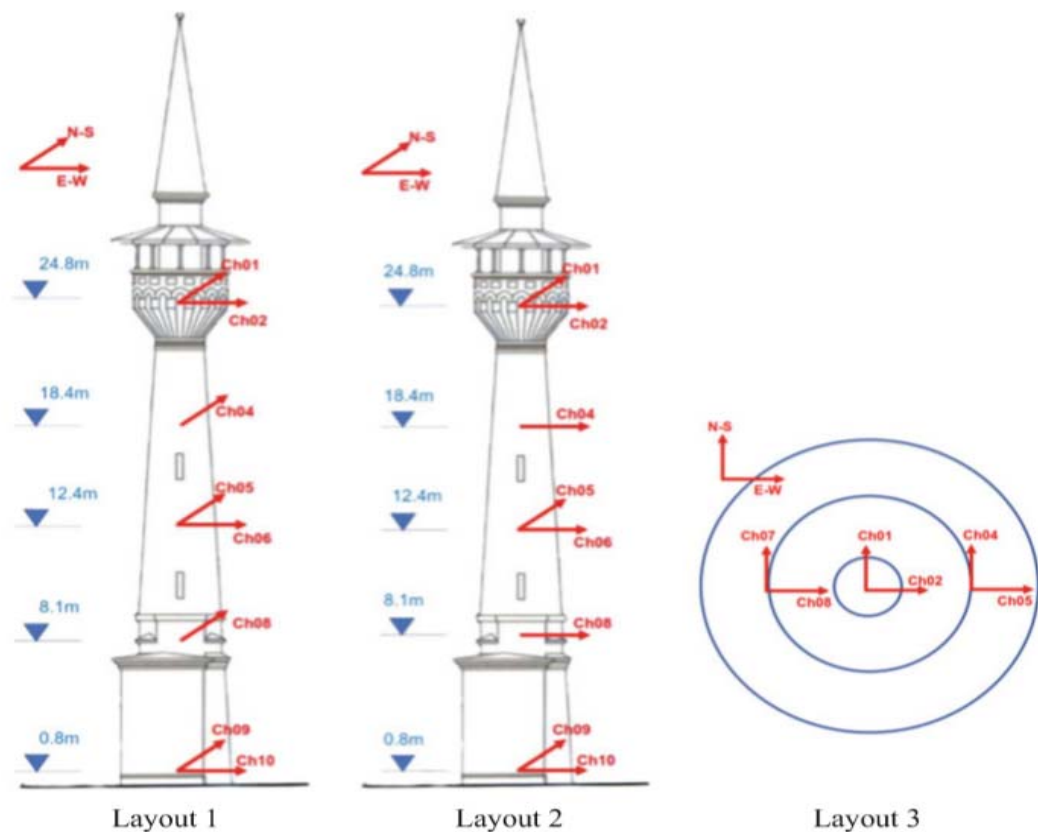
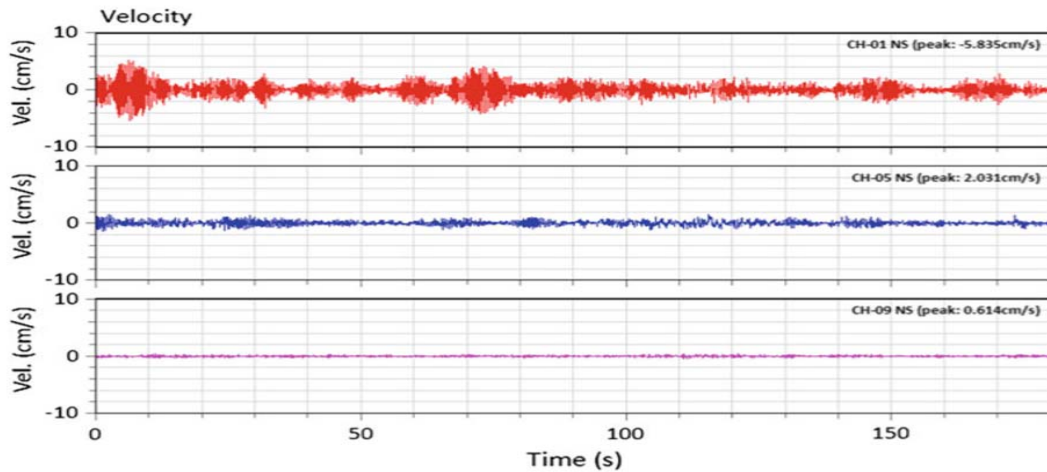


Fig .II.12. Mesures des vibrations ambiantes - dispositions des capteurs

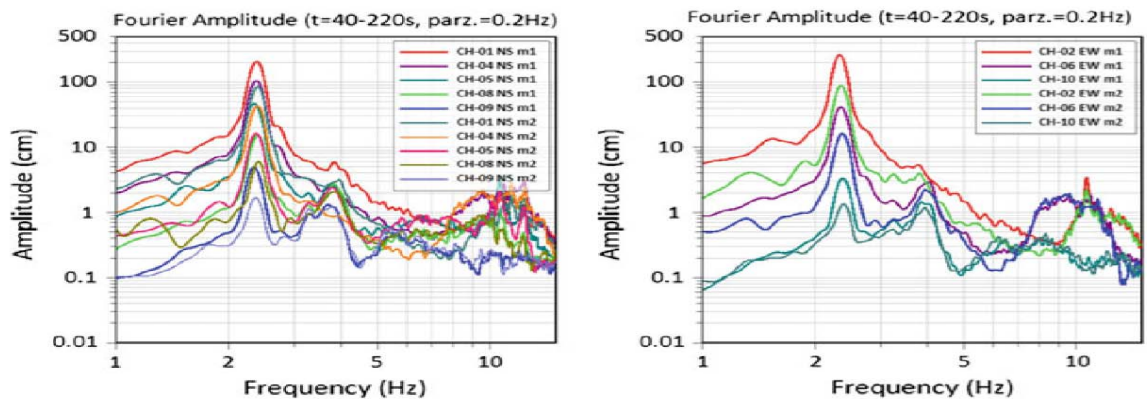
### III .2.2 Analyse des données et résultats préliminaires :

Une analyse spectrale fourier a été utilisée pour estimer les fréquences modales du minaret à partir des enregistrements d'historique des vibrations ambiantes. Cette approche dans le domaine des fréquences est utilisée pour identifier les caractéristiques modales . Dans Fig.3 est présenté un exemple d'enregistrements de vitesse temporelle de la mise en page .

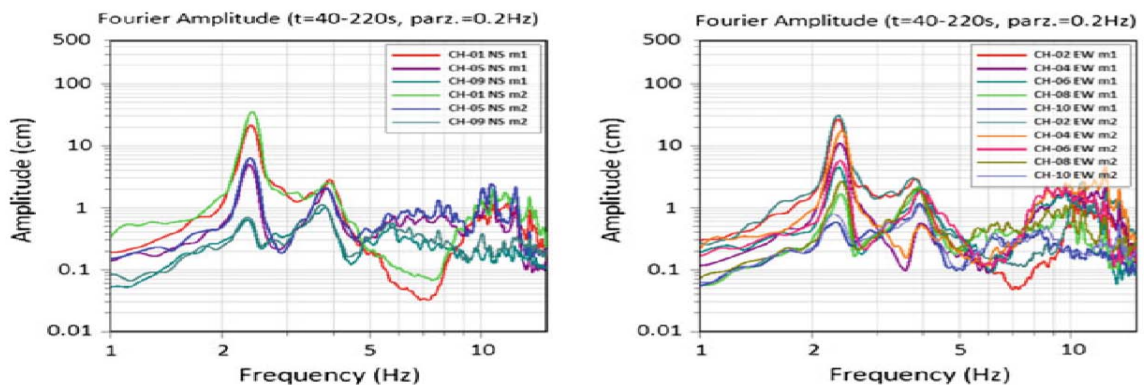


**Fig. II.13. Exemple d'enregistrements de vitesse dans le temps - capteurs Disposition 2**

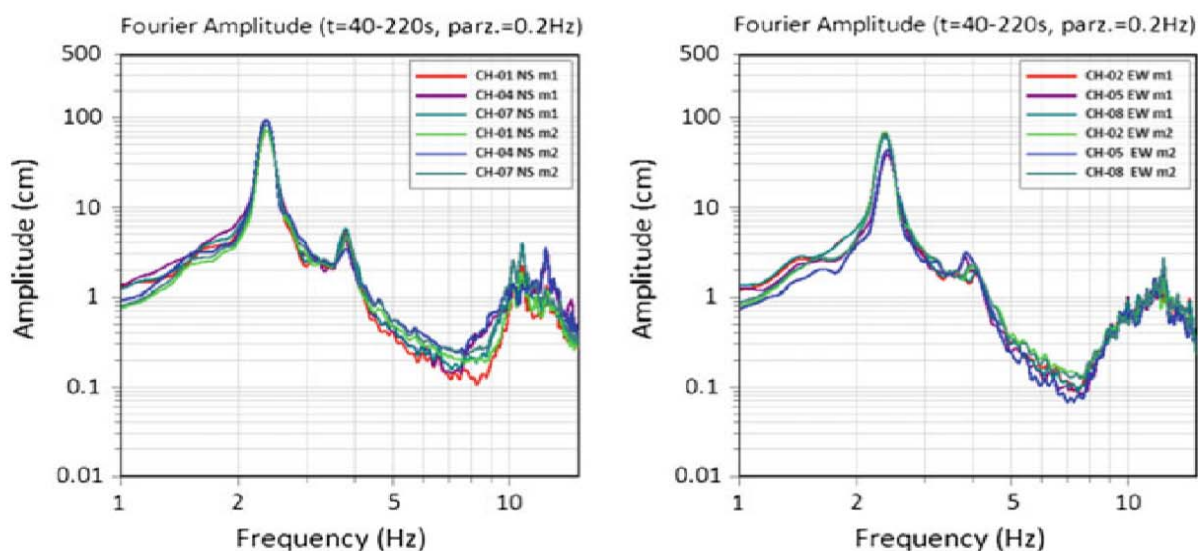
Les pics spectraux identifiés sur les Fig.14, 15 et 16 indiquent des caractéristiques dynamiques stables dans toutes les mesures et dispositions. Comme prévu, les fréquences correspondant aux amplitudes spectrales maximales sur les deux directions de mesure montrent des différences mineures. Les premières fréquences modales du minaret identifiées par les mesures de vibrations ambiantes sont:  $f_1 = 2,38$  Hz ( $T_1 = 0,42$  s),  $f_2 = 3,80$  Hz ( $T_2 = 0,26$  s).



**Fig. II.14. Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 1**



**Fig. II.15. Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 2**



**Fig. II.16 Spectres d'amplitude de Fourier - Capteurs Disposition 3**

### III.3. Évaluation des dommages du système structurel :

En Roumanie, les premières dispositions relatives à l'évaluation sismique des bâtiments existants ont été appliquées par deux chapitres du code sismique P100-1992 qui a été principalement utilisé pour la conception sismique de nouveaux bâtiments. Sur la base de ces dispositions, une activité soutenue d'évaluation sismique a été réalisée pour un grand nombre de bâtiments, en particulier pour ceux qui appartiennent à des institutions publiques.

Selon les dispositions du code roumain P100-3 / 2008, dans le cas des bâtiments en maçonnerie, l'évaluation des dommages in situ vise à identifier certains types de dégradations, tandis que pour les structures RC, il existe d'autres types de dommages à découvrir. Les inspections in situ de la mosquée royale ont révélé des dommages importants aux éléments structuraux qui réduisent leur résistance à la fois à la gravité et aux charges latérales ainsi qu'à la rigidité latérale globale

#### III.3.1. Indice de degré de dommage pour le minaret RC :

Au cours de ses premières décennies, le minaret RC a subi une dégradation progressive en raison de l'exposition aux vents marins. Il a donc été réaménagé deux fois en 1957–1958 et 1993. En conséquence, de nos jours, le minaret RC ne présente que quelques dommages mineurs. Quelques concentrations de contraintes superficielles ont été observées dans la gaine extérieure RC près des ouvertures des fenêtres et quelques fissures associées aux cycles de gel-dégel ont été détectées dans la couche de plâtre de la structure de support RC réhabilitée du toit du balcon du minaret. Dans le cas du minaret, les inspections du site se sont concentrées sur d'autres types de dommages, spécifiques aux structures en béton armé, fissures normales ou inclinées et déformations résiduelles dans les zones critiques des éléments de structure fendant les fissures au niveau des épissures de liaison, rupture des barres d'armature, effritement de la couverture en béton, etc. l'indice de degré de dommage déterminé selon les dispositions P100-3 / 2008 était  $R2_{\text{minaret}} = 82$



**Fig .II.17 Fissures mineures dans la couche extérieure de revêtement du minaret RC de la mosquée**



**Fig .II.18 Fissures dans la couche de plâtre des poutres RC qui supportent le toit du balcon du minaret**

### **III.4. Conclusions :**

La mosquée royale "Carol I" à Constana a été exposée à une agression climatique à long terme, et à plusieurs tremblements de terre sous-crustals majeurs et modérés de Vrancea. Il a fait l'objet de plusieurs réparations d'une ampleur différente en 1925, 1957 et 1993. L'inspection visuelle de la mosquée a révélé des fissures dans la majeure partie de la maçonnerie, certaines d'entre elles assez importantes, et une dégradation continue due aux infiltrations d'eau. L'évaluation des dommages a révélé que de nos jours la structure de maçonnerie de la mosquée est beaucoup plus affectée que le minaret RC déjà rénové. Considérant le minaret comme une structure indépendante et en tenant compte seulement de l'indice de degré de dommages R2, son hould être classé dans la classe sismique RsIII qui est associé aux bâtiments qui, après le séisme de terre de niveau de conception pourrait subir des dommages structurels n'affectant pas la sécurité structurelle sur l'ensemble. D'autre part, l'indice de degré de dommages déterminé pour la structure de maçonnerie de la mosquée correspond à la classe de risque sismique RsII qui comprend les bâtiments qui pourraient subir des dommages structurels et non structurels majeurs, mais pour lesquels l'effondrement structurel est légèrement probable.

## **IV. Egypt ( Qusun ) : Said A. El-kholy1 1 Assistant Professor, Faculty Engineering, Fayoum University, Fayoum , Egypt.10 fevrier 2011**

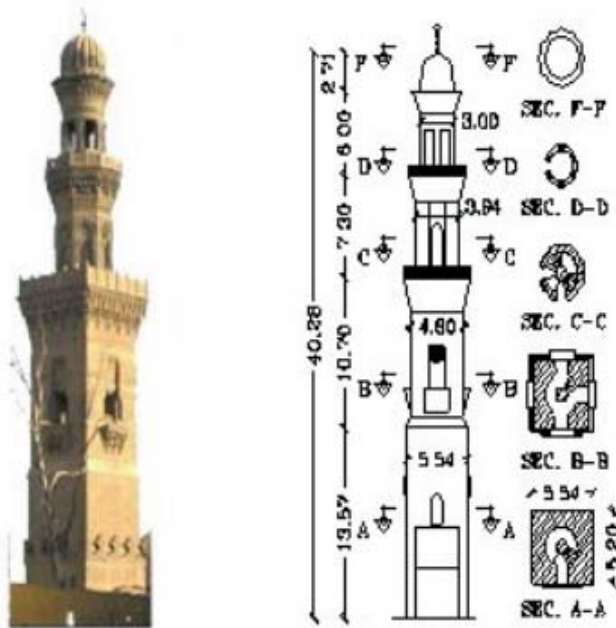
### **IV.1. Le minaret :**

L'évaluation sismique et la rénovation des structures historiques sont difficiles

Tâche en raison de la complexité géométrique et du manque de connaissances sur le matériau du noyau interne et en raison de l'incapacité du matériau de maçonnerie à résister aux contraintes de traction. Un meilleur La compréhension du système de résistance de ces structures est la question clé pour une analyse structurelle, interprétation des résultats d'analyse et une intervention appropriée. Le principal L'objectif de cette étude est d'étudier la vulnérabilité sismique des minarets de style mamelouk.

