



MEMOIRE

En vue de l'obtention de Master en architecture

Option : Patrimoine et Cadre Bâti

Présenté et soutenue par :

Ahmed **MAHMOUDI**

Thème :

**Réduction de la vulnérabilité du vieux bâti par
l'Analyse du comportement structurel face aux
solllicitations sismiques à l'aide de l'outil
informatique**

« Cas de la mosquée du vieux Ténès »

Dirigé et encadré par :

M. Youcef **SI YUCEF**

Devant un jury composé de :

Président de jury : Dr. Nassereddine **ATTARI**

Examineur : Dr. Mohamed **HOCINE**

Examineur : M. Farid **BOUZID**

En premier lieu, je remercie le bon dieu « ALLAH » tout puissant qui m'a donné toute la volonté et le courage pour terminer ce travail ;

Mes vifs remerciements à mon encadreur Dr. SI YUCEF pour son implication, sa patience et surtout sa disponibilité tout au long de cette période ;

Je remercie les membres de jury d'avoir bien voulu accepté d'examiner mon travail...

Résumé

L'évaluation des risques sismiques du bâti ancien, est devenue un sujet de plus en plus important, à cause de la grande vulnérabilité de ce patrimoine vis-à-vis du risque sismique.

Notre recherche a pour but d'établir une simulation numérique sur la mosquée du vieux Ténès, afin de mettre en évidence les zones critiques dans ce monument.

Cette mosquée a été ébranlée par le séisme de Chlef (ex_Orléansville) en 1954, ce qui a engendré d'énormes dégâts, sur laquelle la mosquée a subi d'énormes modifications, pour cela l'analyse structurelle, s'est effectuée à la base d'une modélisation des deux modèles dans le but d'étudier le comportement de la mosquée avant et après le séisme.

Des analyses de spectre de réponse ont été effectuées pour évaluer la réponse sismique des deux structures ;

L'analyse numérique est faite à la base d'une modélisation aux éléments finis(MEF) à l'aide du programme Robot Structural Analysis 2017 ; par la suite les résultats obtenus, ont été interprétés afin de détecter les différentes zones vulnérables dans chaque modèle.

Mots clés : Risque sismique, vulnérabilité, simulation numérique, mosquée du vieux Ténès, zones critiques, séisme de Chlef 1954, modélisation numérique, spectre de réponse, éléments finis(MEF), Robot 2017,

أصبح موضوع تقييم المخاطر الزلزالية للمباني القديمة موضوعا في غاية الأهمية، نظرا لحساسية هذا التراث لخطر الزلازل.

يهدف بحثنا الى انشاء محاكاة رقمية على مسجد تنس العتيق، من اجل تسليط الضوء على المناطق الحساسة في هذا المعلم التاريخي.

تعرض هذا المسجد الى زلزال الشلف سنة 1954، مما أدى الى تعرضه لخسائر معتبرة، وبالتالي خضوع المسجد لتعديلات هائلة، ولهذا فان التحليل الهيكلي قد نفذ على أساس محاكاة نموذجين للمسجد من اجل دراسة سلوكه قبل وبعد الزلزال.

أجريت تحاليل طيف الاستجابة من اجل تقييم الاستجابة الزلزالية لكلا الهيكلين

يقوم التحليل الرقمي على نمذجة بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج التحليل الهيكلي

(Robot Structural Analysis 2017) , بعد ذلك يتم تفسير النتائج المحصل عليها من اجل تحديد المناطق الحساسة في كل نموذج

الكلمات المفتاحية: خطر زلزالي، حساسية، محاكاة رقمية، مسجد تنس العتيق، مناطق حساسة، زلزال الشلف 1954، هيكلية رقمية، طيف الاستجابة، العناصر المنتهية، Robot 2017

Abstract

Seismic risk assessment of historical structures of old buildings has become an increasingly important subject, because of the high vulnerability of this heritage to the seismic risk.

Our research aims to establish a numerical simulation on the mosque of old Tenes, in order to highlight the critical zones in this monument.

This mosque was collapsed during the main shock of the 1954, Chlef earthquake on which the mosque underwent huge modifications, for this the structural analysis, was carried out at the base a modeling of the two models in order to study the behavior of the mosque before and after the earthquake.

Response spectrum analyzes were performed to evaluate the seismic response of both structures;

The numerical analyses is based on finite element modeling(FEM) using the Robot Structural analysis 2017 program, after which the results obtained have been interpreted to detect the different vulnerable zone un each model.

Tags: Seismic risk, Vulnerability, Numerical simulation, Mosque of old Tenes, Critical zones, Earthquake of Chlef 1954, numerical modeling, Response spectrum, Finite element modeling(FEM), Robot 2017.

Liste des tableaux

Tableau 1 : quelques exemples de séismes majeurs ainsi que le nombre approximatif des personnes décédées (CHERAÏT, 2012)	6
Tableau 2 : quelques exemples de séismes majeurs ainsi que les estimations des dégâts (CHERAÏT, 2012)	7
Tableau 3 : les degrés de l'échelle Meralli (CHERAÏT, 2012)	10
Tableau 4 : les degrés de l'échelle Richter (Jean-François, Mars-Juillet 2007)	10
Tableau 5 : Check listes FEMA 310 (American Society of Civil Engineers, 1998).....	27
Tableau 6 : les types de construction nécessitant une analyse de niveau 2 ou éventuellement de niveau 3 (American Society of Civil Engineers, 1998)	30
Tableau 7 : Déficiences sismique et techniques de réhabilitation de maçonnerie (Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers, 2006)	34
Tableau 8 : les modes structurels de la mosquée Husrev Pasha (Ferit Cakir et al. ,2017)	53
Tableau 9 : Déplacement de la mosquée Husrev pasha selon EQ-3 (Ferit Cakir et al. ,2017).....	54
Tableau 10 : Résultats des modes obtenues après l'expérimentation	57
Tableau 11 : Comparaison des résultats obtenus en fonction de l'approche (HARROUNI, et al., 2017)	59
Tableau 12 : Synthèse de la modélisation numérique avec ANSYS (HARROUNI, et al., 2017)	59
Tableau 13 : types de roches (F.Letertre, et al., 1978)	62
Tableau 14 : La résistance à la compression simple de la pierre (Ministère des transports (France), 1982)	68
Tableau 15 : La résistance à la compression simple de la brique (Ministère des transports (France), 1982)	69
Tableau 16 : Résistance à la compression simple de la maçonnerie composite (Ministère des transports (France), 1982).....	72
Tableau 17 : résistance moyenne du mortier (Ministère des transports (France), 1982)	72
Tableau 18 : charges introduites dans le model Robot, Model Avant 1954 (Auteur, 2018).....	118
Tableau 19 : charges introduites dans le model Robot, Model Apres 1954 (Auteur, 2018)	118
Tableau 20 : Introduction des combinaisons(Auteur, 2018)	120
Tableau 21: les périodes de la mosquée avant modification (Auteur, 2018)	125
Tableau 22 : périodes de la mosquée après modification (Auteur,2018)	127
Tableau 23 : Etude comparative entre les deux résultats(Auteur, 2018).....	127
Tableau 24 : Etude comparative entre les deux résultats(Auteur, 2018).....	131

Liste des figures

Figure1: Principe sismique (Auteur,2017)	7
Figure 2 : onde sismique primaire P (CHERAIT, 2012)	8
Figure 3 : onde sismique secondaire S (CHERAIT, 2012)	8
Figure 4: onde sismique de surface Love (CHERAIT, 2012)	9
Figure 5: onde sismique de surface Rayleigh (CHERAIT, 2012)	9
Figure 6 : l'église d'Orléansville après le séisme de 1954. (CDHA, 2016)	11
Figure 7 L'Hôtel Baudouin(CDHA,2016).....	11
Figure 8 : Le collège d'Orléans ville après le séisme de 1954(CDHA, 2016)	12
Figure 9 : Le collège d'Orléans ville avant le séisme de 1954(CDHA, 2016)	12
Figure 10 : séisme d'El Asnam 1980 (Abaci, 2016)	12
Figure 11 : le centre commercial Saint Reparatus (Bossu, 1955-1964)	13
Figure 12 : Les etape de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)	18
Figure 13 : Etape 1 : Préliminaires de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)	19
Figure 14 : Etape 2 : Etudes pluridisciplinaires de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007).....	20
Figure 15 : Etape 3 : Diagnostic de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007).....	21
Figure 16 : Etape 4 : Réflexion et cadre de décisions de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)	22
Figure 17 : Etape 5 : Projet de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007).....	23
Figure 18 : Etape 6 : Réhabilitation (les travaux) de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007).....	24
Figure 19 : Etape 7: entretien de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)	24
Figure 20 : Organigramme FEMA 310 (American Society of Civil Engineers, 1998).....	32
Figure 22a: Crash Test réel (Mazen SAAD, 2014)	37
Figure 22b: Crash Test numérique (Mazen SAAD, 2014)	37
Figure 23: Modélisation 3D d'écoulement en réservoir pétrolier (LEMTA,2016).....	38
Figure 25: Evaluation de réservoir sous chargement sismique (BET NECS,2016)	38
Figure 255: Modélisation d'un réservoir (BET NECS, 2016).....	38
Figure 26 : Strategie du calcul sismique, (Davidovic, et al., 2016).....	39
Figure 27 : Modes de vibration, Horizontal - Ascendant - Torsion, (Auteur;2017).....	40
Figure 28 : courbe de capacité (Auteur, 2017)	42
Figure 29 : ANSYS (2017).....	44
Figure 30 : TreMuri (S. Lagomarsino, et al., 2017)	44
Figure 31 : Robot (2017)	45
Figure 32 : Le musée Civique de sansepolcro Toscane, Italie, (Giulio Castori, et al, 2017)	46
Figure 33 : Plan du musée Civique (Giulio Castori et al. ,2017)	46
Figure 34 : Intensités Sismique majeurs près de Sansepolcro depuis 1200 (Giulio Castori et al. ,2017)	47
Figure 35 : Les fissurations du mur contenant la fresque : (a) vue de face; (B) vue arrière. (Giulio Castori et al. ,2017)	48
Figure 36 :(A) Vue en plan; (B) Section A-A (les lignes rouges mettent en évidence les fissures majeures). (Giulio Castori et al., 2017)	48
Figure 38 : Résultats d'analyse statique non linéaire: (a)fissuration dans l'ensemble du bâtiment; (B) fissuration dans le panneau mural supportant la fresque (Giulio Castori et al. ,2017)	49
Figure 38 : (A) Modèle géométrique; (B) Modèle de Modélisation (Giulio Castori et al. ,2017)	49
Figure 39 Courbe de capacité (déplacement maximal vs cisaillement total à la base) (Giulio Castori et al. ,2017).....	50
Figure 41 : Application d'une charge sismique à tous les niveaux (Giulio Castori et al. ,2017)	50
Figure 41 : les différentes fissurations dans le mur contenant la fresque (Giulio Castori et al. ,2017). 50	

Liste des figures

Figure 42 : Mosquée Husrev Pasha (Ahmet Can Altunışık et Ali Fuat Genç, 2017).....	51
Figure 43 : Organisation générale : (a) Plan, (b) élévation (Ferit Cakir et al. ,2017).....	51
Figure 44 : Le narthex de la mosquée Husrev Pasha (a) avant le tremblement de terre de Van, (b) après le blement de terre de Van (Ferit Cakir et al. ,2017).....	52
Figure 45 : Modèle de la mosquée Husrev pasha (Ferit Cakir et al. ,2017).....	52
Figure 46 :les modes structurels (a) premier mode, (b) deuxième mode (Ferit Cakir et al. ,2017)	53
Figure 47 : Spectres de réponse des niveaux de risques sismiques EQ-1; EQ-2; EQ-3 (Ferit cakir et al. ,2017)	53
Figure 48 : Déplacement latéral de la structure selon le niveau de risque sismique EQ-3 (a) direction X, (b) direction Y. (Ferit Cakir et al. ,2017)	54
Figure 49 : Coupe de la Médersa Errachidia (HARROUNI, et al., 2017)	55
Figure 50 : La cour de la Médersa Errachidia (HARROUNI, et al., 2017).....	55
Figure 52 Risque suivant X (10%g).....	56
Figure 52 : Risque suivant Y (10%g).....	56
Figure 54 Risque suivant X (25%g).....	56
Figure 54Risque suivant X (25%g).....	56
Figure 55 : Photos de travail expérimentales	56
Figure 56 : Plan de repérage des Points de mesures.....	56
Figure 57 : Schémas numériques des différents modes obtenues après l'expérimentation	57
Figure 59 : Model de la médersa sous SAP2000.....	57
Figure 59 : Model de la médersa sous SAP2000.....	57
Figure 61 : Model de la médersa sous ANSYS.....	58
Figure 61 : Model de la médersa sous ANSYS.....	58
Figure 62 : Résultats Model sous SAP2000.....	58
Figure 63 : Résultats Model sous ANSYS	58
Figure 64 : Blocs de moellons brut	64
Figure 65 : Nomenclature des parties de la pierre.....	65
Figure 67 Des maçonneries dites « Opus Incertum ».....	66
Figure 67 : Des maçonneries de moellons assises.....	66
Figure 68 : Rupture par fendage de la pierre(Auteur,2017)	71
Figure 69 : rupture par excès de compression de la pierre et rotation autour de l'arête d'un joint (Auteur, 2017).....	71
Figure 70 : Remplacement physique de la partie endommagée (Ville de Quebec, 1989)	77
Figure 71 : Reprise des fissurations	79
Figure 72 : mur en maçonnerie gonflé (Ville de Quebec, 1989).....	81
Figure 73 : placement des boyaux pour injection (Ville de Quebec, 1989).....	81
Figure 74 :Chemisage (RehabiMed, 2007)	82
Figure 75 : Consolidation par polymères à fibre renforcé (RehabiMed, 2007)	83
Figure 76 : renforcement par ajout de tirants (RehabiMed, 2007).....	83
Figure 77 : chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (AFPS-CSTB, 2013)	84
Figure 78 : chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (AFPS-CSTB, 2013)	84
Figure 79 : plafond du grand hotel dieu de lyoun (EIFFAGE, Juillet 2017).....	85
Figure 80 : Technique de prothèse avec PRF (EIFFAGE, Juillet 2017)	85
Figure 81 : Technique de prothèse avec PRF (EIFFAGE, Juillet 2017)	86
Figure 82 : Planchers connectés (EIFFAGE, Juillet 2017)	86
Figure 83 : Situation de la Casbah du Vieux Ténès	89
Figure 84 : Situation de la mosquée du vieux Ténès.....	90
Figure 85 : La Casbah du Vieux Tenes	91

Figure 86 : la mosquée du vieux Ténès	92
Figure 87: mosquée du vieux Ténès	93
Figure 88 :Outil d'investigation	93
Figure 89 : Environnement de la mosquée du vieux Ténès.....	94
Figure 90 : Plan de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017).....	94
Figure 91 : Volumétrie de la mosquée du vieux Tenes (Auteur,2017).....	95
Figure 92 : Emplacement du mihrab de la mosquée du vieux Tenes(Auteur, 2017).....	96
Figure 93 : Colonnes cylindriques surmontées de chapiteaux. (Auteur, 2016).....	97
Figure 94 : L'intérieure de la mosquée du vieux Tenes(Auteur, 2016)	98
Figure 95 : Mihrab de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2016).....	98
Figure 96 : Les murs porteurs de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2016).....	99
Figure 97 : Les colonnes de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017).....	99
Figure 98: a) colonne cylindrique; b) colonne hexagonale; c) colonne ne marbre (Auteur, 2016).....	100
Figure 99: Impostes de la mosquée du vieux Ténès (Dessus-Lamare, et al., 1924).....	101
Figure 100: photo actuelle montre les traces des tirants en bois (Auteur, 2017).....	101
Figure 101: Schéma du système (Colonne+Chapiteau+Imposte), (Auteur, 2017).....	101
Figure 102 : Toiture de la mosquée du vieux Tenes(Auteur, 2017).....	102
Figure 103: Axonométrie éclatée de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017).....	102
Figure 104 : Coupe de la mosquée avant 1924, (Dessus-Lamare, et al., 1924).....	103
Figure 105 : Coupe de la mosquée après 1954(Auteur, 2017)	104
Figure 106 : Mosquée du vieux Ténès « partie relevés en Béton armé », (Auteur, 2017)	104
Figure 107 : Coupe de la mosquée après 1954 montrant la surélévation du plafond (Auteur, 2017) .	105
Figure 108 : Couverture de la mosquée (Auteur, 2017)	105
Figure 109 : Dégradation de certaines colonnes.....	106
Figure 110 : le phasage de l'analyse (Auteur, 2017)	109
Figure 111 : Modélisation des colonnes(Auteur, 2018)	110
Figure 112 : Modélisation des murs porteurs extérieurs(Auteur, 2018).....	111
Figure 113 : Tracé géométrique des arcs(Auteur, 2018)	111
Figure 114 :Création du contour du mur(Auteur, 2018).....	112
Figure 115 : création du mur avec outil panneau(Auteur, 2018).....	113
Figure 116 : Résultats(Auteur, 2018)	113
Figure 117 : Modélisation de la toiture en charpente en Bois (Auteur, 2018)	114
Figure 118 :Modélisation des murs en béton armé (Auteur, 2018).....	114
Figure 119 : Modélisation de la dalle en béton armé(Auteur, 2018).....	115
Figure 120 : Modélisation des poutres en béton armé (Auteur, 2018)	115
Figure 121 : Propriété mécanique da la maçonnerie(Auteur, 2018).....	116
Figure 122 : Propriété mécanique du béton armée (Auteur, 2018)	116
Figure 123 : Introduction du poids propre de la mosquée(Auteur, 2018)	117
Figure 124 : Introduction de la charge permanente de la dalle (Auteur, 2018)	117
Figure 125 : Introduction de la charge d'exploitation de la dalle (Auteur, 2018)	118
Figure 126 : Introduction de la charge sismique(Auteur, 2018).....	119
Figure 127 : Coefficient du poids total de la structure (Auteur, 2018).....	120
Figure 128 :Création du maillage(a) avant modification (Auteur, 2018).....	121
Figure 129 : Création du maillage (b) après modification (Auteur, 2018)	122
Figure 130 : 1er mode (Auteur, 2018).....	123
Figure 131 :2e mode (Auteur, 2018)	124
Figure 132 : 3e mode.....	124
Figure 133 : 1er mode (Auteur, 2018).....	125

Liste des figures

Figure 134 :1er mode (Auteur, 2018).....	126
Figure 135 : 2e mode (Auteur, 2018).....	126
Figure 136 : 3e mode (Auteur, 2018).....	127
Figure 137 : Déplacements de la mosquée avant modification de 1954 « G+Q+Ex »(Auteur, 2018)	128
Figure 138 : Déplacements de la mosquée avant modification de 1954 « G+Q+Ey » Auteur, 2018)	129
Figure 139 Déplacements de la mosquée après modification de 1954 « G+Q+Ex » (Auteur, 2018)	129
Figure 140 : Déplacements de la mosquée après modification de 1954 « G+Q+Ey » (Auteur, 2018)	130
Figure 141 : Plan de repérage des points de mesures de déformations (Auteur, 2018)	130

Table des matières

I. Chapitre Introductif	1
I.1. Introduction	1
I.2. Problématique.....	2
I.3. Hypothèses de la recherche	3
I.4. Objectif de la Recherche	3
I.5. Méthodologie de Recherche.....	3
I.6. La structure du mémoire.....	3
II. La notion de la vulnérabilité sismique et la réduction des risques	1
II.1. Introduction :	6
II.2. Le séisme :	6
II.2.1. La notion de séisme :	6
II.2.2. L'onde sismique :	7
II.2.3. L'Action sismique :	9
II.3. Intensité et magnitude sismique :	10
II.3.1. Echelle de Mercalli	10
II.3.2. Echelle de Richter	10
II.4. Les séismes de Chlef et leurs conséquences sur le bâti ancien :	11
II.5. La Vulnérabilité Sismique.....	13
II.6. La notion de réhabilitation	14
II.6.1. La réhabilitation architecturale	14
II.6.2. La réhabilitation sismique	14
II.7. Le patrimoine à travers le cadre réglementaire algérien	15
II.7.1. Loi n°90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune :	15
II.7.2. Loi n°90-09 du 7 avril 1990 relative à la wilaya :	16
II.7.3. Loi 90-29 du 01 décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme : ..	16
II.7.4. Décret législatif N° 94-07 du 18 mai 1994 modifié par la loi N° 04-06 du 14 août 2004 relatif aux conditions de la production architecturale et à l'exercice de la profession d'architecte.....	16
II.7.5. Loi n°98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel : ..	17
II.7.6. Décret exécutif n°03-227 du 22 juin 2003 fixant les conditions et les modalités d'octroi des aides pour la réhabilitation des habitations endommagées par le séisme du 21 mai 2003 :	17
II.8. Les méthodes de réhabilitation.....	17
II.8.1. La méthode RehabiMed :	18

II.8.2. Méthode FEMA 547 :.....	25
II.9. Conclusion	35
III. Les moyens de simulations Numérique et leurs applications dans le domaine du bâti ancien.....	36
III.1. Introduction.....	37
III.2. La simulation numérique	37
III.2.1. Définition.....	37
III.2.2. Quelques Domaines d'application de la modélisation et la simulation numérique 37	
III.2.3. La Simulation numérique en génie civile	38
III.3. Les méthodes de modélisation et de calcul numérique de la vulnérabilité sismique du bâti ancien	39
III.3.1. Méthode statique équivalente	40
III.3.2. Méthode dynamique modale spectrale	41
III.3.3. Méthode Pushover	42
III.4. Quelques logiciels de modélisation	43
III.4.1. ANSYS	44
III.4.2. TreMuri.....	44
III.4.3. Robot structural analysis	45
III.5. Exemples d'étude de vulnérabilité sismique sur le Bâti ancien.....	45
III.5.1. Les projets PERPETUATE	46
III.5.2. Médersa Errachidia « Cherratine » à Fès (Maroc)	54
III.6. Conclusion	60
IV. Typologie d'architecture traditionnelle et son comportement vis-à-vis de l'action sismique	61
IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Les matériaux naturels	62
IV.2.1. Quand sont utilisés les matériaux naturels ?.....	62
IV.2.2. Pourquoi les cherche-t-on ?.....	63
IV.3. Typologies d'architecture en maçonnerie	63
IV.3.1. Maçonnerie de pierre naturelle	63
IV.3.2. La maçonnerie de brique	69
IV.3.3. Maçonneries composites.....	70
IV.4. Conclusion	74
V. Techniques de renforcement structurel.....	75

V.1. Introduction	76
V.2. Interventions sur les murs et les piliers	76
V.2.1. Remplacement physique de la partie endommagée	77
V.2.2. Réparation et renforcement des intersections de murs.....	77
V.2.3. Reprise des fissurations.....	78
V.2.4. Réfection	81
V.2.5. Consolidation par parois armées (chemisage)	82
V.2.6. Consolidation par polymères à fibre renforcé (PRF)	82
V.2.7. Le renforcement par ajout de tirants	83
V.3. Interventions sur les planchers	85
V.3.1. Remplacement des parties altérées (Prothèse avec PRF).....	85
V.3.2. Planchers connectés	86
V.4. Conclusion.....	87
VI. Choix du cas d'étude « Mosquée du vieux Ténès »	88
VI.1. Introduction	89
VI.2. Situation.....	89
VI.3. Historique	90
VI.3.1. Fondation de la casbah du Ténès « T'nes Lahdhar ».....	90
VI.3.2. La mosquée du vieux Ténès « Sidi Maïza »	92
VI.4. Investigation In-Situ	93
VI.1. Lecture architecturale sommaire de la mosquée du Vieux Ténès	94
VI.1.1. Environnement	94
VI.1.2. Lecture architecturale.....	94
VI.1.3. Emplacement du mihrab	96
VI.1.4. Les Valeurs de la mosquée du Vieux Ténès	97
VI.2. Etude structurelle de la mosquée du vieux Ténès	99
VI.2.1. Mur porteur	99
VI.2.2. Colonnes.....	99
VI.2.3. Toiture.....	102
VI.2.1. Composition globale	102
VI.3. Les projets de restaurations de la mosquée du vieux Ténès.....	103
VI.3.1. Modification avant le 1924	103
VI.3.2. Projet de restauration après le séisme D'Orléansville 1954	104
VI.4. État de conservation de la mosquée du vieux Ténès	106
VI.4.1. Dégradation de certaines colonnes.....	106

VI.5. Conclusion	106
VII. Etude numérique à l'aide de logiciel Robot Structural Analysis 2017	107
VII.1. Introduction.....	108
VII.2. Modélisation des modèles Sur Robot structural analysis 2017	110
VII.2.1. Considération générales.....	110
VII.2.2. Etapes de modélisation de la mosquée du vieux Ténès.....	110
VII.3. Etudes numérique Sur Robot Structural Analysis 2017	123
VII.3.1. Analyse modale	123
VII.3.2. Réponse structurel de la mosquée du vieux Ténès sous G+Q+Ex et G+Q+Ey	128
VII.4. Conclusion	131
Conclusion générale	133
Limites et perspectives	135
Bibliographie.....	I
Annexes.....	IV

I. Chapitre Introductif

I.1. Introduction

Réduire la Vulnérabilité ...

L'Histoire montre que les exigences de l'environnement, celles des mouvements de sol, des vents violents, des inondations et autres agents actifs ont été considérés au point qu'au XII^e siècle le Khan des Khans voulait mesurer l'importance relative des séismes, et donc les conséquences sur l'économie de son empire, comme le rapporte MARCO POLO sous la plume de Gary Jennings.¹

Notre pays l'Algérie, possède un potentiel patrimonial très riche, qui nécessite une politique de prise en charge consistante de l'ensemble des contraintes que peut subir ce patrimoine bâti,

... du patrimoine bâti ...

Une architecture liée à un système de construction assez complexe, prend en compte la topographie, le climat et les procédés constructifs et structurels, ces interrelations attestent la complexité de cette architecture, ce qui nous sollicite en tant qu'architecte chercheur à fouiller entre les strates de chaque monument afin d'assurer une connaissance correcte et donc une prise en charge durable de ce trésor immobilier.

...à l'aide d'un outil informatique.

Avec le développement technologique, l'utilisation de l'outil informatique a connu un essor très remarquable dans le domaine de l'architecture et du génie civil.

Le patrimoine bâti en lui-même, a été un sujet de recherche sur les possibilités d'appropriation des techniques modernes de modélisation permises par le développement de l'outil informatique.

Cette évolution aboutit aujourd'hui à des relevés et des études tridimensionnelles précises très fiables et rapides à exécuter.

¹ POLO, Marco. Les voyages interdits. Vol. II, à la cour du grand Khan. Telemaque, 2008

Un modèle numérique 3D reconstitué à la base d'un ensemble de paramètres physiques, chimiques et mécaniques qui définit le bâtiment, va nous aider à mettre en évidence les zones critiques de n'importe quel monument afin de les prendre en charge.

I.2. Problématique

La modélisation numérique, le traitement et la lecture d'informations concernant le patrimoine bâti, constitue aujourd'hui un outil d'aide à la préservation et à la mise en valeur du patrimoine bâti.²

Ce dernier est sollicité par différentes contraintes, à l'exemple de l'Algérie qui perd chaque jour un de ces monuments, ceci montre l'état de dégradation du bâti à cause des défauts d'entretien et de maintenance, cette mauvaise connaissance va laisser toujours ce patrimoine mal protégé contre l'aléa sismique surtout dans une zone à forte sismicité tel que l'Algérie.

Justement notre cas d'étude de la Mosquée Sidi Maïza à Ténès va porter sur ce champ de connaissance, en se basant sur une restitution tridimensionnelle de cette mosquée afin de mettre en évidence les zones critiques, Un monument qui se situe dans une zone à forte sismicité (Séisme de Chlef 1954 ainsi que le séisme le plus important celui de 1980).

Pour cela on va poser un certain nombre d'interrogation

A Quel niveau, l'étude informatique pourra aider à mettre en évidence la vulnérabilité du bâti ancien ?

- Quel est le procédé constructif de ce monument ?
- Quels sont les paramètres physiques et chimiques de ce monument ?
- Quelle est la position du règlement algérien envers ces biens ? y a-t-il des normes à respecter ?
- De quelle manière ce monument va être modélisé ?

² Ahmet Can Altunışık, Ali Fuat Genç. «Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques after Restoration.» Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 20 Avril 2017

I.3. Hypothèses de la recherche

- La modélisation numérique est pertinente, Il conviendra de mettre en place une démarche technique qui passe par la connaissance des arts de bâtir traditionnels, aussi la compréhension des modes constructifs des éléments verticaux et horizontaux.
- La modélisation du bâti ancien, ne répond pas d'une manière concrète aux objectifs de la réhabilitation du bâti ancien.

I.4. Objectif de la Recherche

L'objectif principal de cette recherche est d'utiliser la modélisation numérique en tant qu'outil d'aide à la mise en évidence des zones critiques du bâti ancien, en restant toujours dans l'optique de réhabilitation et de la préservation du patrimoine, pour cela cette recherche a pour but de :

- Etablir un diagnostic détaillé sur le monument ;
- Identifier les zones à risques afin de les prendre en charge ;
- Interpréter les résultats obtenus.

I.5. Méthodologie de Recherche

La méthodologie utilisée dans la recherche est la **méthode Quantitative**, elle assure la collecte des données quantifiables, c'est une mathématisation de la réalité³.

Pour mener notre recherche, on va aborder les points suivants :

- Etablir une recherche bibliographique sur l'ensemble des Ouvrages, Revues, Mémoires..., afin de constituer un champ de connaissances consistant capable d'apporter le plus d'information à notre axe de recherche,
- Prendre un cas d'étude à analyser sur un logiciel (Robot), pour établir à la fin un bilan général de l'état actuel du monument

I.6. La structure du mémoire

Notre recherche se compose de trois (03) grandes phases majeures en commençant d'abord par une première phase introductive qui résume une étude bibliographique établie au préalable, il s'agit de l'ensemble des données recueillies en tant qu'appuis à notre réflexion,

³ Maha, Messaouden. «Cour de methodologie de recherche.» Alger: Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), 2015

Par la suite, nous allons passer vers la deuxième phase, et c'est là où elle se déroulera notre analyse dynamique sous charge sismique sur le monument étudiée (Mosquée du Vieux Ténès), ça sera pour but de donner une évaluation générale de ce monument,

En fin on va passer au traitement des résultats obtenue dans la phase précédente,

II. La notion de la vulnérabilité sismique et la réduction des risques

II.1. Introduction :

Les séismes constituent sans doute les risques naturels les plus meurtriers dans le monde. Ils sont souvent associés à des dégâts matériels et humains considérables souvent à la vulnérabilité très importante des constructions.⁴

II.2. Le séisme :

II.2.1. La notion de séisme :

Le dictionnaire le « Petit Larousse » définit le séisme comme suit :

SEISME : [seism] n. m. (gr.seismos, tremblement de terre).

Secousse plus ou moins violente imprimée au sol, et qui se produit toujours à une certaine profondeur, à partir d'un épicentre (*Synonyme* : secousse sismique ou tellurique, tremblement de terre).⁵

Le séisme se traduit par des vibrations plus ou moins importantes au sol. En surface, les mouvements brusques du sol peuvent présenter des amplitudes de plusieurs centimètres, de fortes accélérations et des durées variant de quelques secondes à quelques minutes. Afin de mieux montrer les effets dévastateurs des séismes sur les populations, nous avons reporté dans le tableau I quelques exemples de séismes majeurs ainsi que le nombre approximatif des personnes décédées.⁶

Date	Lieu	Nombre de morts
1556	Chen Si (Chine)	830 000
1976	Chine	650 000
1980	El Asnam (Algérie)	2633(+348 Disparu)
2003	Boumerdes (Algérie)	2300
2004	Sumatra (Indonésie)	240 000

Tableau 1 : quelques exemples de séismes majeurs ainsi que le nombre approximatif des personnes décédées (CHERAÏT, 2012)

⁴ CHERAÏT, Yacine. Conception des bâtiments en zone sismique. Guelma: Direction de la publication universitaire, 2012

⁵ Dictionnaire. Le petit Larousse illustré. Presses, 1972.

⁶ Pecker, A. Dynamique des sols. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1984.

Les dégâts matériels sont tout aussi considérables comme l'attestent les chiffres suivants⁷ :

Date	Région (Pays)	Estimation des dégâts en millions de dollars US
1963	Skopje (Ex Yougoslavie)	500
1972	Managua (Nicaragua)	800
1980	El Asnam (Algérie)	2000
2003	Boumerdes (Algérie)	3000

Tableau 2 : quelques exemples de séismes majeurs ainsi que les estimations des dégâts (CHERAIT, 2012)

II.2.2.L'onde sismique :

Foyer ou hypocentre, il s'agit du point où se produit le premier mouvement libérant l'énergie lors d'un séisme. Il peut être situé jusqu'à 700km de profondeur, on parle aussi de l'épicentre qui est le point situé à la surface du sol, à la verticale de foyer.⁸

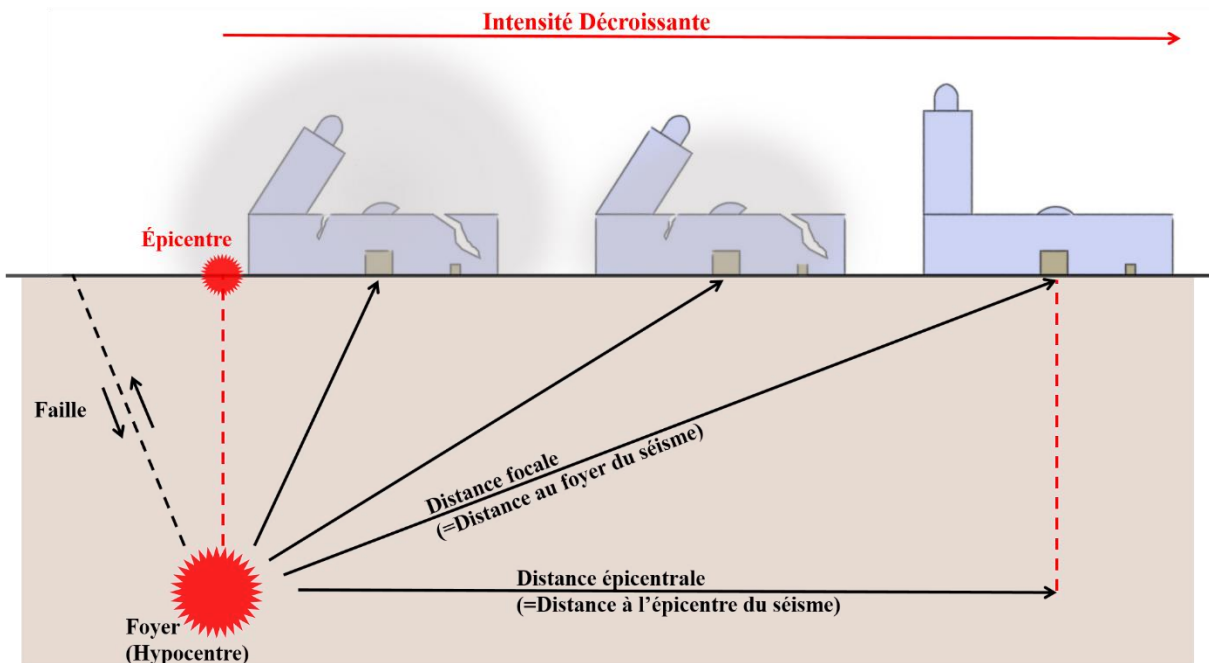


Figure1: Principe sismique (Auteur,2017)

⁷ CHERAIT, Yacine. Conception des batiments en zone sismique. Guelma: Direction de la publication universitaire, 2012

⁸ Ibid

Les vibrations engendrées dans le foyer sont propagées dans toutes les directions sous forme « d'ondes sismiques ».

Il existe deux (2) types d'ondes sismiques :

- Les ondes de volumes.
- Les ondes de surfaces.

II.2.2.1. Les ondes de volumes

Les ondes de volume prennent naissance dans le foyer et se propagent à l'intérieur de la terre sous forme :

- **D'ondes primaires** (ou onde P) qui arrivent les premières .Elles se transmettent longitudinalement dans le sens de leur mouvement avec une vitesse assez élevée (de l'ordre de 5,5 à 13km/s) et s'accompagnent d'un changement de volume du sol (le sol subit un cycle alterné de compression et de dilatation) ;
- **D'ondes secondaires** (ou onde S) de vitesse moins grande (de l'ordre de 3,2 à 7km/s).Elles se transmettent transversalement par distorsion et cisaillement sans changement de volume.⁹

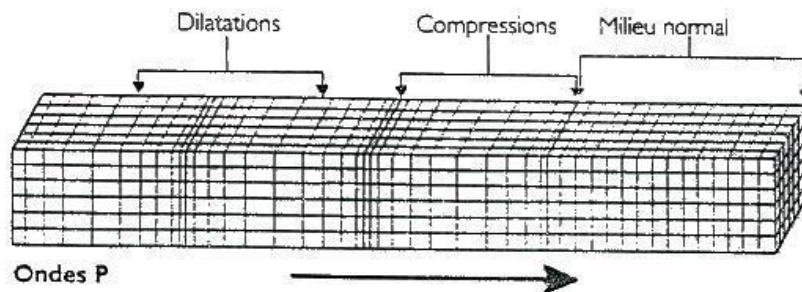


Figure 2 : onde sismique primaire P (CHERAÏT, 2012)

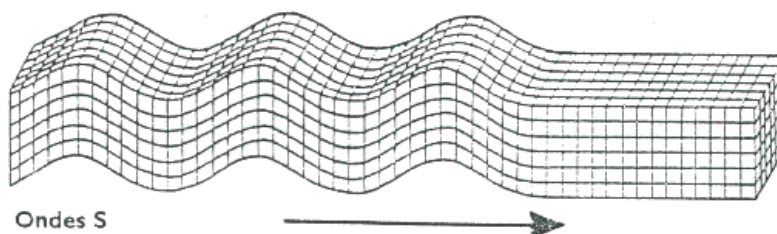


Figure 3 : onde sismique secondaire S (CHERAÏT, 2012)

⁹ Ibid

II.2.2.2. Les ondes de surfaces :

Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre produisent des ondes de surface. On distingue principalement :

- **Les ondes «R » ou ondes de Rayleigh** : ce sont des ondes pour lesquelles les points décrivent des ellipses dans le plan vertical de propagation
- **Les ondes « Q » ou ondes Loves** : ce sont des ondes pour lesquelles les points du sol se déplacent dans un plan tangent à la direction de propagation.¹⁰

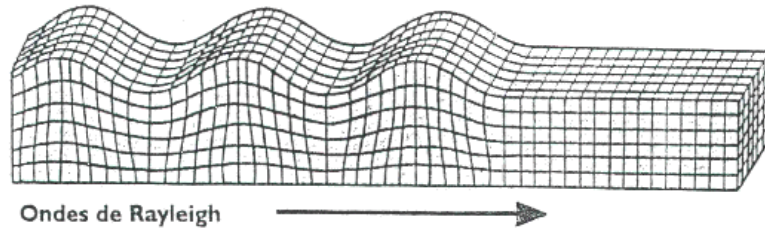


Figure 5: onde sismique de surface Rayleigh (CHERAIT, 2012)

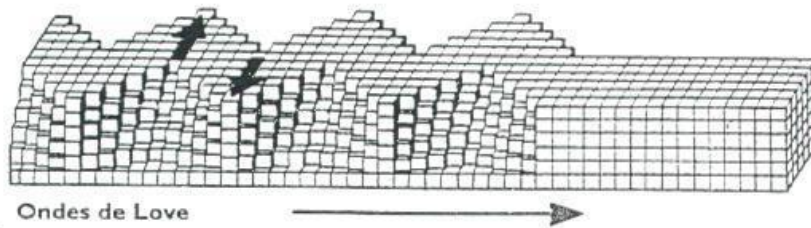


Figure 4: onde sismique de surface Love (CHERAIT, 2012)

II.2.3.L'Action sismique :

Lors d'un séisme, ce dernier se décomposera en deux composantes principales, une composante horizontale H_x et H_y et suivant une autre verticale V_z .

La distance entre l'épicentre et un bâtiment subira un séisme, va influencer d'une manière directe sur la façon de son déplacement, car en s'éloignant de cette épicentre, la composante verticale va augmenter, à l'inverse de la composante horizontale qui va diminuer en s'éloignant de plus en plus de l'épicentre.¹¹

¹⁰ Ibid

¹¹ Jean-François, GARCIA. Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Rapport final de PFE, Strasbourg: INSA, Mars-Juillet 2007

II.3. Intensité et magnitude sismique :

Afin de mesurer l'importance d'un séisme, différents paramètres interviennent pour détecter l'ampleur de ce dernier, on y retrouve parmi ces paramètres l'Echelle de Mercalli et l'échelle de Richter.

II.3.1.Echelle de Mercalli

L'échelle de *Mercalli* est une échelle conventionnelle basée essentiellement sur les dégâts constatés lors du séisme, Elle est graduée de I à XII comme le montre le tableau¹² ;

<i>Intensité</i>	<i>Effets</i>
<i>Degré I</i>	Imperceptible, le séisme n'est détecté que par des sismographes proches.
<i>Degré II-V</i>	Caractérisé de léger à assez fort, le séisme est de plus en plus ressenti, jusqu'au réveil des dormeurs. Oscillation d'objets suspendus.
<i>Degré VI</i>	Séisme suffisamment fort pour être ressenti par tout le monde et provoquer la panique.
<i>Degré VII-VIII</i>	Des dégâts, de légers à importants, apparaissent dans les constructions.
<i>Degré IX-X</i>	Séisme désastreux : les constructions tombent en ruines ; rupture des ponts ; torsion des rails, glissements de terrain, rupture des canalisations.
<i>Degré XI</i>	Désordres dans les constructions réputées solides : le séisme est caractérisé de catastrophique.
<i>Degré XII</i>	Désordre dans la topographie : c'est le cataclysme.

Tableau 3 : les degres de l'echelle Meralli (CHERAIT, 2012)

II.3.2.Echelle de Richter

Le séisme se caractérise aussi par sa magnitude, grandeur quantifiée par l'échelle de Richter qui comporte 9 degrés .la magnitude définit la quantité d'énergie libérée au foyer par le mécanisme sismique, ainsi il n'y a qu'une valeur par séisme.¹³

<i>Magnitude</i>	<i>Energie en J</i>
0	
1	
2	$\sim 10^3$
3	$\sim 10^6$
4	$\sim 10^9$
5	$\sim 10^{10}$
6	$\sim 10^{13}$
7	$\sim 10^{15}$
8	$\sim 10^{17}$
9	Sup à ~ 10

Tableau 4 : les degrés de l'échelle Richter (Jean-François, Mars-Juillet 2007)

¹² CHERAIT, Yacine. Conception des bâtiments en zone sismique. Guelma: Direction de la publication universitaire, 2012

¹³ Jean-François, GARCIA. Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Rapport final de PFE, Strasbourg: INSA, Mars-Juillet 2007

II.4. Les séismes de Chlef et leurs conséquences sur le bâti ancien :

- **Orléansville 1954**

A 01h12, jeudi 9 septembre 1954, Orléansville située à 200km au sud-ouest d'Alger, est frappée par un séisme de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter, la détruisant à 90% et faisant 1500 morts.¹⁴

Parmi les édifices les plus connus qui ont été ébranlés par ce tremblement de terre, nous citons :

L'église d'Orléans ville :



Figure 6 : l'église d'Orléansville avant le séisme de 1954. (CDHA, 2016)



Figure 6 : l'église d'Orléansville après le séisme de 1954. (CDHA, 2016)

L'Hôtel Baudouin :



L'hôtel Baudouin.



LE RISQUE DES RUMES.

Figure 7 L'Hôtel Baudouin(CDHA,2016)

¹⁴ Bossu, Jean (1912-1983). 192 Ifa • Objet BOSJE-H-55-2. Orléansville (aujourd'hui El Asnam, Algérie) : reconstruction (séisme). 1955-1964.

Le collège d'Orléans ville :



Figure 9 : Le collège d'Orléans ville avant le séisme de 1954(CDHA, 2016)



Figure 8 : Le collège d'Orléans ville après le séisme de 1954(CDHA, 2016)

El Asnam 1980

A 13h20, vendredi 10 octobre 1980, El Asnam, ex Orléansville, et sa région, subissent la plus forte secousse sismique jamais enregistrée en Afrique du Nord, 7,3 sur l'échelle de Richter ; elle est suivie d'une nouvelle réplique trois heures plus tard qui finira de mettre à bas ce qui reste de la ville détruite à près de 80%. ¹⁵



Figure 10 : séisme d'El Asnam 1980 (Abaci, 2016)

Le bilan humain est lourd, sur une ville de 120 000 habitants environ, on dénombre selon le CRAAG environs 2633 morts, 4500 blessés, et des dizaines de milliers de survivants sans abris, errant hagards au milieu des ruines. ¹⁶

Entre ces deux événements tragiques, pas mal d'architectes et aménageur de la ville ont pris la responsabilité pour reconstruire la ville d'El Asnam, parmi les architectes qui ont redessiné la ville de Chlef, on trouve **Roland Simounet, Louis Miquel, Jean de Maisonseul**

¹⁵ Bossu, Jean (1912-1983). 192 Ifa • Objet BOSJE-H-55-2. Orléansville (aujourd'hui El Asnam, Algérie) : reconstruction (séisme). 1955-1964.

¹⁶ YELLES-CHAOUCHE, Abdelkrim. COMMEMORATION : Seisme d'El Asnam 10 octobre 1980 . CRAAG INFOS. octobre 2010, p. 4.

et **Jean Bossu**, ce dernier a conçu le centre commercial Saint Reparatus entre 1955 et 1964, qui tombera en ruine suite au séisme de 1980.¹⁷



Figure 11 : le centre commercial Saint Reparatus (Bossu, 1955-1964)

II.5. La Vulnérabilité Sismique

Un bâtiment ne devant osciller que faiblement sur lui-même, il reste à comprendre comment est pris en charge l'énergie qu'il reçoit d'un séisme ou n'importe quel choc, comment reçoit-il cette énergie, comment la transforme-t-il, comment en fin la canalise-t-il et la conduit-t-il dans le sol par l'intermédiaire de ses fondations.

On entend par la vulnérabilité sismique « *analyse des points faibles du bâtiment face à l'éventualité d'un mouvement tellurique dans la localité* »¹⁸. (RehabiMed, 2007), elle varie selon différents paramètres tels que la géométrie et les caractéristiques physico-chimique des matériaux de construction.

Les facteurs de vulnérabilité sismique relèvent¹⁹ :

- De l'architecture (configuration et détail).
- Du système constructif.

¹⁷ Bossu, Jean (1912-1983). «192 Ifa • Objet BOSJE-H-55-2. Orléansville (aujourd'hui El Asnam, Algérie) : reconstruction (séisme).» 1955-1964.

¹⁸ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007..

¹⁹ Attari, N. «Risque, réhabilitation et réduction de la vulnérabilité du bâti.» Alger: Cour, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), 2016.

- De dispositions constructives.
- De l'état de conservation.
- Des interactions possibles avec l'environnement construit.
- De l'interaction de la construction avec le site.

En général on peut dire que, La vulnérabilité sismique se définit par la probabilité qu'un degré de dommages soit atteint pour une classe de bâtiments sous une intensité de séisme donnée.

II.6. La notion de réhabilitation

II.6.1. La réhabilitation architecturale

L'opération de réhabilitation du patrimoine constitue aujourd'hui une alliance très forte entre l'architecte et l'ingénieur. Un travail pluridisciplinaire pour but à mettre en valeur un bien immobilier en prenant en compte son architecture

Le projet de réhabilitation constitue l'acte de prévision qui envisage, en lisant et en interprétant les caractères forts de ce qui préexiste, de projeter ses potentialités dans l'avenir le plus proche.²⁰

Le projet de réhabilitation, qui peut faire partie du filon plus vaste du projet du bâti, devra prendre en compte un système pluriel de liens, car il est destiné à un organisme construit qui existe pour être réutilisé. D'une part, le bâtiment constitue pour le projet un lieu physico-matériel, au moyen de son articulation proprement architecturale et constructive, ainsi qu'un lieu virtuel, grâce à sa dimension historique et évocatrice.²¹

II.6.2. La réhabilitation sismique

On considère actuellement que la réhabilitation sismique découle de la connaissance des techniques constructives locales et de la reconnaissance de leurs possibles déficiences face à l'aléa sismique. La connaissance des procédés de construction locaux est fondamentale et doit guider le choix des interventions. Étant donné que, dans de nombreuses régions sismiques, les bâtiments de caractère traditionnel présentent une certaine adaptation à la sollicitation sismique locale, il est en général préférable de baser le renforcement précisément sur l'analyse des traits constructifs propres à ces constructions et d'éviter ainsi des solutions de renforcement qui leur seraient contraires. L'amélioration sismique est possible en réparant la

²⁰ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

²¹ Ibid

détérioration et en récupérant la résistance originale, sans implanter d'éléments de renfort étrangers à la technologie constructive traditionnelle²².

Dans certains cas, une certaine amélioration de la résistance aux séismes peut être nécessaire du fait du degré de détérioration atteint par le bâtiment par manque d'entretien ou du fait d'une facture constructive ou matérielle originellement déficiente. La nécessité du renfort peut aussi être due à ce que la tradition constructive locale ignore les nécessités de résistance sismique²³.

Même dans ces cas-là, des solutions de caractère compatible avec la construction traditionnelle ou historique et qui tendent à préserver une certaine homogénéité matérielle et organisationnelle sont préférables. Il est souhaitable que les interventions, avant d'altérer profondément la nature constructive et résistante des constructions, tendent plutôt à contrôler ou à relativiser les possibles faiblesses du bâtiment. L'intervention peut être conçue, en cohérence avec les techniques constructives traditionnelles ou historiques, pour contribuer à limiter les déformations subies au cours d'un tremblement de terre ou éviter la séparation excessive entre les parties.²⁴

II.7. Le patrimoine à travers le cadre réglementaire algérien

On étudiant les différents textes législatifs et réglementations algériennes, en corrélation avec la réhabilitation et la préservation du patrimoine bâti, il est remarquable que les différentes lois présentent un cadre réglementaire très superficiel, qui se manifeste dans le manque d'un guide de réhabilitation, chargé de l'ensemble d'opérations de protection et de mise en valeur du patrimoine algérien vis-à-vis des différents risques et pathologies qui pourront altérer cet héritage. Parmi les textes réglementaires qu'on a pu repérer, nous citons :

II.7.1. Loi n°90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune :

Art. 93 – Dans le cadre de la protection du patrimoine architectural, la commune est responsable de :

- La préservation et la protection des sites et monuments en raison de leur vocation et de leur valeur historique et esthétique.
- La sauvegarde du caractère esthétique et architectural et l'adoption de type habitat homogène des agglomérations.

²² Ibid

²³ Ibid

²⁴ Ibid

Art. 106 – La commune a compétence en matière d’habitat pour organiser la concertation, animer et créer les conditions pour favoriser la promotion immobilière publique privée

A cet effet, elle :

- Encourage et organise toute association d’habitants en vue d’opérations de sauvegarde, d’entretien et/ou de rénovation d’immeuble ou de quartier.

II.7.2.Loi n°90-09 du 7 avril 1990 relative à la wilaya :

Art. 82 – L’assemblée populaire de la wilaya apporte son soutien aux communes dans la mise en œuvre de leur programme d’habitat

A ce titre elle :

- Participe à des opérations de rénovation et de réhabilitation en concertation avec les communes.

II.7.3.Loi 90-29 du 01 décembre 1990 relative à l’aménagement et à l’urbanisme :

On remarque dans la présente loi, la prise en charge du patrimoine bâti dans les opérations des aménagements territoriales (PDAU, POS). On peut citer :

Art. 20 – Les secteurs urbanisés incluent également les parties de territoire urbanisés à rénover, à restaurer et à protéger.

Art. 31 – Dans le respect des dispositions des plans directeur d’aménagement et d’urbanisme(PDAU), le plan d’occupation des sols fixe de façon détaillée les droits d’usage des sols et de construction

A cet effet, le plan d’occupation des sols :

- Précise les quartiers, rues, monuments et sites à protéger, à rénover et à restaurer,

II.7.4.Décret législatif N° 94-07 du 18 mai 1994 modifié par la loi N° 04-06 du 14 août 2004 relatif aux conditions de la production architecturale et à l’exercice de la profession d’architecte.

On remarque dans l’article ci-dessous, l’intention donné à la réhabilitation et à la rénovation des tissus urbains dans un cadre global, et pour cela on trouve :

Art. 41 – Le comité d’architecture, d’urbanisme et de l’environnement bâti de wilaya poursuit dans le cadre de la protection et de la préservation de l’environnement bâti, les actions visant à :

- Améliorer l’orientation et l’encadrement des opérations de rénovation et de réhabilitation de tissus urbains.

- Sensibiliser et encadrer les opérations d'intégrations urbaines des grands ensembles.
Encourager les opérations de viabilisation et d'amélioration du cadre bâti des tissus spontanés.
- Conseiller les autorités locales sur la localisation et la délocalisation des activités nuisibles et à la restructuration des zones d'activités.

II.7.5.Loi n°98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel :

Art. 41 – Sont érigés en secteur sauvegardés, les ensembles immobiliers urbains ou ruraux tels que les casbahs, médinas, Ksour, villages et agglomérations traditionnelles caractérisés par leur prédominance de zone d'habitat, et qui, par leur homogénéité et leur unité historique, architectural, artistique ou traditionnel de la nature à en justifier la protection, la restauration, la réhabilitation et la mise en valeur.

II.7.6.Décret exécutif n°03-227 du 22 juin 2003 fixant les conditions et les modalités d'octroi des aides pour la réhabilitation des habitations endommagées par le séisme du 21 mai 2003 :

Art. 2. Les aides prévues à l'article 1er ci-dessus sont consenties aux conditions ci-après pour la réhabilitation de :

- Tout immeuble collectif à usage d'habitation, occupé ou en voie de l'être par un ou plusieurs locataires ou copropriétaires ;
- Toute construction individuelle à usage d'habitation occupée ou en voie de l'être.

II.8. Les méthodes de réhabilitation

La réhabilitation en tant qu'opération très complexe, il est nécessaire d'avoir une feuille de route sous forme d'un guide, qui sera chargée de fournir une stratégie cohérente pour mener une opération correcte, qui commencera toujours par une fiche descriptive du corpus à étudier, son état actuel, son rapport avec le site et l'environnement en général, en arrivant à la fin à des orientations et des rectifications qui vont réduire les vulnérabilités du projet étudié.

Une opération de réhabilitation a pour but principal de réduire les vulnérabilités d'un cadre bâti et notamment les biens à valeur patrimoniales et historique.

Parmi les opérations courantes, on trouve souvent des réhabilitations sismique, architecturale et esthétique et pour cela il faut toujours soulever les enjeux de chaque projet de réhabilitation qui diffèrent selon les contextes.

Parmi les guides de réhabilitation, connu nous citons : RehabiMed, AFPS, le Guide CSTB, FEMA, FABEM.

II.8.1. La méthode RehabiMed :

Cette méthode englobe deux volumes majeurs à savoir le volume destinée à l'intervention à l'échelle des villages, des villes et du territoire et le deuxième volume qui est le complément du premier du fait qu'il se focalise sur l'échelle du bâtiment. Il s'agit par conséquent d'un texte destiné aux architectes, aux ingénieurs et aux constructeurs qui projettent, dirigent et exécutent quotidiennement des travaux de réhabilitation dans des bâtiments traditionnels de la Méditerranée.

En réhabilitant un bâtiment, il est nécessaire d'avoir une vision globale du territoire dans lequel celui-ci est situé ainsi que de comprendre ses rapports avec l'environnement territorial et urbain.²⁵

RehabiMed propose une procédure séquentielle, un processus en quatre phases consécutives (sept étapes) qui démarrent avec la décision d'agir, voici un schéma qui synthétise les différentes étapes majeures :

Voici les étapes en détail :

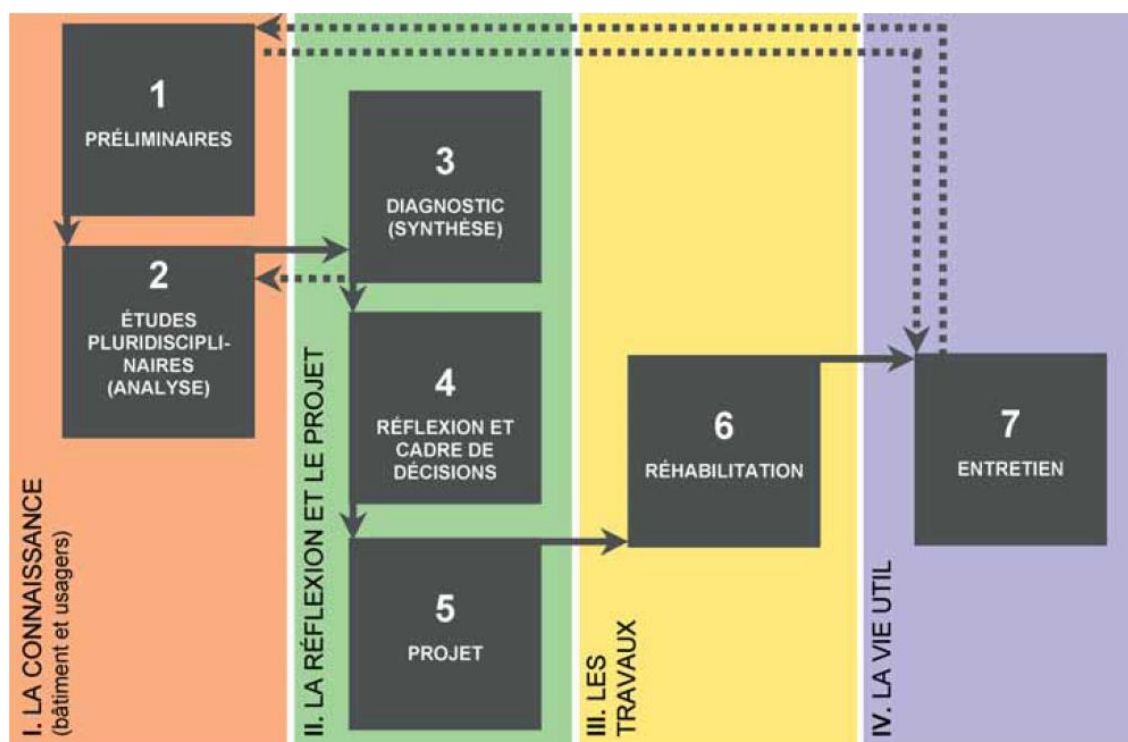


Figure 12 : Les étapes de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

²⁵ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

II.8.1.1. Etape 1 : Préliminaires :

C'est le premier contact avec le projet à étudier, qui va fournir l'ensemble des informations nécessaires, afin de mesurer l'état actuel du bâtiment et choisir à la fin les mesures de réhabilitations essentielles.

Elle se base sur un pré-diagnostic, pour en fin choisir un des deux itinéraires à savoir un projet d'entretien si le bâtiment demeure en bon état,

Dans le cas inverse ou le bâtiment présente des altérations remarquables, on passe à la deuxième étape

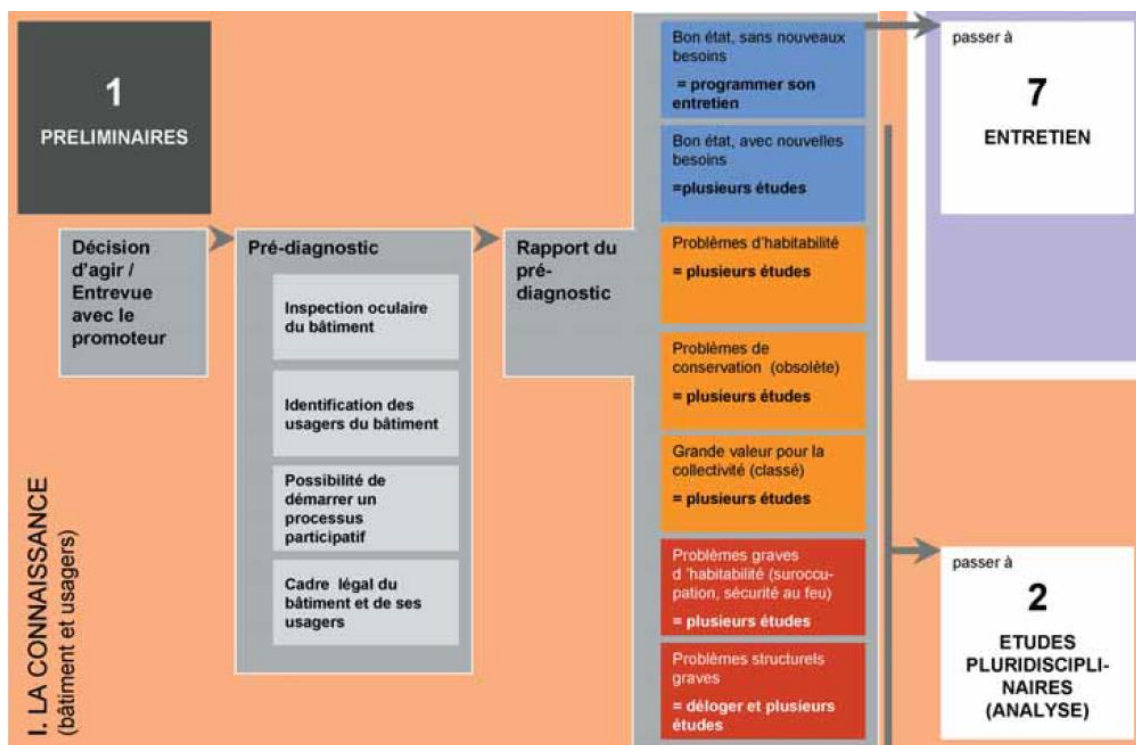


Figure 13 : Etape 1 : Préliminaires de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

II.8.1.2. Etape 2 : Etudes pluridisciplinaires (Analyse) :

Cette étape du processus consiste en un recueil systématique d'information dans tous les domaines que l'on considère nécessaire d'investiguer pour parvenir à une profonde connaissance de l'objet d'étude.²⁶

Le premier, le domaine social qui se base en général sur une enquête sociologique qui permet de détecter les unités familiales ainsi que les possibles situations problématiques (entassement, marginalisation, chômage, abandon, etc.) et leur relation avec le quartier.

²⁶ Ibid

On trouve également le **domaine historique**, qui se résume en une enquête dans les sources documentaires (archives notariales, archives familiales, photographies anciennes, anciens projets du bâtiment) pour compiler des données qui aideront à comprendre le bâtiment et ses transformations. De l'autre, le bâtiment lui-même est un magnifique document historique qui peut être soigneusement étudié comme culture matérielle par la méthode archéologique qui est habituellement utilisée parallèlement au relevé graphique du bâtiment (sondages dans les murs, analyse des matériaux de construction, analyse stratigraphique du bâtiment, etc.).

Pour le **domaine architectural**, il est nécessaire de faire appel à un bon relevé étant donné qu'il constituera la base de tous les travaux postérieurs, de l'autre côté une bonne documentation photographique, voire vidéographique, est extrêmement utile parce qu'elle permet de fixer des détails qui peuvent passer inaperçus à première vue.

Un relevé graphique n'est pas seulement une opération abstraite permettant de prendre des mesures. Dessiner le bâtiment est le meilleur moyen pour le découvrir et l'appréhender. Une partie importante du relevé appartient à la reconnaissance des valeurs architecturales du bâtiment et au relevé graphique des matériaux.

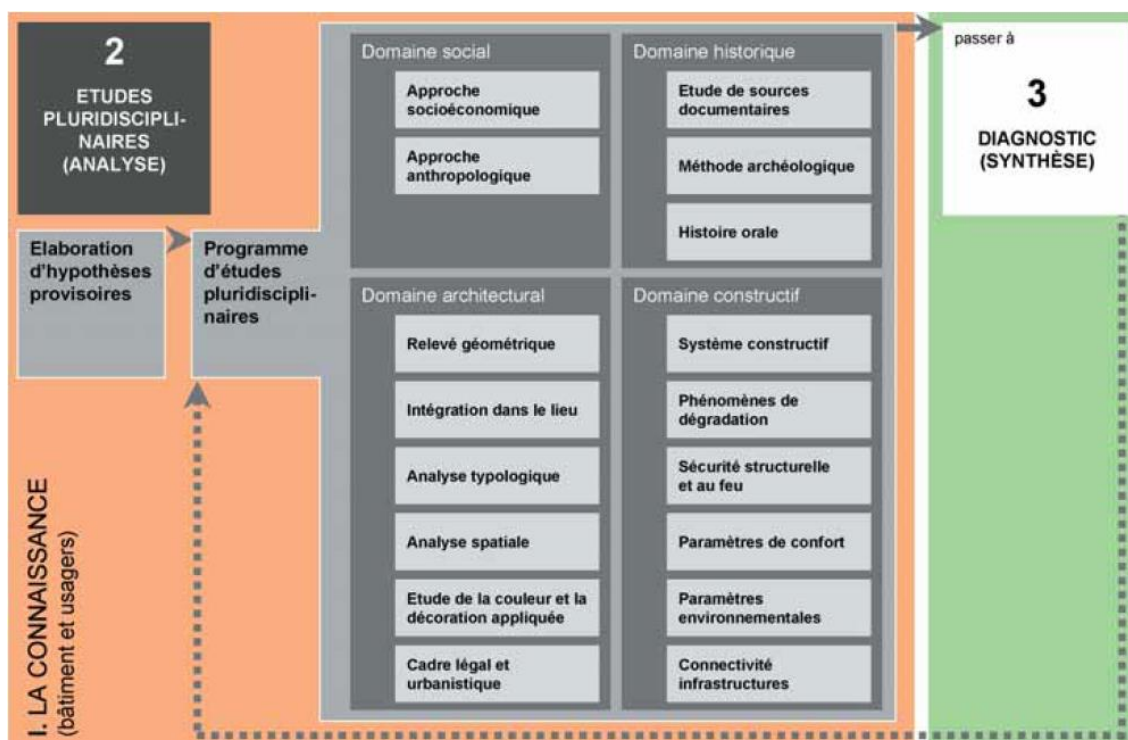


Figure 14 : Etape 2 : Etudes pluridisciplinaires de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

En fin, on a le **domaine constructif**, ce derniers comprend la reconnaissance physico-constructive de tous les éléments du bâtiment ainsi que l'observation de ses lésions, gérer par un architecte/ingénieur habitué aux modes de construction traditionnels de la région,

disposant d'une solide formation scientifico-technique de la pathologie des bâtiments traditionnels.

L'analyse constructive doit passer par une identification des matériaux, leurs altérations éventuelles et faire le suivi des fissurations, etc.

L'évaluation de la sécurité structurelle du bâtiment, est primordiale surtout dans les zones sismiques.²⁷

II.8.1.3. Etape 3 : Diagnostic (synthèse) :

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une étape de synthèse, ou on va traiter l'ensemble des données pluridisciplinaires ayant été réalisée auparavant sous une réflexion critique, pour en fin confirmer l'hypothèse fixée auparavant.

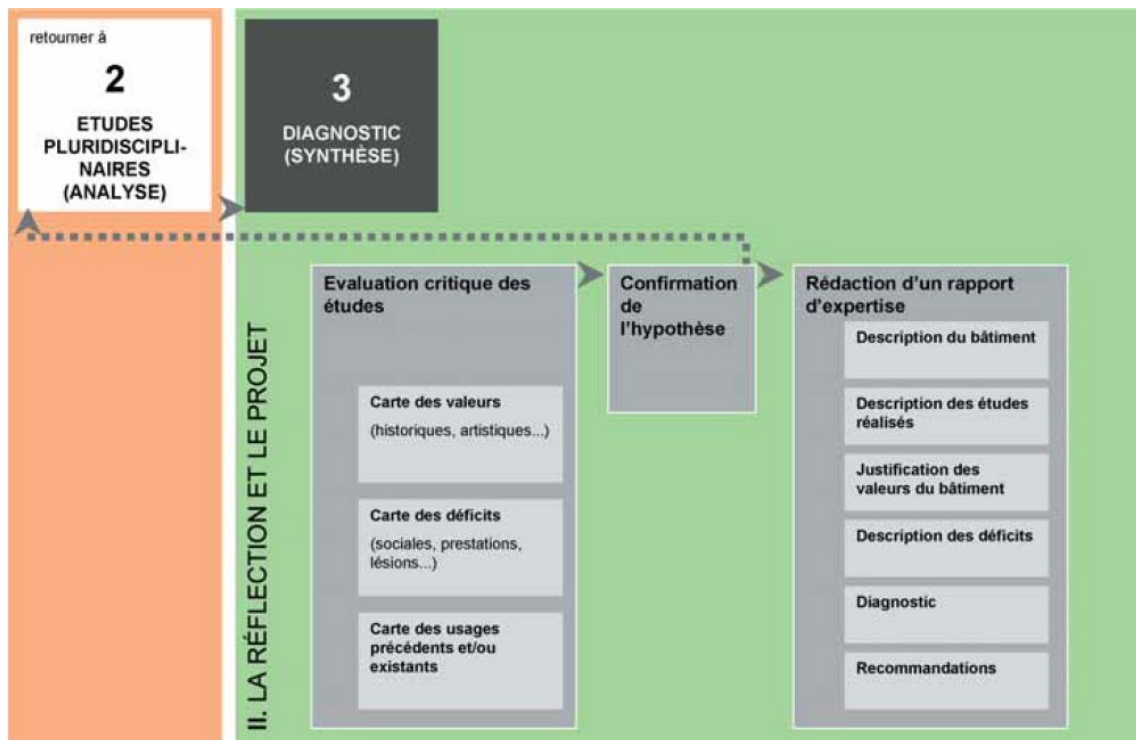


Figure 15 : Etape 3 : Diagnostic de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

Pour finir cette étape, le travail va être clôturé sous un rapport d'expertise. On détaillera la composition du bâtiment, on décrira et on justifiera ses valeurs, on détaillera les déficits et leurs causes, et on fera des recommandations.

²⁷ Ibid

II.8.1.4. Etape 4 : Réflexion et cadre de décisions

A travers cette étape, la réflexion va commencer par une étude de faisabilité des différents changements qui vont être apportés par la suite, pour en fin choisir un cadre de décision selon l'état du projet.