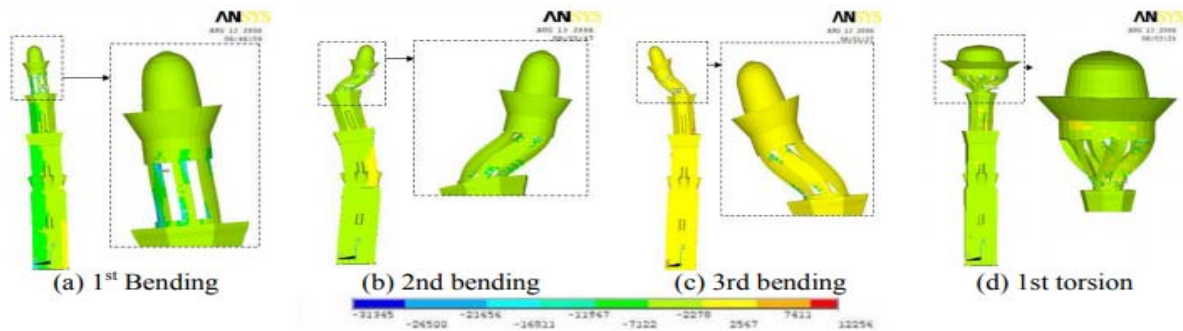
Un important inventaire de minarets historiques existe maintenant dans la soi-disant «vieille ville du Caire».

Pour enquêter sur la vulnérabilité sismique des minarets de style mamelouk le "minaret Qusun" (1337 A.D.) a été sélectionné pour représenter ce type de structures. Le minaret considéré pour cela l'étude est présentée sur la Fig. (19).



**Fig.II .19. Qusun minaret**

Le minaret a un impressionnant puits rectangulaire en pierre, portant un deuxième étage octogonal avec un Mabkharah en pierre sur le dessus. À première vue, il semble que le minaret soit une autoportante structure. Cependant, un examen plus attentif indique qu'il a été construit dans le cadre du Seif Eldin Monastère Qusun Al-Saki (Khanqah ) pour l'enseignement des règles islamiques. Après la destruction du monastère adjacent, le minaret est actuellement séparé et repose directement sur le sol. la hauteur totale du minaret est de 40,28 mètres avec le premier balcon à 16,80 mètres, le second balcon à 24,40 mètres, et le troisième à 31,85 mètres du niveau du sol. La base le puits rectangulaire mesure environ 5,20 × 5,54 mètres et s'étend jusqu'au premier balcon, comme le montre la Fig. (19). Le corps du minaret à la base est composé de trois couches différentes à partir de la surface externe du minaret au noyau interne. La couche extérieure est un mur de calcaire de 45 cm d'épaisseur, noyau est une colonne de calcaire circulaire avec un diamètre de 1,50 mètre de large, et un massif faible un matériau de remplissage a été utilisé pour combler l'espace entre la couche externe et le noyau interne [El-Habbal étal, 2008]. En 1888, de graves fissures profondes dans le bas du minaret ont été observées. Dans réponse, le Comité arabe pour la restauration du patrimoine islamique a restauré cette partie du minaret en utilisant quatre tiges d'acier installées pour attacher ensemble les murs à quatre côtés du minaret. De plus, le comité a installé des parapets en pierre sur les balcons et réparé la partie endommagée par le haut cap "Mabkharah" [El-Attar et Osman, 2004].



**Fig. II.20. Répartition des contraintes dans différentes formes de mode**

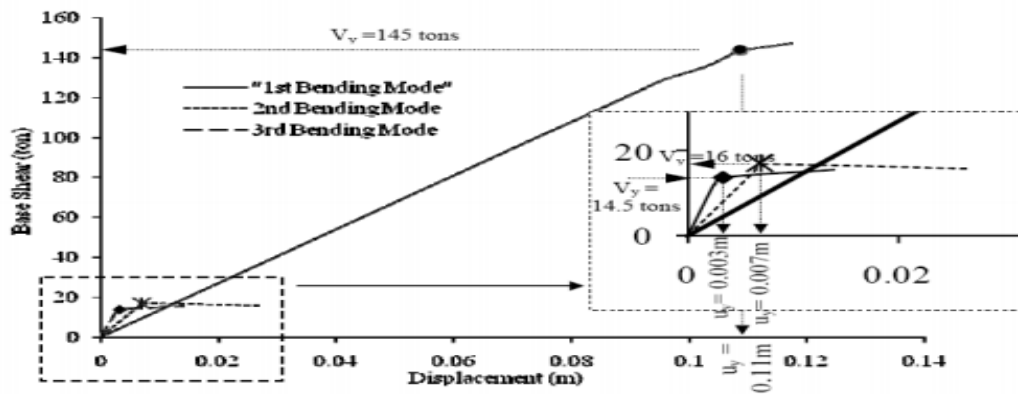
Une analyse modale est effectuée pour extraire les caractéristiques dynamiques du minaret et identifier les parties les plus sollicitées du corps du minaret. Au sein d'ANSYS, l'analyse de la dynamique de puissance sans agrégation de masse est utilisé à cette fin. Les contraintes modales sont également extraites et tracées. Comme le montre la Fig. (20), les parties les plus sollicitées pour toutes les formes de mode sont les colonnes de pierre supérieures portant l'ampoule supérieure et sections à grandes ouvertures telles que portes et fenêtres.

Par conséquent, ces zones sont définies comme éléments solides non linéaires-inélastiques, et les autres parties sont définies comme solides linéaires-élastiques éléments.

### IV.3. Analyse modale de PUSHOVER :

L'objectif principal de cette section est d'identifier les niveau de fiabilité de l'analyse push-inélastique pour ces structures en danger. À cette fin, la performance sismique inélastique du minaret est déterminée à l'aide du Modal Pushover Analyse (MPO), à comparer ultérieurement à la performance sismique inélastique du minaret obtenu à partir d'une analyse dynamique non linéaire. Les charges de poussée sont appliquées à plusieurs niveaux le long de la hauteur du minaret. Charges de poussée sont appliqués aux niveaux des 1er et 2ème balcons et du point haut de Mabkharah. Ces charges sont appliquées proportionnellement au déplacement de la forme du mode à chaque niveau. L'analyse MPO a été répétée trois fois pour prendre en compte les déplacements modaux correspondant au

premier, deuxième et formes du troisième mode de flexion. Le cisaillement de base total résultant dans chaque cas d'analyse est tracé en fonction de le déplacement maximal du point supérieur calculé à partir de l'analyse MPO dans chaque mode (Fig.21).



**Fig. II. 21.. Cisaillement de la base par rapport au déplacement du point supérieur en raison de l'analyse de Pushover.**

La figure (21) montre le changement du déplacement du point le plus élevé en conjonction avec le changement dans le cisaillement de base total appliqué dans chaque forme de mode obtenue à partir de l'analyse MPO. Il est trouvé à partir de cette dernière relation que la structure se comporte dans le premier mode de flexion forme linéairement

élastique la plupart du temps et le rendement se produit juste avant la rupture structurelle complète dans ce mode. Pour évaluer les performances du minaret pendant les tremblements de terre, trois tremblements de terre différents sont utilisés.

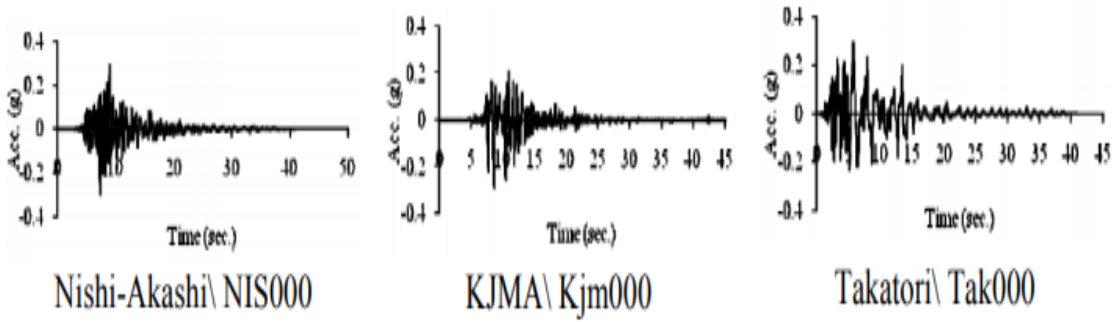
Lors de la sélection de ces enregistrements sismiques, trois aspects principaux sont pris en compte, à savoir le contenu en fréquence de l'enregistrement et l'accélération maximale du sol (PGA) jusqu'à la valeur maximale du sol rapport de vitesse (PGV) ( $a/v$ ).

#### IV. 4. ANALYSE DES PERFORMANCES :

Les enregistrements sélectionnés ont été récupérés pour couvrir un large éventail de fréquences et rapports  $A/V$ . Les trois tremblements de terre sélectionnés proviennent de la même excitation au sol (Kobe 1995) dans trois stations d'enregistrement différentes, comme indiqué dans le tableau (2). Les trois enregistrements sont réduits à trois valeurs différentes de PGA: 0,10 g, 0,15 g, 0,30 g qui correspondent à la accélérations maximales attendues du séisme dans la ville du Caire pour une période de retour de 475 ans. La figure 22 montre les enregistrements de tremblement de terre après avoir été mis à l'échelle à un PGA de 0,3 g

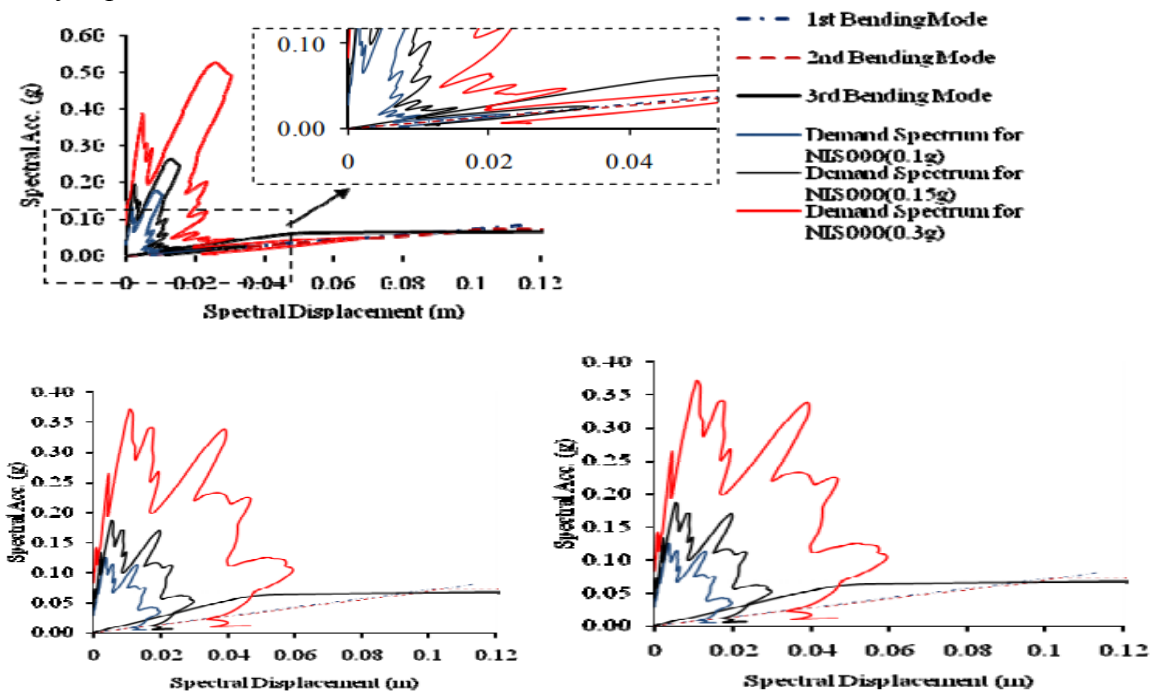
Tableau II.2. Enregistrements de séismes sélectionnés

Station\component	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	Distance to fault	A/V	Frequency content category
Nishi-Akashi\ NIS000	0.51	37.28	9.529	11.1 km	1.37	High
KJMA\ Kjm000	0.82	81.30	17.695	0.6 km	1.00	Medium
Takatori\ Tak000	0.61	127.1	35.788	0.3 km	0.48	Low



**Fig .II.22. Excitations au sol utilisées mises à l'échelle à un PGA de 0,30 g.**

La performance sismique structurelle est déterminée en définissant le point de performance structurelle. Selon FEMA 274 [FEMA 2000], le point de performance est défini comme l'intersection entre la courbe de demande sismique et la courbe de spectre de capacité, qui définit la demande de déplacement imposée à la structure [Saleh et Zaghw]. À cette fin, le total le cisaillement de base (V) résultant dans chaque cas d'analyse est tracé en fonction du point supérieur maximal déplacement calculé à partir de l'analyse MPO à chaque mode, comme le montre la Fig. (22), alors, les équations (1 à 3) sont utilisées pour déterminer les courbes de spectre de capacité pour chaque mode, comme montré dans la Fig. (23). Le spectre de réponse inélastique est ensuite converti en déplacement spectral par rapport à l'accélération spectrale connue sous le nom de courbe de demande. Le tableau (3) résume les résultats de l'analyse pushover.



**Fig.II.23. Courbes de capacité et de demande pour les tremblements de terre examinés avec différents PGA.**

Tableau .II.3 . Résultats de l'analyse pushover

Eq. record	PGA (g)	Performance Point						SRSS	
		1 <sup>st</sup> Bending mode		2 <sup>nd</sup> Bending mode		3 <sup>rd</sup> Bending mode			
		S <sub>d</sub> (m)	S <sub>a</sub> (g)	S <sub>d</sub> (m)	S <sub>a</sub> (g)	S <sub>d</sub> (m)	S <sub>a</sub> (g)	S <sub>d</sub> (m)	S <sub>a</sub> (g)
NIS000	0.10	0.022	0.017	0.022	0.0076	0.005	0.015	0.032	0.024
	0.15	0.034	0.025	0.033	0.032	0.010	0.0216	0.048	0.046
	0.30	0.067	0.050	0.067	0.051	0.023	0.032	0.098	0.078
Kjm000	0.10	0.013	0.011	0.013	0.010	0.016	0.025	0.024	0.029
	0.15	0.088	0.014	0.018	0.013	0.024	0.034	0.093	0.039
	0.30	0.038	0.029	0.035	0.025	0.047	0.066	0.070	0.076
Tak000	0.10	0.053	0.032	0.046	0.026	0.071	0.070	0.100	0.081
	0.15	0.077	0.057	0.072	0.051	0.080	0.071	0.132	0.104
	0.30	0.150	0.100	0.12	0.073	0.110	0.072	0.221	0.143

#### IV.5. Conclusion :

Cette recherche étudie les performances sismiques des minarets historiques dans le but de Définissant un critère pour leur modernisation / réparation sismique visant à réduire le risque de dommages prohibitifs ou défaillance catastrophique. De l'étude détaillée ci-dessus, les éléments suivants les remarques finales peuvent être formulées:

1) Les minarets de style mamelouk sont des structures très rigides. Leur géométrie particulière les rend vulnérable aux tremblements de terre modérés.

2) La ductilité structurelle de ces bâtiments historiques change en fonction du tremblement de terre contenu de fréquence.

3) La partie la plus vulnérable des minarets de style mamelouk est la structure supérieure de l'ampoule.

4) L'analyse modale peut être utilisée pour définir les régions les plus sollicitées de ces structures à modélisé à l'aide de modèles de matériaux non linéaires.

5) Étant donné que l'analyse par poussée modale sous-estime le comportement sismique de ces structures, il est n'est pas la procédure la plus appropriée pour utiliser l'analyse modale non linéaire par poussée pour estimer comportement sismique de ces bâtiments historiques

6) Plutôt que d'utiliser une procédure d'analyse modale non linéaire, la validité de l'adaptation

L'analyse pushover doit être examinée comme un outil simple pour étudier les performances sismiques de ces structures historiques.

V. **Inde(Qutb minar )** : Sreeja Chandran, A. Meher Prasad et M.S. Mathews

Institut indien de technologie, Département de génie civil, Chennai, Inde 2006

### V.1.Le minaret :

La construction du Minar a commencé en 1198 après JC et a atteint son statut actuel en 1368 après JC en trois phases. En plan, le Minar est circulaire, la base ayant un diamètre de 14,07 m et elle se rétrécit jusqu'à un diamètre de 3 m au sommet sur une hauteur de 72,45 m. La figure 23 montre l'élévation en coupe et le plan du Minar à chaque niveau d'étage. Il se compose d'une coquille cannelée extérieurement et d'un puits intérieur, qui supporte un escalier en colimaçon de pierres de quartzite de Delhi. Dans son aspect artistique, les caractéristiques les plus élégantes du Minar sont les balcons soutenus par un système de brackets en stalactite. La maçonnerie en coquille de Minar est constituée d'un remplissage de maçonnerie en moellons épais recouvert à l'extérieur de pierres de taille de grès rouge et à l'intérieur de pierre de quartzite de Delhi. Le puits central est en maçonnerie de moellons avec revêtement en pierre de quartzite. La fondation est de 10,2 m de profondeur et a été renforcée par le coulis de ciment au cours de 1971-1972 sur l'observation d'une inclinaison dans la verticalité du Minar.

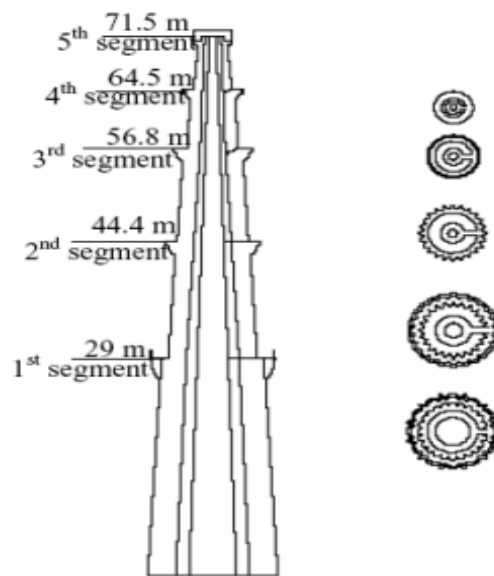
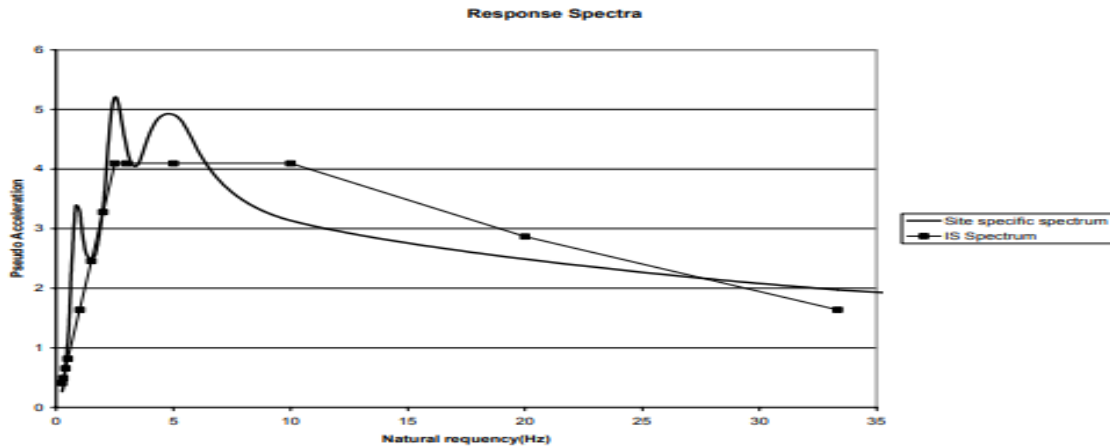


Fig. II.24.: L'élévation sectionnelle et le plan du Minar à chaque étage.

### V.2. MODÉLISATION NUMÉRIQUE :

La modélisation par éléments finis se fait à l'aide du package commercial d'éléments finis ANSYS. La procédure de modélisation comprend deux étapes, comme expliqué.



**Fig. II.25.: spectre de réponse spécifique au site**

### **V.2.1. Modélisation géométrique :**

Deux stratégies de modélisation différentes sont adoptées pour la présente étude :

#### **V.2.1.1. Modélisation de faisceaux 3D :**

Le Minar est modélisé à l'aide d'éléments de poutre Timoshenko 3D. Ces éléments conviennent pour analyser les structures de poutres élancées et modérément tronquées / épaisses. Une formulation linéaire est utilisée avec six degrés de liberté à chaque nœud. La section effilée du Minar est modélisée selon la vraie géométrie.

#### **V.2.1.2. Modélisation solide :**

Les 10 éléments solides du tétraèdre incliné avec trois degrés de liberté de translation par nœuds sont utilisés pour la modélisation solide. L'arbre central de la tour est modélisé avec la connexion entre le puits et la coque maintenue uniquement au niveau des balcons à travers des dalles de linteau. les dalles de linteau sont modélisées à l'aide d'éléments SHELL 63 à comportement membranaire.

### **V.2.2. Modélisation des matériaux :**

La maçonnerie Minar est idéalisée comme élastique linéaire et l'analyse est réalisée pour deux différents ensemble de paramètres de matériau, l'un aligné sur une extrémité plus rigide et l'autre aligné sur une plus flexible fin. Dans l'analyse du faisceau 3D, le matériau est considéré comme élastique linéaire et isotrope.

Le module élastique de la coque Minar est pris comme la moyenne volumétrique du module de chaque couche. À l'extrémité rigide supérieure, le module élastique est calculé comme 5,6 GPa et à l'extrémité inférieure flexible fin, il a été obtenu comme 1,4 GPa.

**tableau II.4 : Les paramètres mécaniques calculés pour la maçonnerie**

		$E_{\text{sandstone}}=39\text{GPa}$	$E_{\text{sandstone}}=7.8\text{GPa}$
Ex (GPa)	Sand stone	20.6	4.1
	Quartzite	24.3	4.9
Ey (GPa)	Sand stone	14.4	2.9
	Quartzite	17.0	3.4
Ez (GPa)	Sand stone	27.0	5.4
	Quartzite	31.7	6.3
Gxy (GPa)	Sand stone	4.1	0.83
	Quartzite	4.9	0.98
Gxz (GPa)	Sand stone	7.5	1.5
	Quartzite	8.9	1.8
Gyz (GPa)	Sand stone	4.8	0.9
	Quartzite	5.6	1.1
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Sand stone	2300	2000
	Quartzite	2600	2300

### V.3. Analyse structurelle :

L'analyse structurelle comprend deux parties: l'analyse statique sous chargement par gravité et dynamique analyse sous une charge sismique réalisable. La charge sismique est représentée par un site un spectre de réponse spécifique et une analyse du spectre de réponse sont effectués.

L'analyse statique montre une très bonne marge de sécurité sous poids propre et inclinaison pour les deux paramètres de matériau.

Le la contrainte de compression principale maximale observée sous le poids mort est d'environ 5 MPa boîtier plus rigide où il est d'environ 2,5 MPa dans le boîtier flexible. La procédure d'analyse sismique

et les résultats obtenus pour les modèles de poutre 3D et de solide 3D sont discutés séparément dans le sections suivantes :

#### V.3.1. Analyse de faisceau 3D

##### V.3.1.1. Analyse modale :

L'analyse modale est effectuée pour obtenir la fréquence naturelle et les modes de vibration du système. Les propriétés dynamiques de la tour correspondant à des paramètres de matériaux rigides et flexibles sont répertoriés dans les tableaux 5 et 6 respectivement.

##### V.3.1.2 Analyse du spectre de réponse :

Le Minar incliné a été analysé pour un chargement combiné sous un spectre de réponse spécifique au site et poids mort.

Le spectre montré sur la figure est utilisé comme entrée de charge sismique. Un maximum un déplacement horizontal de 21,7 cm est observé dans le cas de paramètres de

matériaux rigides et 30,3 cm est obtenu dans le cas de paramètres de matériaux flexibles. Dans le niveau considéré d'excitation sismique

**Tableau. II.5. : Les propriétés dynamiques de la tour pour les paramètres des matériaux rigides.**

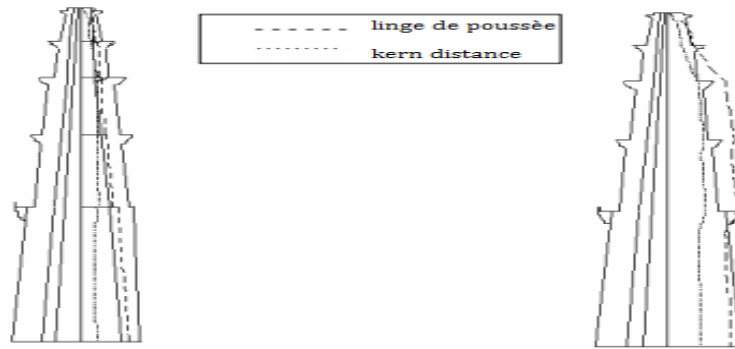
Mode	Natural frequency (Hz)	Individual modal participation mass (percentage)			Cumulative Modal Participation Mass (percentage)			Predominant Vibration Direction
		U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	
1	1.11	0.00	0.00	38.82	0.00	0.00	38.82	Z
2	1.11	38.82	0.00	0.00	38.82	0.00	38.82	X
3	3.26	0.00	0.00	22.53	38.82	0.00	61.35	Z
4	3.26	22.53	0.00	0.00	61.35	0.00	61.35	X
5	6.5	0.00	0.00	9.24	61.35	0.00	70.58	Z
6	6.5	9.23	0.00	0.00	70.58	0.00	70.58	X
7	7.69	0.00	0.00	0.00	70.58	0.00	70.58	Torsion
8	8.12	0.00	64.31	0.00	70.58	64.31	70.58	Y
9	10.46	0.00	0.00	6.79	70.58	0.00	77.37	Z
10	10.46	6.79	0.00	0.00	77.37	0.00	77.37	X

**Tableau .II.6. : Les propriétés dynamiques de la tour pour les paramètres des matériaux flexibles.**

Mode	Natural frequency (Hz)	Individual modal participation mass (percentage)			Cumulative Modal Participation Mass (percentage)			Predominant Vibration Direction
		U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	
1	0.58	0.00	0.00	39.07	0.00	0.00	39.07	Z
2	0.58	39.07	0.00	0.00	39.07	0.00	39.07	X
3	1.71	0.00	0.00	22.6	39.07	0.00	61.66	Z
4	1.71	22.6	0.00	0.00	61.66	0.00	61.66	X
5	3.39	0.00	0.00	8.5	61.66	0.00	70.77	Z
6	3.4	8.5	0.00	0.00	70.77	0.00	70.77	X
7	4.04	0.00	0.00	0.00	70.77	0.00	70.77	Torsion
8	4.25	0.00	64.66	0.00	70.77	64.66	70.77	Y
9	5.47	0.00	0.00	6.73	70.77	64.66	77.51	Z
10	5.47	6.73	0.00	0.00	77.51	64.66	77.51	X

### V.3.1.3 Discussions :

La ligne de poussée est une mesure de la stabilité de la structure . Les lignes de poussée sont calculées à différents sections le long de la hauteur du Minar et la stabilité de la structure contre le renversement est vérifié. La figure 26 montre les lignes de poussée calculées pour un spectre de période de retour de 1000 ans paramètres de matériaux rigides et flexibles, tracés avec la distance de crénage de la section. La distance de crénage représente l'excentricité limite de la poussée résultante afin d'éviter la évolution des contraintes de traction au niveau de la section.



**Fig .II 26.: Ligne de poussée du Minar sous charge sismique et gravimétrique calculée**

Il est clair d'après la fig .II.26. qu'une fois que les propriétés du matériau coïncident avec l'extrémité rigide la plus élevée toute la section du Minar sera sous tension .

Pour les sections annulaires la limite d'excentricité maximale de la poussée résultante de manière à empêcher le développement de la tension à la section peut être calculée en utilisant la formule suivante

$$e = r_0/2 [ 1 + ( r_i / r_0 )^2 ]$$

L'excentricité de la ligne de poussée par rapport au centre de la section est calculée comme suit:

$$e = M / W$$

où M est le moment de flexion dû à la charge sismique et W est le poids propre du structure.

### **V.3.2. Analyse solide 3D :**

Le Minar est modélisé en trois dimensions et analysé pour la gravité et le spectre combinés chargement. Le modèle tridimensionnel a incorporé les ouvertures à la base du premier et des deuxièmes segments du Minar. Les trois couches de maçonnerie de la coque extérieure sont intégrées séparément.

#### **V.3.2.1. Analyse modale :**

Une analyse modale est effectuée afin d'obtenir la fréquence naturelle et les formes de mode du structure pour les paramètres de matériaux rigides et flexibles. La figure 27 montre les deux premières formes de mode du Minar.

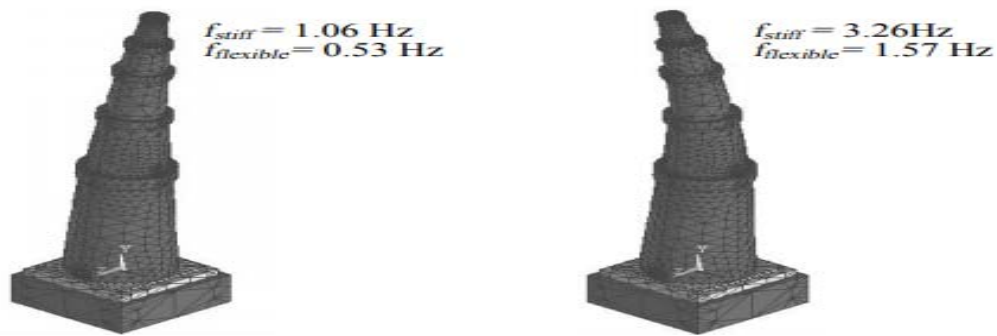


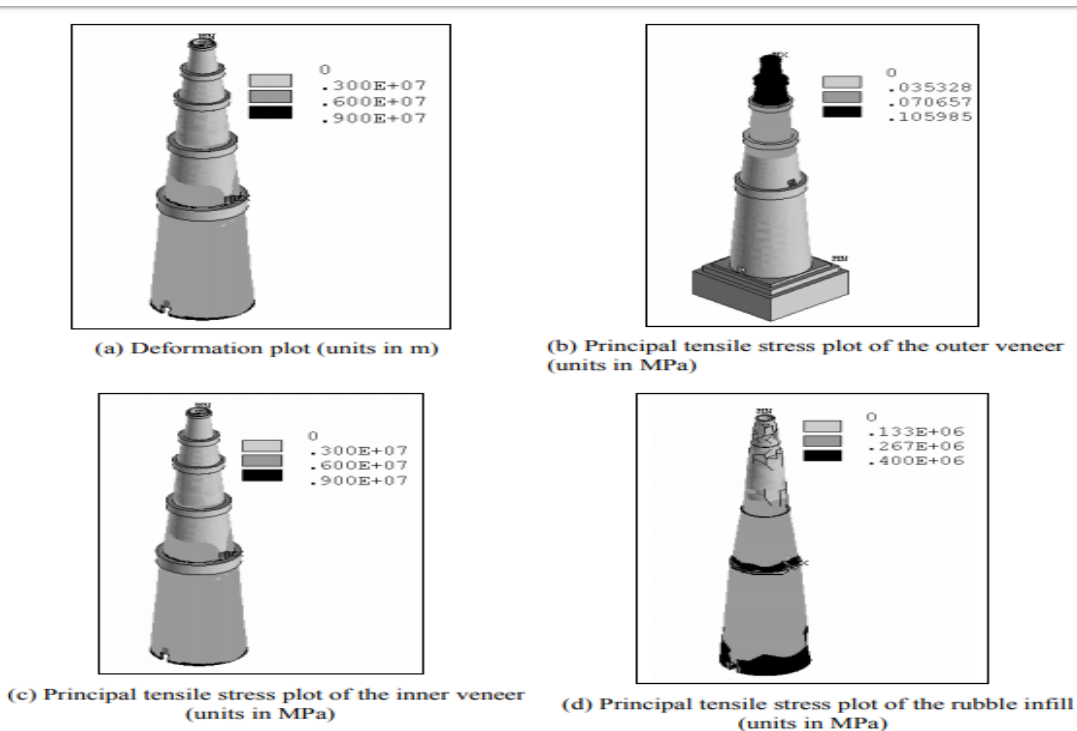
Fig. II .27.les deux premières formes de mode du Minar.

Tableau. II 7.: Comparaison des résultats d'analyse modale des modèles poutre et solid

Mode No	Natural frequency				Predominant direction	
	Solid model		Beam model		Solid model	Beam model
	For stiff material	For flexible material	For stiff material	For flexible material		
1	1.06	0.53	1.11	0.58	Z	Z
2	1.07	0.53	1.11	0.58	X	X
3	3.26	1.57	3.26	1.71	Z	Z
4	3.32	1.60	3.26	3.26	X	X
5	6.5	3.29	6.5	3.39	Torsional	Z
6	7.15	3.44	7.69	3.4	Z	Torsional

### V.3.2.2. Analyse du spectre :

Le Minar a été analysé pour un chargement de spectre de réponse spécifique au site et de poids mort. La charge spectrale est appliquée le long de la direction X globale. La déformation et la traction principale les courbes de contrainte pour les paramètres du matériau rigide sont représentées sur la figure .