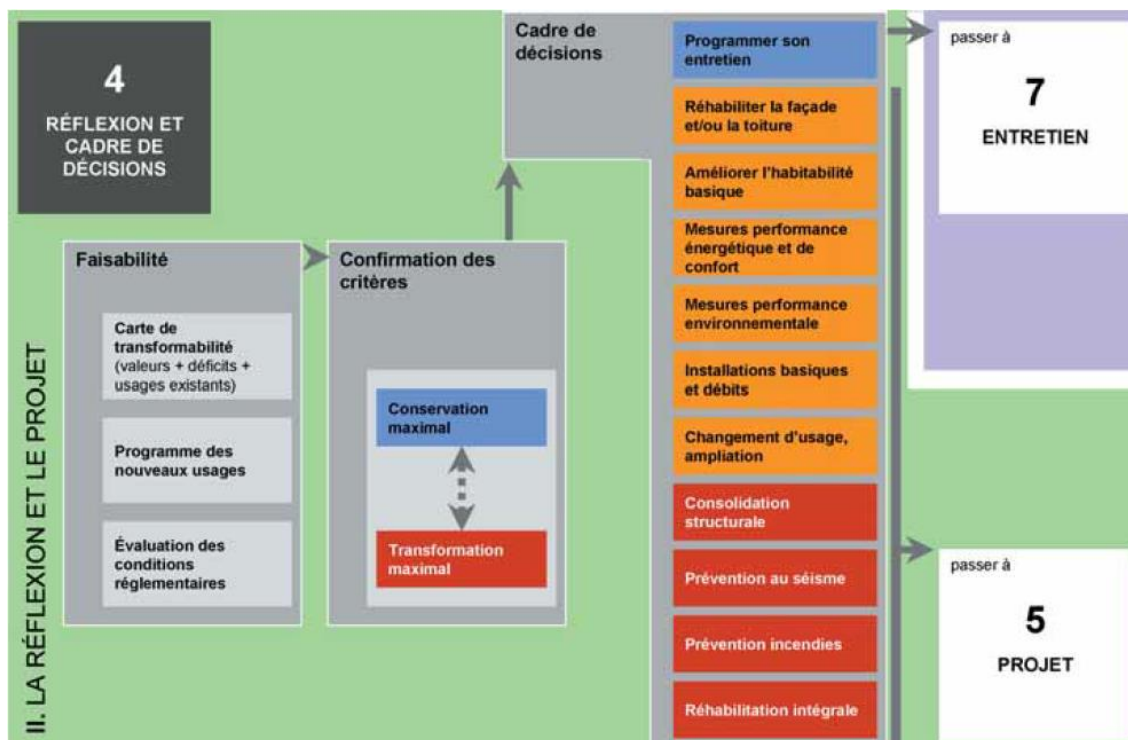


Figure 16 : Etape 4 : Réflexion et cadre de décisions de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

II.8.1.5. Etape 5 : Projet

Divisée en deux parties, l'avant-projet et le projet, et c'est là où on va fixer l'ensemble des démarches administratives et le choix des techniques de construction, il doit intégrer aussi les paramètres de durabilité qui seront raisonnables à l'échelle de l'intervention (mesures d'économie de l'eau, mesures d'économie énergétique, introduction des énergies renouvelables, introduction de facilités pour la gestion correcte des résidus domestiques, etc.).

Le projet doit prendre en compte la possibilité des modifications qui pourraient parvenir au cours des travaux.

Il comprendra la documentation suivante : définition géométrique de la proposition avec cotes (étages, sections et élévations), plans de structure, plans des finitions, plans des installations, cahier technique, mesures, devis, cahier des charges et mesures d'hygiène et de sécurité.

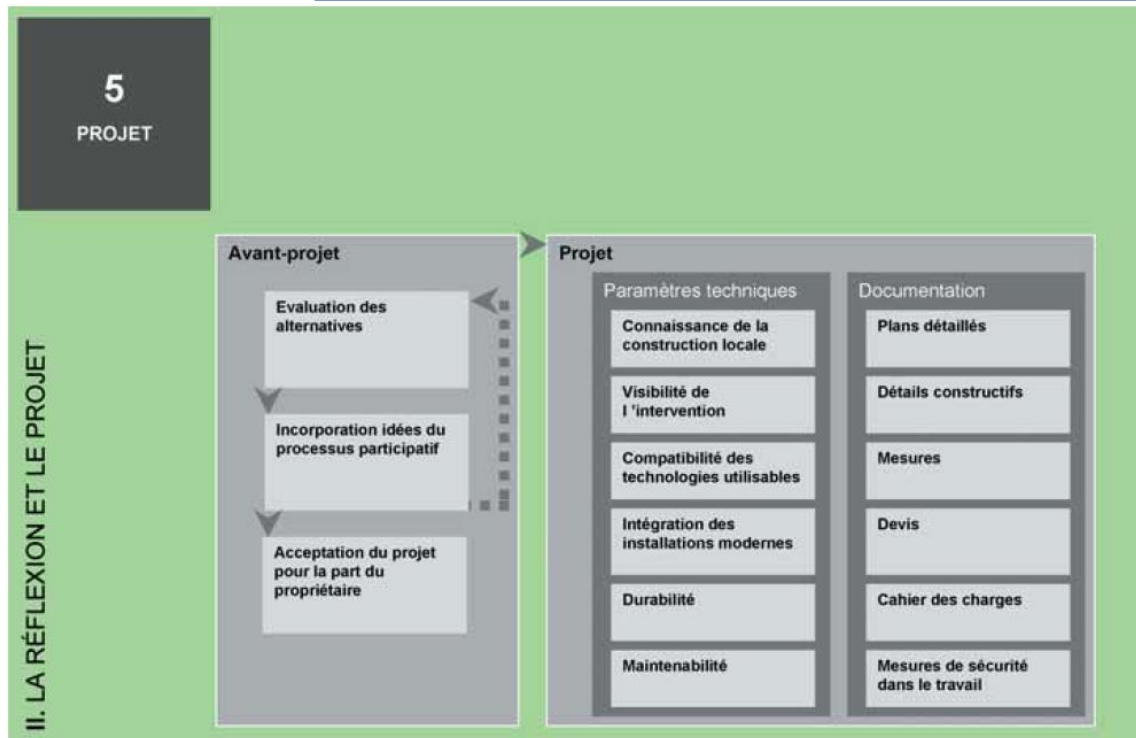


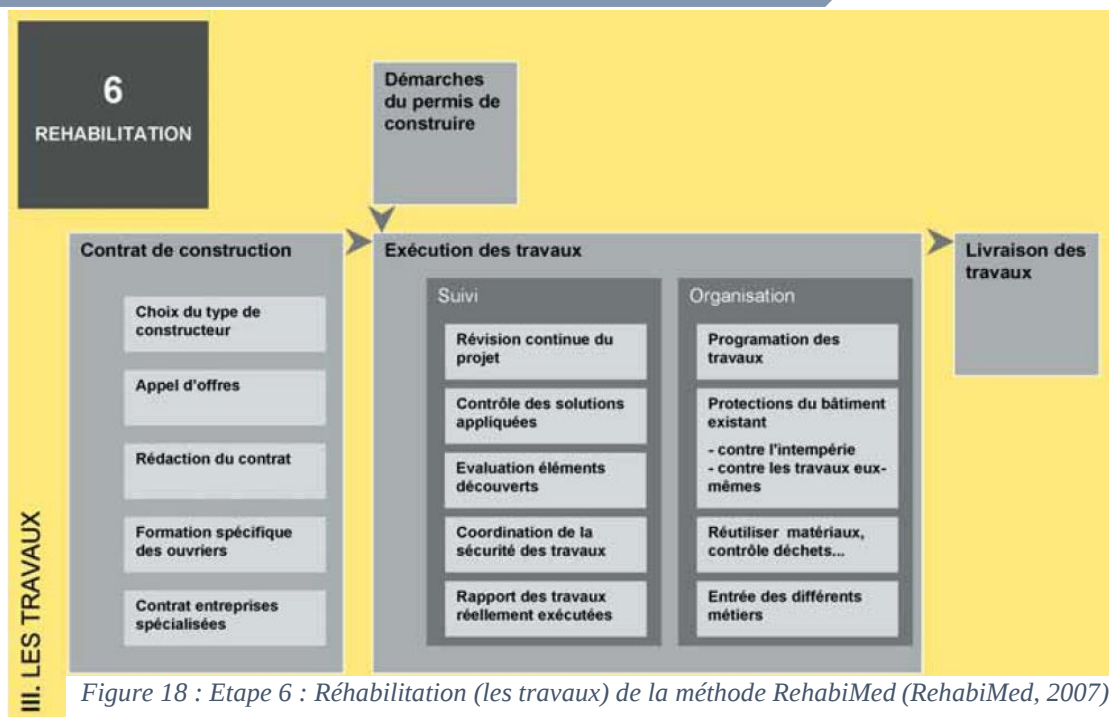
Figure 17 : Etape 5 : Projet de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

II.8.1.6. Etape 6 : Réhabilitation (les travaux)

Gérer par une direction des travaux, la réhabilitation exige toujours une flexibilité, afin d'être toujours prêt à des imprévus qui surgissent souvent au fur et à mesure des travaux, ce qui complique l'application unique de ce qui est indiqué dans le projet.

De ce fait la révision continue du projet est obligatoire pour apporter à chaque fois les modifications nécessaires.

D'autre part, on pourra difficilement parler d'opérations de démolition dans une réhabilitation mais plutôt de déconstruction ou de démontage. Car on doit repérer dès le début des travaux les éléments qui devront être démontés pour qu'ils soient réutilisés si les conditions permettent de faire (nécessités d'approvisionnement en tuiles, en poutres de bois, Etc.)



II.8.1.7. Etape 7 : Entretien

Il est important de fixer en avant une stratégie d'entretien pour un bâti ancien, pour lutter en permanence contre sa vulnérabilité importante. Et si l'on fait l'effort de réhabiliter cette architecture, il faut profiter de l'occasion et promouvoir son entretien, parce qu'à partir du jour même de la fin de la réhabilitation le bâtiment recommence à vieillir.²⁸

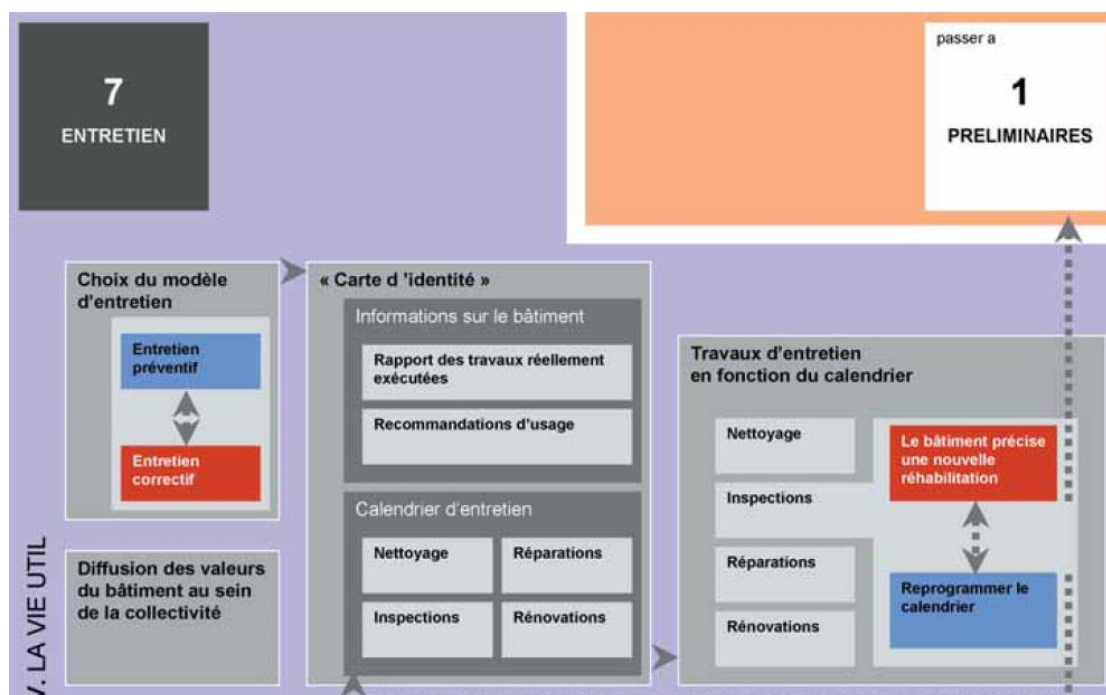


Figure 19 : Etape 7: entretien de la méthode RehabiMed (RehabiMed, 2007)

²⁸ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

II.8.2.Méthode FEMA 547 :

Présentée sous forme de guide, cette méthode de la Federal Emergency Management Agency américaine, qui a lancé en 1984 son programme visant à encourager la réduction des risques sismiques du bâti ancien dans tout le pays, constitue une prénorme.

Le but principal de ce document est de fournir une compilation de données de réhabilitation sismiques qui sont pratiques et efficaces. Les descriptions des techniques comprennent les détails et les conseils constructibles qui pourraient être inaccessibles aux spécialistes de réhabilitation. Un objectif secondaire est de fournir des indications sur les techniques utilisées couramment pour atténuer les risques sismiques spécifiques dans les différents types de bâtiments.²⁹

Les objectifs du document sont les suivants³⁰ :

- Elaborer des guides de Diagnostic et d'analyses du bâti ancien ;
- Décrire les techniques de réhabilitation couramment utilisées pour divers types de bâtiments ;
- Intégrer les résultats de recherches pertinentes ;
- Discuter des détails et des problèmes de construction ;
- Fournir des suggestions aux ingénieurs sur l'utilisation de nouveaux produits et techniques.

II.8.2.1. Evaluation sismique suivant FEMA 547

Le guide FEMA 547, est le résultat de mises à jour de méthodes antérieures, intégrant les enseignements des études post sismiques récentes.

Dans ce document, la notion de déficience sismique est définie comme une condition qui empêchera un bâtiment de respecter la performance sismique désigné.

L'un des premières lacunes qu'on peut trouver lorsque l'on commence à évaluer la vulnérabilité sismiques d'un bâtiment existant est la disponibilité et la fiabilité des relevés et des détails structurels.³¹

Certains types d'évaluation sont décrits brièvement ci-après.

²⁹ American Society of Civil Engineers. Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings. FEMA 310, Federal Emergency Management Agency, 1998

³⁰ Ibid

³¹ Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington: FEMA 547, 2006.

1. Comparaison avec les règlements des nouveaux bâtiments

Selon le FEMA 547, l'évaluation sismique était souvent déterminée en comparant le bâtiment ancien avec les règlements des nouveaux bâtiments. Cette comparaison est souvent difficile ou impossible car l'ancien bâtiment peut inclure des matériaux ou des systèmes structuraux interdits dans le code de nouveaux bâtiments et il est souvent impossible d'enlever complètement les matériaux et donc toucher à l'authenticité de l'édifice ou de modifier les systèmes structurels.³²

2. Normes prescriptive

Le guide le plus remarquable disponible pour l'évaluation sismique des bâtiments existants est ASCE 31-03: Évaluation sismique des bâtiments existants (ASCE, 2003), développé à l'origine par FEMA 310: Manuel pour l'évaluation sismique des bâtiments existants. ASCE 31-03 est destiné à être utilisé sur des bâtiments anciens qui connaissent des systèmes structurels anciens et primitifs.³³

2.1. Aperçu sur FEMA 310

L'évaluation est systématiquement faite par rapport à deux niveaux de performance³⁴:

- Sauvegarde des vies humaines (SVH) ;
- Fonctionnalité immédiate (FI).

Trois niveaux d'évaluation sont proposés.

Niveau 1 : Présomption de vulnérabilité

Cette évaluation concerne tous les types de bâtiments et vise à identifier ceux qui n'atteignent pas le niveau de performance requis. L'état de la construction est examiné à l'aide d'une série de " check-lists " détaillées dans le guide et portant sur la structure, les éléments non structuraux et l'interface sol/fondations. Si des points vulnérables sont détectés, il peut être décidé de procéder à l'évaluation du niveau 2 ou de se satisfaire des résultats obtenus.

³² Ibid

³³ Ibid

³⁴ Zacek, Milan. Vulnérabilité et renforcement. 2004

Tableau 5 : Check listes FEMA 310 (American Society of Civil Engineers, 1998)

Région de sismicité	Niveau de performance	Check listes				
		Structure base	Structure compléments	Sol et fondations	él. non structuraux base	él. non structuraux compléments
Faible	SVH					
	FI	X		X	X	
Moyen	SVH	X		X	X	
	FI	X	X	X	X	X
Fort	SVH	X	X	X	X	
	FI	X	X	X	X	X

Si dessous la description la liste de vérification structurelle de base pour le type des constructions en maçonnerie

Légende :

- C = conforme ; NC = non conforme ; SO = sans objet.

Certains points peuvent ne pas s'appliquer au cas étudié.

Pour les points évalués non conformes, on peut choisir d'effectuer d'autres recherches en utilisant la procédure d'évaluation correspondante de niveau 2

REMARQUE : les points traités concernent seulement le niveau de performances structurelles (les deux premiers points de la Check List)

➤ Système structurel

- **DESCENTE DES CHARGES** : La structure doit assurer un chemin de descente de charge complet pour les SVH et FI pour les charges sismique de n'importe quelle direction horizontale qui sert à transférer les forces d'inertie de la masse à la base.
- **MEZZANINES** : Les mezzanines doivent être contreventées indépendamment de la structure principale, ou ancrés aux éléments résistant à la force latérale de la structure principale.

- **NIVEAU FAIBLE:** La résistance à la force latérale dans un niveau ne doit pas être inférieure à 80% de la résistance d'un niveau situé au-dessus ou au-dessous pour les performances SVH et FI.
- **NIVEAU SOUPLE :** La rigidité du système résistant à la force latérale dans n'importe quel niveau ne doit pas être inférieure à 70% de la rigidité dans un niveau adjacent au-dessus ou au-dessous ou inférieure à 80% de la rigidité moyenne des trois niveaux au-dessus ou au-dessous pour les performances SVH et FI.
- **GEOMETRIE :** Les dimensions horizontales du système de contreventement ne doivent pas varier de plus de 30 % par rapport à celles du contreventement des niveaux adjacents, à l'exclusion des derniers niveaux en retrait, pour les performances SVH et FI.
- **DISCONTINUITÉ VERTICALES :** Tous les éléments verticaux de contreventement doivent être continus jusqu'aux fondations.
- **MASSE :** La masse effective ne doit pas varier de plus de 50 % d'un niveau à l'autre, pour les performances SVH et FI.
- **TORSION :** La distance entre les centres de rigidité et de gravité ne doit pas dépasser 20 % de la largeur du bâtiment dans toutes les directions, pour les performances SVH et FI.
- **UNITES DE MACONNERIE :** Il ne doit pas y avoir de détérioration visible des tous les unités de maçonnerie.
- **JOINTS DE MACONNERIE :** L'ensemble des joints doivent être bien finis et dans un bon état.
- **FISSURATION DES MURS DE MACONNERIE:** Il ne doit pas y avoir de fissures diagonales existantes dans des éléments de paroi supérieurs à 3.1750mm pour la performance SVH et 1.5875mm pour la performance FI, ou des décalages du lit de joint supérieur à 3.1750mm pour SVH et 1.5875mm pour FI.

➤ Résistance aux forces latérales

- **REDONDANCE**

➤ Connections

- **TRANSFERT DES CHARGES:** Les diaphragmes doivent être renforcés et reliés pour le transfert des charges aux murs pour la performance SVH et les liaisons doivent être en mesure de développer la résistance au cisaillement des murs pour la FI.
- **CONNEXION POTEAU/POUTRE :** Il doit avoir une connexion positive entre les poteau et les poutres.

➤ DIAPHRAGMES

- **OUVERTURES EXTERIEURS :** Les ouvertures des murs extérieurs de maçonnerie ne doivent pas dépasser 2,40 m de long pour la SVH et 1.2 m de long pour le FI.
- **RENFORCEMENT DES DIAPHRAGMES DANS LES OUVERTURES :** Il doit y avoir un renforcement autour de toutes les ouvertures supérieures à 50% de la largeur du bâtiment.

Ce point s'applique uniquement pour la performance FI.

Niveau 2 : analyse quantitative

Cette analyse consiste à appliquer une méthode de calcul élastique linéaire simplifiée aux bâtiments désignés comme non conformes au niveau 1. L'objectif est d'identifier les constructions qui ne nécessitent pas de réhabilitation, ainsi que celles qui présentent une réelle vulnérabilité. Le tableau suivant précis, en fonction du nombre de niveaux, les types de construction nécessitant une analyse de niveau 2 ou éventuellement de niveau 3, même s'ils ont été considérés comme conformes au niveau 1³⁵.

³⁵ Ibid

Type de construction	Nombre de niveaux à partir duquel une analyse de niveau 2 ou de niveau 3 (N3) est exigée					
	Sismicité faible		Sismicité moyenne		Sismicité forte	
	SVH	FI	SVH	FI	SVH	FI
Ossature bois : -maisons individuelles -idem avec grandes portes de garage en rez-de-chaussée -bât. Industriels commerciaux		3 4 3		3 3 3		3 3 3
Portiques en acier : -diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles	4	4 1	1	1	1	
Ossatures en acier contreventées par triangulation : -diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		4 4	3 3		3 3	
Portiques transversaux de grande portée en acier		2		2		2
Ossatures en acier contreventées par des voiles		5	5		4	
Ossatures en acier contreventées par des murs en maçonnerie : - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		3 3		1 1	1 1	1 1
Portiques en béton armé		3	1		1	
Voiles en béton : - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles	5	5	5	5	4	4
Ossature en béton armé avec remplissages en maçonnerie rigides - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		3 3		1 1		1 1
Panneaux préfabriqués en béton armé - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		2 2	1 1		1 1	
Ossatures en béton armé préfabriqué : - contreventement par voiles - contreventement par effet de portique		5 1	5 1		4 1	
Maçonnerie armée : - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		4 4	3 1		2 1	
Maçonnerie non armée : - diaphragmes rigides - diaphragmes flexibles		2 N3		N3 N3	1	N3 N3
Systèmes mixtes		3		1		1

Tableau 6 : les types de construction nécessitant une analyse de niveau 2 ou éventuellement de niveau 3
(American Society of Civil Engineers, 1998)

Niveau 3 : analyse approfondie³⁶

Dans le cas où les deux niveaux précédents n'apportent pas une réponse précise sur le cas étudié vue leur aspect superficiel, l'étude se perpétue vers le niveau 3 qui vise à une évaluation précise qui ne se justifie que dans des cas spécifiques.

On peut utiliser des méthodes statiques ou dynamiques linéaires ou non linéaires

Un plan du rapport final figure dans le guide. Ce rapport devrait comporter au moins les informations suivantes :

- Objectif, méthode, type d'analyse, niveaux de performance vérifiés.
- Description du bâtiment : destination, capacité, forme, dimensions, système porteur, éléments non structuraux, type de bâtiment par référence à une typologie, importance historique,...
- Description du site : topographie, sismicité, type de sol,...
- Liste des hypothèses adoptées : propriétés des matériaux, effets liés au site, nature du sol,...
- Liste des points faibles constatés.
- Annexes : références, notes de calcul,...

³⁶ Ibid

2.2. Organigramme FEMA 310

La démarche se résume dans sa globalité dans l'organigramme ci dessous ;

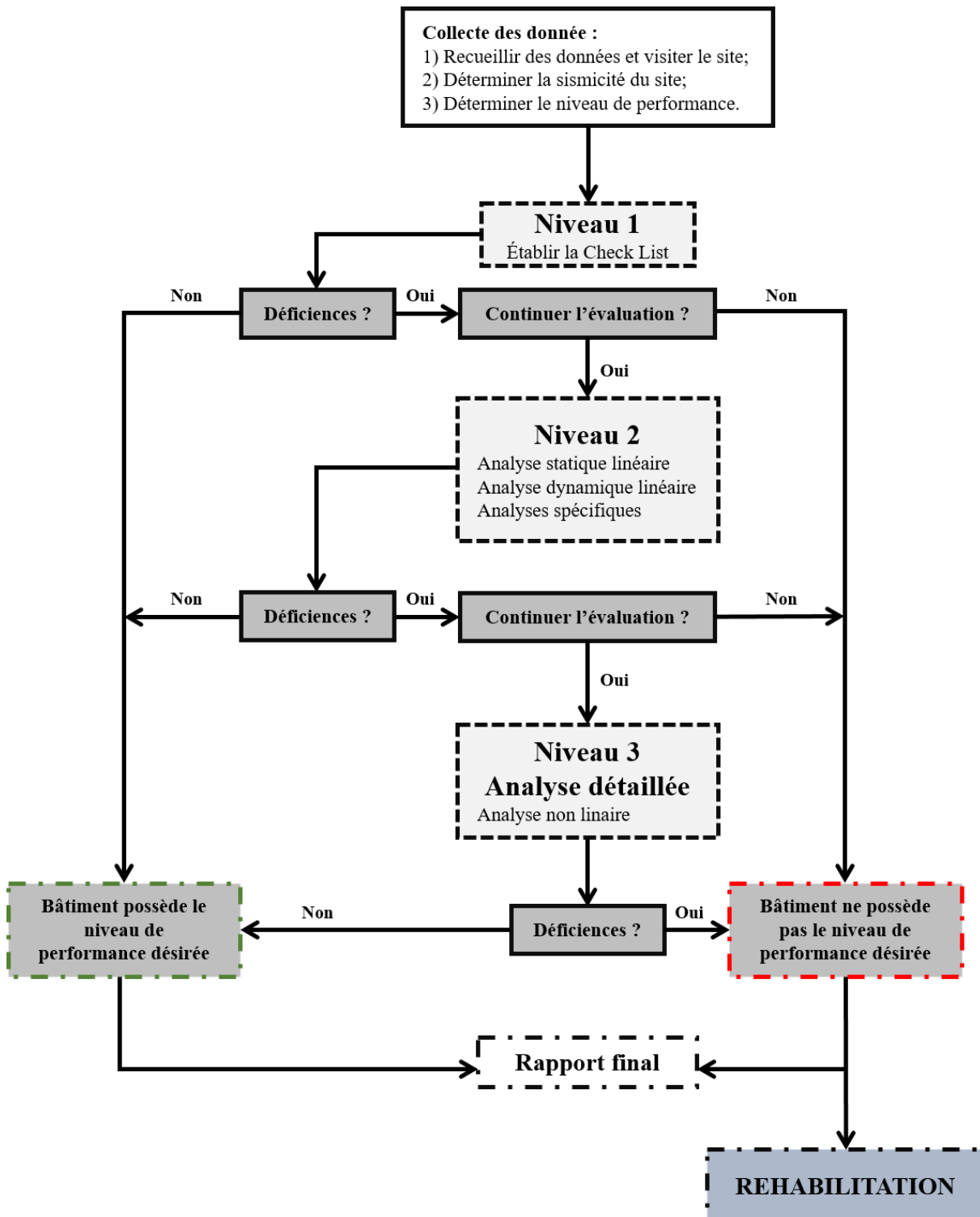


Figure 20 : Organigramme FEMA 310 (American Society of Civil Engineers, 1998)

3. L'Analyse Non linéaire

Le guide FEMA 547 affirme que l'évaluation sismique la plus sophistiquée et la plus compliquée en même temps est réalisée à l'aide de techniques analytiques qui tiennent compte la réponse non linéaire d'une la structure lors d'un séisme important.³⁷

Parmi les analyses connues, on trouve l'Analyse Pushover cité plusieurs fois dans les Guides FEMA.

II.8.2.2. Techniques de réhabilitation FEMA 547

En se focalisons sur notre thème d'étude à savoir le patrimoine ancien, Nous allons essayer de résumer les techniques de réhabilitation qui concerne le bâtiment construit majoritairement en maçonnerie qui est l'un des catégories traités dans le guide FEMA 547 parmi d'autres.³⁸

Selon ce guide, Il est important de reconnaître que les bâtiments construit en maçonnerie varient considérablement selon la structure et les caractéristiques du matériau en lui-même, ce qui peut avoir un effet important sur la réponse sismique de l'édifice. Les bâtiments réguliers tels que les immeubles résidentiels, possèdent souvent des hauteurs d'étages relativement faibles et de nombreuses cloisons qui peuvent servir de renfort. Ces bâtiments fonctionnent généralement beaucoup mieux que d'autres types d'édifice tels que les complexes religieux (église, mosquée, médersa...etc.) qui peuvent avoir des plans irréguliers, des hauteurs de niveau élevé, des murs lourds, des toits décalés, des cloisons et de nombreuses fenêtres.³⁹

Dans un cas pareil ce type de bâtiment peut également être plus couteux à réhabiliter.

Si dessous un tableau qui résume les déficiences des bâtiments construit en maçonnerie ainsi que les techniques de réhabilitation.

³⁷ Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington: FEMA 547, 2006

³⁸ Ibid

³⁹ Ibid

Déficiences sismique et techniques de réhabilitation de maçonnerie						
Déficiences		Techniques de réhabilitation				
Catégorie	Déficience	Ajout de nouveaux éléments	renforcement des éléments existants	Améliorer la connexion entre les éléments	Réduire la demande sismique	Supprimer des éléments
Résistance	Résistance du mur insuffisante	Panneaux porteur en bois Mur porteur en béton/Maçonnerie	Revêtement mural en béton Revêtement mural en fibre composite Coulis Remplissage des fenêtres		Isolation sismique	
Rigidité						
Configuration	Niveau souple, Niveau faible, Torsion excessive	Panneaux porteur en bois Mur porteur en béton/Maçonnerie Contreventement métallique Portique métallique (moment frame)				
Descente des charges	Mauvaise ou absence de liaison avec le diaphragme			Ancrage Ancrage de cisaillement Liaison transversale Ancrage de diaphragme (subdiaphragms) Supports verticales supplémentaires		
Détail de composant	Fléchissement de mur		Support mural Revêtement mural en béton Revêtement mural en fibre composite			
	Parapet non consolidé		Support de parapet			
	Cheminé non consolidé		Support de cheminé Remplissage de cheminé		Réduction de la hauteur de cheminé	Enlever la cheminé
	Placage mal ancré		Ajouter des attaches			Enlever le placage
Diaphragmes	Résistance ou rigidité inadéquate	Contreventement horizontal Panneaux porteur en bois Mur porteur en béton/Maçonnerie Contreventement métallique Portique métallique (moment frame)	Renforcement du diaphragme existant			
	Contraintes excessives dans les ouvertures	Ajouter des attaches métallique ou en bois				

Tableau 7 : Déficiences sismique et techniques de réhabilitation de maçonnerie (Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers, 2006)

II.9. Conclusion

L'étude de vulnérabilité sismique du patrimoine bâti est un sujet d'actualité très complexe qui nécessite un savoir-faire dans le domaine, afin de garantir une fiabilité de résultat et donc une bonne prise en charge à la fin,

Un travail qui nécessite une connaissance sur le cas étudié, son environnement, et surtout le comportement du matériau qui le compose, surtout dans une région de forte sismicité telle que la wilaya de Chlef où l'activité sismique demeure constante et destructive, ce qui atteste l'obligation de forger notre propre guide de réhabilitation qui prend en charge tous ces aspects, un manque flagrant dans le cadre réglementaire en ce qui concerne le sujet ce qui nous a poussé à affirmer l'importance d'un guide de réhabilitation du cadre bâti qui sera un baromètre de conscience patrimoniales et une image pour un pays qui cherche à prendre en charge son héritage.

Cette insuffisance a fait appel à d'autres méthodes et guide de réhabilitation sismique tels que le RehabiMed et la FEMA 547 (310), dans le but de définir dans un premier temps et les objectifs de l'étude pour ensuite utiliser ce guide en tant que feuille de route vers un plan d'action qui vise à répondre à notre objectif principale.

III. Les moyens de simulations Numérique et leurs applications dans le domaine du bâti ancien

III.1. Introduction

La grande vulnérabilité sismique du patrimoine ancien, très souvent en maçonnerie, impose, afin d'éviter tout dommage irréparable, de se donner les moyens d'intervenir en amont. Notre vision doit donc répondre à deux objectifs principaux : Offrir dans un premier lieu une analyse pertinente du comportement sous séisme d'une structure historique maçonnée même en première approche, et donner des perspectives pour trouver des méthodes pour gérer le nombre important d'incertitudes qui caractérise le diagnostic des édifices anciens. Pour ce faire, nous devons mettre la tache sur le domaine de modélisation numérique afin d'avoir une idée générale sur ce domaine pour comprendre le sens de la modélisation numérique, son principe de calcul et aussi son application dans le domaine du patrimoine et du bâti ancien.

III.2. La simulation numérique

III.2.1. Définition

La simulation numérique est le processus qui permet de calculer sur ordinateur les solutions des modèles abstraits accessible à l'analyse et au calcul et donc de simuler la réalité.⁴⁰

III.2.2. Quelques Domaines d'application de la modélisation et la simulation numérique

- **Conception de voitures et d'avions** Utilisée par nombreuse company de fabrication de voitures et d'avions afin de répondre à plusieurs objectifs tels que la carrosserie, les Crash test, la Structure...etc.⁴¹



Figure 22a: Crash Test réel (Mazen SAAD, 2014)



Figure 22b: Crash Test numérique (Mazen SAAD, 2014)

⁴⁰ SAAD, Mazen. Modelisation et simulation numérique par l'exemple. Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire de Mathématiques Jean Leray. 10 Avril 2014

⁴¹ Ibid

- **Ingénierie pétrolière** Pour comprendre la migration des hydrocarbures et améliorer la production des gisements pétroliers.⁴²

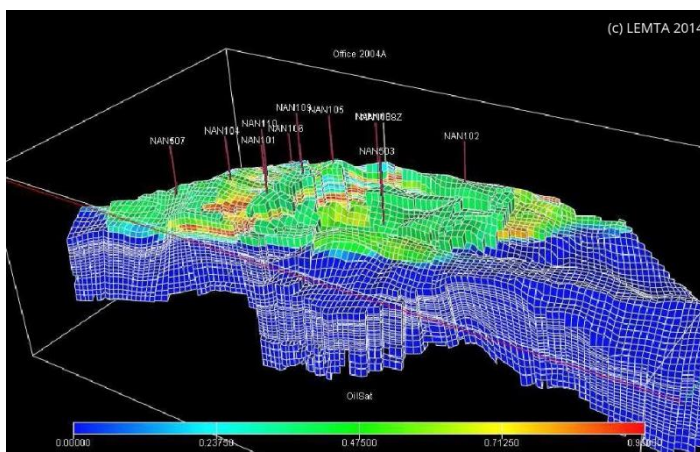


Figure 23: Modélisation 3D d'écoulement en réservoir pétrolier (LEMTA,2016)

III.2.3. La Simulation numérique en génie civil

Calcul en 3D et étude paramétrique permettant de déceler les facteurs influençant la sécurité du cadre bâti en identifiant les dommages et la vulnérabilité sismique.⁴³ Il s'agit d'une identification de la capacité portante d'un cadre bâti sous différents chargement.