**Fig .II.28.: Résultats de l'analyse du spectre de réponse d'une analyse de modèle solide 3D**

#### V.4. CONCLUSION :

D'après l'étude, il est clair que le Minar est potentiellement dangereux pour un tremblement de terre d'intensité considérée. La maçonnerie historique, qui est de nature très fragile, ne peut pas supporter les contraintes de traction. Le matériau échouera une fois que les contraintes de traction se développeront dans la section. La contrainte de traction élevée non réaliste

Les valeurs obtenues à partir de l'analyse sont dues à l'hypothèse du mode de matériau élastique linéaire pour la maçonnerie. Néanmoins, les résultats indiquent un possible effondrement potentiel de la structure sous un charge sismique d'intensité considérée. Plus le Minar est rigide, plus la possibilité de effondrer. Sous des événements sismiques d'intensités réduites, un comportement satisfaisant du Minar peut être attendue que si la fréquence naturelle du Minar tombe dans la plage flexible ( $<0,5$  Hz). des évaluations sont nécessaires concernant les paramètres mécaniques de la maçonnerie Minar afin faire des commentaires sur la conception de la restauration sismique.

## VI. En Algérie :

### VI.1. Définition :

Projet de fin d'étude intitulé « Etude de confortement du minaret de mosquée Ali Ben Abitaleb », présenté par Gourida Abdelmalek et Tioua Abdullah en 2017.

Dans ce travail, ils ont proposé d'étudier le renforcement d'un Minaret en R+6 contreventé par des portiques autostables (système poteaux - poutres) en béton armé appartenant à la mosquée d'Ali Ibn Abi Talib.

Cette étude a été effectuée sur le Minaret, en se basant sur les résultats des essais à l'ultrason qui donnent la résistance de béton.

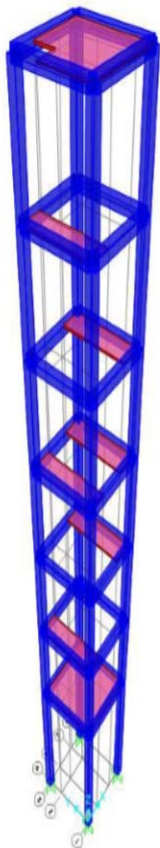


Fig .II.29 : vue en 3D du minaret



Fig. II .30. : vue du minaret

Après avoir les résultats des ultrasons, Ils ont passé à la vérification de la résistance de cette structure par l'étude du vent et l'étude sismique .Ils ont constaté que les forces sismique sont plus grands par rapport les force du vent , donc ils ont utilisé pour les calculs les forces sismiques.

A partir des résultats de la vérification des éléments structuraux qu'ils ont entamé, ils ont noté les insuffisances au niveau de :

- La vérification du déplacement de les étages RDC, 1er ,2eme et 3eme étages insuffisantes.

- Le minaret présentent un risque de renversement (n'est pas stable)  $M_s/M_r < 1.5$
- Le ferrailage des poteaux de RDC insuffisant.
- Le ferrailage des poutres de RDC et 1er étage insuffisant.

Donc ils doivent trouver des solutions pour tous les problèmes

De ce fait, ils ont pu affirmer que ce Minaret est vulnérable. Afin d'améliorer le comportement du Minaret vis à vis du séisme, il a été procédé au renforcement de la structure par l'introduction de nouveaux éléments de contreventement.

### VI.2. Proposition :

- Un renforcement métallique (forme X) comme solution pour éliminer le déplacement.
- Modifier la semelle pour stabiliser le Minaret.

Ils ont vérifié le nouveau comportement du Minaret suite à l'insertion des nouveaux éléments.

le schéma de la variante proposée le renforcement métallique pour le confortement du Minaret.

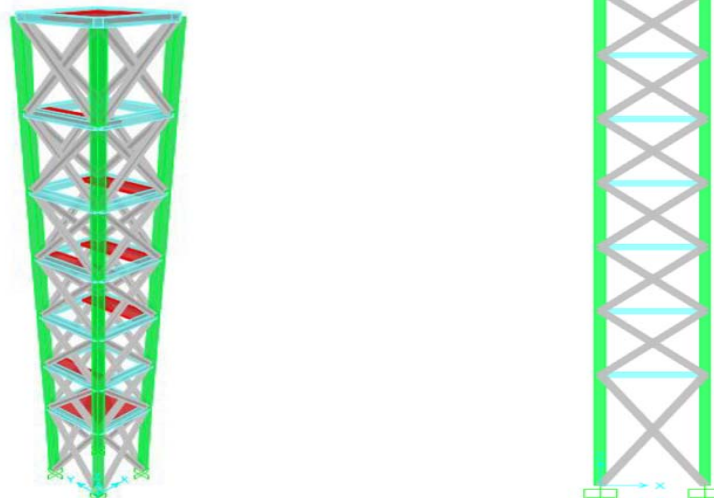
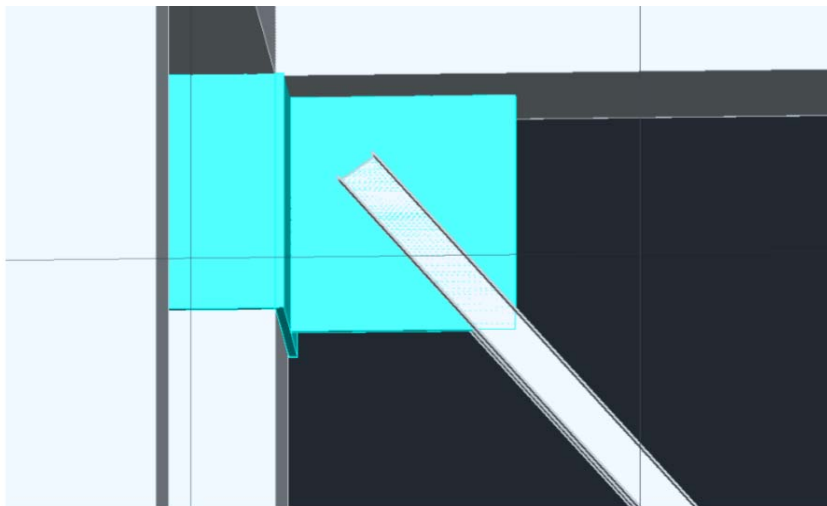
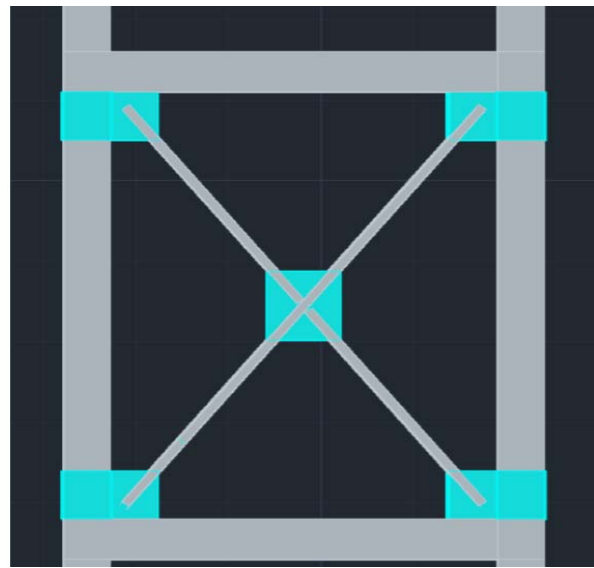
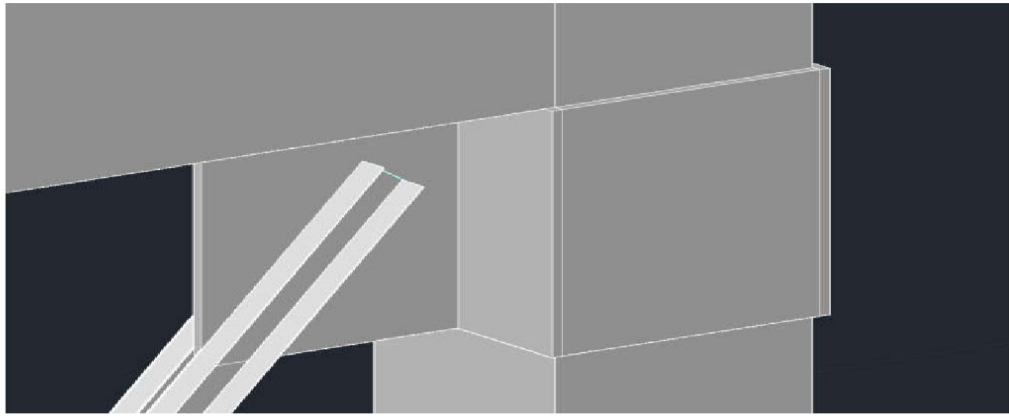


Fig .II .31. disposition du profile (vue en 3D)

(sens X-Z)



**Fig .II.32. système d'assemblage**

### **VI.3. Conclusion:**

Après avoir appliqué le renforcement métallique et la modification sur la semelle, ils ont constaté que tous les problèmes ont été résolus.

Donc :

- le minaret est stable vis-à-vis du renversement.
- Le problème du déplacement dans les étages RDC, 1er, 2ème et 3ème a été résolu.
- Les ferraillements longitudinaux des poteaux et poutres ont été résolus.

Donc la solution est applicable sans aucun problème.

## CHAPITRE III

### Analyse Dynamique des Trois Minarets

## **I. Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'élaboration des modèles numériques en éléments finis de trois (03) minarets choisis comme cas d'études des mosquées situés dans la ville de Mostaganem à savoir le minaret de la mosquée Kobaa (cité Mon-plaisir), minaret de la mosquée Abu El Hassan Ali Ibn Abi Saïd Merini (Tabbana), ainsi que le minaret de la mosquée El badr. Ces minarets caractérisés par des hauteurs variées entre 17 à 25m.

Après un aperçu sur les méthodes utilisées dans l'analyse dynamique, La section 3.3 fournit quelques informations et préconisations nécessaires pour accomplir la modélisation. Les modèles éléments finis en 3D développés à l'aide du logiciel Etabs sont présentés dans la section 3.4. Dans la section 3.5 les résultats de l'analyse dynamique des modèles en éléments finis seront présentés tel que ceux des déplacements, accélérations et la distribution des contraintes sous l'excitation sismique du séisme de Boumerdes 2003 et enfin une discussion des résultats trouvés.

## **II. Aperçu sur l'analyse dynamique**

Le comportement dynamique d'une structure dépend d'une part aux propriétés matérielles et géométriques de la structure et d'autre part de la nature des charges appliquées. Pour les charges variables comme le vent, l'utilisation de l'analyse statique est adéquate.

Quand la charge devienne variable plus rapidement dans le temps comme des charges de choc, vent violent et un chargement sismique, les effets inertiels deviennent significatives, donc l'analyse dynamique sera exigée (Aldaami H., 2000).

Le terme " dynamique " peut être défini simplement comme une variation temporelle ; ainsi une charge dynamique est une charge quelconque dont la grandeur ou la direction change avec le temps. De même, la réponse de la structure à une charge dynamique est également considérée comme une variation temporelle, ou dynamique (Clough RW., Penzien J., 1975). En cette partie, les méthodes dynamiques présentées dans ce paragraphe sont appropriées au chargement sismique seulement.

### **II.1. Analyse dynamique d'un problème de séisme**

Avant le début d'un tremblement de terre, la structure est en équilibre statique et si un mouvement de terre a lieu très lentement, la structure rejoindra la nouvelle position déplacée. Pendant un tremblement de terre, la structure est soumise aux déplacements au sol rapides et éprouve un certain nombre de différentes forces internes qui incluent les forces d'inertie, les forces d'amortissement et les forces élastiques. Quand la terre se déplace soudainement, l'inertie des masses distribuées dans la structure essaye d'empêcher le déplacement de la structure, ainsi la création des charges sismiques peu analogue pour appliquée des forces extérieures latérales.

La magnitude de ces forces est, bien sûr, en fonction de la masse et la longueur du temps pendant lequel le déplacement a lieu.

Dans la dynamique des structures, il est nécessaire de formuler le problème en termes d'équations différentielles par la relation des forces d'inertie à la deuxième dérivée de déplacements structurels. Les équations résultantes sont appelées équations de mouvement qui expriment l'équilibre dynamique de toutes les forces, y compris les forces d'inertie agissantes sur la structure. Bien que l'outil informatique d'aujourd'hui devient robuste, le besoin d'avoir une compréhension de l'analyse dynamique est nécessaire afin de formuler les problèmes dynamiques et d'interpréter les résultats numériques (Taranath BS., 1988).

Les méthodes dynamiques décrites dans cette partie sont adaptées à la charge sismique. Il existe différentes méthodes par lesquelles la magnitude et la distribution des forces latérales induit du séisme sont estimées sur la structure. Généralement, il est préférable d'utiliser des méthodes d'analyse dynamique simples telle que la méthode pseudo dynamique ou la méthode de spectre de réponse au lieu que des méthodes plus rigoureuses et sophistiquées. Une brève revue de quelques méthodes est présentée ici :

### **II.1.1.La méthode pseudo dynamique :**

Il s'agit d'une analyse simplifiée du spectre de réponse qui détermine la réponse de la structure, dans le mode fondamental de vibration, seulement pour la composante horizontale du mouvement du sol. Cette méthode peut être utilisée pour évaluer les contraintes de compression et de traction aux endroits au-dessus de la base de la structure. En utilisant cette information, le degré de dommages peut être estimé et pris en compte dans une analyse de la stabilité post-sismique (Hamdaoui K., 2006).

### **II.1.2.Les méthodes dynamiques modales :**

Analyse de la réponse dynamique est généralement effectuée en utilisant l'analyse modale en éléments finis.

Les principaux modes de vibration sont calculés, et la réponse de la structure au séisme est exprimée comme une combinaison de réponses modales individuelles. Il existe deux techniques pour l'analyse modale :

- i) la méthode de spectre de réponse.
- ii) l'analyse dynamique temporelle.

#### **a-La méthode de spectre de réponse**

Souvent les ingénieurs sont intéressés à la réponse maximale et non pas à l'histoire complète de la réponse. Des valeurs maximales peuvent être tracées en fonction de la période d'un oscillateur d'un seul degré de liberté.

A cause de la durée de pic de différentes réponses modales qui ne sont pas prise en compte, et à cause des pics de tous les modes qui ne se produiront pas simultanément, les réponses modales ne sont pas combinées algébriquement. Les réponses modales sont combinées en utilisant le SRSS (square root of sum of squares) ou la méthode de CQC (complète quadratique combinassions).

Dans ce qui suit, une brève récapitulation de la procédure de l'analyse spectrale est présentée (Taranath B S., 1988) :

- Sélection d'un spectre de conception ;
- Détermination des formes de mode et les périodes de vibration à inclure dans l'analyse ;
- Lire le niveau de la réponse du spectre pour la période de chaque mode considéré ;
- Calcul de la participation de chaque mode correspondant à la réponse de système à un seul degré liberté ;
- Ajout de l'effet des modes pour obtenir la réponse maximum combinée ;
- Convertir la réponse maximum combinée en cisaillements et moments pour l'usage dans la conception de la structure ;
- Analyse de la structure pour les moments et les contraintes de cisaillements résultantes de la même manière quant aux charges statiques.

#### **b-La méthode d'histoire temporelle :**

La superposition de modes ou la méthode de spectre décrite dans la section précédente est une technique utile pour l'analyse élastique des structures. Il n'est pas directement transmissible à l'analyse non élastique parce que le principe de la superposition n'est plus applicable.

En outre, l'analyse est soumise aux incertitudes inséparables à la méthode de superposition modale.

Le processus réel de combiner les différentes contributions modales est une technique probabiliste moyenne et dans certains cas peut mener aux résultats qui ne représentent pas entièrement le comportement réel de la structure.

L'analyse d'histoire temporelle surmonte ces deux incertitudes, mais elle exige un grand effort de calculs. Ce n'est pas normal d'utiliser comme outil d'analyse dans la conception pratique des structures. La méthode se compose d'une intégration directe pas à pas dans laquelle le domaine de temps est discrétisé en un certain nombre de petits incréments, et pour chaque intervalle de temps les équations du mouvement sont résolues avec les déplacements et les vitesses de l'étape précédente en tant qu'une fonction initiale. Toutes les réponses modales sont alors ajoutées pour chaque pas de temps pendant l'événement sismique.

Tandis que cette méthode est plus précise que la méthode de spectre de réponse pour un enregistrement d'accélération donné, ses résultats sont dépendants des conditions particulières de l'enregistrement d'accélération utilisé. Pour cette raison, l'analyse temporelle devrait considérer plusieurs accélérogrammes. La méthode actuelle est applicable à l'analyse élastique et inélastique.

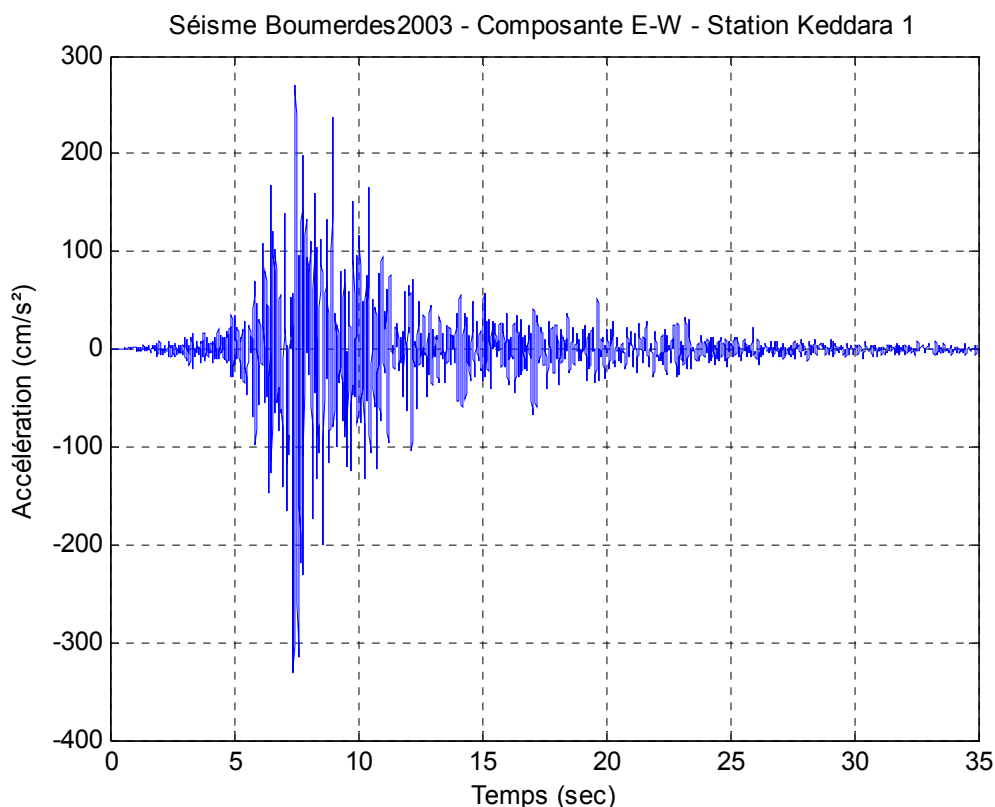
### III. Hypothèses de calcul :

Les principales hypothèses retenues sont :

- ✓ Le comportement du matériau des minarets est supposé être linéaire, élastique, homogène et isotrope ;
- ✓ Les ouvertures et les fenêtres sont prises en compte dans la modélisation ;
- ✓ L'effet du mortier entre la maçonnerie est négligé pour le cas de minaret de Tabana ;
- ✓ L'excitation sismique utilisée est réelle représenté par un pourcentage de l'excitation du séisme de Boumerdes 2003 ;
- ✓ Afin d'exclure les effets de l'Interaction Sol-Structure, les modèles numériques sont supposés être encastrés au niveau des bases.

### IV. Excitation Sismique utilisée

L'enregistrement du séisme de Boumerdes 2003 est utilisé dans cette analyse. La figure III.1 représente le chargement sismique réels du séisme de Boumerdes (Algérie) du 21 mai 2003 enregistré à la station Keddara 1 selon la composante Est-Ouest (Laouami et al, 2006).



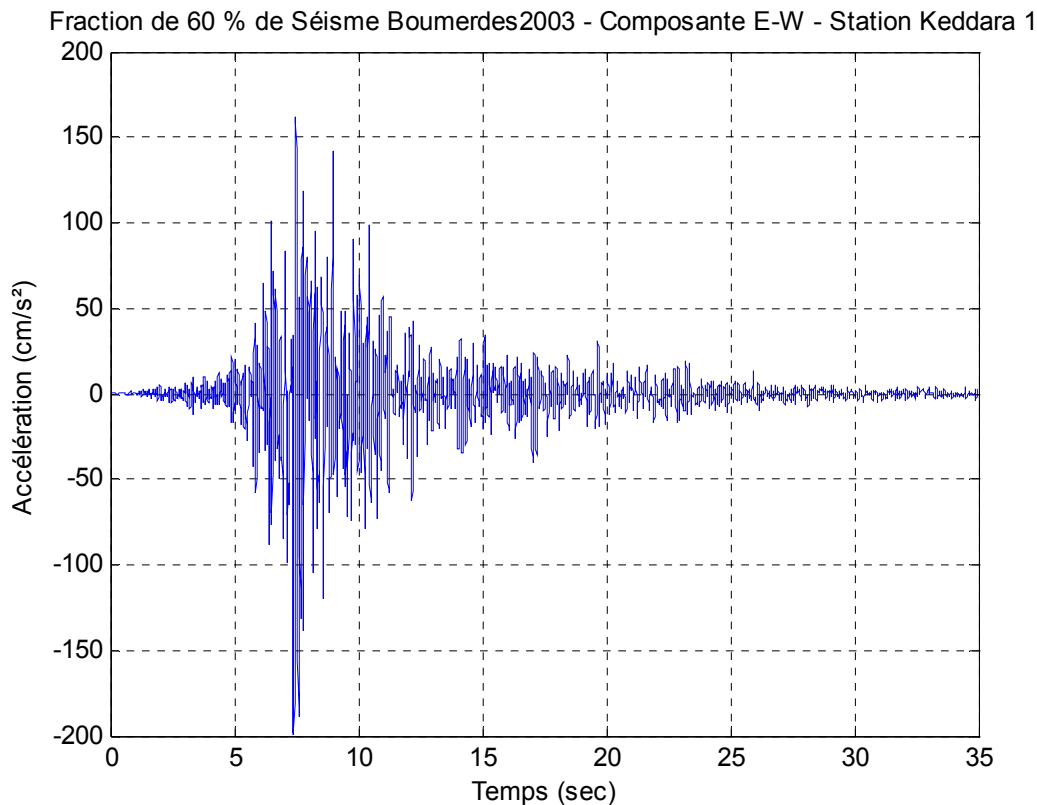
**Fig .III.1. Enregistrement du séisme de Boumerdes 2003, composante Est-Ouest, PGA=0,34g.**

Dans ce qui suit, une analyse dynamique en histoire temporelle est effectuée en appliquant dans la direction X un pourcentage de 60% de l'excitation du tremblement de terre de Boumerdes 2003, figure III .2.

Cette idée est basée sur la classification des zones sismiques du territoire Algérien, donnée dans le règlement parasismique Algérien RPA2003 (§ 2.6), où le coefficient d'accélération de la région de Mostaganem (zone sismique II) représente environ de 60% du coefficient d'accélération à la région de Boumerdes (zone sismique III), et ce afin de comprendre le comportement réel du minaret sous une forte excitation.

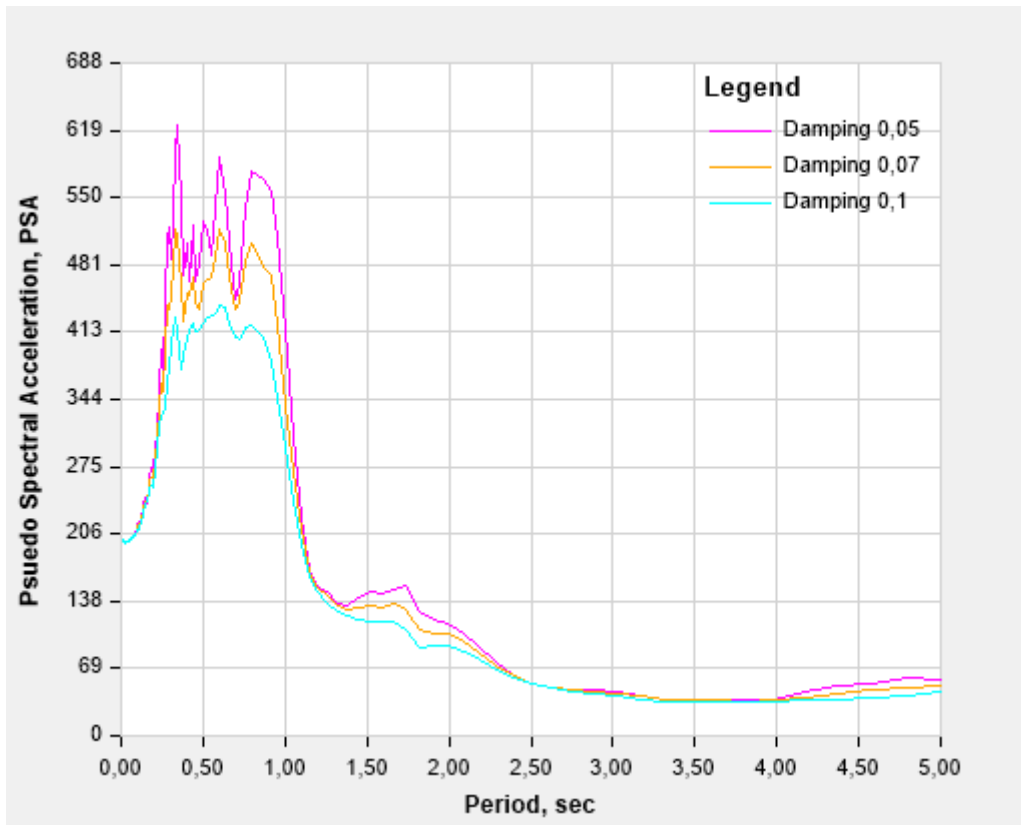
Les caractéristiques de l'analyse temporelle sont :

- ✓ Pas de temps=0.05sec ;
- ✓ Temps total=35sec ;
- ✓ Taux d'amortissement=5%.



**Fig .III.2. Fraction de 60% de l'enregistrement du séisme de Boumerdes 2003, PGA=0,2g**

La figure III .3 illustre le spectre de réponse du chargement sismique utilisé (60 % de l'enregistrement de séisme de Boumerdes 2003 à la staitaion Keddara 1), pour des facteurs d'amortissement de 5%, 7% et 10%.



**Fig .III.3. Spectre de réponse du chargement dynamique utilisé pour amortissement de 5%, 7% et 10%.**

## **V. Analyse dynamique des minarets :**

Dans cette partie, l'analyse dynamique des minarets des trois mosquées est présentée selon le modèle éléments finis développé..

L'analyse dynamique du minaret a été effectuée par la méthode d'analyse en histoire temporelle. Les résultats obtenus de cette analyse sont présentés ci-après.

### **V.1. Le minaret de Kobaa :**

La mosquée de Kobaa Contient deux minarets identiques, figure III.4, avec des escaliers reliant le niveau  $\pm 0.00$  et la terrasse au niveau  $+4.52$  et un balcon au niveau  $+24.48$ . La forme de cet minaret est octogonale avec une largeur de  $2.66\text{m}$ .



**Fig .III.4. Vue de la mosquée Kabaa, Cité Mon-plaisir Mostaganem.**

#### **V.1.1. Propriétés des matériaux :**

Une série de testes ultrason et de scléromètre (essai combiné) est effectué le 28 octobre 2019 par une équipe de chercheurs du laboratoire LMPC de l'université de Mostaganem sur les deux minarets de la mosquée Kobaa, où on a obtenu une moyenne de la résistance à la compression de 238 bars. Le tableau III.1 montre les propriétés physiques et mécaniques utilisées dans la modélisation.

**Tableau III.1. Les caractéristiques mécaniques utilisées.**

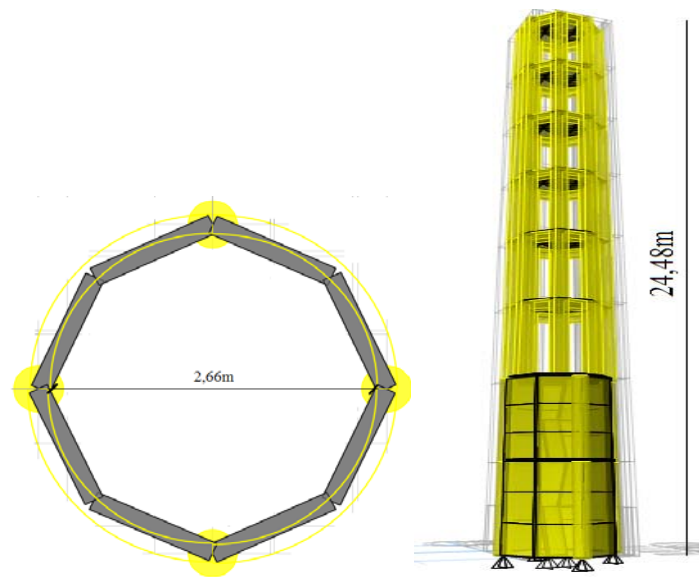
Propriété	Valeur	Unité
Module d'élasticité E	31641,5	MPa
Poids volumique	25	kN/m <sup>3</sup>
Coefficient de poisson	0,2	-
Module de cisaillement G	13183,96	MPa
Résistance à la compression	23.8	MPa
Résistance à la traction	2.30	MPa

### V.1.2. Modèle numérique du minaret Kobaa :

La figure Fig .III .5 montre la géométrie et le détail du modèle numérique du minaret de la mosquée de Kobaa.

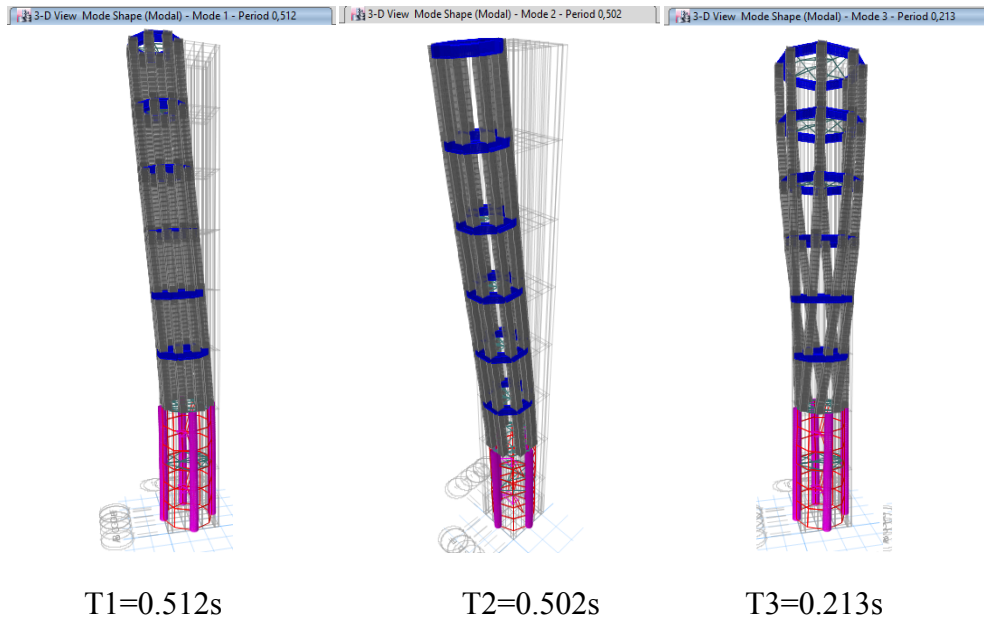
L'analyse élastique linéaire a été adoptée et généralement elle est suffisante pour la modélisation en éléments finis (Hamdaoui K., 2006).

Rappelons que le comportement du matériau du minaret (béton armé) est supposé être élastique linéaire, homogène et isotrope.



**Fig .III.5. Géométrie et détails du modèle 3-D en EF du minaret**

Suite à l'analyse dynamique modale, la figure suivante, Fig .III.6, montre la forme des trois premiers modes propres de vibrations. Le premier mode est en translation horizontale suivant la direction X ( $T_1=0.512s$ ) et le deuxième mode est aussi en translation horizontale mais suivant la direction Y ( $T_2=0.502s$ ), par ailleurs le troisième mode est torsionnel ( $T_3=0.213s$ ).