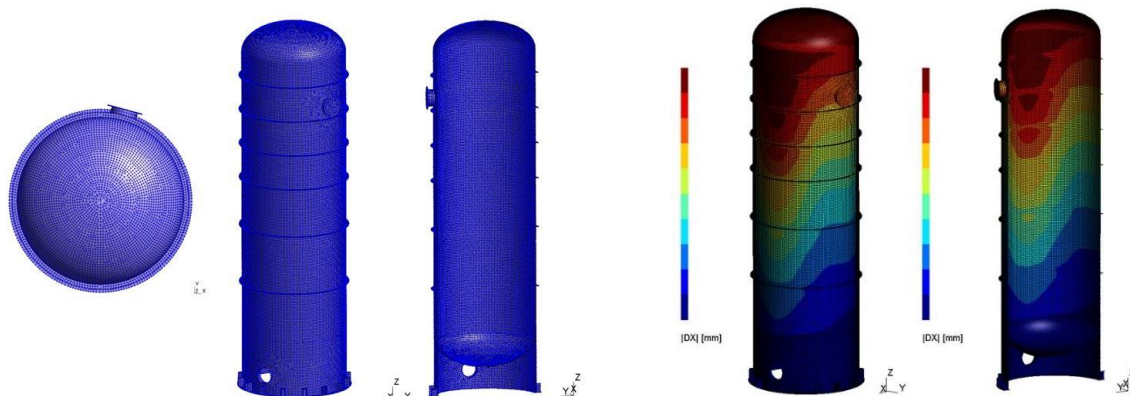


Figure 255: Modélisation d'un réservoir (BET NECS, 2016)

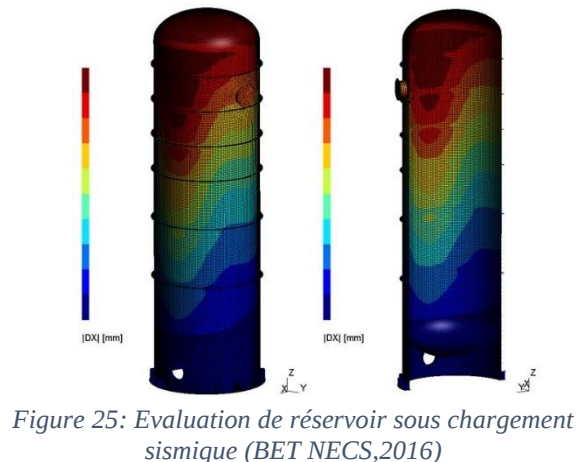


Figure 25: Evaluation de réservoir sous chargement sismique (BET NECS,2016)

⁴² SAAD, Mazen. Modelisation et simulation numérique par l'exemple. Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire de Mathématiques Jean Leray. 10 Avril 2014

⁴³ HARROUNI, Khalid EL, et Abdallah EL HAMMOUMI. «La modélisation numérique en tant qu'outil de pilotage de la durabilité du patrimoine bâti.» J.of Herit. Archit, Vol 1, N° 3, 2017: 401-410

III.3. Les méthodes de modélisation et de calcul numérique de la vulnérabilité sismique du bâti ancien

Le choix des méthodes de calcul et la maîtrise de la modélisation de la structure doivent avoir pour objectif une approche aussi fidèle que possible du comportement réel de l'ouvrage considéré compte tenu non seulement du type de structure, mais aussi des caractéristiques du matériau constitutif.⁴⁴

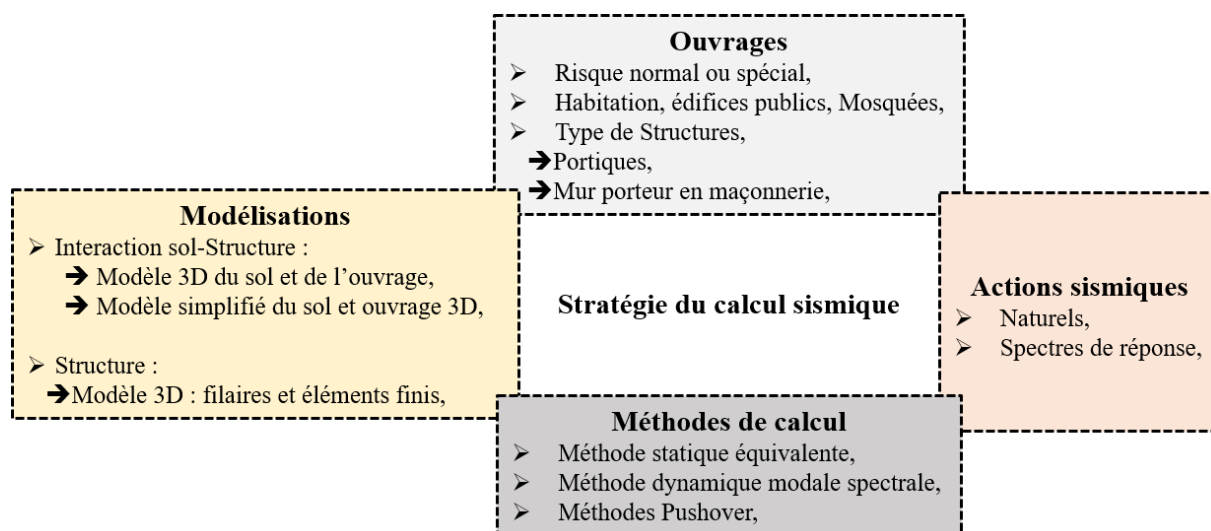


Figure 26 : Stratégie du calcul sismique, (Davidovic, et al., 2016)

La modélisation consiste dans l'établissement de modèles à partir de la structure réelle. Il s'agit ensuite, lors de l'exploitation des résultats, de vérifier (à la base d'un règlement) la structure originale.

La détermination d'un modèle, tenant compte le plus correctement possible de **la masse** et de **la raideur** de tous les éléments d'une structure, est donc une phase essentielle pour l'étude de la réponse sismique⁴⁵.

Compte tenu de toutes les imprécisions (Les fissures dans les murs peuvent diminuer l'inertie réelle de ce dernier), il est donc inutile de détailler excessivement un modèle dans le seul but de restituer la raideur de la structure.

L'analyse dynamique requiert toujours de créer d'abord un modèle de calcul représentant la structure. Ce modèle, introduit ensuite dans un programme de calcul dynamique,

⁴⁴ Davidovic, Victor, Dominique Corvez, Alain Capra, Shahrokh Ghavamina, Veronique Le Corvec, et Claude Saintjean. Pratique du calcul sismique Guide d'application de l'eurocode 8. Paris: Eyrolles, 2016

⁴⁵ Ibid

permet alors la détermination des modes propres de vibration et des efforts engendrés par l'action sismique.⁴⁶

A cette fin, il est nécessaire de connaître les différents moyens de modélisation et aussi les catégories de modes propres que présentent habituellement les structures :

Pour les modèles de calcul on trouve, Deux types qui peuvent être envisagés :

- *Modélisation par éléments finis (modèle complexe sous forme de maillage);*
- *Modélisation type brochette (modèle simplifié à barre).*

Parlons des catégories de modes propres d'une structure :

- **Les modes horizontaux**, ce sont des déplacements dans une direction horizontale particulière correspondant à une orientation des parois porteuse de l'ouvrage ;
- **Les modes verticaux** apparaissent pour des fréquences généralement élevées (flambement des éléments porteurs);
- **Les modes de torsions** mettent en jeu des rotations générales des différents niveaux de la structure autour d'un axe vertical.

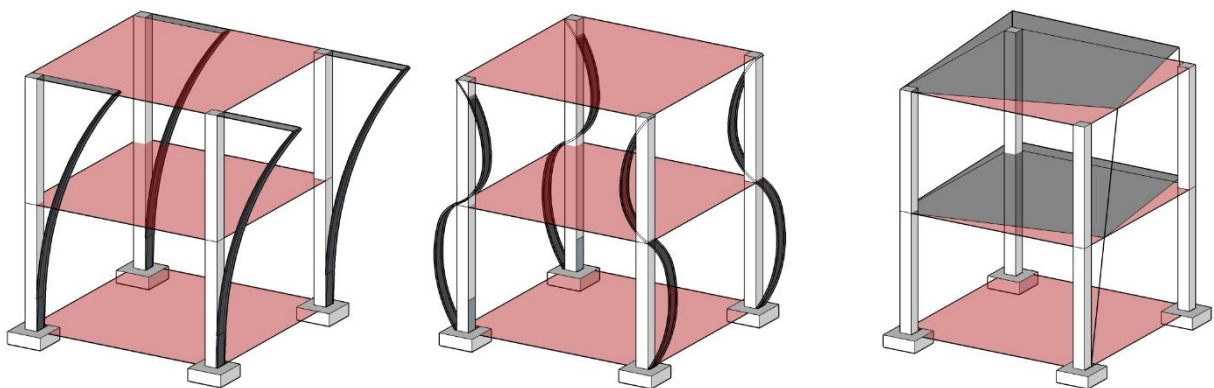


Figure 27 : Modes de vibration, Horizontal - Ascendant - Torsion, (Auteur;2017).

III.3.1. Méthode statique équivalente

Analyse statique d'une structure sous l'effet d'un système de forces statiques équivalentes à celui de l'action sismique.

« Les forces réelles dynamiques qui se développent dans la construction sont remplacées par un système de forces statiques fictives dont les effets sont considérés équivalents à ceux de l'action sismique. »⁴⁷

⁴⁶ Ibid

⁴⁷ Ministère de l'habitat et d'urbanisme CGS. DTR B C 2 48 Règles parasismiques Algériennes RPA99. 2003

Elle est utilisée souvent pour les structures régulières, et faiblement élevés.

III.3.2. Méthode dynamique modale spectrale

« Analyse dynamique d'une structure sous l'effet d'un séisme représenté par un spectre de réponse. »⁴⁸

L'analyse modale spectrale désigne la méthode de calcul des effets maximaux d'un séisme sur une structure, basée sur :

- La sollicitation sismique décrite sous forme d'un spectre de réponse ;
- Le comportement supposé élastique de la structure permettant le calcul des modes propres.

La réponse d'une structure, description des oscillations sous l'action d'un séisme, est prépondérante au voisinage de certaines fréquences, dites fréquences modales ; le comportement de la structure pour ces fréquences particulières est appelé mode de vibration, le comportement global peut être considéré comme la somme des contributions des différents modes.⁴⁹

Cette méthode peut être appliquée à tout type de structure. (Bâtiments Irréguliers)

⁴⁸ Ibid

⁴⁹ Davidovic, Victor, Dominique Corvez, Alain Capra, Shahrokh Ghavamina, Veronique Le Corvec, et Claude Saintjean. Pratique du calcul sismique Guide d'application de l'eurocode 8. Paris: Eyrolles, 2016.

III.3.3. Méthode Pushover

Méthode Pushover ou méthode en poussé progressive est une méthode d'analyse non linéaire dont laquelle la structure est soumise à une charge latérale croissante jusqu'à atteindre un déplacement cible et jusqu'à ce que les modes de ruines commencent à apparaître dans la structure.⁵⁰

Les résultats de cette analyse sont représentés sous forme de courbe qui relie l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement du sommet de la structure.

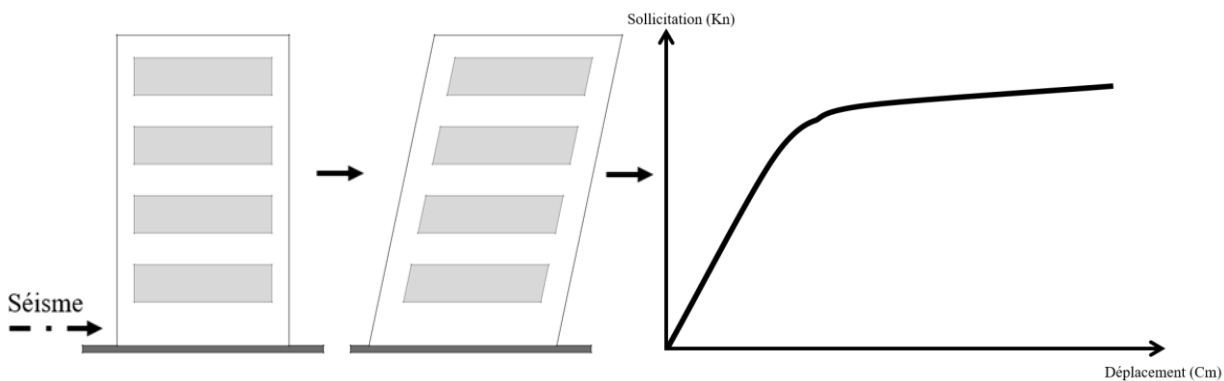


Figure 29: Bâtiment sous Chargement latéral (Auteur, 2017)

Figure 28 : courbe de capacité (Auteur, 2017)

Pour approcher le plus du comportement réel, il faut prendre en compte le comportement des structures au-delà du domaine élastique linéaire, en étudiant leurs comportement dans le domaine plastique.

Le but essentiel de l'analyse Pushover est de décrire le comportement réel de la structure et d'évaluer les différents paramètres en termes de sollicitations et déplacements dans les éléments de la structure à savoir :

- L'estimation des déformations inélastiques dans les éléments destinés à dissiper l'énergie sismique.
- L'identification des zones critiques où les déformations sont supposées être grandes.
- La détermination des sollicitations réelles sur les éléments fragiles tels que la zone nodale.

⁵⁰ Ibid

La méthode en poussé progressive (Pushover) tente d'apporter une évaluation raisonnable de la ductilité effectivement développée dans la structure et de quantifier rationnellement la diminution des efforts sismiques perçus par la structure. La méthode permet également de vérifier l'homogénéité en résistance de la structure et de réaliser des optimisations, et ce qu'il va guider à l'ingénieur dans la mise au point des renforts pour des projets de diagnostic et de confortement parasismique du bâti ancien.⁵¹

III.4. Quelques logiciels de modélisation

De nombreux logiciels sont disponibles pour chaque discipline de génie civil et d'architecture.

En se focalisons sur notre champ d'étude à savoir l'étude de vulnérabilité du bâti ancien, il est clair que le matériau principal avec lequel ont été bâtis tous ces édifices anciens est la maçonnerie.

Parmi les logiciels les plus connues qui traitent le sujet d'étude de vulnérabilité du bâti ancien nous citons :

- ANSYS ;
- Abaqus ;
- Robot Structural Analysis ;
- SAP2000 ;
- TreMuri ;
- MB-PERPETUATE ;
- Cast3m...etc.

⁵¹ Ibid

Voici brièvement une présentation des quelques-uns de ces logiciels :

III.4.1. ANSYS

ANSYS développe des logiciels d'analyse par éléments finis pour l'étude dynamique des ouvrages en génie civile tels qu'Ansys Structural

ANSYS dispose d'une technologie de maillage intelligent qui permet d'obtenir rapidement un maillage optimal sur tous types de modèles. Des algorithmes intelligents et automatiques assurent la création de maillages de haute qualité. De plus, il est très simple d'ajouter des commandes d'ajustement si nécessaire. (Ansys Inc.)⁵²

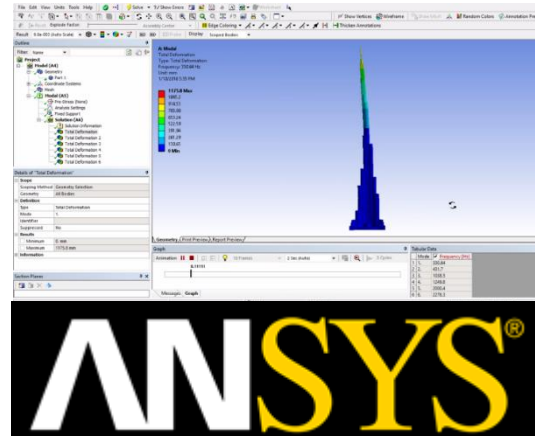


Figure 29 : ANSYS (2017)

III.4.2. TreMuri

TREMURI est un programme informatique spécialement développé pour l'analyse structurale et sismique des bâtiments en maçonnerie.



Figure 30 : TreMuri (S. Lagomarsino, et al., 2017)

Il a été développé par le groupe PERPETUATE, spécialisé dans l'étude, l'évaluation et la préservation du bâti existant dans les zones sismique justement pour servir en tant qu'outil d'étude de vulnérabilité du patrimoine bâti.

TREMURI permet d'effectuer des analyses statiques et dynamiques non linéaires de modèles de construction 3D complets, en fournissant également une présentation claire des résultats. (Sergio Lagomarsino TreMuri Developer)⁵³

⁵² Structures. ANSYS. [En ligne] aout 2017. www.ansys.com/fr-fr/products/structures.

⁵³ S. Lagomarsino, et al. TREMURI. [En ligne] Aout 2017. www.tremuri.com

III.4.3. Robot structural analysis

Le robot est un programme graphique intégré pour la modélisation, l'analyse et la conception de divers types de structures (Béton armée, acier, maçonnerie, aluminium, bois...). Il permet de créer des structures, de réaliser des calculs et de vérifier les résultats



Figure 31 : Robot (2017)

Les caractéristiques les plus importantes de Robot comprennent

.⁵⁴

- Effectue une analyse statique et dynamique de la structure
- Étudie le comportement linéaire (méthode des éléments finis) et non linéaire de nombreux types de structure
- Exécute des analyses sur des études sismiques
- Créer des simulations virtuelles pour tester la conception structurelle pour différentes types de charges (vents, réponse sismique).

III.5. Exemples d'étude de vulnérabilité sismique sur le Bâti ancien

Le choix des exemples s'est porté sur la base de la similitude et la ressemblance du cas avec notre Corpus d'étude à savoir la mosquée du Vieux Ténès « Sidi Maïza » à travers différents facteurs qui sont les suivant :

- La date de construction de l'édifice ;
- Les étapes de constructions de l'édifice ainsi que les modifications architecturales complexes qui ont touché la structure initial et qui se rapportent même à la fois à la transformation du site urbain et au changement d'utilisation du bâtiment en lui-même ;
- Le procédé constructif de l'édifice.

⁵⁴ Robot Structural Analysis Professional. AUTODESK. [En ligne] Aout 2017. www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview.

III.5.1. Les projets PERPETUATE

III.5.1.1. Le musée Civique de sansepolcro Toscane, Italie

Le bâtiment est l'une des structures civiques les plus importantes et les plus célèbres, construit pendant la période médiévale (*Duecento*) pour abriter le gouvernement de la ville, ce bâtiment est également caractérisé par la présence d'un des chefs-d'œuvre de l'art de la Renaissance du XVe siècle: «la résurrection», Une grande fresque peinte par Piero della Francesca.⁵⁵



Figure 32 : Le musée Civique de sansepolcro Toscane, Italie, (Giulio Castori, et al, 2017)

La procédure d'évaluation utilisée pour accomplir cette étude, comporte deux étapes clés qui sont itératives :

- Phase 1 (ou stade de la connaissance) ;
- Phase 2 (ou étape d'analyse).

Dans la première partie de l'étude, un aperçu sur les étapes de construction du musée et en particulier le mur contenant la fresque.

Le bâtiment est Construit en différentes étapes, l'ensemble du complexe est, en fait, Une structure stratifiée composée de trois unités structurales principales (A, C, D) qui sont réunis par deux bâtiments de maçonnerie du XVe siècle (E).

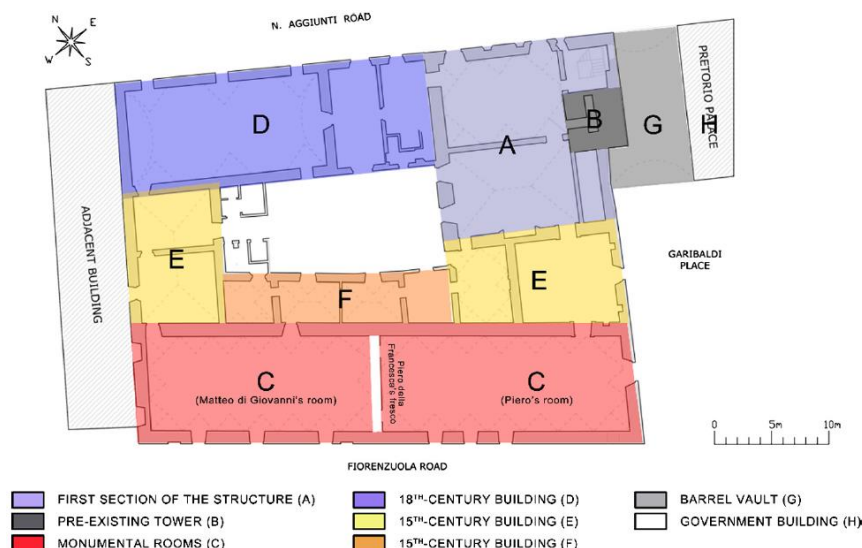


Figure 33 : Plan du musée Civique (Giulio Castori et al. ,2017)

⁵⁵ Giulio Castori, et al. «Seismic vulnerability assessment of a monumental masonry building.» Engineering Structures, Avril 2017: 454-465

Une évaluation historique de l'activité sismique dans cette zone montre comment le Musée Civique a été exposé à un tremblement de terre de degré 9 à l'échelle Mercalli

Et aussi à des événements sismiques plus forts que l'ampleur 7 (échelle MCS) au moins trois fois depuis que la fresque de Piero Della Francesca a été peinte (figure 34).

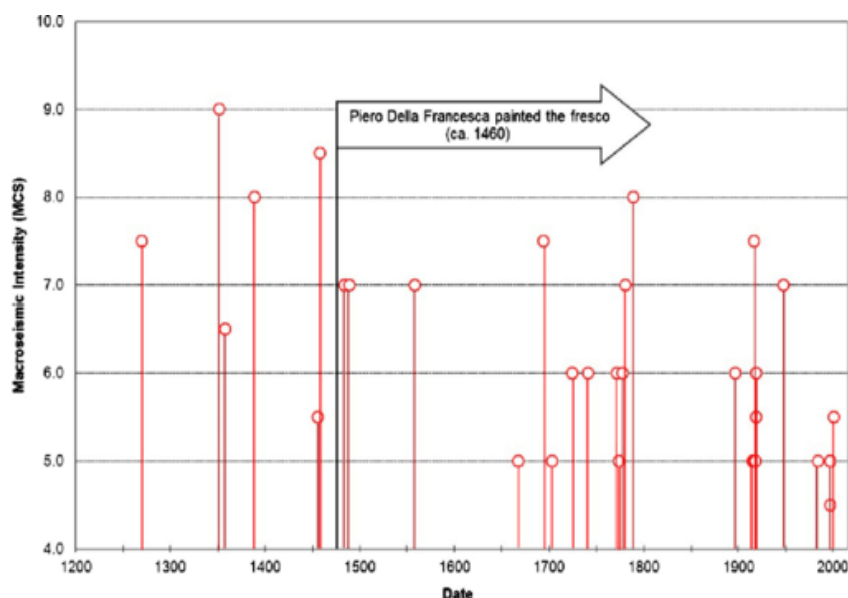


Figure 34 : Intensités Sismique majeurs près de Sansepolcro depuis 1200 (Giulio Castori et al. ,2017)

Ensuite, une enquête sur la géométrie, effectuée pour fournir toutes les données nécessaires pour compléter l'étape de modélisation numérique suivante.

L'enquête a pris en compte l'état de conservation du bâtiment afin de fournir une identification précise des différentes fissures présentent dans le musée et particulièrement dans le mur contenant la fresque⁵⁶.

⁵⁶ Ibid

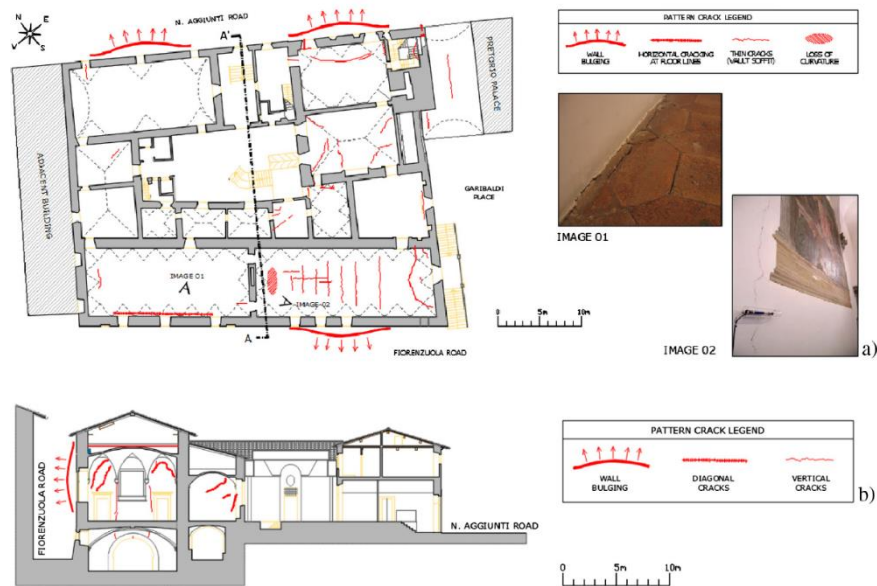


Figure 36 : (A) Vue en plan; (B) Section A-A (les lignes rouges mettent en évidence les fissures majeures).
(Giulio Castori et al., 2017)

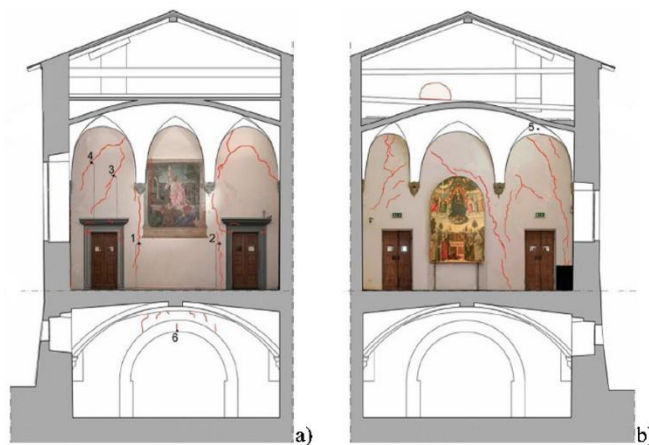


Figure 35 : Les fissurations du mur contenant la fresque : (a) vue de face; (B) vue arrière.
(Giulio Castori et al., 2017)

Les dommages (gonflement d'environ 60 cm et fissuration des murs) semblent se localiser dans les façades longitudinales, nord et sud, ces dernières présentent des hauteurs importantes avec un manque de murs transversales (mise à part le mur portant la fresque qui joue un rôle important dans la réduction des efforts de cisaillement dans la façade SUD⁵⁷).

Par contre, les façades Est et Ouest apparaissent dans un état de conservation décent, car presque la totalité des parois périmétriques longitudinales ne présentent pas de dégâts significatifs, À l'exception de quelques fissures minces dans certains endroits.

⁵⁷ Ibid

Un aperçu global nous montre la stratégie de modélisation par éléments finis, afin d'étudier les causes de fissure du motif sur cet important atout artistique.

À cette échelle, le modèle a été modélisé en considérant la maçonnerie comme un matériau macroscopiquement isotrope (c'est-à-dire maçonnerie en pierre non découpée), Dont les propriétés mécaniques, évaluées en fonction du Code italien.

- Le module de Young (E) et Le module de cisaillement (G) ont été supposés égaux à 1230 N /mm² et 410 N /mm², respectivement ;
- La résistance à la compression et au cisaillement ont été supposés égaux à 2,0 N/mm² et 0,035 N/mm², respectivement.

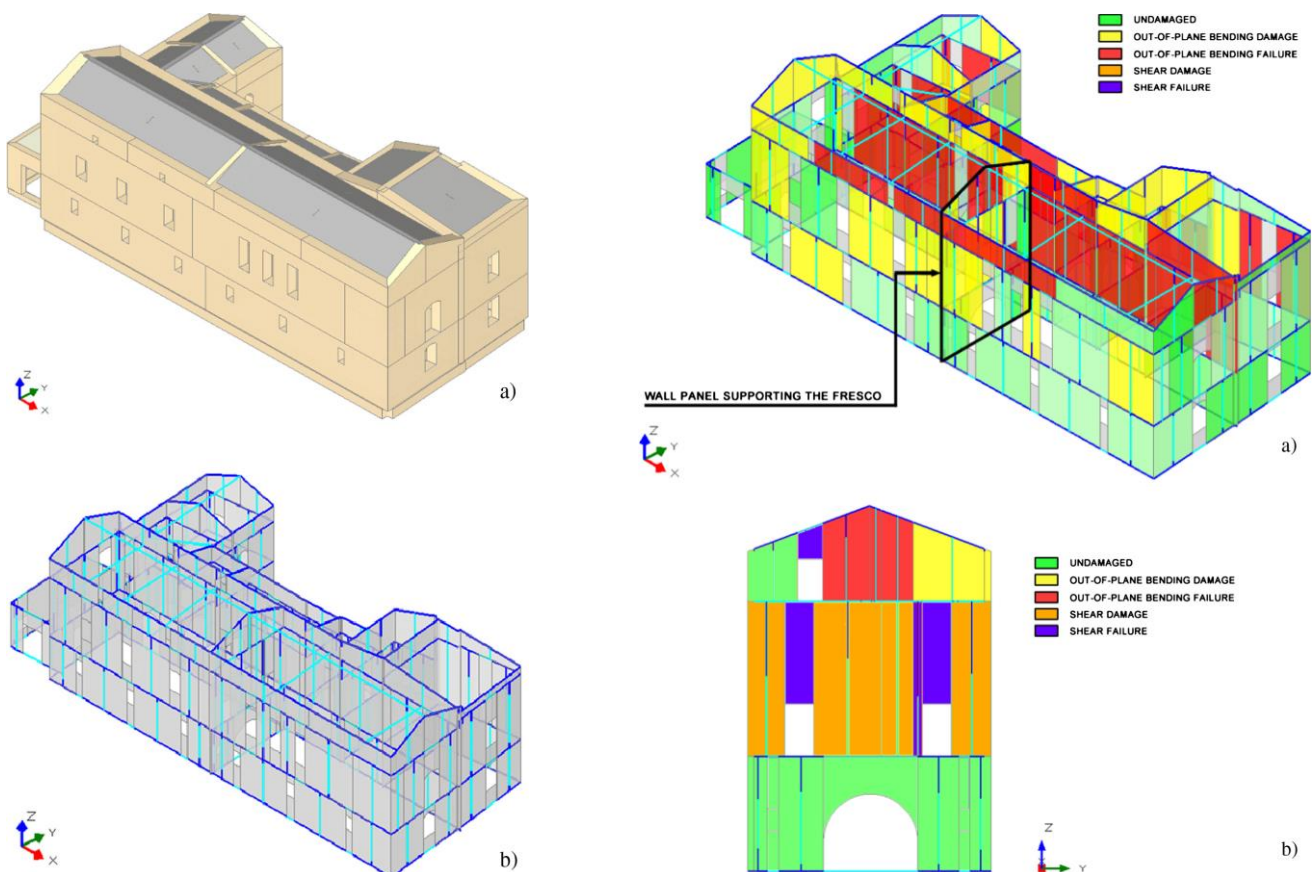


Figure 38 : (A) Modèle géométrique; (B) Modèle de Modélisation (Giulio Castori et al. ,2017)

Figure 38 : Résultats d'analyse statique non linéaire: (a)fissuration dans l'ensemble du bâtiment; (B) fissuration dans le panneau mural supportant la fresque (Giulio Castori et al. ,2017)

La figure 39 montre la Courbe de capacité (déplacement maximal vs effort tranchant à la base).

On peut constater à travers la courbe de capacité les différentes zones endommagées dans le bâtiment. Il est clair que la zone centrale a subi un chargement sévère (Direction de l'axe Y).

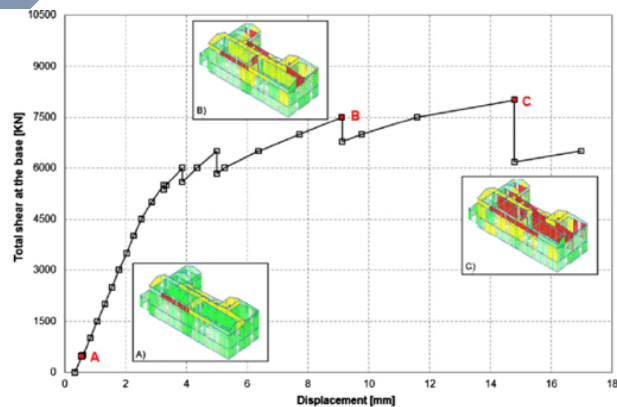


Figure 39 Courbe de capacité (déplacement maximal vs cisaillement total à la base) (Giulio Castori et al. ,2017)

Donc c'est l'endroit le plus sollicité et le plus susceptible a engendré des fissurations dans le musée y compris le mur portant la fresque.

Dans cette direction, la résistance de la structure est faible et insuffisante (40% inférieure à celle liée à L'action sismique selon l'axe X), à la suite du fléchissement des parois orthogonales (voir point A, B et C de la courbe de capacité, figure 39)⁵⁸.

Cela est due par le fait de l'absence des murs porteurs dans le sens transversale (direction y), et d'autre part par le fait que les charges permanente sur les planchers étaient principalement réparties sur des parois parallèles au sens longitudinale (direction x).

- **Application d'une charge sismique à tous les niveaux.**

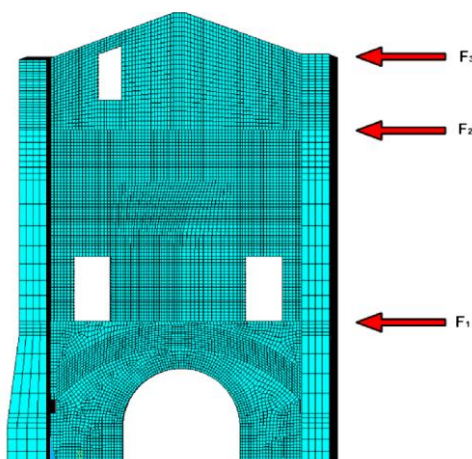


Figure 41 : Application d'une charge sismique à tous les niveaux (Giulio Castori et al. ,2017)

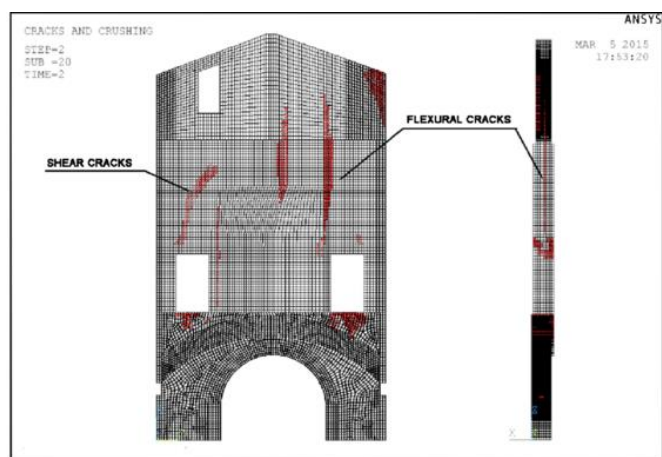


Figure 41 : les différentes fissurations dans le mur contenant la fresque (Giulio Castori et al. ,2017)

⁵⁸ Ibid

III.5.1.2. La mosquée Husrev Pasha à Van (Turquie)

Il s'agit d'un monument qui a été touché par le séisme de Van le 23 octobre 2011 ($M_w=7,2$), le corps central du bâtiment a survécu au tremblement de terre, mais le narthex s'est effondré. Un examen approfondi est mis en avant afin d'étudier les raisons de cet état de fait et pour évaluer la réponse sismique de la mosquée.⁵⁹



Figure 42 : Mosquée Husrev Pasha (Ahmet Can Altunışık et Ali Fuat Genç, 2017)

Il a été construit par Mimar Sinan, qui a servi en tant qu'architecte chef ottoman pendant environ cinq décennies à la fin du 16ème siècle.