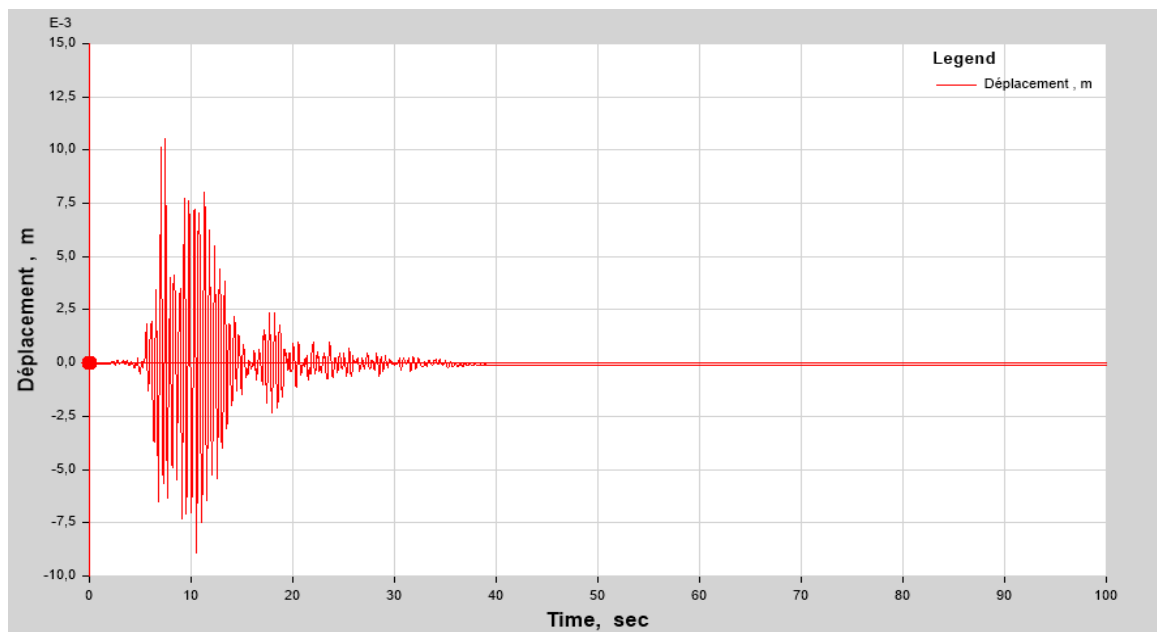


**Fig .III.6. Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis.**

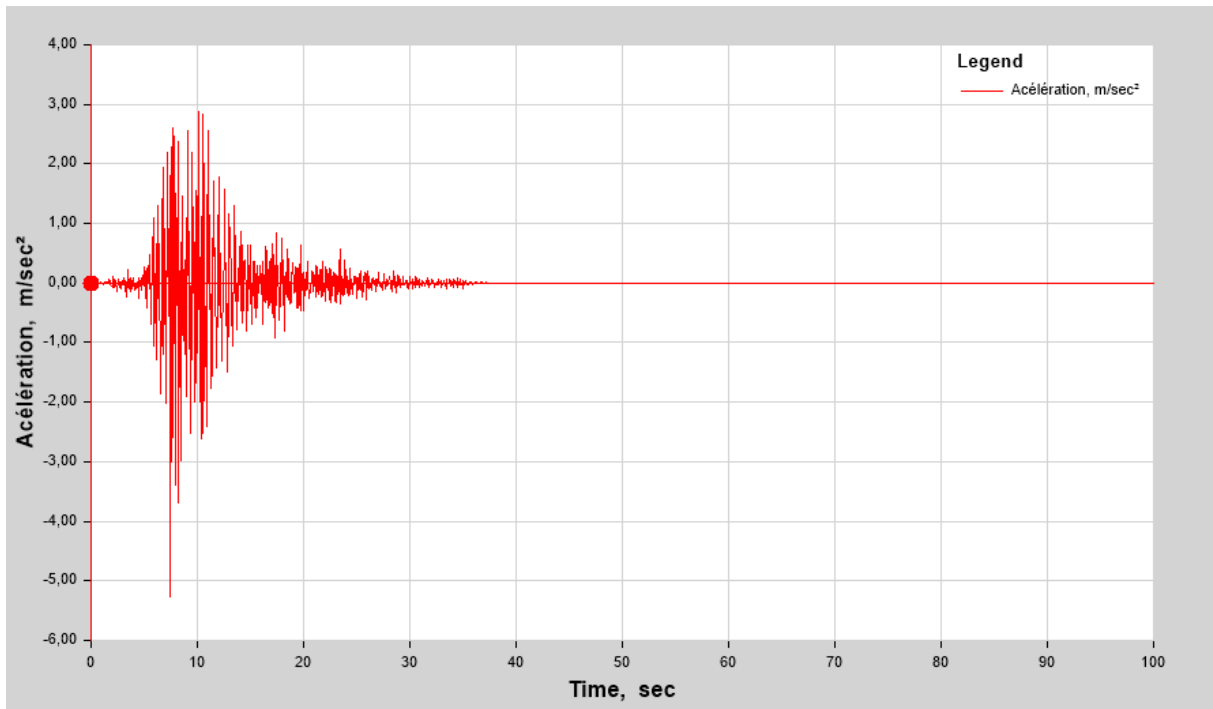
### V.1.3. Analyse histoire temporelle :

Les figures de III.7 et III.8 montrent respectivement le déplacement horizontale et l'accélération obtenus au sommet du minaret exactement à 24.48m de hauteur.

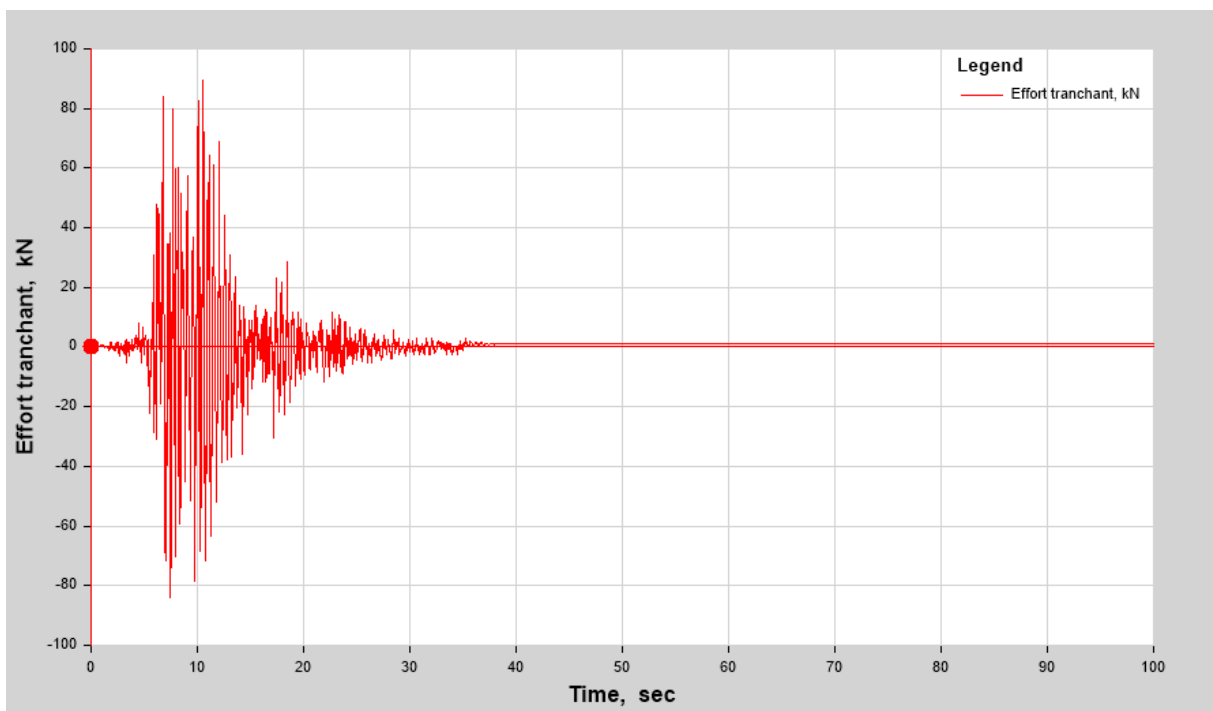
De même, les figure III.9 et III.10 montrent l'évolution de l'effort tranchant résultant et le moment fléchissant à la base durant le scénario sismique.



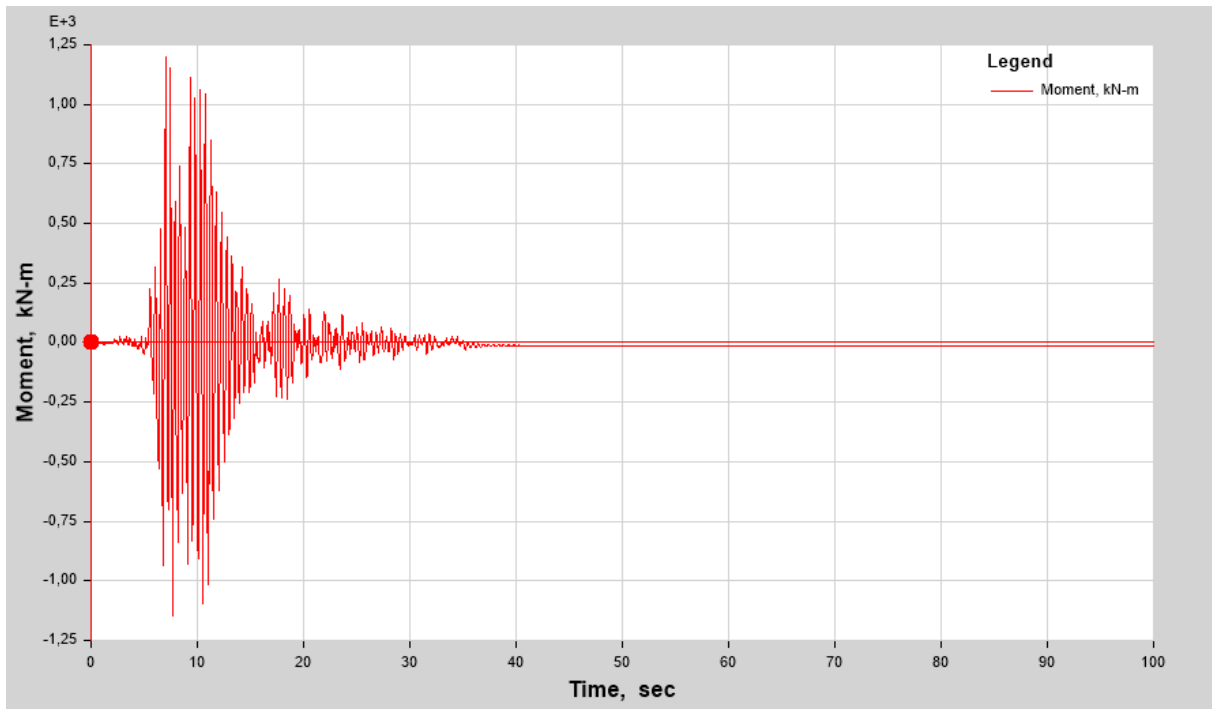
**Fig .III.7. Déplacement horizontal au sommet du minaret**



**Fig .III.8. Accélération horizontale au sommet du minaret.**



**Fig .III.9. Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement.**



**Fig .III.10. Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement.**

#### **V.1.4.Discussion**

Le déplacement horizontal maximum engendré lors de l'application de l'action sismique est de 01,05 cm enregistré au sommet du minaret. Ce déplacement ne représente même pas 1% de la hauteur du minaret. À partir de ces résultats, on peut conclure que la structure est très rigide, et le déplacement horizontal maximum produit à l'application de l'action sismique se trouve dans une gamme acceptable.

L'évolution de l'amplification de l'accélération horizontale au sommet du minaret est importante, elle est environ de 150% supérieure à celle de l'action sismique appliquée au bas du système dans la direction X, donc elle est de 2,5 fois plus grande que l'accélération maximale de l'action sismique elle-même (0.2g).

L'effort tranchant maximal à la base est de 90 KN et représente 5% du poids total du minaret. Le moment fléchissant maximal à la base est de 1150 kN.m.

## V.2.Minaret de la mosquée El-Badr :

La mosquée de El-badr était une église "Saint-Jean-Baptiste devenue un lieu de culte musulman (Wikipedia, 2020), contient un minaret de forme octogonale, figure III.11. dont la hauteur du minaret dépasse les 30m.



**Fig .III.11. Vue de la mosquée El-Badr, ancienne église Saint-Jean-Baptiste, au centre de la ville de Mostaganem.**

### V.2.1.Propriétés des matériaux :

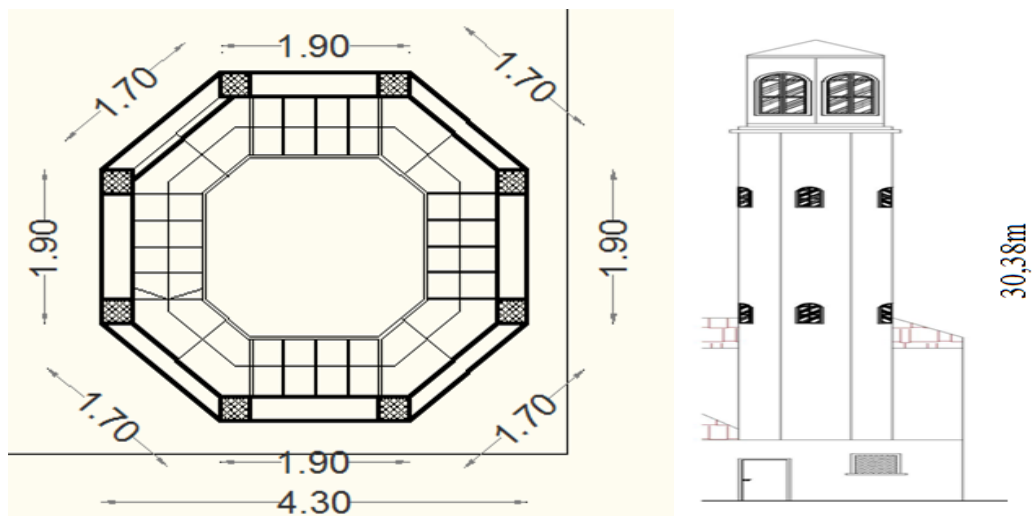
Une série de testes de vibration ambiante est effectuée en 2017 par une équipe de recherche du laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem, sur les différentes parties de la mosquée El-Badr, où ils ont obtenu pour le minaret une période fondamentale égale 0,332sec. Le tableau III.2 résume les propriétés physiques et mécaniques utilisées dans la modélisation après plusieurs tentatives de calibrage du modèle numérique jusqu'à l'obtention du même période fondamentale dans l'analyse modale.

**Tableau .III.2. Les caractéristiques mécaniques et physique utilisées pour le minaret El-Badr.**

Propriété	Valeur	Unité
Module d'élasticité E	29858	MPa
Poids volumique	23	kN/m <sup>3</sup>
Coefficient de poisson	0,2	-
Module de cisaillement G	12440,83	MPa
Résistance à la compression	20	MPa
Résistance à la traction	2	MPa

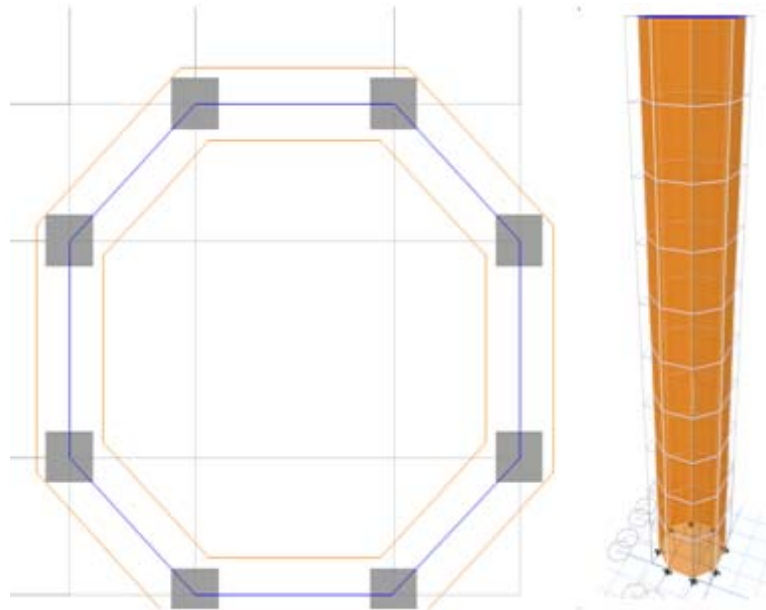
**V.2.2.modèle numérique du minaret El-Badr :**

La figure III .12 montre la géométrie et le détail du minaret de la mosquée El-Badr.