Ce complexe comprend El-amadrasah, une école primaire, un caravansérail, Une fontaine, un bain turc (hammam), une cuisine, une mosquée et une tombe. La mosquée, comme une des plus importantes structures du complexe, est situé au centre du complexe.⁶⁰

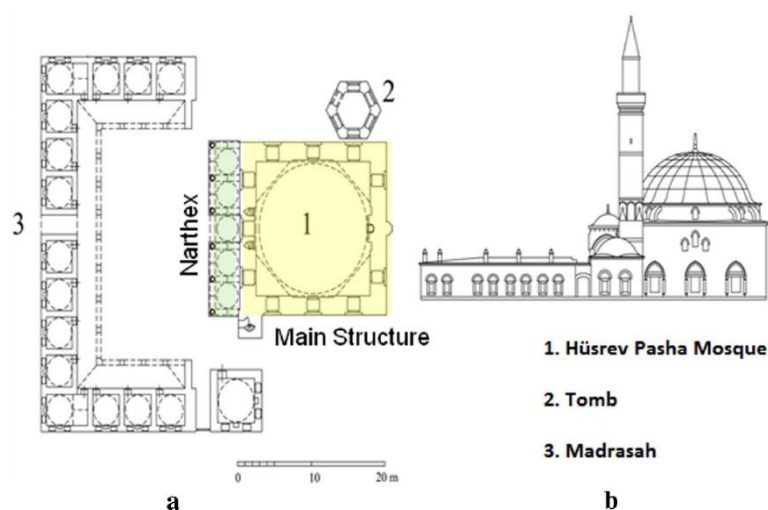


Figure 43 : Organisation générale : (a) Plan, (b) élévation (Ferit Cakir et al., 2017)

La mosquée se compose de deux unités distinctes, la structure principale et le Narthex. La structure principale a un plan carrée symétrique avec un dôme hémisphérique, le narthex est la partie qui précède l'espace principale qui a un plan rectangulaire et cinq dômes.⁶¹

⁵⁹ Ahmet Can Altunışık, Ali Fuat Genç. «Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques after Restoration.» Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 20 Avril 2017

⁶⁰ Ibid

⁶¹ Ferit Cakir, Eren Uckan, Jay Shen, Burcin S. Seker, Bulent Akbas. «Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011.» Engineering Failure Analysis, 2015: 249-266.

Le complexe a été gravement endommagé lors d'un tremblement de terre en 1839 après lequel il a été rénové et reconstruit. Par la suite tout le complexe était en partie démoli à cause d'un incendie en 1915. Le narthex s'est totalement effondré dans les années 1960 en raison d'un autre tremblement de terre.⁶²

La mosquée a été complètement restaurée dans les années 2000. Cependant, la structure a souffert de graves dommages structurels pendant le séisme de Van et le narthex s'est effondré à nouveau.

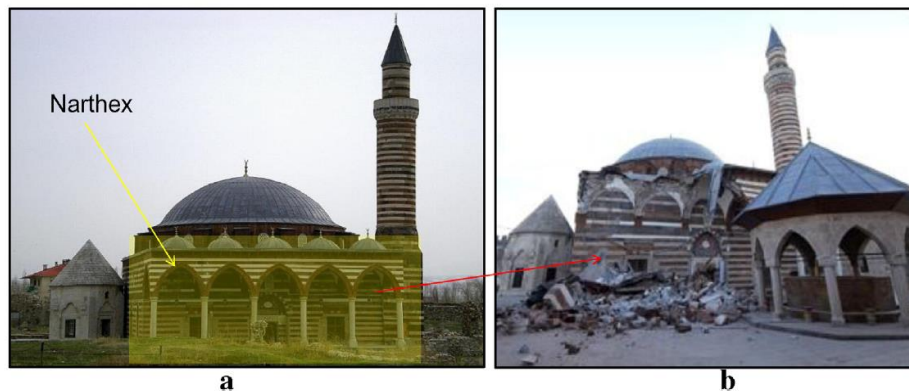


Figure 44 : Le narthex de la mosquée Husrev Pasha (a) avant le tremblement de terre de Van, (b) après le blement de terre de Van (Ferit Cakir et al. ,2017)

Afin d'analyser cette mosquée, un modèle numérique élément finis (FEM) est utilisé dans l'analyse en raison de la complexité du modèle structurel construit en maçonnerie.

Dans cette étude, le modèle numérique de la mosquée Husrev Pasha a été modélisé en utilisant un logiciel ANSYS Workbench.



Figure 45 : Modèle de la mosquée Husrev pasha (Ferit Cakir et al. ,2017)

Les propriétés des matériaux d'un tel édifice ancien jouent un rôle important dans la réponse du modèle structurel. Cependant, Il est difficile de déterminer ces paramètres avec précision. Par conséquent, dans cette étude, les propriétés des matériaux sont tirées des études précédentes et des hypothèses générales qui ont été réalisés pour les paramètres inconnus.

⁶² Ibid

Dans cette étude, le module d'élasticité des pierres, le coefficient de Poisson et le poids volumique unitaire ont été considérés comme étant respectivement de 8500 MPa, 0,20 et 2300 kg/m³, alors que pour la brique, les mêmes données ont des valeurs respectivement de 3500 MPa, 0,22 et 1850 kg / m³.

Les modes structuels globaux dans les directions X et Y sont observés dans les premier et deuxième modes avec $T = 0.0814$ s et 0,0799 s, respectivement.

Pour les deux premiers modes, les fréquences, les périodes sont présentés dans le tableau.

MODE	Frequency (Hz)	Period (s)	Ratio eff. mass to total mass		
			X	Y	Z
1	12.2818	8.14E-02	1.070E-05	0.6099	3.838E-04
2	12.5193	7.99E-02	0.6288	1.612E-05	1.342E-07

Tableau 8 : les modes structuels de la mosquée Husrev Pasha (Ferit Cakir et al. ,2017)

Les deux premiers modes du modèle sont présentés à la figure 48.

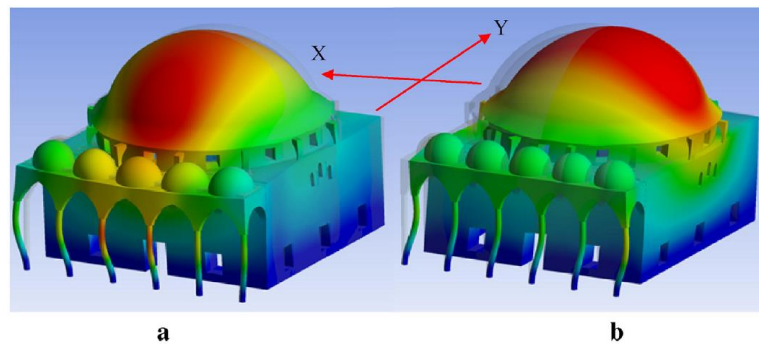


Figure 46 :les modes structuels (a) premier mode, (b) deuxième mode (Ferit Cakir et al. ,2017)

Une analyse du spectre de réponse a également été réalisée sur le modèle des éléments finis pour l'évaluation de la performance sismique de la mosquée Husrev Pasha.

Comme le montrent les analyses du spectre de réponse EQ3 (figure 29), le déplacement maximal latéral a été observé au sommet d'environ 3.135mm en direction X (figure 48a) et 3.231mm en direction Y (figure 48b).

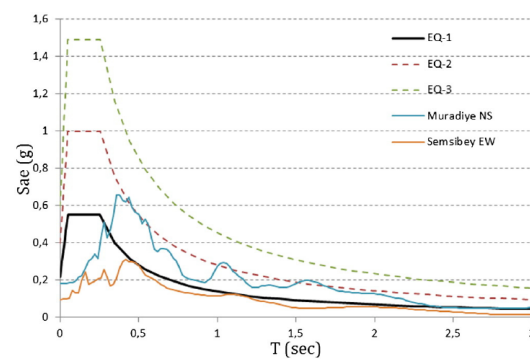


Figure 47 : Spectres de réponse des niveaux de risques sismiques EQ-1; EQ-2; EQ-3 (Ferit cakir et al. ,2017)

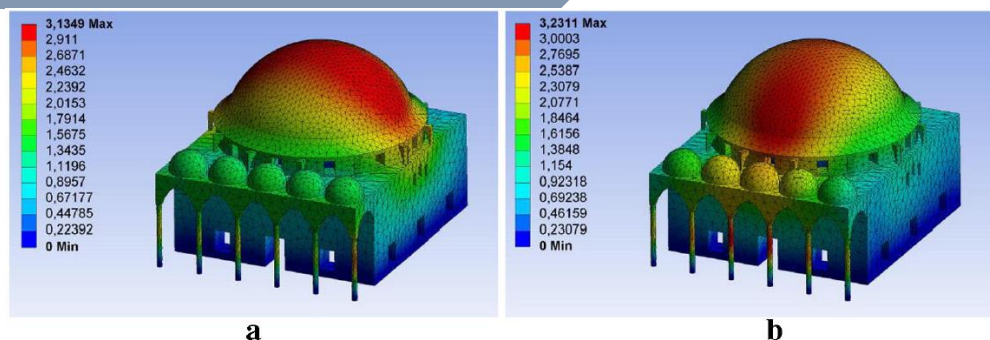


Figure 48 : Déplacement latéral de la structure selon le niveau de risque sismique EQ-3 (a) direction X, (b) direction Y. (Ferit Cakir et al. ,2017)

Selon la réglementation les ratios de déplacement doivent restés inférieur à 0,1% et ce qui vérifiable (tableau9). Le tableau 9 indique que, à ce niveau de déplacement, la réponse structurale au sommet, ne devraient pas dépasser le niveau d'occupation immédiate (0,1%).

Drift ratios of the Seven Churches and Husrev Pasha Mosque under EQ-3.		
Drift ratio (%)	Top-point of the Narthex	
	Top-point of the Narthex	Top-point of the main structure
Husrev Pasha Mosque		
X direction	0.016	0.017
Y direction	0.034	0.016

Tableau 9 : Déplacement de la mosquée Husrev pasha selon EQ-3 (Ferit Cakir et al. ,2017)

La charge sismique utilisé dans l'analyse a était bien au-dessus de la charge sismique imposée lors du tremblement de terre de Van à la structure.

Les analyses de spectre de réponse indiquent que la mosquée Husrev Pasha est restée élastique lors du tremblement de terre de Van, cela n'est pas surprenant en raison de la très faible période fondamentale de la structure, c'est-à-dire que la structure devrait se comporter comme un corps rigide dans la totalité du volume de la mosquée

La raison possible de l'effondrement du Narthex pendant le tremblement de terre de Van pourrait être due à la différence du mouvement entre le Narthex et la structure principal.

Cela souligne une éventuelle discontinuité ou une faible connexion entre ces deux composants, ce qui n'a pas a été considéré dans le modèle actuel.

III.5.2. Médersa Errachidia « Cherratine » à Fès (Maroc)

L'étude a été fait par l'école National d'architecture au Maroc s'inscrit par le Professeur Khalid El HARROUNI de l'école national d'architecture, Rabat, Maroc/ISCARSAH-ICOMOS & le Professeur Abdallah El HAMOUMI de la faculté des sciences, Université Mohamed V Agdal, Rabat, Maroc, dans le cadre du projet international NIKER (NEW INTEGRATED KNOWLEDGE BASED APPROACHES TO THE PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE FROM EARTHQUAKE-INDUCED RISK).

La médersa Cherratine, est une médersa construite en 1670 par le sultan alaouite Rachid ben Cherif, Située dans le quartier Cherratine, ce bâtiment de deux étages a été conçu pour héberger plus de 130 étudiants. La medersa Cherratine, construite par le Sultan Moulay Rachid, est constituée de trois pavillons pourvus de jolies petites fenêtres ornées de moucharabieh d'où l'on peut contempler la cour.⁶³



Figure 50 : La cour de la Médersa Errachidia (HARROUNI, et al., 2017)

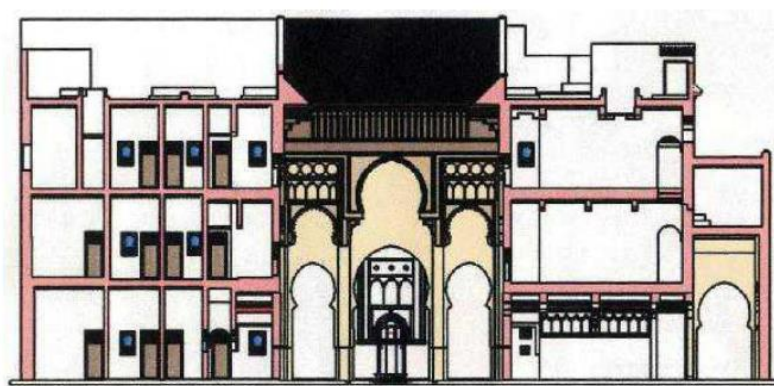


Figure 49 : Coupe de la Médersa Errachidia (HARROUNI, et al., 2017)

La medersa est un des nombreux collèges destinés à loger les étudiants et les professeurs ne résidant pas à Fès. Sa porte à deux battants recouverts de bronze ciselé donne accès, par un couloir couvert d'un plafond en bois sculpté et peint, à la cour centrale, entourée de galeries au rez-de-chaussée et à tous les étages. La medersa a 125 cellules réparties sur trois niveaux le long des galeries protégés des regards par des moucharabiehs⁶⁴.

L'étude propose une étude de vulnérabilité sismique de la Médersa Errachidia en utilisant trois approches différentes approches à savoir :

- Approche analytique ;
- Tests dynamiques par accéléromètre ;
- Calcul numérique (SAP2000 et ANSYS).

⁶³ HARROUNI, Khalid EL, et Abdallah EL HAMMOUMI. «La modélisation numérique en tant qu'outil de pilotage de la durabilité du patrimoine bâti.» J.of Herit. Archit, Vol 1, N° 3, 2017: 401-410.

⁶⁴ Ibid

III - Les moyens de simulations Numérique et leurs applications dans le domaine du bâti ancien

➤ Analyse analytique :

- Avec accélération de 10%g

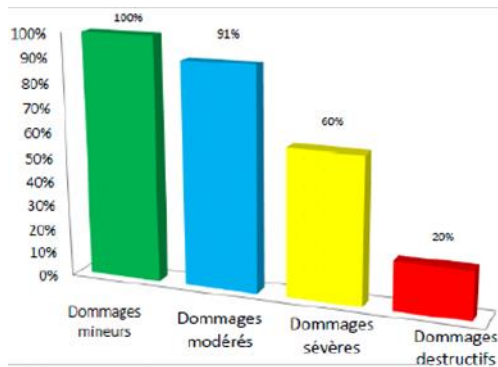


Figure 52 Risque suivant X (10%g)

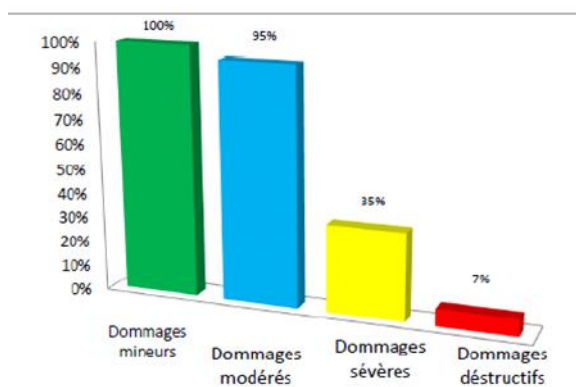


Figure 52 : Risque suivant Y (10%g)

Avec accélération de 25%

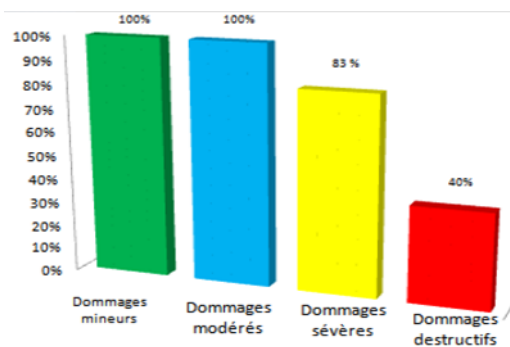


Figure 54 Risque suivant X (25%g)

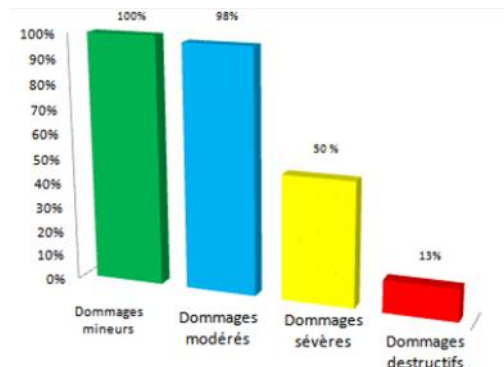


Figure 54 Risque suivant Y (25%g)

➤ Tests Dynamiques :

Mesures expérimentales des fréquences propres avec accéléromètres piézoélectriques dans le cadre du projet NIKER

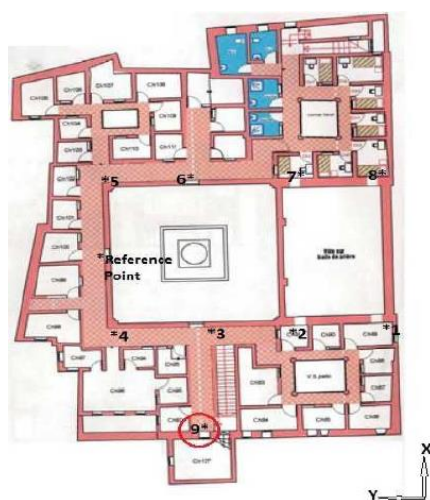


Figure 56 : Plan de repérage des Points de mesures



Figure 55 : Photos de travail expérimentales

Résultats expérimentaux

1er jour de mesures				2ème jour de mesures			
Mesure no.	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mesure no.	Mode 1	Mode 2	Mode 3
1	3,987	10	20	8	3,963	10,01	-
2	3,925	-	-	9	3,925	-	-
3	3,963	10	20	10	3,963	-	-
4	4,025	9,7	20,01	11	3,912	10,64	-
5	-	9,988	20	13	3,987	9,438	-
7	3,975	10,01	-	14	3,975	10,5	-
				16	3,975	-	-
Moyenne de toute les mesures	3,975	9,988	20	Moyenne de toute les mesures	3,975	9,313	20

Tableau 10 : Résultats des modes obtenues après l'expérimentation

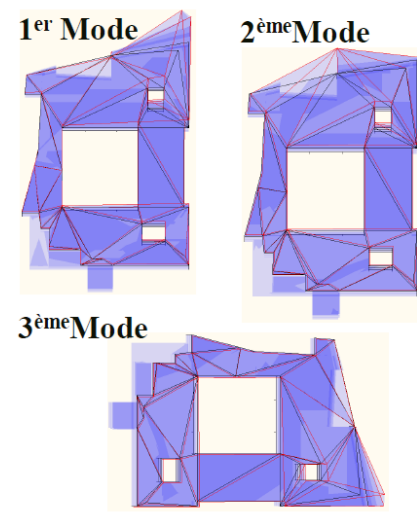


Figure 57 : Schémas numériques des différents modes obtenus après l'expérimentation

➤ Calcul numérique

• Modèle SAP2000

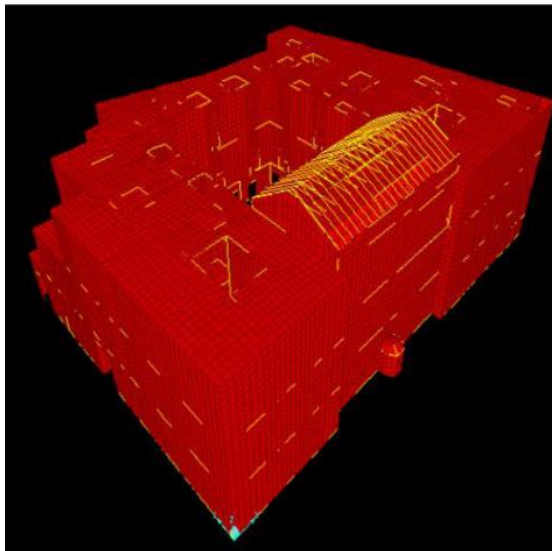


Figure 59 : Model de la médersa sous SAP2000

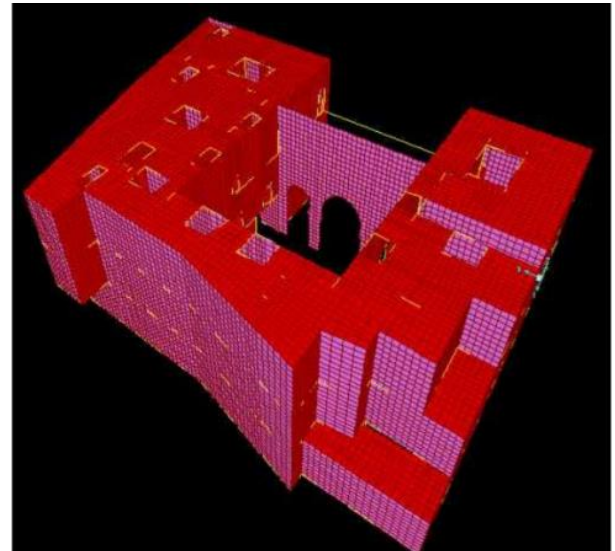


Figure 59 : Model de la médersa sous SAP2000

- **Modèle ANSYS**

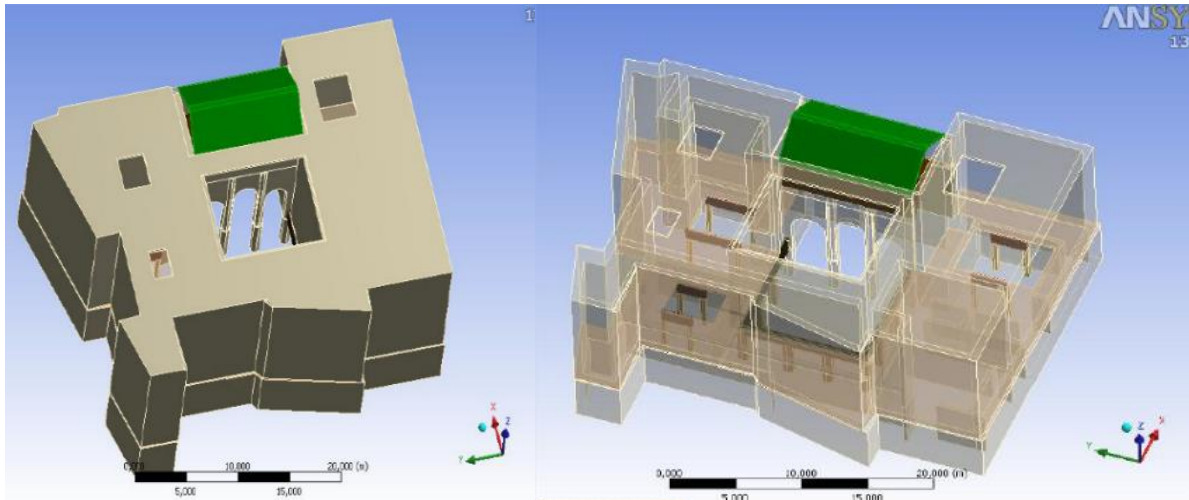


Figure 61 : Model de la médessa sous ANSYS

Figure 61 : Model de la médessa sous ANSYS

- **Résultats de modélisation**

- **SAP2000**

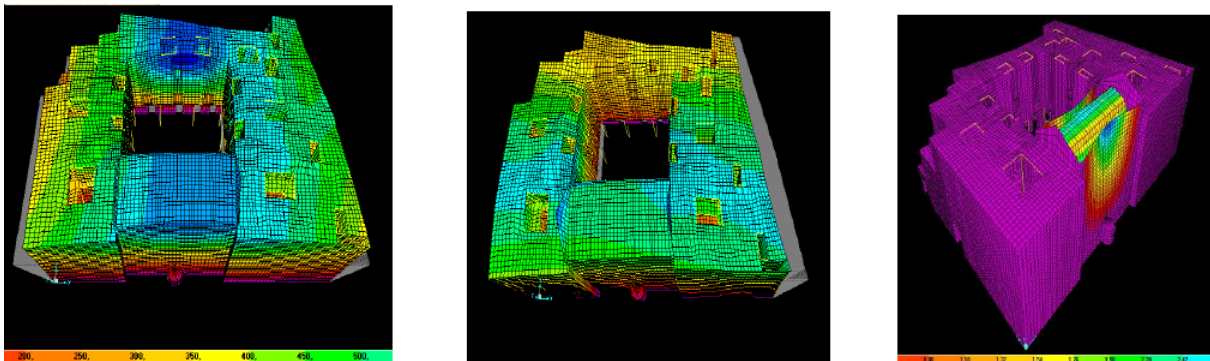


Figure 62 : Résultats Model sous SAP2000

- **ANSYS**

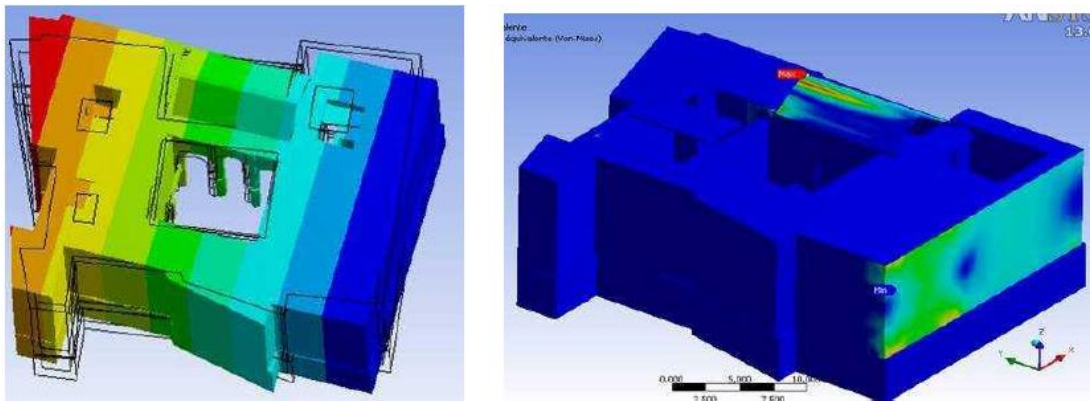


Figure 63 : Résultats Model sous ANSYS

➤ **Comparaison des résultats obtenus en fonction de l'approche**

Calcul manuel « analyse Pushover »	• 2Hz suivant la direction X • 1,88Hz suivant la direction Y
Calcul manuel « analyse dynamique »	• 1^{er} mode : 1,74Hz • 2^{ème} mode : 23,75H
Calcul informatique : « ANSYS »	• 1^{er} mode : 4,23Hz • 2^{ème} mode : 10,28Hz • 3^{ème} mode : 13,46Hz
Calcul informatique : « SAP 2000 »	• 1^{er} mode : 3,94Hz • 2^{ème} mode : 4,30Hz • 3^{ème} mode : 4,93Hz
Mesure expérimentale « accéléromètre »	• 1^{er} mode : 4Hz • 2^{ème} mode : 10Hz • 3^{ème} mode : 20Hz

Tableau 11 : Comparaison des résultats obtenus en fonction de l'approche (HARROUNI, et al., 2017)

➤ **Modélisation numérique avec ANSYS avant et après intervention**

Etude de cas	Renforcement proposé	Résultats avant renforcement			Résultats après renforcement		
		Période (s)	Déplacement (cm)	% dommages sévères (10%g)	Période (s)	Déplacement (cm)	% dommages sévères (10%g)
Médersa Ras Cherratine	- Chemisage - chaînage - tirant et ancrage	0,25	2,33	72	0,20 20%	2,11 10%	62 14%

Etude de cas	Renforcement proposé	Résultats avant renforcement			Résultats après renforcement		
		Contrainte σ_{xx} (MPa)	Contrainte σ_{yy} (MPa)	Contrainte σ_{xy} (MPa)	Contrainte σ_{xx} (MPa)	Contrainte σ_{yy} (MPa)	Contrainte σ_{xy} (MPa)
Médersa Ras Cherratine	- Chemisage - chaînage - tirant et ancrage	12,1	15,4	11,2	8,2 33%	9,6 38%	7,3 35%

Tableau 12 : Synthèse de la modélisation numérique avec ANSYS (HARROUNI, et al., 2017)

III.6. Conclusion

La Définition d'un modèle numérique, l'analyse et la prévision de la réponse mécanique des structures maçonnées sont encore des problèmes ouverts, et cela revient à la complexité d'approche et la difficulté de collecte des données précises concernant les propriétés physico-chimiques d'un matériau ancien tel que la maçonnerie.

A travers l'étude des cas, nous constatons comme hypothèse primaire que la simulation et l'analyse numérique apporte une plus-value pour le sujet de la vulnérabilité sismique du patrimoine bâti ancien, étant donné qu'on peut remarquer le pourcentage important de la fiabilité des résultats en les comparant à d'autres approches d'analyses, mais ceci dit il est important de signaler qu'un architecte ou un ingénieur doit être prudent et en recul afin de pouvoir apporter son propre interprétation et sa propre lecture des résultats obtenus de cette simulation à la base de ses prérequis et son expérience.

iv. Typologie d'architecture traditionnelle et son comportement vis-à-vis de l'action sismique

IV.1. Introduction

Le patrimoine immobilier dans le monde entier est constitué en partie de différents ouvrages datant des siècles passés et du début du notre.

A ces époques les bâtisseurs construisaient généralement les murs à l'aide de matériaux locaux qu'ils mettaient en œuvre suivant des techniques traditionnelles.

De nos jours ces bâtiments chargés du passé sont souvent mal protégés et cela mènent leur situation en péril et en risque de disparitions, à cause de plusieurs raisons les plus coupables sont à mon sens, le manque de conscience patrimoniales sur leur valeur en tant qu'héritage transmis par nos ancêtres et une identité pour les générations futures ainsi que l'insuffisance des informations nécessaires qui vont aider à protéger ces biens.

Ce chapitre a pour but d'indiquer brièvement ce qu'il faut savoir sur les principales maçonneries anciennes et leur comportement vis-à-vis de l'action sismique.

IV.2. Les matériaux naturels

IV.2.1. Quand sont utilisés les matériaux naturels ?

1. Ils sont mis en œuvre en qualité :

- De **constituants** des mortiers et béton → Granulats ;
- D'**éléments porteurs** — exemples —
 - Moellons
 - Pierre de taille
 } Maçonnerie ;
- D'**éléments de revêtements** — exemples —
 - Dalles de pierres (Horizontalement);
 - Plaques de pierres (Verticalement).

2. Quels matériaux ?

TYPES DE ROCHES				
Natures chimique Nature physique	Siliceuse	Argileuse	Calcaire	Pression + Température + Profondeur
	Origine → Roche sédimentaire → Roche métamorphique → Roche cristallophyllienne → Roche ignée →	Sable siliceux ↓ Grès ↓ Quartzites ↓ Gneiss ↓ Granites-porphyres	Argiles ↓ Schistes argileux ↓ Ardoises ↓ Micaschistes ↓ Granites-porphyres	Particules calcaires ↓ Calcaires ↓ Marbres ↓ Calcaires micacés (cipolin) ↓ Micaschistes

Tableau 13 : types de roches (F.Letertre, et al., 1978)

IV.2.2. Pourquoi les cherches-t-on ?

Ils **servent** à :

Ils **doivent** : (Qualités recherchées)

- Clore – Ex. → Mur de clôture/Mur porteur → résister aux charges à supporter ;
- Protéger – Ex. → Mur de façade → s'opposer au passe de l'eau ;
- Revêtir – Ex. → Dallage en pierre → être durables ;
- Décorer – Ex. → Parement → pouvoir se débiter et se façonner⁶⁵.

IV.3. Typologies d'architecture en maçonnerie

La maçonnerie est depuis l'antiquité l'art de bâtir par l'assemblage de matériaux élémentaires qui sont généralement des briques ou des pierres, liées avec du mortier. Il existe une large variété d'applications de maçonnerie⁶⁶ :

- Les murs ;
- Les arches, dômes et les voutes ;
- Les poutres et les colonnes.

Les structures en maçonnerie sont généralement très durables. Cependant, certains paramètres comme les matériaux utilisés, la qualité et leurs fabrications et l'appareillage, c'est-à-dire la façon dont les unités de brique ou de pierre sont assemblées, peuvent influencer considérablement sur la durabilité de la construction en maçonnerie. Il est donc obligatoire de contrôler et d'évaluer ces structures afin d'assurer leur sauvegarde.⁶⁷

IV.3.1. Maçonnerie de pierre naturelle

Le but de ce travail ce n'est pas de refaire un cours de géologie mais de donner les éléments nécessaires au matériau "pierre" fondamentales à la compréhension du fonctionnement d'un ouvrage en maçonnerie.⁶⁸

On distingue :

- Les diverses maçonnerie de moellons les plus répandues.
- La maçonnerie de pierre de taille réservée généralement à la construction des façades.

Les murs sont construits parfois avec des blocs volumineux taillés dans la pierre de qualité en forme de parallélépipède rectangle.

Chaque pierre a été probablement façonnée manuellement par les tailleurs de pierre pour occuper une place déterminée dans le mur⁶⁹.

⁶⁵ F.Letertre, et H.Renaud. Travaux de maçonnerie et finitions. Paris: FOUCHER, 1978

⁶⁶ R.CHAISE. Restauration des anciennes maçonneries et percement des ouvertures en sous-oeuvre. Eyrolles.

⁶⁷ Ibid

⁶⁸ Ibid

⁶⁹ Ibid

Concernant les pierres de tailles, elles sont des éléments de grande dimension, de hauteur d'assise allant de 0,25 m à 0,60 m, et de largeur comprise entre 1,5 à 2 fois la hauteur. Les propriétés de la pierre dépendent directement de sa nature qui va du calcaire ordinaire (très faible résistance à la compression) au quartzite (très forte résistance à la compression).⁷⁰

IV.3.1.1. La Maçonnerie de moellons

- **Définition** : Une maçonnerie de moellons est un ouvrage réalisé avec des éléments de pierres, pouvant être manipulés par un seul homme.⁷¹
- **Catégorie de moellons** : les moellons se présentent dans la maçonnerie à l'état de moellons bruts ou d'assise.
 1. **Moellons brut** : est un petit bloc irrégulier de pierre tel qu'il provient de la carrière mais toutefois débarrassé du bousin (matière tendre ou pierre en formation qui l'enrobe)



Figure 64 : Blocs de moellons brut

2. Moellons d'assise ou d'appareil : (pierre ayant subi une préparation)

un moellon assise est une petite pierre de taille dont le volume ne dépasse pas quinze mètres cubes et dont aucune arête n'a plus de 0,6 à 0,7 de longueur.

Il suffit de tailler les éléments de pierres sur deux faces parallèles au lit de carrière pour avoir un bon moellon d'assise⁷².

⁷⁰ Techniques de l'ingénieur. Construire avec des matériaux naturels. Ref.Internet : 43807.

⁷¹ BRIGAUX, Guy. La maçonnerie. Paris: Eyrolles,

⁷² Ibid

Les différentes parties d'un moellon sont les faces ⁷³:

- De parement ;
- De lit ;
- De joint ;
- De derrière ;
- Et la queue.

Le moellon peut se présenter avec une partie amoindrie.

Suivant leur volume et la place qu'ils occupent dans une construction, les moellons sont appelés ⁷⁴:

- **Carreau** : élément de peu d'épaisseur à un parement.
- **Boutisse** : élément pénétrant très profondément dans le mur et à un parement.
- **Parpaing** : élément traversent tout le mur et à deux parements.