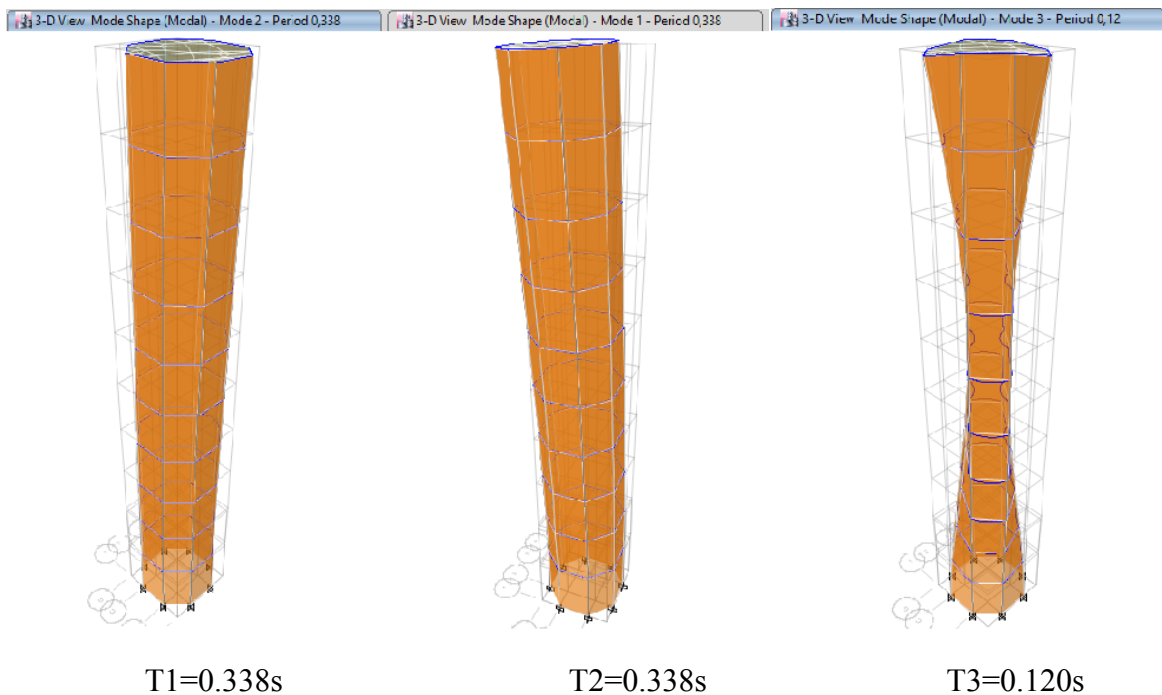
**Fig .III.12. Géométrie et détails du minaret El-Badr**

Le modèle numérique du minaret de la mosquée El-Badr est représenté dans la figure III.13



**Fig .III.13. Modèle 3-D en EF du minaret El-Badr.**

Suite à l'analyse dynamique modale, la figure suivante, III.14, montre la forme des trois premiers modes propres de vibrations. Le premier mode est en translation horizontale suivant la direction X ( $T_1=0.338s$ ) et le deuxième mode est aussi en translation horizontale mais suivant la direction Y avec la même période ( $T_2=0.338s$ ), par ailleurs le troisième mode est torsionnel ( $T_3=0.120s$ ).



**Fig .III.14. Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis.**

### V.2.3. Analyse histoire temporelle :

Après l'application d'une fraction de 60% de l'action sismique de Boumerdes 2003 enregistré à la station Keddara 1 selon la composante est-Ouest, les figures.III.15 et III.16 montrent respectivement le déplacement horizontal et l'accélération obtenus au sommet du minaret exactement à 30.38m de hauteur.

De même, les figures.III.17 et III.18 montrent l'évolution de l'effort tranchant résultant et le moment fléchissant à la base durant le scénario sismique de Boumerdes 2003.

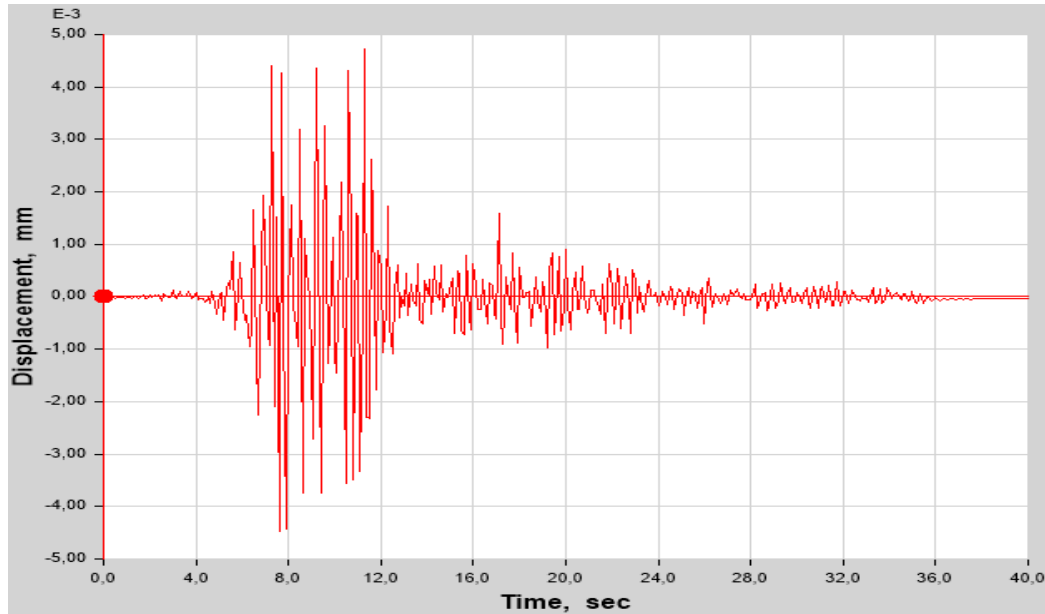


Fig .III.15. Déplacement horizontal au sommet du minaret.

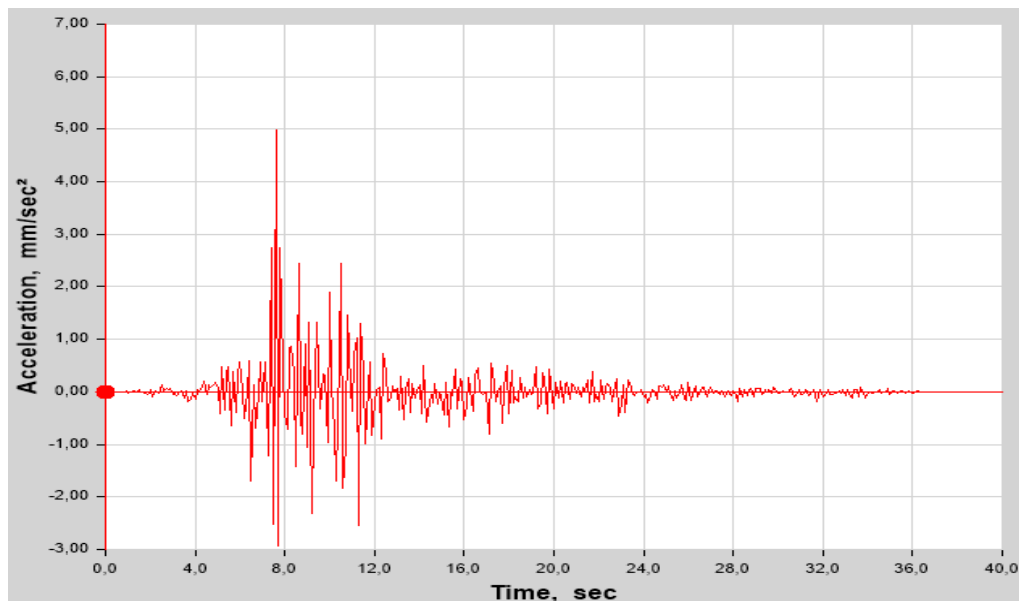
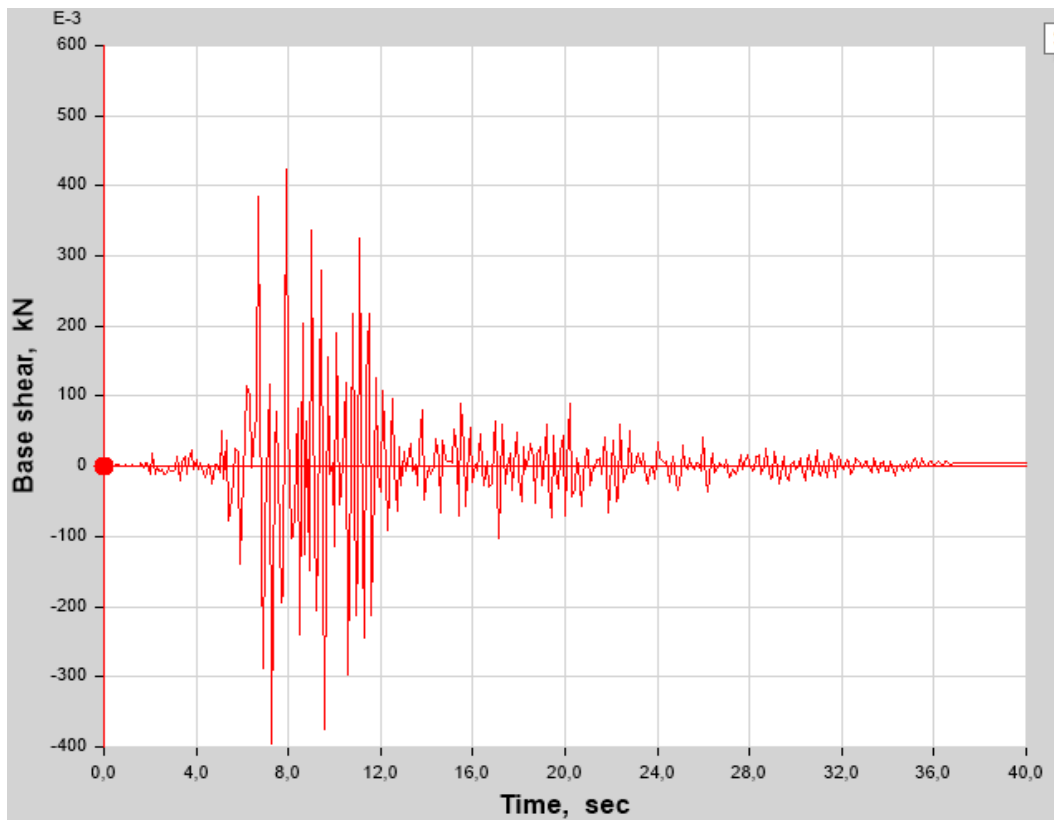
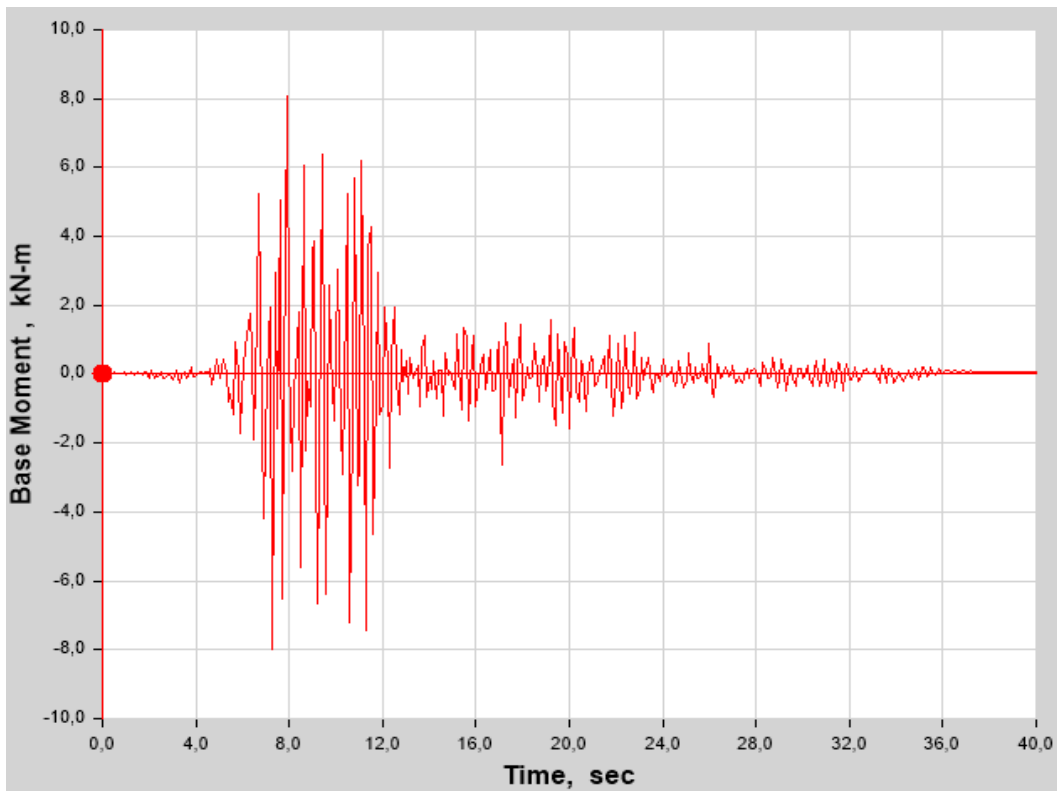


Fig .III.16. Accélération horizontale au sommet du minaret.



**Fig .III.17. Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement.**



**Fig .III.18. Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement.**

#### **V.2.4.Discussion :**

Le déplacement horizontal maximum engendré lors de l'application de l'action sismique est de 0.5 cm enregistré au sommet du minaret. Ce déplacement ne représente même pas 1% de la hauteur du minaret. À partir de ces résultats, on peut conclure que la structure est très rigide, et le déplacement horizontal maximum produit à l'application de l'action sismique se trouve dans une gamme acceptable.

L'évolution de l'amplification de l'accélération horizontale au sommet du minaret est importante, elle est environ de 150% supérieure à celle de l'action sismique appliquée au bas du système dans la direction X, donc elle est de 2.5 fois plus grande que l'accélération maximale de l'action sismique elle-même (0.2g).

L'effort tranchant maximal à la base est de 420 KN et représente 10% du poids total du minaret. Le moment fléchissant maximal à la base est de 800 KN.m.

#### **V.3. Minaret de la mosquée Tabana :**



**Fig .III.19.Vue de la mosquée de Tabana.**

#### **V.3.1.Propriétés des matériaux :**

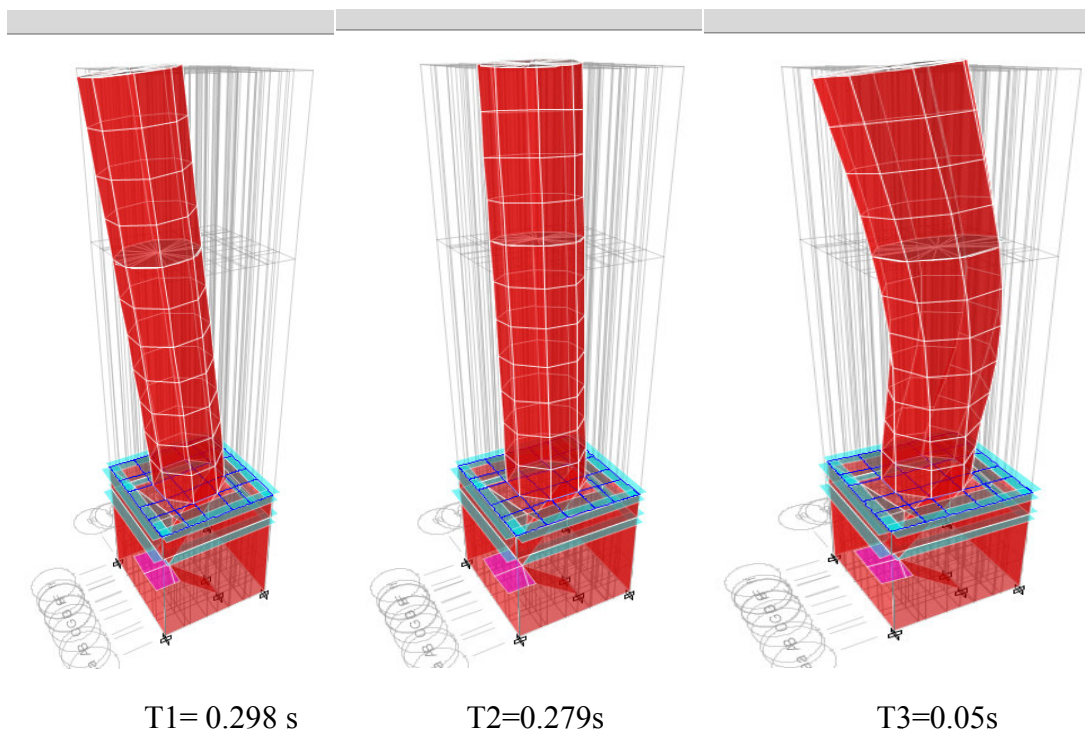
Vue l'absence des informations sur les propriétés des matériaux on s'est référencié à la littérature au travaux similaire (Haouach, 2020) , le tableau suivant montre les propriétés physiques et mécaniques utilisés dans la modélisation .

**Tableau .III 3. Les caractéristiques mécaniques utilisées.**

Propriété	Valeur	Unité
Module d'élasticité E	29630	MPa
Poids volumique	14	kN/m <sup>3</sup>
Coefficient de poisson	0,2	-
Module de cisaillement G	4012 ,5	MPa
Résistance à la compression	20	MPa
Résistance à la traction	2	MPa

### V.3.2. Analyse dynamique modale du minaret Tabana :

La figure suivante, III.14, montre la forme des trois premiers modes propres de vibrations. Le premier mode est en translation horizontale suivant la direction X ( $T_1=0.298s$ ) et le deuxième mode est aussi en translation horizontale mais suivant la direction Y avec la même période ( $T_2=0.279s$ ), par ailleurs le troisième mode est torsionnel ( $T_3=0.05s$ ).



**Fig .III.20. Les trois premiers modes de déformation du modèle éléments finis.**

### V.3.3. Analyse histoire temporelle :

Après l'application d'une fraction de 60% de l'action sismique de Boumerdes 2003 enregistré à la station Keddara 1 selon la composante est-Ouest, les figures.III.21 et III.22 montrent respectivement le déplacement horizontal et l'accélération obtenus au sommet du minaret exactement à de hauteur.

De même, les figures.III.23 et III.24 montrent l'évolution de l'effort tranchant résultant et le moment fléchissant à la base durant le scénario sismique de Boumerdes 2003.

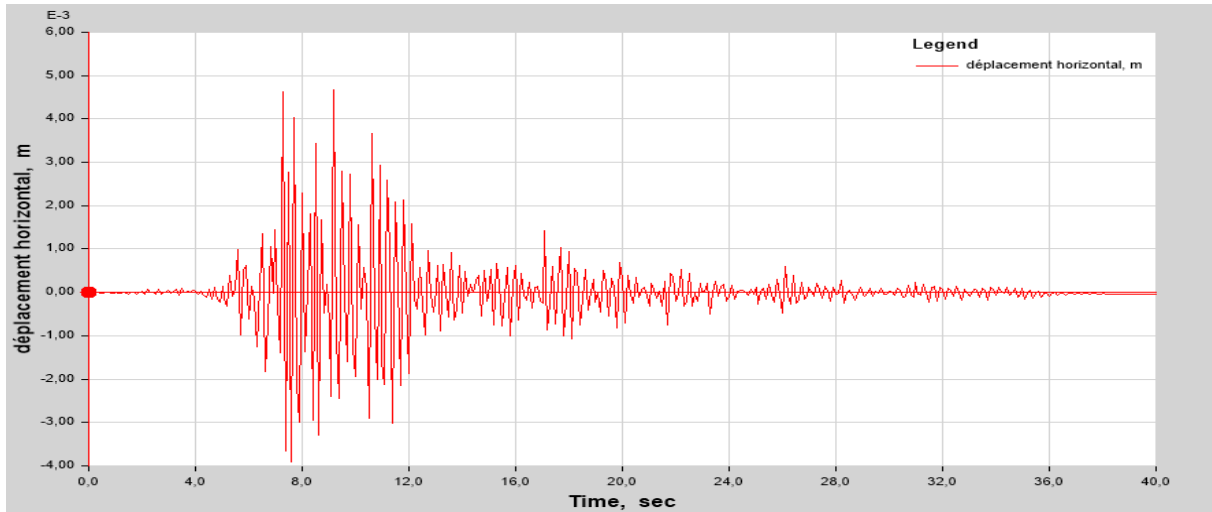


Fig .III.21. Déplacement horizontal au sommet du minaret.

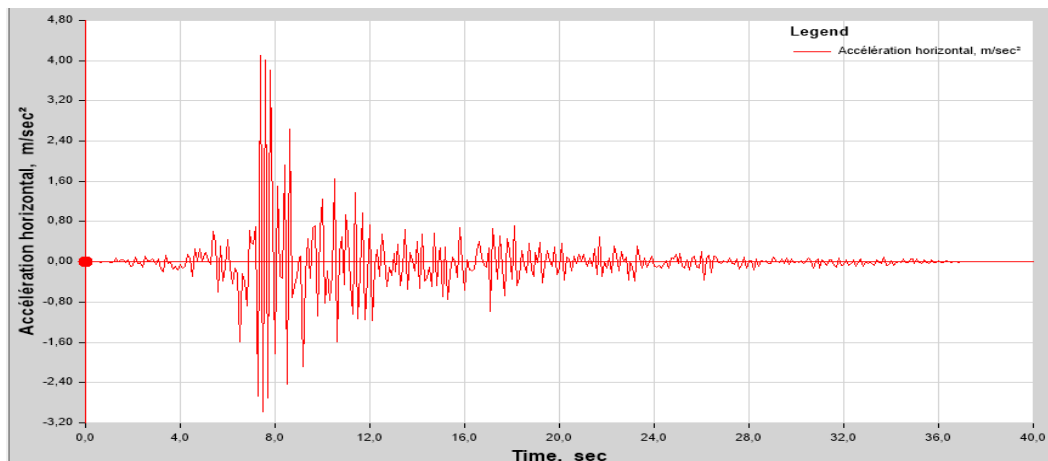
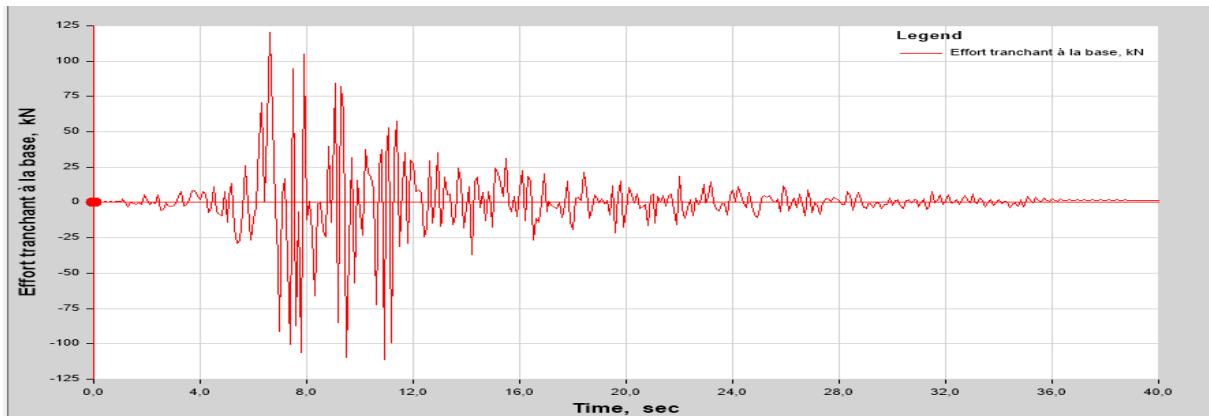
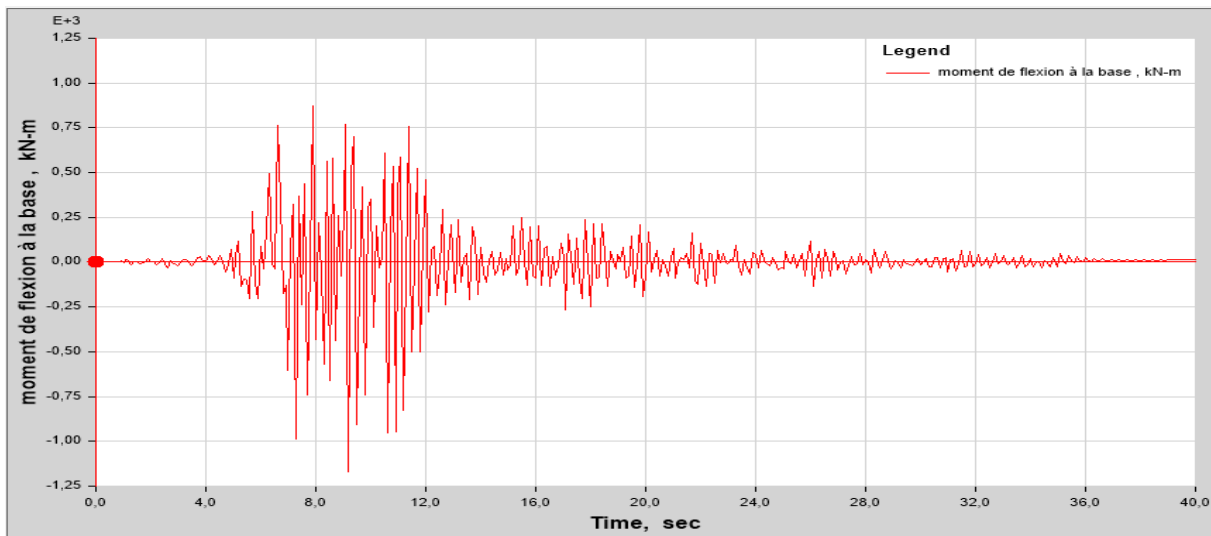


Fig .III.22. Accélération horizontale au sommet du minaret.



**Fig .III.23. Variation de l'effort tranchant à la base durant le chargement.**



**Fig .III.24. Evolution du moment de flexion à la base durant le chargement.**

#### **V.3.4.Discussion :**

Le déplacement horizontal maximum engendré lors de l'application de l'action sismique est de 0.48 cm enregistré au sommet du minaret. Ce déplacement ne représente même pas 1% de la hauteur du minaret. À partir de ces résultats, on peut conclure que la structure est très rigide, et le déplacement horizontal maximum produit à l'application de l'action sismique se trouve dans une gamme acceptable.

L'évolution de l'amplification de l'accélération horizontale au sommet du minaret est importante, elle est de 100% supérieure à celle de l'action sismique appliquée au bas du système dans la direction X, donc elle est 02 fois plus grande que l'accélération maximale de l'action sismique elle-même (0.2g).

L'effort tranchant maximal à la base est de 125 kN et représente 15% du poids total du minaret. Le moment fléchissant maximal à la base est de 1250 KN.m.

## **VI .Conclusion :**

D'après la modélisation et l'analyse histoire temporelle on peut conclure que les trois minarets étudiés sont stables et en état de sécurité .

Vue que les minarets de Kobaa et d'El-badr ont la même forme géométrique et ils sont construits en béton armé , et implantés dans la même zone (ville de Mostaganem) qui classée comme zone de moyenne sismicité selon le RPA99, on peut dire que le minaret de Kobaa est plus rigide et stable, avec un déplacement de 0,10 cm et un effort tranchant de 90kN, par rapport au minaret d'El-Badr qui a un déplacement = 0,5 cm et un effort tranchant développé à la base égale à 420 kN.

cette conclusion est justifiée par la période de construction dont la mosquée de Kobaa construite en 1990 et selon le règlement parasismique. par contre la mosquée d'El-Badr construite pendant la période coloniale et le minaret construite en 1980 c'est à dire avant l'apparition de la première version du règlement parasismique Algérien en 1983.

## Conclusion générale

Le travail accompli nous a permis de prendre connaissances des principales étapes à mener lors de l'étude et l'analyse des structures existantes, et d'enrichir nos connaissances requises le long de notre cursus.

Il nous a permis également de prendre la maîtrise du logiciel ETABS et les règlements parasismiques pour le calcul des structures.

Les principales conclusions qu'on a pu retenir après cette études comparative sont :

- Les trois minarets étudiés sont stable et en état de sécurité .
- Le minaret de Kobaa est plus rigide et plus stable parmi les trois minarets étudiés.

On peut aussi conclure que :

- L'analyse dynamique est importante lors de l'évaluation de la vulnérabilité et la stabilité des structures.
- La modélisation doit, autant que possible, englober tous les éléments de la structure secondaires ou structuraux, ceci permet d'avoir un comportement proche du réel.
- Le comportement dynamique d'une structure dépend d'une part aux propriétés matérielles et géométriques de la structure et d'autre part de la nature des charges appliquées.
- Les résultats des analyses numériques ont permis de tirer les conclusions sur la réponse dynamique des structures .

## Références Bibliographique :

- [1] - Merzoug Nouredine Abdellatif , Minarets des mosquées de Tlemcen , Tlemcen,2012.
- [2] - Ramli Ali , Évaluation de la vulnérabilité sismique d'un mur de soutènement avec prise en compte de l'interaction Sol –structure (ISS) , Mesila 2018 .
- [3] - Pathologie des bâtiments endommagés par les séismes, prof. Kassoul Amar . Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [4] - Alexandru Aldea and Sidi Mohammed El-Amine Bourdim, (2018) Toward the Seismic Evaluation of “Carol I” Royal Mosque in Constanța. In: Vacareanu R., Ionescu C. (eds) Seismic Hazard and Risk Assessment. Springer Natural Hazards. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-74724-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74724-8_23)
- [5]- Adem Dogangun · Ramazan Acar · Halil Sezen · Ramazan Livaoglu Enquête sur la réponse dynamique du minaret de maçonnerie , turquie , 6 April 2008.
- [6]-Alexandru Aldea, Cristian Neagu, Eugen Lozinca, Sorin Demetriu, Sidi Mohammed El-Amine Bourdim and Federico Turano, Vers l'évaluation sismique de la mosquée royale «Carol I» à Constanța, 2018
- [7]-Said A. El-kholy , Vulnérabilité sismique d'un minaret de style mamelouk, Fayoum , Egypt,2011.
- [8]-Sreeja Chandran, A. Meher Prasad , et M.S. Mathews, Évaluation de la vulnérabilité sismique de Qugtb Minar, Inde ,2006 .
- [9]- Gourida Abdelmalek, Tioua Abdullah, mémoire de fin d'étude (Etude de confortement du minaret de mosquée Ali Ben Abitaleb)2017.
- [10]- <https://www.alnas.fr/actualite/religion/les-10-mosquees-les-plus-anciennes-du-monde/>
- [11] -<https://iqna.ir/fr/news/3468701/les-plus-belles-mosqu%C3%A9es-deurope>
- [12] -[https://www.qantara-med.org/public/show\\_document.php?do\\_id=1287](https://www.qantara-med.org/public/show_document.php?do_id=1287)
- [13]-<https://www.photosetbalades.fr/galerie-d-hier/proche-orient/egypte-le-caire-ibn-touloun/>
- [14]-<https://www.hertz.ma/maroc/visites-du-maroc/patrimoine/la-mosquee-hassan-ii-le-gigantesque-edifice-religieux-de-casablanca>
- [15] -<https://www.egis.fr/action/realisations/grande-mosquee-dalger-algerie>
- [16] - <https://www.thecasbahpost.com/quelle-est-la-plus-ancienne-mosquee-dalgerie/>
- [17] [https://www.reflexiondz.net/MOSQUEE-KOBA-DE-MOSTAGANEM-Les-enfants-exigent-une-ecole-coranique-et-un-enseignant-permanent\\_a53032.html](https://www.reflexiondz.net/MOSQUEE-KOBA-DE-MOSTAGANEM-Les-enfants-exigent-une-ecole-coranique-et-un-enseignant-permanent_a53032.html)
- [18]-<https://fr.scribd.com/document/252862862/Tp-n-5-Analyse-Par-Ultrasons-de-Beton-Durci>
- [19]-<https://www.es-france.com/7309-analyseur-ultrason-pour-beton-et-materiaux-graineux-v-meter-mark-iv.html>

[20]- <https://fr.scribd.com/document/378265951/Analyse-Push-Over>

[21]- <https://fr.scribd.com/document/350956754/Expose-de-Pushover-2>