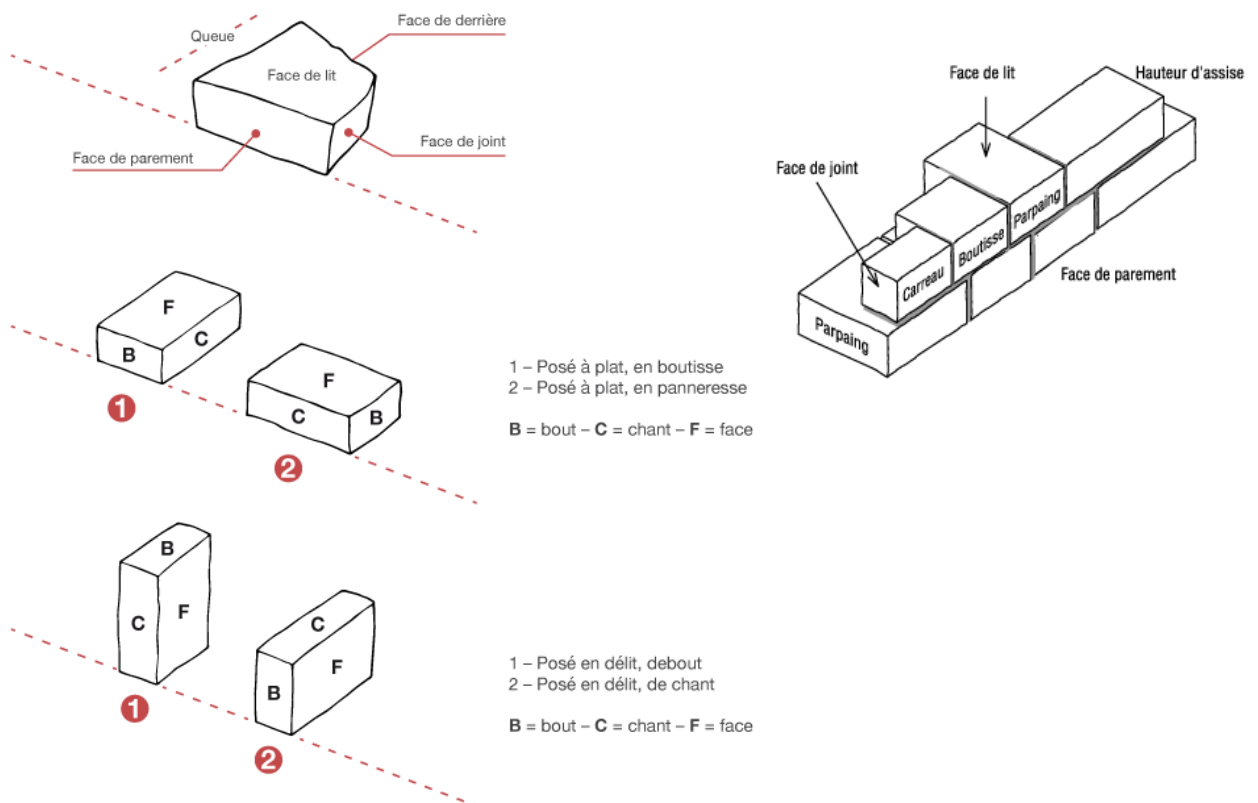


Figure 65 : Nomenclature des parties de la pierre

⁷³ OLIVIER, Emile. Les maçonneries. Vol. II, Technologie des méthodes de construction. Technique et Documentation Lavoisier, 1990.

⁷⁴ Ibid

- **Différents genres de maçonnerie** : Selon qu'on utilise des moellons brut ou assises, on réalise :

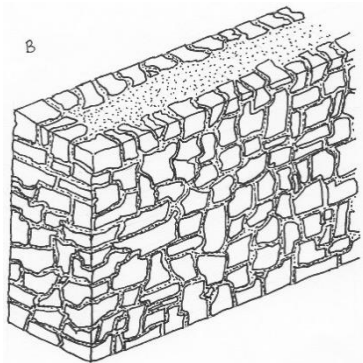


Figure 67 Des maçonneries dites « Opus Incertum ».

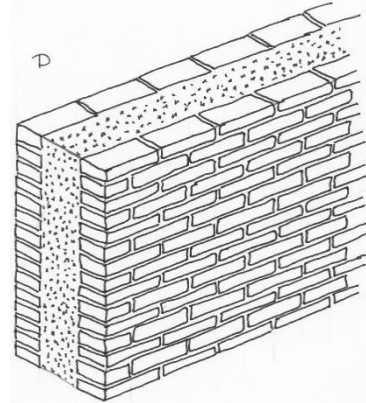


Figure 67 : Des maçonneries de moellons assises

- **Le libage** : Sont des pierres de bonne qualité et de grandes dimensions, grossièrement taillées. Ils sont utilisés dans les zones très sollicitées en compression ou exposées aux chocs (socle des piles, soubassements).

IV.3.1.2. Caractéristiques physique et mécanique des pierres

1) Caractéristiques physiques

Les plus importants sont⁷⁵ :

- La structure : compacte, oolithique, caverneuse, schisteuse...
- La forme et l'aspect de la surface des cassures : plane, arrondie, granuleuse, esquilleuse, feuilletée...
- Le lit : les pierres sédimentaires et en particulier les pierres calcaires présentent des stratifications. Dans les constructions, on dispose les pierres de manière à avoir les lits normaux à la résultante des efforts.
- L'homogénéité : la présence de parties tendres, de fentes, de cavités remplies d'une matière étrangère pulvérulente fait qu'on ne peut pas compter sur la résistance d'une pierre dont la constitution n'est pas régulière.

Une bonne pierre a une contexture compacte, serrée et uniforme : elle rend un son clair sous le choc du marteau.

⁷⁵ Ministère des transports (France). Les ponts en maçonnerie. Paris: Département des Ouvrages d'Art, 1982

- La dureté : dont on peut se faire une idée avec la lame d'un couteau. Cette profondeur peut être reliée à la résistance de la pierre, l'entaille devant alors être faite dans des conditions précises.
- Les propriétés physiques proprement dites :
 - La masse volumique : (la densité par rapport à l'eau), que l'on tente de relier à la résistance à la compression simple f_{cp} , au moins pour les pierres calcaires.
$$f_{cp} = 15 \frac{d-0,38}{2,82-d}$$
Où f_{cp} est exprimée en MPa.
 - La porosité : mesure le rapport du volume des vides au volume total. Elle est très variable.
 - Granite, quartzite, porphyre, basalte 0 à 1 %
 - Grès 5 à 22 %
 - Calcaire dur 15 à 30 %
 - Calcaire tendre 30 à 50 %

Immédiatement après leur extraction, les pierres contiennent de l'eau incluse dans leurs pores, eau appelée « eau de carrière ». Si elles sont extraites aux approches de l'hiver ou pendant l'hiver et si elles sont utilisées tout de suite, les pierres, conservant leur eau de carrière, risquent de se fendre et d'éclater sous l'action des cycles de gel-dégel⁷⁶.

- La capillarité : rattachée à la porosité, est l'aptitude de la pierre à absorber de l'eau. Les pierres qui absorbent ainsi beaucoup d'eau sont susceptibles de souffrir des cycles gel-dégel. En outre, elles nécessitent l'utilisation de mortiers humides : elles risquent de perturber leur durcissement en pompant leur eau.
- La gélivité : reliée à la perméabilité et à la capillarité, est un défaut capital pour une pierre de construction.
- La dilatation : sous l'effet de la température : le coefficient de dilatation thermique est de l'ordre de 10^{-5} degré⁻¹.

⁷⁶ Ibid

2) Caractéristiques mécaniques

- **La résistance à la compression simple f_{cp}**

Comme pour le béton, elle est mesurée sur des éprouvettes, généralement en forme de cubes dont les dimensions sont normalisées et dont l'état d'imbibition est mesuré⁷⁷.

	Résistance à la compression simple f_{cp} en MPa	Résistance à la traction simple f_{tp} en MPa	Module d'élasticité E en 10^3 MPa
Craie	2-12	0,1-0,15	2-10
Calcaire ordinaire	7-40	0,5-5	5-30
Calcaire compact	40-100	4-15	30-60
Grès	7-60	0,5-5	7-50
Schiste	15-70	0-10	7-60
Granite	60-180	6-15	15-70
Quartzite	80-300	7-20	25-80

Tableau 14 : La résistance à la compression simple de la pierre (Ministère des transports (France), 1982)

- **La résistance à la traction simple f_{tp}**

Elle est considérablement moindre que la résistance à la compression simple et par simplification, on considère qu'elle est nulle. A titre indicatif, des valeurs sont données dans le tableau ci-dessus⁷⁸.

IV.3.1.3. Mortier

La chaux est connue depuis l'Antiquité la plus reculée mais son utilisation dans l'exécution des maçonneries remonte aux Etrusques.

Les Romains connaissaient l'art de faire de la chaux grasse et cuisaient le marbre le plus pur lorsqu'ils, voulaient une chaux de qualité exceptionnelle. Ils utilisaient des pouzzolanes pour obtenir un mortier durcissant sous l'eau et de grande résistance.⁷⁹

⁷⁷ Ibid

⁷⁸ Ibid

⁷⁹ Ibid

IV.3.2. La maçonnerie de brique

Les briques employées en maçonnerie sont obtenues à partir de certaines argiles durcies naturellement (briques crues) ou artificiellement (briques cuites).⁸⁰

IV.3.2.1. Les caractéristiques physique et mécanique de la brique

1) Caractéristiques physiques

- L'homogénéité de composition et de structure : une bonne brique doit avoir une structure massive et ne doit contenir aucune inclusion de matériaux étrangers.
- La régularité des formes et des dimensions.
- l'altérabilité, fonction de la porosité et de la cohésion de la brique : risques de délitage sous l'action du gel et de l'humidité.

La présence de nodules de chaux et de magnésie fait gonfler et éclater la brique sous l'action de l'humidité,

- Une bonne brique doit rendre un son clair sous le choc du marteau ; sa cassure doit être homogène, à grain fin ou serré ; elle doit être difficilement rayable par le fer ou l'acier.
- La densité : les valeurs courantes sont données dans le tableau 15.

2) Caractéristiques mécaniques

Comme pour la pierre la résistance à la traction simple f_{tp} est négligée vue qu'elle ne dépasse pas les 3% de la résistance à la compression simple.⁸¹

- La résistance à la compression simple f_{cp}

Brique de qualité	Densité	f_{cp} en MPa
Inférieure	1,36	De 6 à 10
Moyenne	De 1,4	De 10 à 20
Très bonne	à 1,8	De 20 à 30
Exceptionnelle	de 1,8 à 2,2	De 30 à 70

Tableau 15 : La résistance à la compression simple de la brique (Ministère des transports (France), 1982)

- Le module d'Young E : à des valeurs faibles (de 5 à 25 x 10³ MPa), mais la prise en compte de ce paramètre nécessite les mêmes précautions que pour les pierres.

⁸⁰ Ibid

⁸¹ Ibid

IV.3.3. Maçonneries composites

Une construction en maçonnerie est constituée de pierres ou de briques, bien liaisonnées entre elles avec des joints de mortier suivant l'état de conservation de ces joints. On appellera ce matériau un matériau composite : ses caractéristiques et son comportement dépendent des propriétés de chacun des matériaux le constituant, des propriétés de contact entre ces matériaux (encore appelées propriétés d'interface) et de la géométrie de l'assemblage.⁸²

IV.3.3.1. Comportement de la maçonnerie composite vis-à-vis de l'action sismique

Un bâtiment de structure de murs porteurs constitue un système complexe dont la stabilité vis-à-vis des actions verticales et horizontales est le résultat du travail d'ensemble de divers éléments constructifs (murs porteurs, murs de liaison et planchers). Ces éléments collaborent de manière non redondante à la stabilité globale, de telle manière que la défaillance individuelle de l'un d'entre eux peut facilement affecter les autres éléments en produisant un effondrement en cascade de tout ou partie de la structure. (Pere Roca Fabregat)

Lorsque la stabilité latérale d'un bâtiment face aux sollicitations sismiques est assurée par des éléments en maçonnerie, la détermination de la résistance de ces éléments dans leur plan devient déterminante, en particulier pour les planchers rigides. La maçonnerie composite étant un mode de construction complexe dont la résistance dépend essentiellement de l'inclinaison de la compression par rapport à l'assise.⁸³

IV.3.3.2. Les modes de ruptures d'une maçonnerie composite

- **1^{er} mode : Rupture par fendage de la pierre. (Sous compression centré)**

Soit un empilage de pierres maçonnées soumis à un effort centré de compression.

Vu que le module d'élasticité du mortier est beaucoup plus faible que celui de la pierre, le mortier a tendance à s'étaler latéralement.

En raison de l'adhérence et du frottement entre le mortier et la pierre, cette expansion latérale induit dans la pierre un état de tension latérale et dans le mortier un état de compression latérale : il en résulte la rupture par fendage de la pierre.

⁸² Ibid

⁸³ Ibid

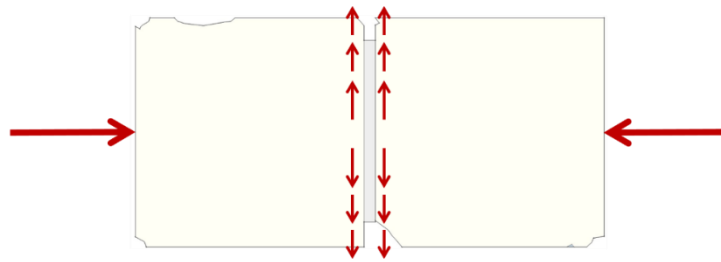


Figure 68 : Rupture par fendage de la pierre(Auteur,2017)

- **2e mode : rupture par excès de compression de la pierre et rotation autour de l'arête d'un joint**

Dans le cas où l'effort appliqué n'est plus centré, l'assemblage est soumis également à un moment de flexion et la structure subit une courbure qui se concentre dans les joints de mortier. Il apparaît alors des cisaillements (Figure 69) qui s'opposent aux tensions latérales et la rupture a lieu par excès de compression et par rotation autour de l'arête d'un joint.⁸⁴

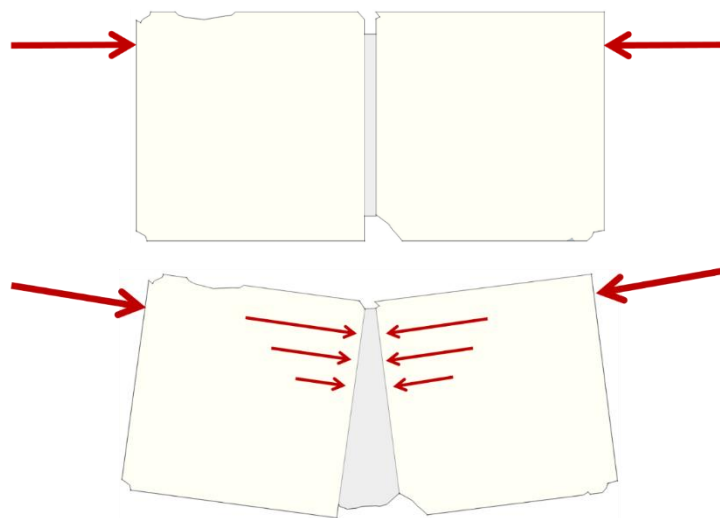


Figure 69 : rupture par excès de compression de la pierre et rotation autour de l'arête d'un joint (Auteur, 2017)

IV.3.3.3. Résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple d'une maçonnerie dépend de la résistance de chacun des matériaux et de leurs proportions géométriques.

1. Cette résistance diminue avec les résistances à la compression simple des pierres et du mortier des joints.

⁸⁴ Ibid

IV - Typologie d'architecture traditionnelle et son comportement vis-à-vis de l'action sismique

Résistance caractéristique à la compression simple des pierres f_{pk}	Résistance caractéristique à la compression simple des pierres suivant les mortiers (tableau X)				Résistance moyenne à la compression simple des pierres f_{pm} MPa
	M ₄	M ₃	M ₂	M ₁	
2,0	1,3	1,4	1,4	1,4	2,5
5,0	2,9	3,3	3,4	3,5	6,5
7,0	3,5	4,1	4,5	4,9	10,0
10,0	4,1	4,7	5,3	6,2	13,0
15,0	5,1	5,9	6,7	8,2	20,0
20,0	6,1	6,9	8,0	9,7	26,5
30,0	7,2	8,6	10,2	12,0	40,0
40,0	8,1	10,4	12,0	14,3	53,0
60,0	-	-	16,0	18,8	80,0

Tableau 16 : Résistance à la compression simple de la maçonnerie composite (Ministère des transports (France), 1982)

Remarque : Selon la référence les valeurs caractéristiques sont établies pour un coefficient de variation de 15 % et une probabilité égale à 5 % d'obtenir une valeur inférieure à la valeur caractéristique (loi normale).

Les valeurs relatives aux pierres figurant dans ce tableau correspondent à des essais sur cubes (rapport hauteur/largeur = 1).

Type de mortier	Résistance moyenne à 28 jours (MPa)	Composition approximative en volume		
		Ciment	Chaux	Sable
M ₁	20	1	0- ¼	2 ¼-3(chaux + ciment)
M ₂	10	1	¼-½	
M ₃	5	1	½-1 ¼	
M ₄	2,5	1	1 ¼-2 ½	

Tableau 17 : résistance moyenne du mortier (Ministère des transports (France), 1982)

Remarque : Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes parallélépipédiques 40 x 40 x 160 mm.

Dans les ouvrages anciens, les joints de mortier sont dans un état de conservation variable mais souvent médiocre. On se référera alors à des mortiers de type M 3 ou M4 en l'absence d'éléments chiffrés, difficiles à obtenir.

2. La résistance à la compression simple de la maçonnerie diminue avec la résistance à la traction de la maçonnerie.

3. La résistance à la compression simple de la maçonnerie dépend aussi de l'adhérence pierre-mortier.
4. La résistance à la compression simple de la maçonnerie dépend de l'épaisseur du joint. Lorsque les joints sont très épais, la proportion de mortier est importante et la résistance intrinsèque du mortier prend une part prépondérante, et ceci d'autant plus que le mortier est de qualité médiocre.
5. La résistance à la compression simple de la maçonnerie diminue avec la présence de joints parallèles à l'effort normal, ceux-ci ayant une résistance latérale faible (traction-adhérence).
6. La résistance à la compression simple de la maçonnerie diminue avec la surface des joints : si le joint est dégradé sur une grande profondeur, la surface de transmission est réduite.

Remarque : pour déterminer la résistance à la compression simple de la maçonnerie, les résultats ont été faits par des essais sur éprouvettes obtenues par des forages carottés de diamètre important (supérieur à 100 mm...). On peut alors :

- soit chercher la résistance de la pierre seule et ensuite utiliser le tableau n° 4,
- soit chercher directement la résistance de la maçonnerie : il faut alors « intercepter » le maximum de joints lors du forage.

De leurs part et dans une étude plus récentes *Pierino Lestuzzi et Marc Badoux* confirment que les propriétés mécaniques de la maçonnerie de pierre naturelle dépendent essentiellement du type d'assemblage mis en œuvre et il faut distinguer entre une maçonnerie constitué de pierres façonnées et une maçonnerie de pierres non façonnées.

La maçonnerie composée de pierres naturelles façonnées, comme les pierres de taille, les moellons équarris et, dans une moindre mesure, les moellons bruts à assises irréguliers, a un comportement similaire à celui de la maçonnerie de brique. Par conséquent, ce type de maçonnerie peut être traité de manière analogue à la maçonnerie de brique.⁸⁵

IV.3.3.4. Résistance à la traction

Il est clair que la résistance à la traction dépend de chaque résistance à la traction de chacun des matériaux qui compose la maçonnerie, mais il ne faut pas oublier aussi une autre notion importante celle de l'adhérence.⁸⁶

⁸⁵ Ibid

⁸⁶ Ibid

Si,

1. L'adhérence est nulle : la résistance à la traction est nulle ;
2. L'adhérence est plus grande que la résistance à la traction de la pierre : la pierre se rompt en traction (cas des pierres calcaires tendres),
3. L'adhérence est inférieure à la moitié de la résistance à la traction du mortier : c'est le cas des pierres calcaires demi dures ou dures,
4. L'adhérence est inférieure au quart de la résistance à la traction du mortier : c'est le cas des pierres calcaires dures, compactes esquilleuses ou écailleuses.

Dans ces deux derniers cas, la rupture a lieu par rupture de la liaison pierre-mortier.

Et donc il est indispensable de considérer que la résistance à la traction du matériau composite est faible, voire nulle.⁸⁷

IV.4. Conclusion

Un passage vélocé nous a permis de confirmer les variétés des typologies de maçonneries anciennes, une discipline de construction qui nécessite un savoir-faire riche sur l'ensemble des éléments qui la compose, Afin de pouvoir apporter les caractéristiques mécanique les plus correcte relatives à une telle typologie hétérogène pour qu'elles vont servir ensuite en tant que données opérationnelles pour n'importe qu'elle modélisation numérique de ce matériau.

⁸⁷ Ibid

V. Techniques de renforcement structurel

V.1. Introduction

Etant analysé dans le chapitre précédent quelques typologies de maçonnerie traditionnelle, qui sont composés en général de pierres naturelles ou de briques, maintenues entre elles par un mortier, leurs déficiences vis-à-vis un éventuel tremblement de terre nécessite un renforcement et une consolidation pour une éventuelle réhabilitation structurelle d'un cadre bâti ancien.

En se basant sur le guide FEMA 547 qu'on a élaboré auparavant, les travaux de réhabilitation structurelle des bâtiments se divisent en plusieurs catégories qui sont les suivantes ⁸⁸:

1. Renforcement des éléments existants, dans le but de réparer un élément endommagé afin de reprendre sa résistance initial ;
2. Augmenter la résistance des éléments existants afin d'avoir une réponse sismique souhaité non acquise auparavant ;
3. Ajouter de nouveaux éléments porteurs pour reprendre le fonctionnement d'un autre élément obsolète ;
4. Renforcer la relation entre plusieurs éléments porteurs, pour assurer un bon cheminement des charges transmises à l'édifice ;
5. Réduire la demande sismique en intervenant sur la morphologie principale de l'édifice ou en optant vers une isolation parasismique de l'édifice
6. Enlever carrément un élément porteur.

V.2. Interventions sur les murs et les piliers

Les désordres d'un mur porteur en maçonnerie peuvent avoir diverses causes avec des aspects très variés, nous citons:

- Simple fissure ;
- Gonflement ;
- Effondrement partiel voir total.

⁸⁸ Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington: FEMA 547, 2006

V.2.1. Remplacement physique de la partie endommagée

Il s'agit d'un remplacement d'une partie endommagée à cause d'une fissuration, gonflement de mur ou même un effondrement total ou partiel d'un mur en maçonnerie

Comme indique dans le guide FEMA 547, on peut reconstruire avec le même matériau ou d'autres dont la résistance et la déformabilité seront similaires.

En ce qui concerne l'exécution, il faut prendre grand soin du contact de la partie remplacée avec l'ouvrage, pour assurer une correcte transmission des charges, sans oublier la similitude déjà citée de leurs caractéristiques mécaniques.⁸⁹



Figure 70 : Remplacement physique de la partie endommagée (Ville de Quebec, 1989)

V.2.2. Réparation et renforcement des intersections de murs

Les intersections des murs sont particulièrement vulnérables aux forces sismiques. Ce qui peut générer de larges fissures verticales ou des séparations totales qui éliminent les effets d'interaction. Le CGS propose trois méthodes de rigidification :⁹⁰

1. Rigidification par des moellons-liaison sur les deux murs avec un mortier très riche en ciment sur un espacement de 70 cm.
2. Rigidification à l'aide des fers plats, avec un treillis soudé scellé au deux murs et recouvert d'un enduit de ciment.
3. Réalisation d'un chaînage en béton armé.

⁸⁹ Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington: FEMA 547, 2006

⁹⁰ M. Belazougui et al. Catalogue des methodes de reparation et de renforcement des ouvrages. s.l. : CGS, 1992.

V.2.3. Reprise des fissurations

Il s'agit de retrouver la continuité perdue d'un mur fissuré dans le but de reprendre son homogénéité initiale à l'aide d'une injection d'un coulis recommandé par le FEMA 547⁹¹, des agrafes métalliques ou des morceaux de brique, etc. (RehabiMed).⁹²

V.2.3.1. Méthode du guide technique de Québec :

Pour reprendre la fissuration par coulis faut d'abord assurer que l'évolution de la fissure est arrêtée pour qu'on puisse procéder à sa réparation de la façon suivante ⁹³:

- A) A l'aide d'un ciseau, enlever toutes les parties friables ou détériorées de la maçonnerie de chaque côté de la fissure ; nettoyer les résidus avec une brosse dur. Si la largeur de la fissure excède 25 mm, faut percer des petits trous dans la pierre seine pour améliorer l'adhérence ; si la fissure est très large, faut enfoncer un treillis à une profondeur de 12 mm (guide techniques Québec). (Figure 71a)

Le guide RéhabiMed suggère une suite de l'étape suivante en fixant éventuellement sur la surface à rendre une armature de type grillage galvanisé ou grillage de fibres synthétiques, avec un maillage supérieur à 2 cm (un maillage large permet à l'enduit d'adhérer correctement au support)⁹⁴. (Figure 71c)

- B) Préparer un coulis de mortier (souvent un mortier de chaux et de ciment) de couleur semblable aux éléments du mur ; en obtient la couleur désirée en ajoutant de la poussière de pierre au mélange. Construire un petit coffrage étanche en bois ou en plastique et remplir la fissure de mortier, au moyen d'un entonnoir ; au besoin, prolonger le coffrage au fur et à mesure qu'on remplit la fissure. Attendre que le mortier durcisse suffisamment, enlever le coffrage, nettoyer le surplus de coulis et exécuter la finition de surface à l'aide d'une truelle, d'une brosse ou d'un fer à joints. (guide techniques Québec)⁹⁵. (Figure 71b)

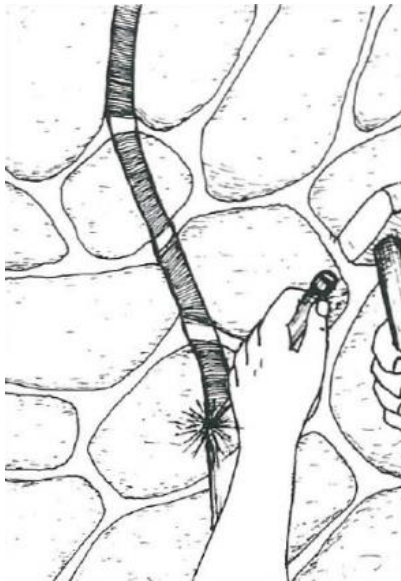
⁹¹ Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers. Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Washington: FEMA 547, 2006

⁹² Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

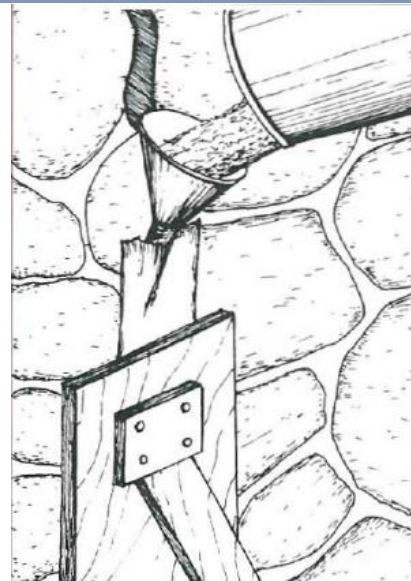
⁹³ Ville de Québec. Guide technique, La maçonnerie de pierre. 1989.

⁹⁴ Ibid

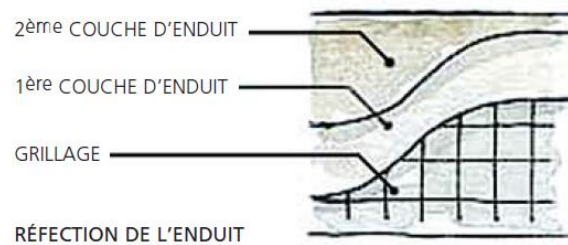
⁹⁵ Ibid



A



B



C

Figure 71 : Reprise des fissurations

V.2.3.2. Méthode du CGS :

Le catalogue des méthodes de réparation et de renforcement du CGS propose trois niveaux de réparation qui sont les suivants :

1. Fissures comprise entre 0.3 et 3 mm

Dans ce cas les fissures peuvent être réparées par injection de mortier très fluide, avec la possibilité d'utiliser des résines dans le besoin ;

En résumé voici les étapes de l'injection :

A) enlever la couche d'enduit dans la partie endommagée et nettoyer les fissures au jet d'eau ou à l'air comprimé ;

B) percer des trous sur l'axe de la fissure, distants de 30 à 60 cm suivant l'importance de la fissure ;

C) introduire les injecteurs sur une profondeur de 5 cm environ dans les trous et les sceller avec du mortier ;

D) injecter le mortier fluide ou le lait de ciment avec une pression de 30 bars.

2. Fissures comprise entre 3 et 10 mm

Si la fissure dépasse 3 mm de large, elle peut être injectée avec un mortier de ciment,

3. Fissure qui dépasse 10 mm

Quand la fissure dépasse 10 mm, l'injection est insuffisante, car il est fort possible que la maçonnerie est fortement endommagée,

Si la fissure est verticale, il est préférable de dégager les moellons sur une largeur de 15 à 20 cm de part et d'autre de la fissure afin de les remplacer en utilisant un mortier de ciment, soit par du béton avec des fers ronds ou avec des fers plats en forme de U.

Si la fissure est inclinée, la réparation va passer à un niveau de complexité plus élevée, en optant vers la réalisation de potelets en béton armé en plusieurs endroits pour rigidifier le mur, il faut dégager tout d'abord les moellons sur une largeur de 15 à 20 cm le long d'un tracé vertical, sur une profondeur de 10 à 15 cm, la cheminée créée est remplie de béton armé.

Dans le cas où la réalisation des potelets est difficile ou impossible, il est possible de réaliser des chaînages apparents de part et d'autre du mur.⁹⁶

⁹⁶ M. Belazougui et al. Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages. s.l. : CGS, 1992.

V.2.4. Réfection

Lorsqu'un mur menace de s'effondrer à cause de la vétusté du mortier à l'intérieur de ce mur ou que les pierres qui le composent sont détériorées au point qu'il est impossible de le réparer selon les techniques décrites précédemment, il faut envisager une intervention plus complexe. Qu'on prévoit l'injection de coulis à l'intérieur du mur ou le remplacement partiel ou total du mur.⁹⁷

Un mur qui présente une déformation comme le gonflement ou le déversement peut parfois être stabilisé par l'injection d'un coulis.

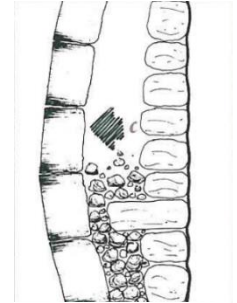
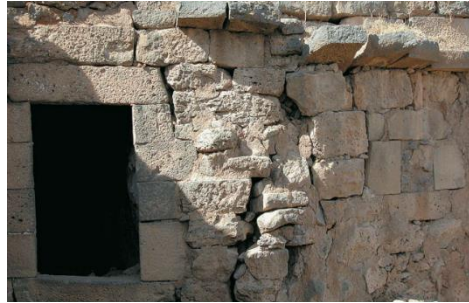


Figure 72 : mur en maçonnerie gonflé (Ville de Québec, 1989)

Cette opération exige la plus grande prudence et doit être exécutée par une main d'œuvre spécialisée et supervisée par des professionnels. Les étapes sont les suivantes⁹⁸:

- A) Il faut d'abord rejointoyer toute la maçonnerie suivant la méthode décrite précédemment.
- B) Au besoin, les pierres trop détériorées sont remplacées (voir une réfection partielle).
- C) Pendant le rejointoiement, on introduit dans les joints des boyaux de plastique de 12 mm de diamètre, jusqu'au centre de mur ; les boyaux sont insérés par paires à tous les mètres carrés.
- D) En commençant par le bas de mur, on procède ensuite à l'injection du coulis, à l'aide d'une pompe à injection branchée sur un des deux boyaux jumelés ; l'autre boyau doit être bouché dès que le coulis y refoule. (guide techniques Québec)

Durant l'injection, il faut effectuer un contrôle régulier de la qualité du coulis, de la pression d'injection et des quantités de coulis injectées. Cette opération, quoique complexe, est préférable à la construction d'un mur, puisqu'elle n'affecte pas l'intégrité architecturale de bâtiment.⁹⁹

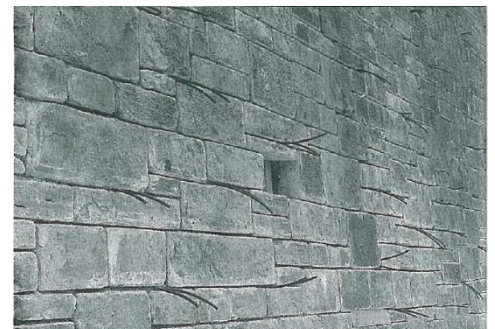


Figure 73 : placement des boyaux pour injection (Ville de Québec, 1989)

⁹⁷ Ville de Québec. Guide technique, La maçonnerie de pierre. 1989.

⁹⁸ Ibid

⁹⁹ Ibid

V.2.5. Consolidation par parois armées (chemisage)

Cette technique consiste à augmenter la section du mur endommagé ou sous dimensionné en incorporant aux parements des épaisseurs de matériau (mortier ou béton) après la pose de treillis métalliques, solidarisés entre eux dans le mur.

L'opération peut se faire à l'aide d'un coffrage sur le côté du mur désiré ou bien par projection sur les parements avec le treillis déjà en place.¹⁰⁰

Cette solution n'est pas concernée que pour un mur tout entier mais elle s'adapte à des pans précis. Cette qualité la rend tout spécialement appropriée pour renforcer des bâtiments que les mouvements sismiques auront abîmés, en augmentant la rigidité des parties du bâtiment qui l'exigent et, au besoin, celle de l'ensemble du bâti.¹⁰¹

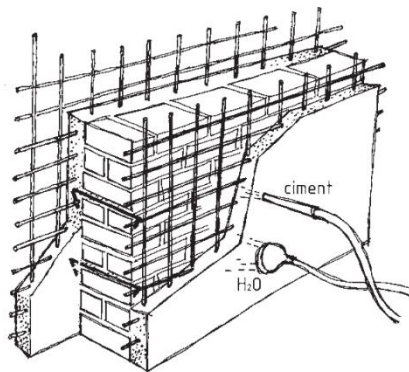


Figure 74 : Chemisage (RehabiMed, 2007)

Il est préférable de chemiser le mur sur les deux faces avec des liaisons qui traversent toute son épaisseur, cependant si la réalisation des liaisons qui traversent toute l'épaisseur du mur est impossible, il suffit de réaliser des « chase » dans des endroits choisis soigneusement. Le béton ajouté est mis en œuvre par projection, l'épaisseur varie de 3 à 4 cm pour la maçonnerie en brique simple et de 8 cm ou plus pour la maçonnerie lourde.¹⁰²

V.2.6. Consolidation par polymères à fibre renforcé (PRF)

L'une des techniques novatrices dans le domaine de la consolidation des structures et la réhabilitation sismique du patrimoine ancien, les fibres de polymère renforcé PRF ont été dernièrement un sujet d'étude et d'expérimentation en tant qu'éléments de consolidation légers et irréversible, vue qu'ils bénéficient d'un rapport poids/résistance élevé ainsi qu'une très bonne résistance à la fatigue.¹⁰³

¹⁰⁰ Thomaz, Ercio, et al. Defects in Masonry Walls Guidance on Cracking: Identification, Prevention and Repair. Rotterdam : CIB, 2015.

¹⁰¹ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

¹⁰² M. Belazougui et al. Catalogue des methodes de reparation et de renforcement des ouvrages. s.l. : CGS, 1992.

¹⁰³ Xavier CASANOVAS et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Bâtiments. Barcelona, 2007.

Il s'agit d'un alliage de tissu et une résine époxy appliqués sur l'élément à renforcer suivant la direction désirée.

Plus récemment, les bandes en fibre de carbone remplissent la même fonction qu'un chaînage ordinaire métallique dans certaines situations. Néanmoins, il est nécessaire de considérer les effets du matériau qui adhérerà à l'élément renforcé.¹⁰⁴

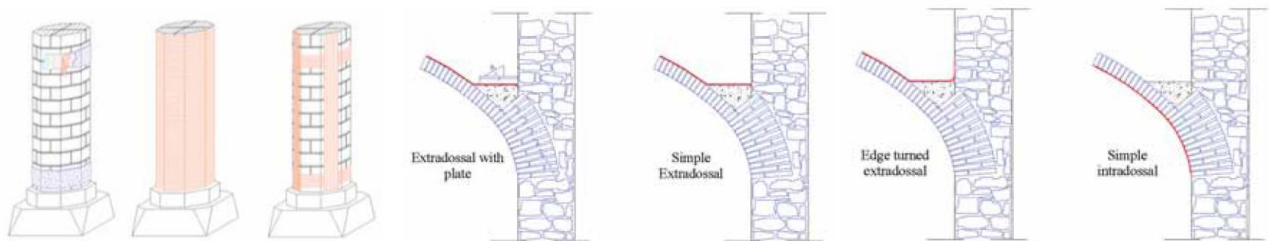


Figure 75 : Consolidation par polymères à fibre renforcé (RehabiMed, 2007)

V.2.7. Le renforcement par ajout de tirants

La pose de tirants dans les structures murales vise généralement à freiner l'effondrement des murs. Ces éléments sont constitués en principe d'un câble d'acier et fixés à deux murs opposés par des pièces spécifiques d'ancrage qui évitent l'évolution de leur écartement et la perte de leur capacité résistante.

Il convient de prévoir que l'un des deux éléments d'ancrage, au moins, admettra le réglage périodique de la tension pour compenser les effets de l'allongement éventuel du tirant.¹⁰⁵

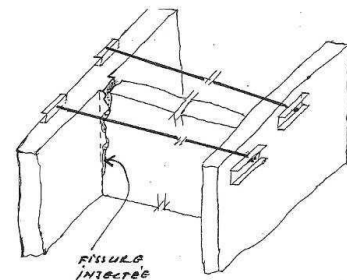


Figure 76 : renforcement par ajout de tirants (RehabiMed, 2007)

L'Eurocode 8-3 envisage ce type de renforcement pour améliorer le comportement d'ensemble de bâtiment.

¹⁰⁴ Ibid

¹⁰⁵ Ibid

V.2.7.1. Cas de la chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (Abruzzes, Italie)

Beaucoup d'exemples ont été traités par le CSTB au ce sujet, à la suite d'un séisme, à l'exemple du renforcement de la chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (Abruzzes, Italie)



Figure 77 : chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (AFPS-CSTB, 2013)

Cette chapelle du XVIème siècle a été restauré à plusieurs reprise, une première restauration à base d'éléments en béton armé qu'elle pas donné satisfaction vue son caractère massive, ce qui a mené vers une deuxième restauration qui consistait à l'élimination d'éléments en béton au profit de deux lits de tirants qui ont été disposés dans la direction transversale ; Ils sont associés à des tirants longitudinaux.¹⁰⁶



Figure 78 : chapelle « S.Maria Dei Centurelli » (AFPS-CSTB, 2013)

Ce système retiennent les murs et assurent un comportement monolithique de l'édifice. *« Les observations effectuées après le séisme de l'Aquila, démontrent l'efficacité de ce renforcement. Les seuls dommages apparents affectent le couronnement de la baie circulaire (quelques pierres ont été éjectées) et l'édicule supportant la cloche en toiture. Ce type de structure, analogue aux souches de cheminée, subit des impacts (coups de fouet) sous séisme qui le rendent instable. »* (AFPS-CSTB, 2013)

¹⁰⁶ AFPS-CSTB. Guide construction parasismique, Diagnostique et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme. 2013.

V.3. Interventions sur les planchers

L'unes de facteurs majeurs affectant les planchers anciens sont l'humidité au niveau des appuis des poutres et d'autres pathologies qui développent des champignons sur certains éléments porteurs, ce qui va mener vers un remplacement totale de l'élément porteur ou bien le renforcer.

Le Grand Hôtel-Dieu de Lyon en France est un exemple concret qui a subi une importante réhabilitation qui prévoyait la rénovation de 11 500 m² de planchers en bois, les points traités ci-après montrent quelques procédés de renforcement de cet hôtel.¹⁰⁷



Figure 79 : plafond du grand hotel dieu de lyon (EIFFAGE, Juillet 2017)

V.3.1. Remplacement des parties altérées (Prothèse avec PRF)

Il s'agit d'une technique de prothèse en coupant l'about de l'appui de la poutre(ou même une autre partie) altérée et le remplacer par une autre section identique en bois neuf et l'assemblage est réalisée par des armatures en fibres de carbones ou de verres scellées à la résine dans la partie prothèse et dans la partie poutre conservée.¹⁰⁸

Parmi les avantages de ce système on trouve :

- La bonne adhérence avec le bois,
- les deux matériaux ont un module d'élasticité proche



Figure 80 : Technique de prothèse avec PRF (EIFFAGE, Juillet 2017)

¹⁰⁷ EIFFAGE. Grand Hotel Dieu Lyon, La Rénovation des poutres et plancher historiques. Juillet 2017.

¹⁰⁸ MAPEI. Polymères renforcés de fibres (PRF) Systèmes composites. 2015.

Le travail consiste aussi à restituer le plancher tels qu'il était auparavant en démontant les chevêtres et restaurer les solives en faisons des aboutages avec de nouvelles chevêtres en place.



Figure 81 : Technique de prothèse avec PRF (EIFFAGE, Juillet 2017)

V.3.2. Planchers connectés

Par ailleurs, sur les 11 500 m² réparés et renforcés selon les techniques décrites ci-dessus afin de rétablir les propriétés d'origine de ces planchers historiques, 4 830 m² ont également été renforcés par le procédé «plancher connecté bois-béton» afin d'améliorer les capacités de ces planchers bois pour des raisons de surcharges, de stabilité au feu, ou d'acoustique entre étages.

Ce procédé mixte consiste à fixer des connecteurs métalliques (vis ou tirefonds) sur les poutres et/ou solivage bois du plancher, puis à couler une fine dalle de béton armé par-dessus. Les connecteurs sont ainsi pris dans le béton et l'ensemble constitue un plancher mixte avec les deux matériaux qui travaillent de manière solidaire.¹⁰⁹



Figure 82 : Planchers connectés (EIFFAGE, Juillet 2017)

« Ce type d'intervention est très adapté en rénovation puisqu'il permet de conserver des poutres anciennes et de maintenir visibles des plafonds à la française dans un esprit patrimonial, tout en augmentant la portance, l'acoustique et la stabilité au feu de ces planchers bois existants, via une intervention uniquement par la face supérieure du plancher. » Michaël Poncet, directeur de travaux.

¹⁰⁹ EIFFAGE. Grand Hôtel Dieu Lyon, La Rénovation des poutres et plancher historiques. Juillet 2017.

V.4. Conclusion

Nous avons revu dans ce présent chapitre, les différentes techniques utilisées récemment pour la réhabilitation structurelle du patrimoine bâti,

Le choix a été fait dans le but de ne pas apporter beaucoup de changement au volume initial dans une optique de consolider, de réparer ou de remplacer des éléments porteurs selon l'état de conservation de ces derniers afin de rétablir ou augmenter la capacité portante de la structure.

VI. Choix du cas d'étude « Mosquée du vieux Ténès »

VI.1. Introduction

La mosquée du vieux Ténès dite « mosquée Sidi Maïza », est l'une d'édifice les plus célèbre de la wilaya de chlef de part son histoire et son architecture, c'est parmi les raisons majeurs que notre choix du cas d'étude s'est dirigé vers cette édifice.

Les spécificités du site sont aussi des facteurs prédominants dans notre choix pour deux raisons :

- Le caractère sismique de la région du Ténès en tant que zone à une sismicité élevée, qui a été ébranler par plusieurs tremblement de terre tels que le séisme de 1954 et encore un autre le plus fort de l'histoire de l'Algérie celui de 1980 ;
- La proximité du site, ce qui nous a donné la possibilité de rendre plusieurs visites et investigations in situ afin de bien maitriser notre mosquée et aussi prendre les relevés et les mesures nécessaires.

Dans ce chapitre on va essayer d'établir une anatomie global sur la mosquée du vieux Ténès à la base des textes historiques et des relevés déjà établie mais aussi à partir de notre travail établie sur la mosquée.

La présentation commencera par un bref aperçu sur l'historique du site et la mosquée pour ensuite se focaliser sur une étude architecturale sommaire et à la fin une étude structurelle qui va nous montrer son état de conservation et aussi l'ensemble des composants qui détient cet édifice.

VI.2. Situation

Situé à 53 km au nord du chef-lieu de la wilaya de Chlef et 1,5 km au sud du chef-lieu de la daïra de Ténès, cette mosquée ponctue le vieux Ténès, une véritable casbah connu sous l'appellation populaire T'nes Lahdhar (ville des citadins).

La Casbah de Ténès est bordée par oued Allala sur le côté Est et la RN19 sur le côté Ouest.

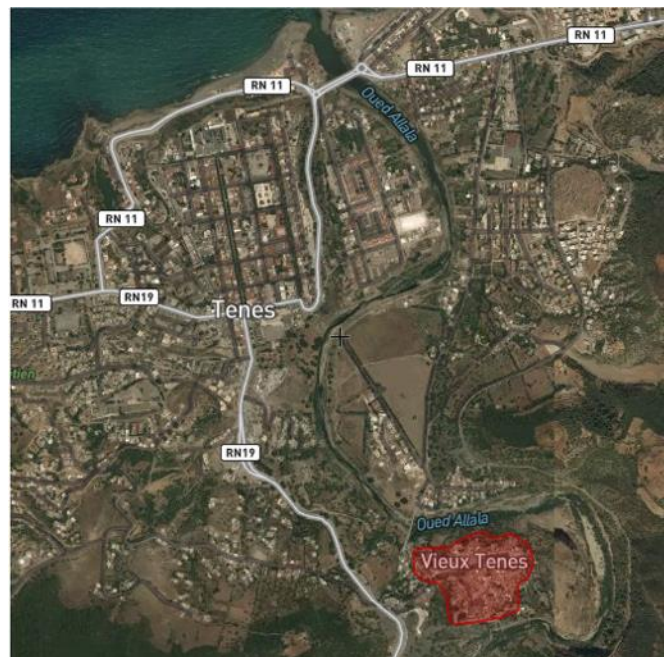


Figure 83 : Situation de la Casbah du Vieux Ténès

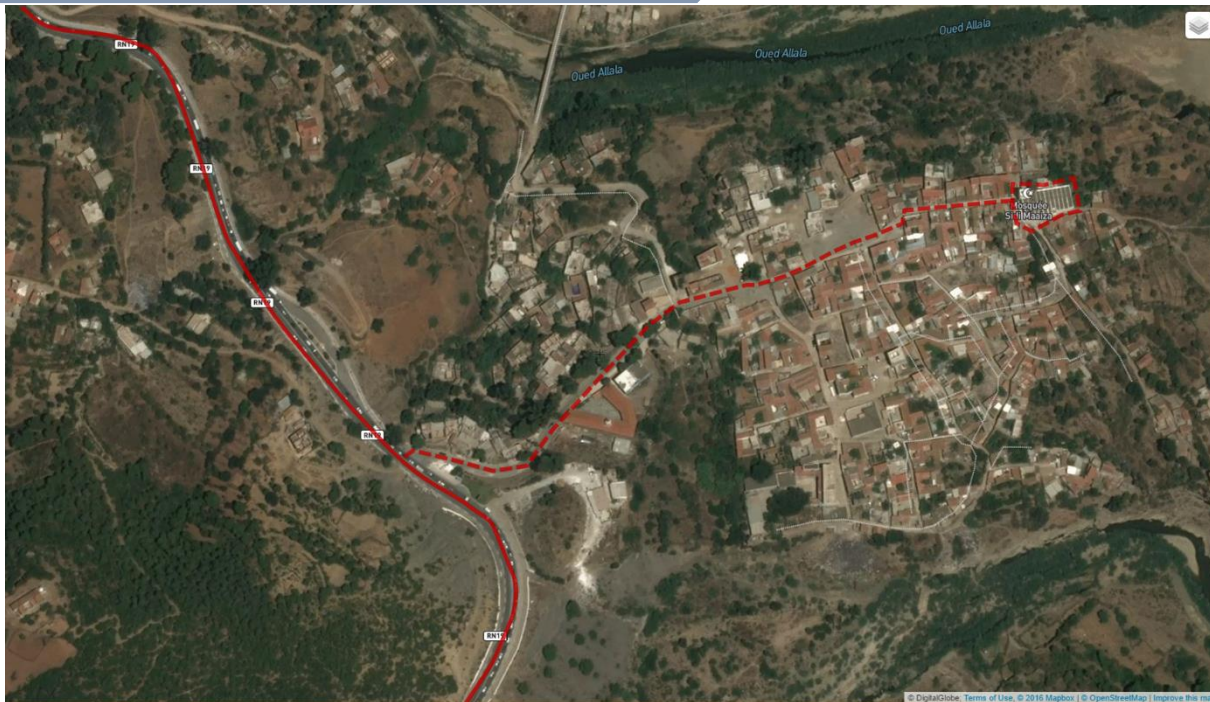


Figure 84 : Situation de la mosquée du vieux Ténès

VI.3. Historique

VI.3.1. Fondation de la casbah du Ténès « T'nes Lahdhar »

Le Chéllif constitue une partie charnière de la géographie de l'Algérie, il se trouve entre deux régions : à l'est la région algéroise et à l'ouest la région oranaise (est à mi-chemin d'Oran et d'Alger).

La cote a été d'abord fréquentée par les phéniciens, ou ils y ont installé des comptoirs à Cartenne (Ténès).¹¹⁰

« L'histoire urbaine de Ténès commence au 9^e siècle av. J.-C., avec les occupations successives, des Punique, des Berbères, des Romains, des Andalous, des Byzantins, des Arabes, des Turcs et des Français. Vers Le VIII^e siècle av. J.-C., les Phéniciens fondent à Ténès un comptoir commercial et des échanges commerciaux apparaissent avec la population berbère. Des tombeaux existent à ce jour sur la côte de la ville. A partir de ce moment la ville porta le nom de Cartenna. »¹¹¹

Le Chéllif est devenu une région de frontière entre l'est et l'ouest du pays : les royaumes de l'ouest commandé par Syphax puis Bocchus et de l'est que gouvernaient Massinissa et Jugurtha.

¹¹⁰ Hakima, SLIMANI. Toponymie au Dahra au Nord du Chlef. Chlef : Université Hassiba Benbouali, Faculté des lettres et sciences sociales, Département de Français. Memoire de Magister.

¹¹¹ Moussaoui, Rachid. Tenes: une ville historique enclavée et ignorée. la Nouvelle Revue de Presse. Juin 2016, 32, pp. 5-6.

A partir de 40 après J-C, au temps de l'occupation romaine de la région fut le centre du royaume berbère romain sous l'autorité du roi Juba II. Après la mort du fils de Juba II, Ptolémée, les romains occupèrent toute l'Afrique du nord. Le Chéllif a été devenu une région de frontière entre la Mauritanie Tingitane et la Mauritanie Césarienne.¹¹²

Entre 875 et 882, la région est entre les mains du chef militaire musulman Abou El Mouhajir Dinar, puis par les dynasties Rostemide, Maghraoua, Ziride, Almoravide, Almohade, Zianide et Mérinide.

El bekri nous apprend qu'il fut bâti en l'an 262 de l'hégire (875-876J.C.), par les marins de l'Andalousie, qui venaient passer l'hiver dans le port de Ténès, et qu'il fut peuplé par deux colonies andalouses dont l'une était venue d'El-Bira (Elvira) et de l'autre de Todmir (Murcie).¹¹³



Figure 85 : La Casbah du Vieux Tenes

Ténès El hadhar ou (la ville des citadins), fut construite vers 1302 par les Andalous, appelée aujourd'hui « Vieux Ténès », et où se trouve la mosquée de Sidi Maiza.¹¹⁴

Les écrits d'El Bekri témoignent que la ville de Ténès était une ville très riche à caractère universitaire. Au début du XVIe siècle,

« Les Espagnols sont chassés par les Turcs, à la tête desquels se trouve Kheireddine Barberousse. La ville reste ainsi sous domination turque jusqu'à la colonisation française. Les occupations successives de la ville ont laissé beaucoup de vestiges ; pour la période

¹¹² Hakima, SLIMANI. Toponymie au Dahra au Nord du Chlef. Chlef : Université Hassiba Benbouali, Faculté des lettres et sciences sociales, Département de Français. Mémoire de Magister.

¹¹³ E.J.BRILL'S. "El-Bakri" in: Encyclopaedia of islam. [éd.] Th,Houtsman M, et al. 1913-1936.

¹¹⁴ Moussaoui, Rachid. Ténès: une ville historique enclavée et ignorée. la Nouvelle Revue de Presse. Juin 2016, 32, pp. 5-6.

préhistorique citons : les grottes préhistoriques au Cap Ténès, les stations de campements et ateliers de taille du silex en plein air tout le long du littoral ». (Moussaoui, 2016)

VI.3.2. La mosquée du vieux Ténès « Sidi Maïza »



Figure 86 : la mosquée du vieux Ténès

Selon Rachid Bourouiba, les Idrissides, descendants du Prophète, auraient construit au début du X^{ème} siècle cette mosquée qui est la plus ancienne d'Algérie encore intacte, dans un style inspiré de la Grande Mosquée de Damas.¹¹⁵

« Considérant le caractère historique de cette belle mosquée...Selon l'expression de M. Christofle, Architecte e chef du gouvernement général : "Un monument historique très remarquable qui doit être entretenu convenablement" » extrait de procès-verbal du 23 avril 1947 du conseil général d'Alger, A/S du projet de restauration de la mosquée du Vieux Ténès adressé à monsieur le directeur des musées de l'archéologie, des monuments et sites historiques.¹¹⁶

¹¹⁵ Bourouiba, R. Apports de l'Algérie à l'architecture arabo-islamique. Alger : OPNA, 1956.

¹¹⁶ Procès verbal de la séance du 23 avril 1947 du conseil général d'Alger. Dossier n° 268. p. Archives de l'OGEBEC.

Une première impression sur la mosquée, est le caractère particulier de ses éléments architecturaux qui semble être bien plus antérieurs que la mosquée.

Cette remarque a mérité d'être vérifiée sur la base des textes historiques, et ce qui a été approuvé dans les archives des colons en disant que ces derniers revient à l'époque romaine et sont la raison principale du classement de cette mosquée en tant que monument historique.

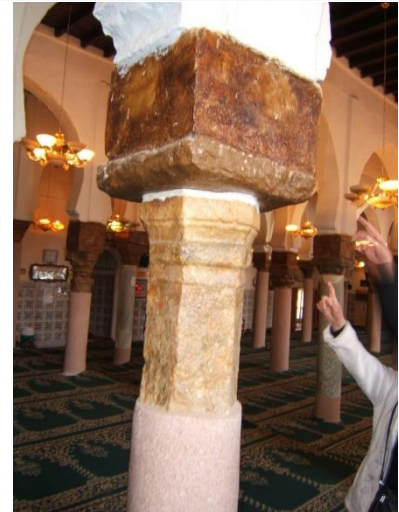


Figure 87: mosquée du vieux Ténès

« ...en tant que monument historiques les éléments architecturaux de cette mosquée peuvent être considérées comme classes par application de l'arrêté du 9 mai 1905, qui concerne les ruines romaines de la Kalaa des Oulad Abdallah... » Lettre du 21/07/1947 de M. Christofle, architecte en chef des monuments historiques à monsieur le directeur de l'intérieur et des beaux-arts A/S de la mosquée du vieux Ténès.¹¹⁷

« ... soit quarante colonnes, dont les fûts et les chapiteaux proviennent d'édifices romains ou chrétiens » Dessus-Lamare A., Marçais, G, 1924¹¹⁸

VI.4. Investigation In-Situ

Afin d'acquérir un taux important de connaissances sur la mosquée, un travail de relevés et d'analyses a été établie à plusieurs reprises, pour avoir d'une part une étude préliminaire sur l'état de conservation de la mosquée et reprendre d'autre part l'ensemble des mesures nécessaires pour la modélisation, ceci dans le but d'établir un relevé détaillé du plan et des élévations de la mosquée,

Ci-dessous l'ensemble des instruments utilisés pour accomplir les différentes tâches cités au préalable

- Un décamètre ;
- Un Distancemètre à ultrason « Atlas ATLMUM Ultrasonic Distance Measure Meter Laser Pointer (Feet/Meter) »



Figure 88 :Outil d'investigation

¹¹⁷ Lettre du M.Christofle architecte en chef des monuments historiques à monsieur le directeur de l'intérieur et des beaux-arts. La mosquée du vieux. 21 Juillet 1947.

¹¹⁸ Dessus-Lamare, A et Marçais, G. La mosquée du vieux Ténès. Revue Africaine. 1924, pp. 530-540.

VI.1. Lecture architecturale sommaire de la mosquée du Vieux Ténès

VI.1.1. Environnement

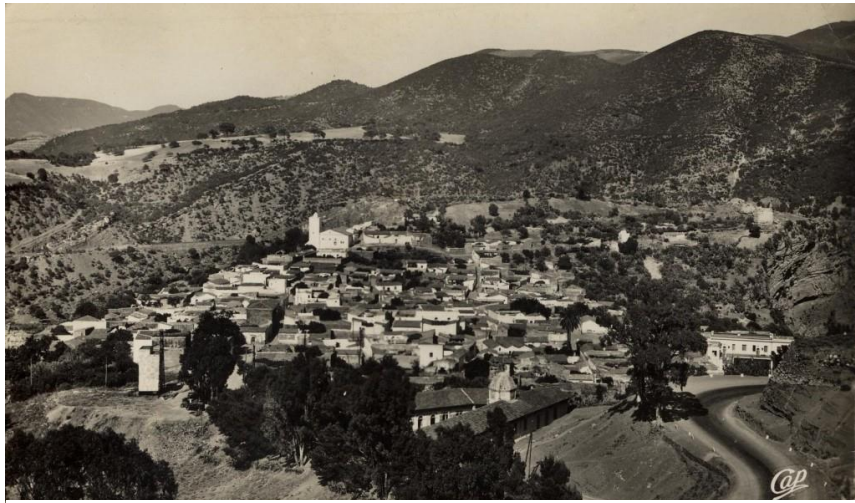


Figure 89 : Environnement de la mosquée du vieux Ténès

La mosquée du vieux Ténès ponctue son site, à l'extrémité du village actuel (Casbah de Ténès) sur un terrain en pente vers le Nord.

VI.1.2. Lecture architecturale

La mosquée couvre un rectangle assez régulier qui mesure, dans ses plus grandes dimensions 18,6 m sur 34,5 m,

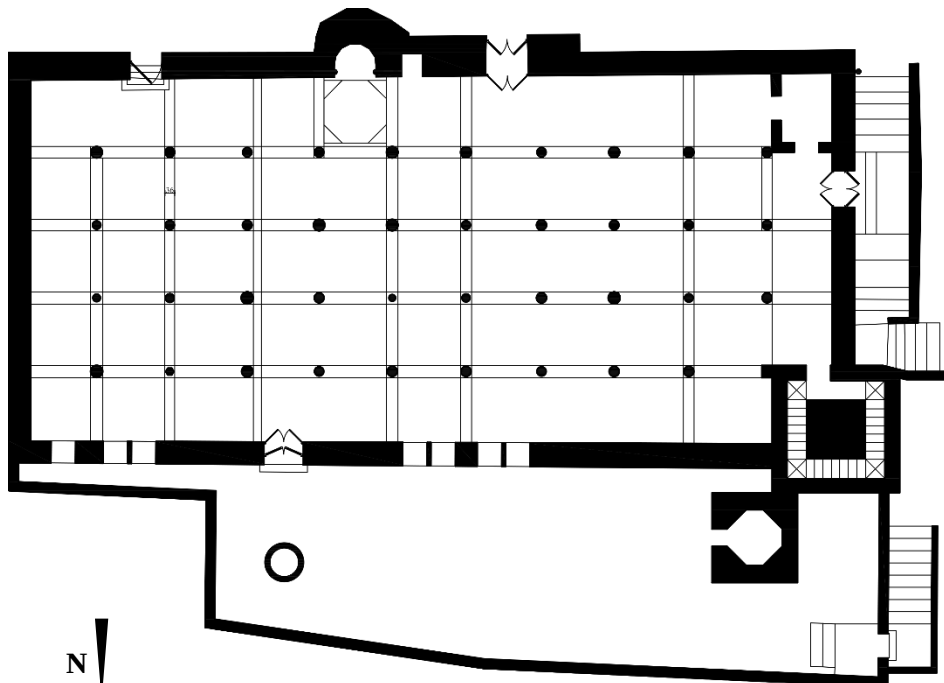


Figure 90 : Plan de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017)

À l'angle Nord-Ouest de la salle de prière, s'élève un minaret carré très simple, de 15,4 m de haut,

Une cour étroite et peu profonde longe la face Nord de la salle de prières. Le niveau de cette cour est de 2 mètres au-dessus de niveau de la rue,

D'après la composition ancienne de la mosquée on remarquait que le mur de la cour ne fut jamais percé d'une porte et que, dès l'origine, les fidèles accédaient dans la mosquée par le coté,

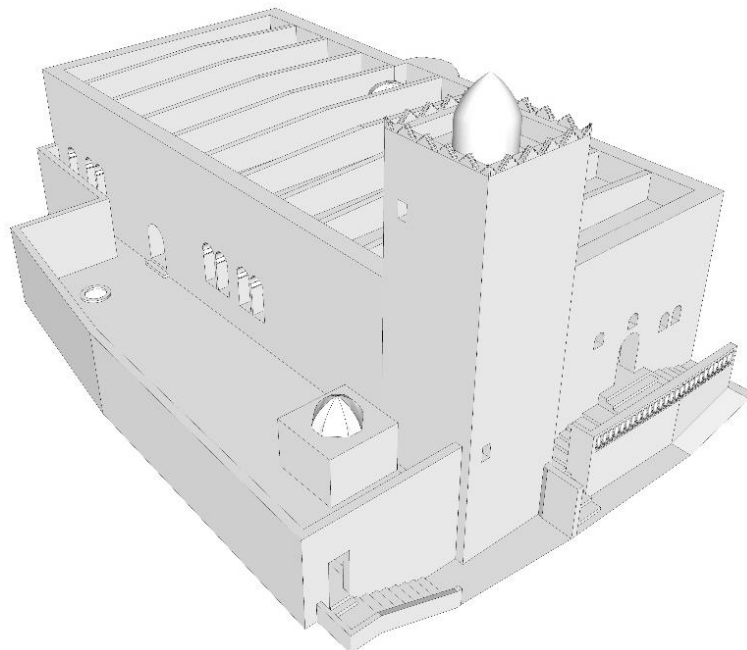


Figure 91 : Volumétrie de la mosquée du vieux Tenes (Auteur,2017)

- On trouve dans la cour un puits, qui sert pour les ablutions ainsi que pour les usagers ménagers des gens du quartier, et un tombeau couvert d'une coupole,
- La mosquée est de type hypostyle avec des nefs parallèle au mur de Qibla,
- Les nefs sont au nombre de cinq, et divisés en onze travées dont quatre supportent des arcs perpendiculaires au mur de la qibla,
- Les arcs sont brisés outrepassé
- L'ensemble des nefs et des travées ont des largeurs variables et se diffèrent les uns des autres ;

VI.1.3. Emplacement du mihrab

La mosquée du vieux Ténès, la grande mosquée de Constantine et la mosquée de Sidi Remdane à Alger sont les seules types qui ont une nef centrale décalée par rapport au mihrab, tandis que toutes les mosquées de l'Algérie qui restent ont un mihrab disposé au milieu du mur de la qibla¹¹⁹

Pour notre cas, La niche de mihrab n'est pas placée parfaitement à l'axe de la nef central, mais plutôt désaxé d'une nef vers l'est, coiffé d'une coupolette à huit pans et elle précédé d'une coupole qui émerge du toit avec une calotte écrasée.

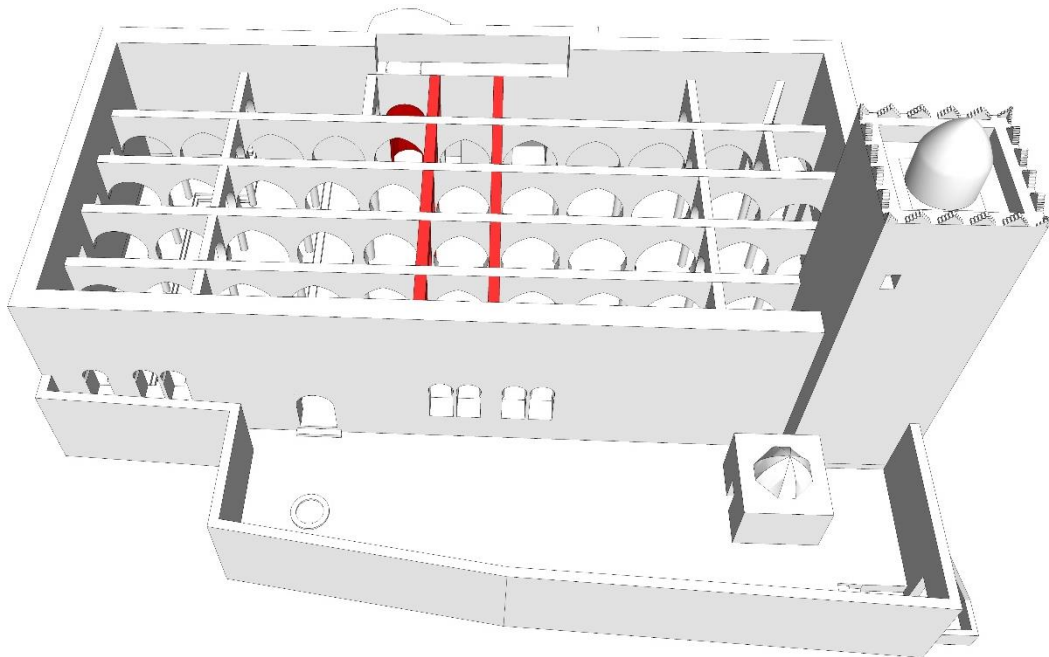


Figure 92 : Emplacement du mihrab de la mosquée du vieux Tenes(Auteur, 2017)

Trois hypothèses peuvent être avancées :

1. Le plan de la mosquée n'a pas été modifié ;
2. La mosquée a été agrandie de deux nefs vers l'ouest ;
3. La mosquée a été amputée de deux nefs du côté de l'est.

La seconde hypothèse n'est pas à retenir puisque d'une part, le minaret qui occupe actuellement l'angle Nord-Ouest aurait été isolé par rapport à la salle de prière, ce qui ne se voit dans aucune mosquée d'Algérie et d'autre part, parce que les colonnes les chapiteaux et les arcs des deux nefs extrêmes sont de la même facture que ceux des autres nefs.

¹¹⁹ Bourouiba, R. Apports de l'Algérie à l'architecture arabo-islamique. Alger : OPNA, 1956.

La troisième hypothèse ne semble pas devoir être retenue, elle non plus, car rien ne justifie l'amputation de deux nefs du côté Est. « Il est donc possible que comme la mosquée de Médine, ce mihrab ait été dès l'origine décalé du côté Est. Ce qui nous incite à avancer cette hypothèse, c'est que la mosquée du Vieux Ténès et sans doute l'œuvre des Idrissides, descendant du prophète, qui ont longtemps occupé la région de Ténès. » (Bourouiba, 1956)

VI.1.4. Les Valeurs de la mosquée du Vieux Ténès

Vu la valeur historique et surtout archéologique de la mosquée de vieux Ténès, cette dernière a été classé monument historique depuis la période coloniale en 1905¹²⁰ et patrimoine national pendant la période postcolonial en 1967.¹²¹

Parmi les valeurs qu'on peut repérer on trouve :

VI.1.4.1. Valeur archéologique

Comme cité auparavant les colonnes de la mosquée sont empruntées des monuments romains de la région, à fûts cylindriques coiffées de chapiteaux (styles dorique, ionique et corinthien) et deux types seulement de style musulman (ziride et hammadite) appartenant au décor végétal et floral stylisé « feuilles aux œillets ».



Figure 93 : Colonnes cylindriques surmontées de chapiteaux. (Auteur, 2016)

¹²⁰ Lettre du M.Christofle architecte en chef des monuments historiques à monsieur le directeur de l'intérieur et des beaux-arts. La mosquée du vieux. 21 Juillet 1947.

¹²¹ Association El athar Chlef. Les sites Historiques. www.castellum-tingitanum.org. [En ligne] Novembre 2016. www.castellum-tingitanum.org/index.php?id=8&cat=sites&id2=14.

VI.1.4.2. Valeur Architectural

Par ses 39 colonnes cylindriques surmontées de chapiteaux antiques aux formes et aux dimensions diverses, par la régularité de ses arcs, par ses impostes carrées ou rectangulaires, la mosquée de Ténès prend une valeur très importante sur le plan architectural. On retrouve plusieurs formes, comme l'arc brisé, et outrepassé ;



Figure 94 : L'intérieure de la mosquée du vieux Tenes(Auteur, 2016)

VI.1.4.3. Valeur stylistique

R. Bourouiba affirme que la mosquée du vieux Ténès offre le plus ancien exemple de mihrâb sur plan polygonal à niche octogonale. Ce modèle a été repris dans toutes les mosquées médiévales de l'Ouest algérien sous l'influence des grandes mosquées de Kairouan et de Cordoue qui ont délaissé la forme curviligne traditionnelle.

Le mihrab de la mosquée du vieux Ténès à la particularité de présenter trois arcs d'ouvertures échelonnées en profondeur, le plus grand est un arc brisé outrepassé et les deux autres sont en forme d'anse de panier.¹²²



Figure 95 : Mihrab de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2016)

¹²² Bourouiba, R. Apports de l'Algérie à l'architecture arabo-islamique. Alger : OPNA, 1956.

VI.2. Etude structurelle de la mosquée du vieux Ténès

VI.2.1. Mur porteur

Les murs porteurs de la salle de prière mosquée du vieux Ténès sont des murs en maçonnerie de pierre de Grès avec de mortier composée de terre de la chaux.¹²³

L'épaisseur de mur varie entre 80 cm et 1,50 m



Figure 96 : Les murs porteurs de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2016)

VI.2.2. Colonnes

La mosquée possède 39 colonnes qui sont majoritairement en pierre à fut cylindrique (mise appart 3 colonnes en marbre)

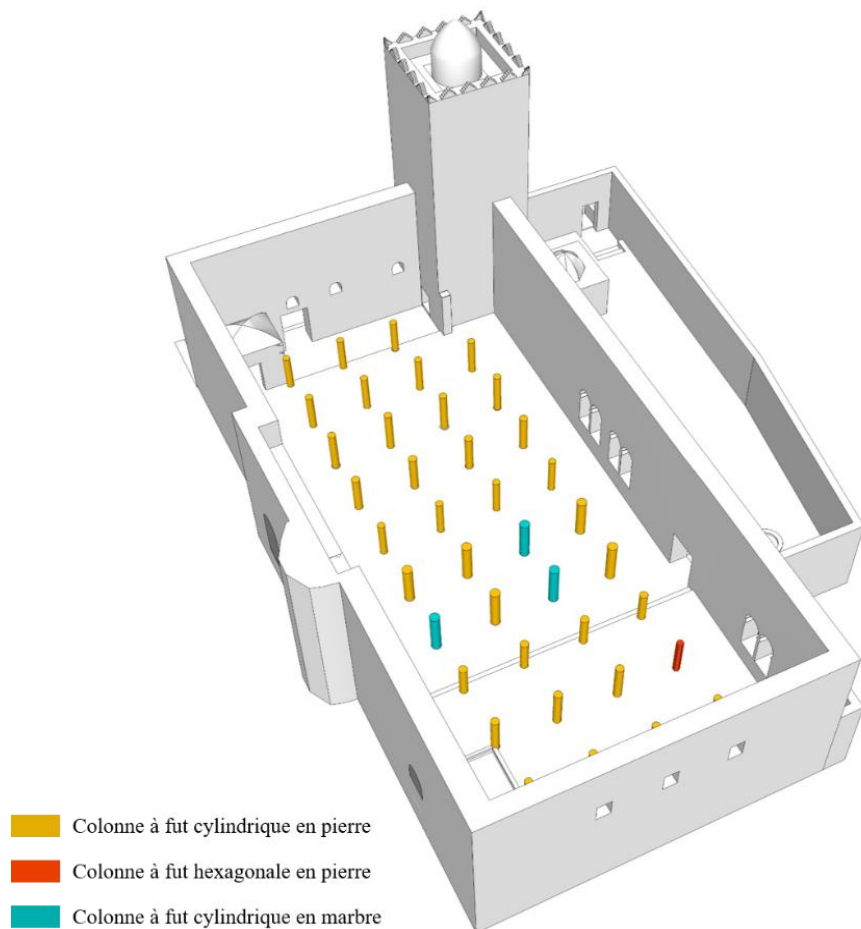


Figure 97 : Les colonnes de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017)

¹²³ Compte rendu de la mission effectuée dans la daïra de Ténès du 30 juillet au 01 septembre 1996. 16 septembre 1996, pp. Réf DACA 111 n° 96, Archives de l'OGEBEC.



Figure 98: a) colonne cylindrique; b) colonne hexagonale; c) colonne ne marbre (Auteur, 2016)

Chaque colonne est composée en plus de son fut cité auparavant d'un chapiteau et un imposte, ces derniers ont une forme en parallélépipède qui ont permis de surélever les arcs au-dessus des colonnes, dont on ne pouvait pas changer la hauteur, puisqu'elles étaient empruntées à d'autres édifices.

Selon Dessus-Lamare A et Marçais, G, les impostes étaient reliées entre elles par des tirants de bois, qui maintiennent l'écartement des murs et consolident l'édifice entier.¹²⁴

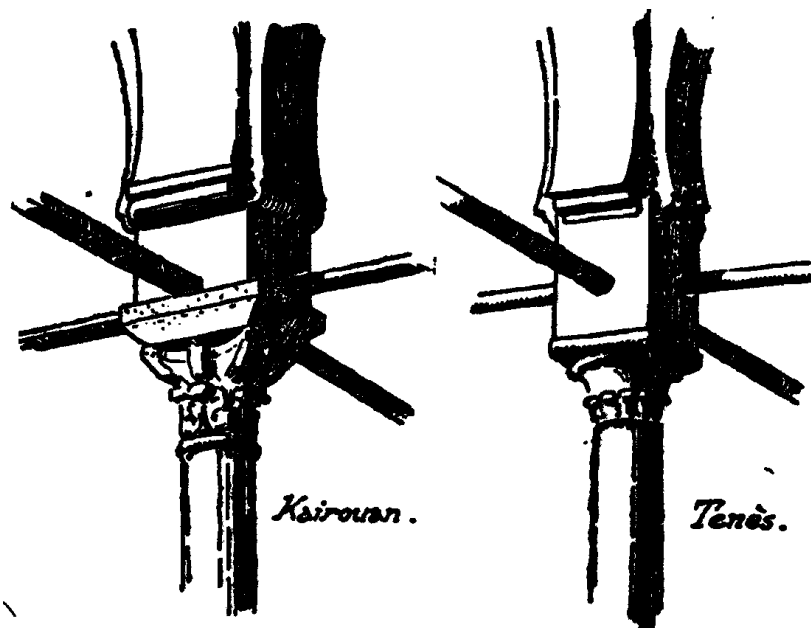


Figure 99: Impostes de la mosquée du vieux Ténès (Dessus-Lamare, et al., 1924)



Figure 100: photo actuelle montre les traces des tirants en bois (Auteur, 2017)

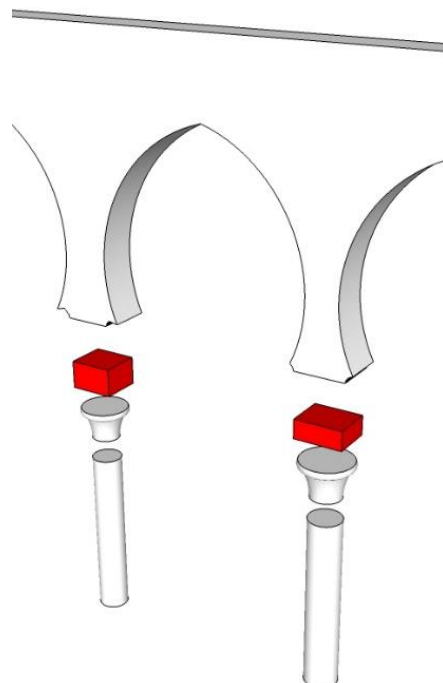


Figure 101: Schéma du système (Colonne+Chapiteau+Imposte), (Auteur, 2017)

¹²⁴ Dessus-Lamare, A et Marçais, G. La mosquée du vieux Ténès. Revue Africaine. 1924, pp. 530-540.

VI.2.3. Toiture

La toiture actuelle est en béton armée, réalisée avec une dalle pleine et des poutres renversées.



Figure 102 : Toiture de la mosquée du vieux Ténès (Auteur, 2017)

VI.2.1. Composition globale

Ci-contre une représentation générale qui nous montre les différents éléments porteurs qui composent la mosquée

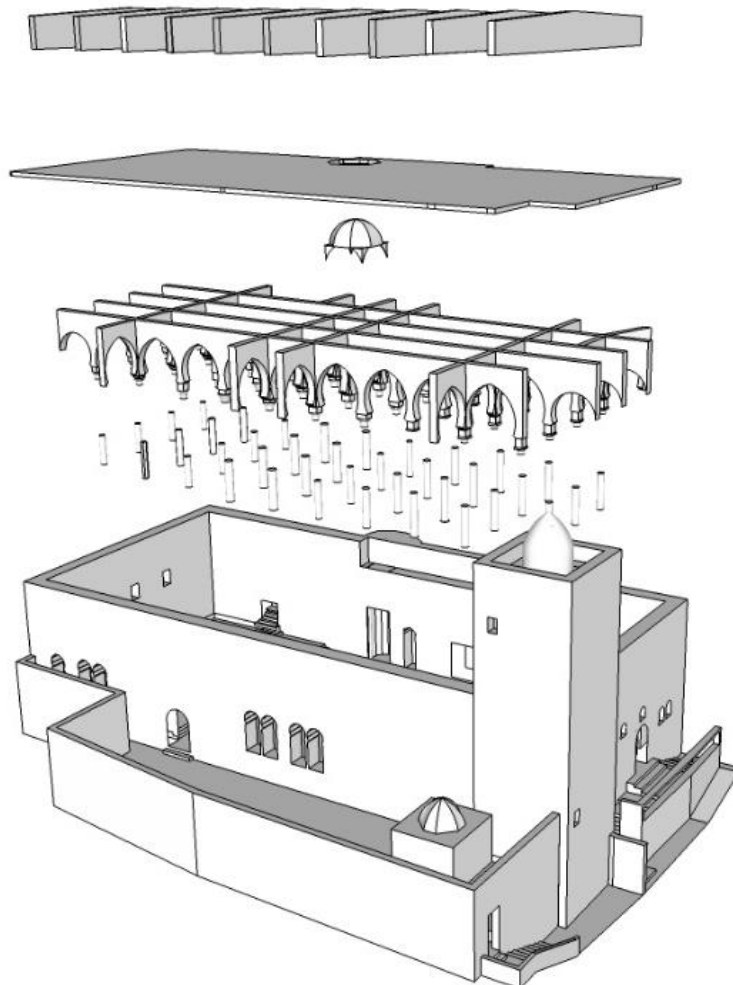


Figure 103:
Axonométrie éclatée de
la mosquée du vieux
Ténès (Auteur, 2017)

VI.3. Les projets de restaurations de la mosquée du vieux Ténès

VI.3.1. Modification avant le 1924

Selon Dessus-Lamare A et Marçais, G, la toiture originale de la mosquée du Vieux Ténès était une toiture terrasse,¹²⁵

« ...La salle de prières est actuellement couverte par un grand toit à deux pentes, dont les pignons ont été élevés au-dessus des murs latéraux Est et Ouest. Un examen du sommet des murs bordant les nefs et le souvenir des gens du pays, notamment de l'imam Si 'Othman, attestent que la mosquée était naguère couverte par des terrassas. Leur délabrement les fit remplacer par le toit de tuile, qui défigure maintenant l'édifice... » Dessus-Lamare A., Marçais, G, 1924¹²⁶

L'information fournie par George Marçais et Dessus Lamare atteste que la terrasse de la mosquée a été changée à une date indéterminée par une toiture à deux pentes

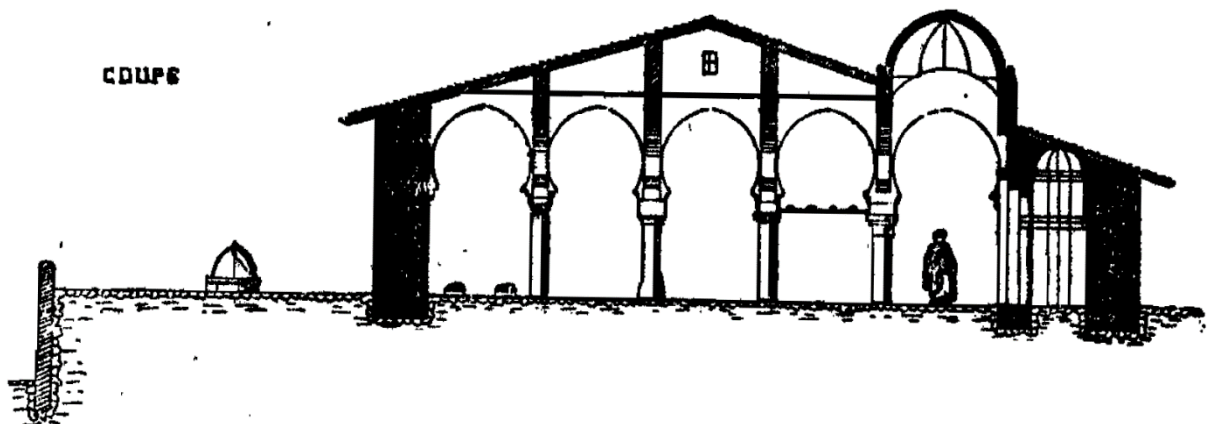


Figure 104 : Coupe de la mosquée avant 1924, (Dessus-Lamare, et al., 1924)

¹²⁵ Marçais, G. L'Algérie médiévale, Monuments et paysage Historiques. Paris : Arts et métiers graphiques, 1957.

¹²⁶ Dessus-Lamare, A et Marçais, G. La mosquée du vieux Tenes. Revue Africaine. 1924, pp. 530-540.

VI.3.2. Projet de restauration après le séisme D'Orléansville 1954

Après le séisme d'Orléansville en 1954, l'édifice a subi d'important changement :

La toiture en tuiles a été remplacée par une dalle en béton armée avec des poutres renversé prenant appui sur les murs Nord et Sud.¹²⁷

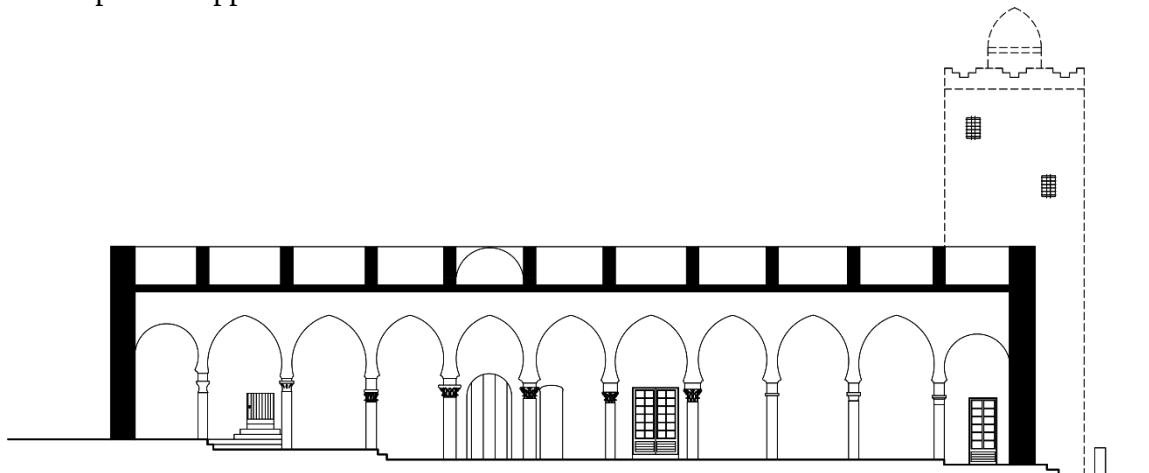
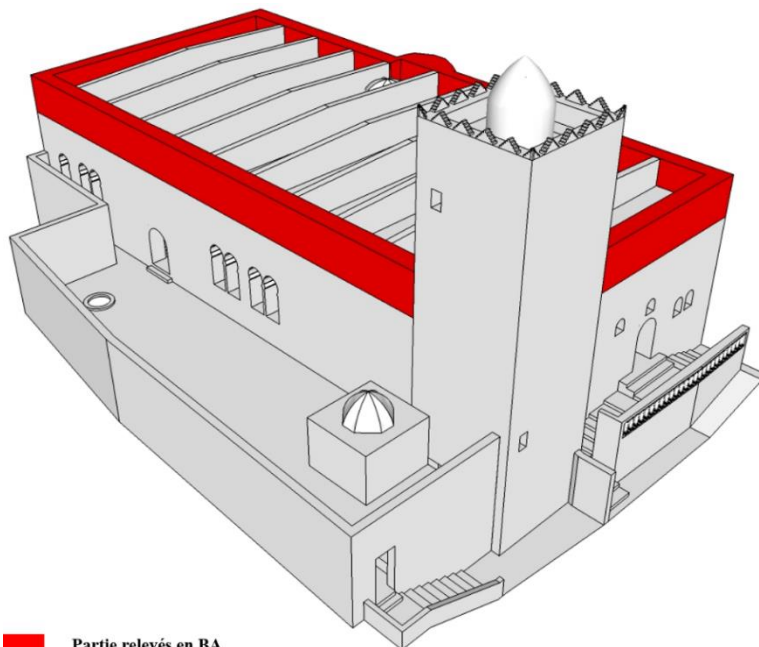


Figure 105 : Coupe de la mosquée après 1954(Auteur, 2017)

Les conséquences de cette transformation :

VI.3.2.1. Modification du volume initial :

De l'extérieur, les murs et l'acrotère de la salle de prières ont été relevés de 2 mètres environ, ce qui a pour effet de masquer complètement la coupole située devant le mihrab et de changer les rapports de hauteur entre le minaret et la hauteur d'origine de la salle de prière.¹²⁸



Partie relevés en BA

Figure 106 : Mosquée du vieux Ténès « partie relevés en Béton armé », (Auteur, 2017)

¹²⁷ Ravereau, Andre. Mission du 18/06/1968 à Ttenes et Miliana. s.l. : Ref DACA 2 N°887 / Mts.h. Archive de l'OGEBEC, 1968.

¹²⁸ Ibid

Intérieurement, le niveau du plafond a été relevé de 60 CM environ

D'après les textes historique, nous constatons que c'est la deuxième modification importante apportée à la couverture de cette mosquée depuis sa création, la première a été le remplacement de la toiture terrasse d'origine par celle en tuile, disparue en 1954.

Cette dernière, bien que non conforme aux dispositions originales avait néanmoins le mérite d'altérer beaucoup moins le volume que la solution actuelle.¹²⁹

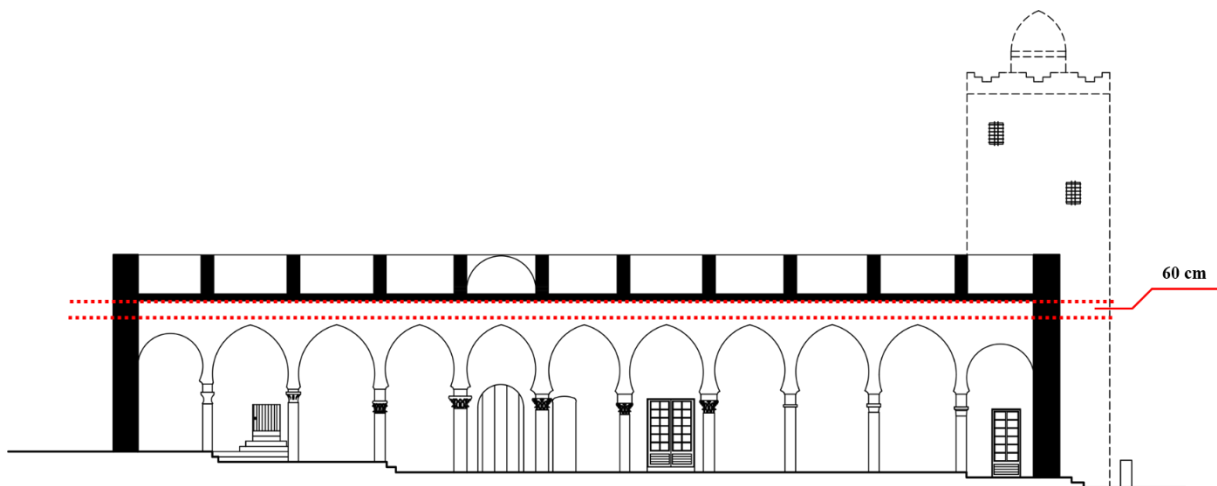


Figure 107 : Coupe de la mosquée après 1954 montrant la surélévation du plafond (Auteur, 2017)

VI.3.2.2. Etanchéité de la couverture

La couverture est constituée d'une étanchéité de type « Pax-Alumin » placée sur la toiture.¹³⁰

Les infiltrations sont provoquées actuellement :

- Par le décollement a plusieurs endroits des relevés de solins.
- Par la mauvaise exécution de certains joints d'étanchéité, notamment dans le trou pratiqué au travers la poutre à l'angle Sud Est du Minaret

- Par la stagnation des eaux en terrasse, provoquée par la mauvaise évacuation d'eau.



Figure 108 : Couverture de la mosquée (Auteur, 2017)

¹²⁹ Ibid

¹³⁰ Ibid

VI.4. État de conservation de la mosquée du vieux Ténès

VI.4.1. Dégradation de certaines colonnes

Certaines colonnes présentent des dégradations avancées et des effritements à cause de l'humidité très élevée dans le site



Figure 109 : Dégradation de certaines colonnes

VI.5. Conclusion

La mosquée du Vieux Ténès présente un intérêt archéologique et architectural, voir ses éléments qui la composent et aussi les singularités qu'il possède,

Cette richesse perpétue encore à nos jours malgré les différents risques qui ont touché cette dernière, tels que le risque sismique qui a engendré plusieurs modifications à travers des projets de restaurations après chaque tremblement de terre,

Ces nouvelles dispositions peuvent provoquer de leurs parts des dégâts et des altérations à cause de la mauvaise stratégie de restauration et du mauvais choix de la technique,

L'étude numérique va essayer d'évaluer le niveau de performance de cette mosquée vis-à-vis de l'action sismique après toutes ces modifications.

vii. Etude numérique à l'aide de logiciel Robot Structural Analysis 2017

VII.1.Introduction

La mosquée du Vieux Ténès, demeure un passé très riche, mais aussi intrigant sur le plan historique, architectural et même structurel, en ce qui concerne notre champ d'étude, il est clair que les interventions qui ont affecté cette mosquée ont un effet sur son comportement structurel,

Une structure ancienne en charpente en bois avec toiture en tuile, affirme une grande légèreté si on la compare avec celle qui a été mise lors de la restauration d'après le séisme de 1954, constitué par une nouvelle structure en Béton armé qui vient se greffer à l'ancienne,

Nous devons se poser plusieurs questions, la plus sommaire, est la suivante :

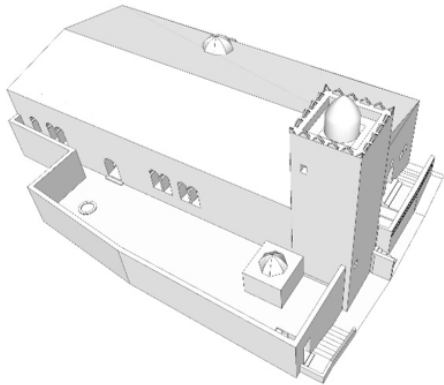
« Quels sont les effets engendré sur la mosquée du vieux Ténès après les modification qui ont touché sa structure? »

Notre interrogation à mener la réflexion vers un schéma d'analyse qui se base sur la comparaison entre deux modèles à savoir la mosquée avant la modification du 1954 et après cette dernière ;

Nous devons simuler le comportement structurel de la mosquée en question face à un éventuel séisme, le schéma ci-après résume en générale le phasage de l'analyse.

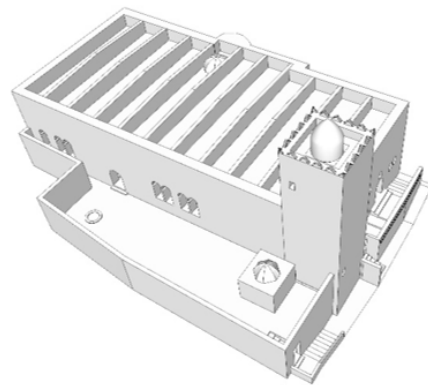
Modélisation des deux modèles de la mosquée du vieux Ténès

Modèle « Mosquée Avant Modification »



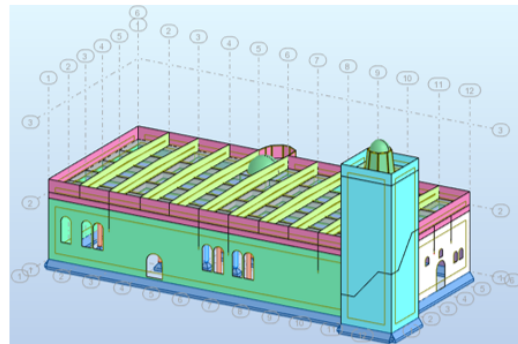
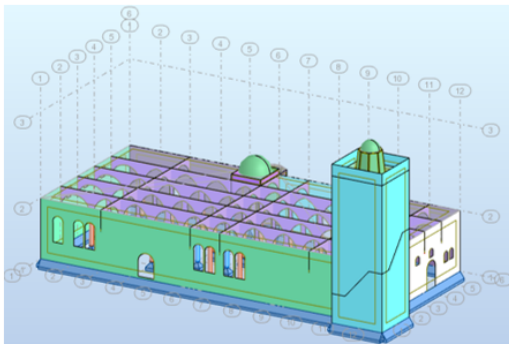
La mosquée avant le séisme du 1954
(Toiture en tuile avec charpente en bois)

Modèle « Mosquée après Modification »

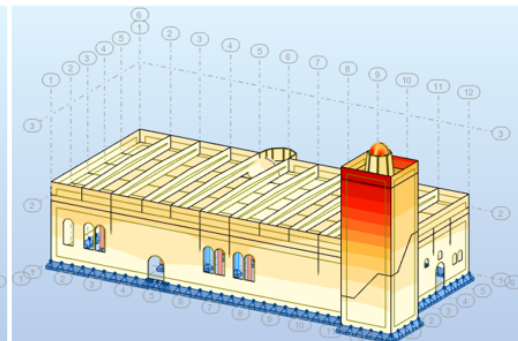
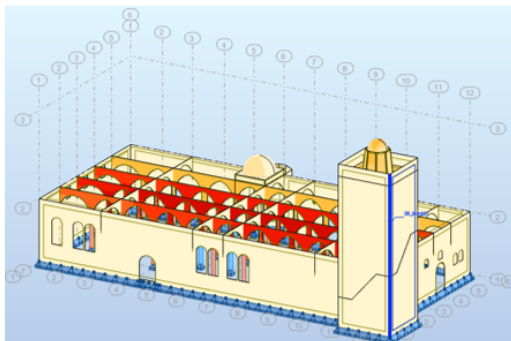


La mosquée après le séisme du 1954
(couverture composé de poutre et
d'une dalle en Béton armé)

Simulation numérique des deux structures sur Robot 2017



Résultats de simulation



Conclusion et discussion des résultats

Figure 110 : le phasage de l'analyse (Auteur, 2017)

VII.2.Modélisation des modèles Sur Robot structural analysis 2017

VII.2.1. Considération générales

- La modélisation de la mosquée du vieux Ténès a été effectuée à la base d'un relevé réalisé par l'auteur, en prenant appui sur différents documents et en tenant compte les différents mesures et détails qu'on a trouvé et qu'on a pu avoir accès à ces derniers, car il est important de signaler que ce travail a été réalisé en faisant face à plusieurs difficultés tels que les différents empêchements lors de chaque visite à la mosquée par les responsables,
- Afin de simplifier la modélisation toutes les colonnes introduites dans le modèle Robot ont la même section moyenne $\varnothing = 38 \text{ cm}$;
Remarque : les colonnes possèdent des sections variables, la différence entre la grande et la plus petite section est de $38 \pm 8,4 \text{ cm}$;
- Vu que l'ensemble « Fut de colonne, Chapiteau et imposte » possède le même matériau à savoir la pierre du Grès, on suppose que ce groupe compose un seul élément lors de la modélisation sous Robot.

VII.2.2. Etapes de modélisation de la mosquée du vieux Ténès

VII.2.2.1. Modèle 01 « La mosquée avant le séisme du 1954 »

1. Modélisation des colonnes :

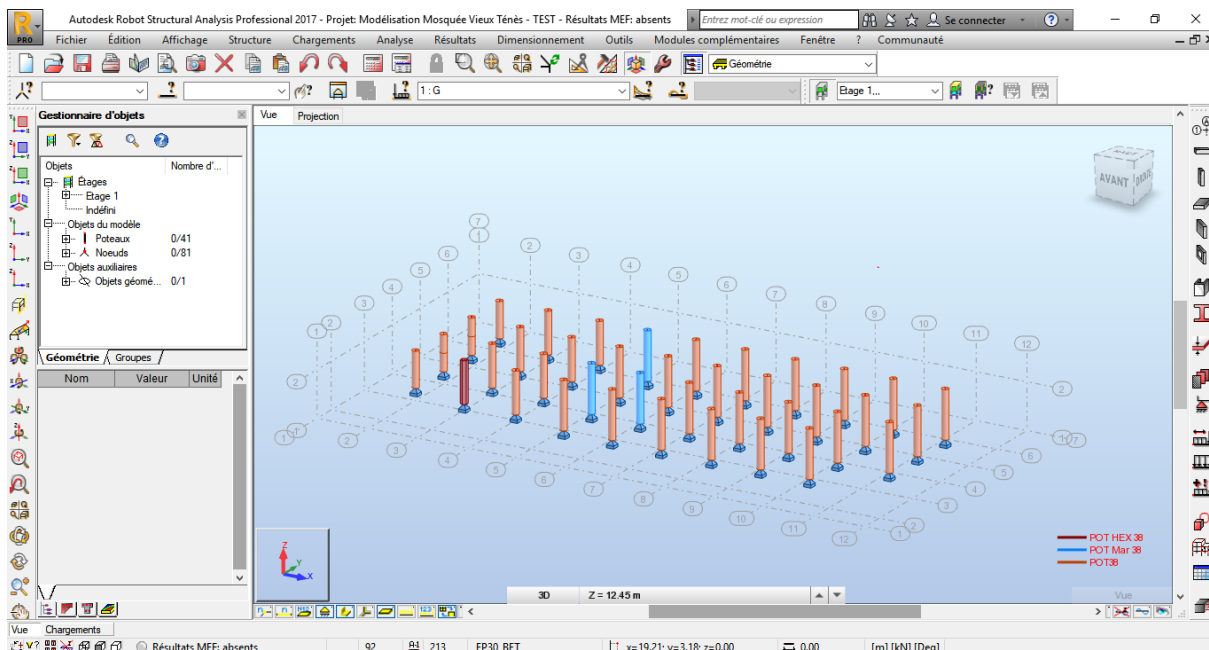


Figure 111 : Modélisation des colonnes(Auteur, 2018)

2. Modélisation des murs porteurs extérieurs

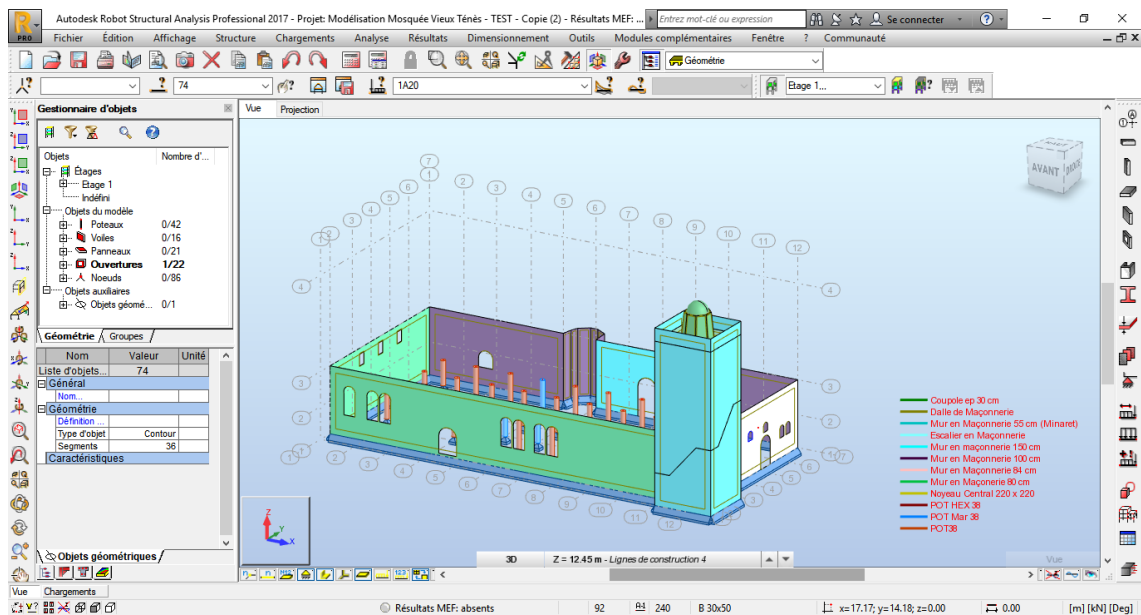


Figure 112 : Modélisation des murs porteurs extérieurs(Auteur, 2018)

3. Modélisation des arcs et coupole

La modélisation des arcs est faite tout d'abord par l'intégration du tracé géométrique des arcs dans le modèle Robot,

On trouve deux types d'arcs dans la mosquée du vieux Ténès, l'arc brisé outrepassé à deux centres et l'arc en plein cintre outrepassé ;

Les figures ci-après résument les étapes comme suit :

A) Tracé géométrique des arcs

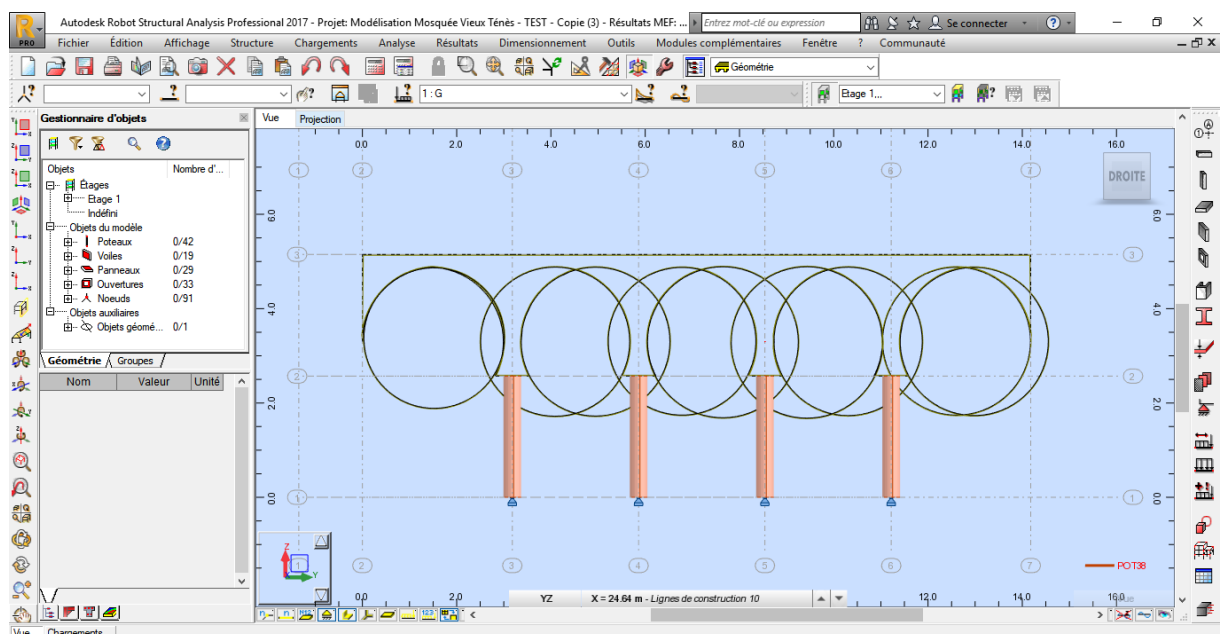


Figure 113 : Tracé géométrique des arcs(Auteur, 2018)

B) Création du contour du mur

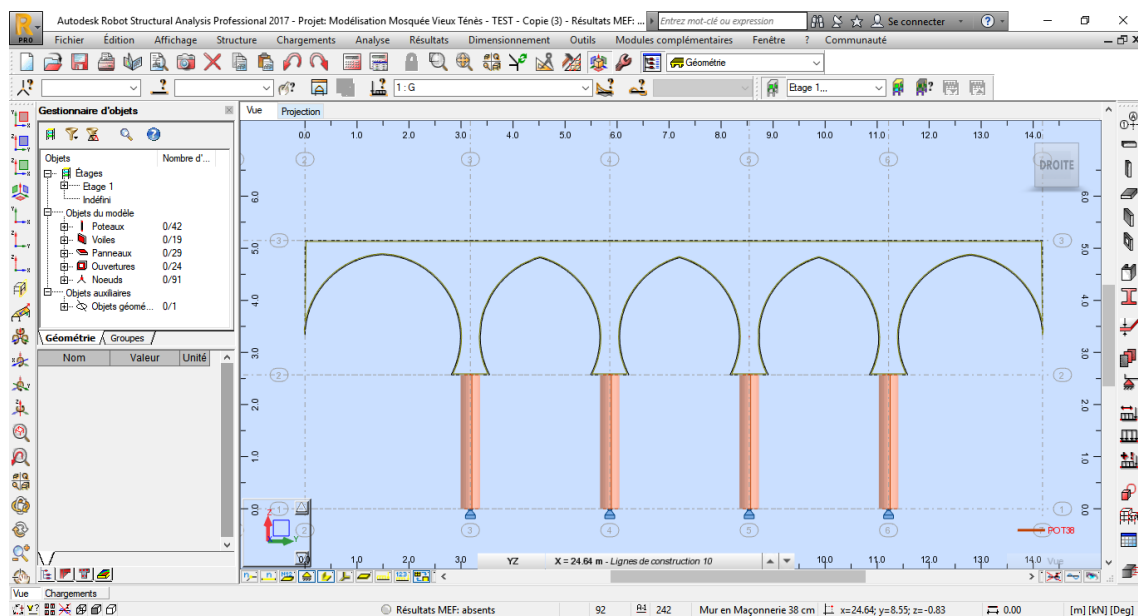
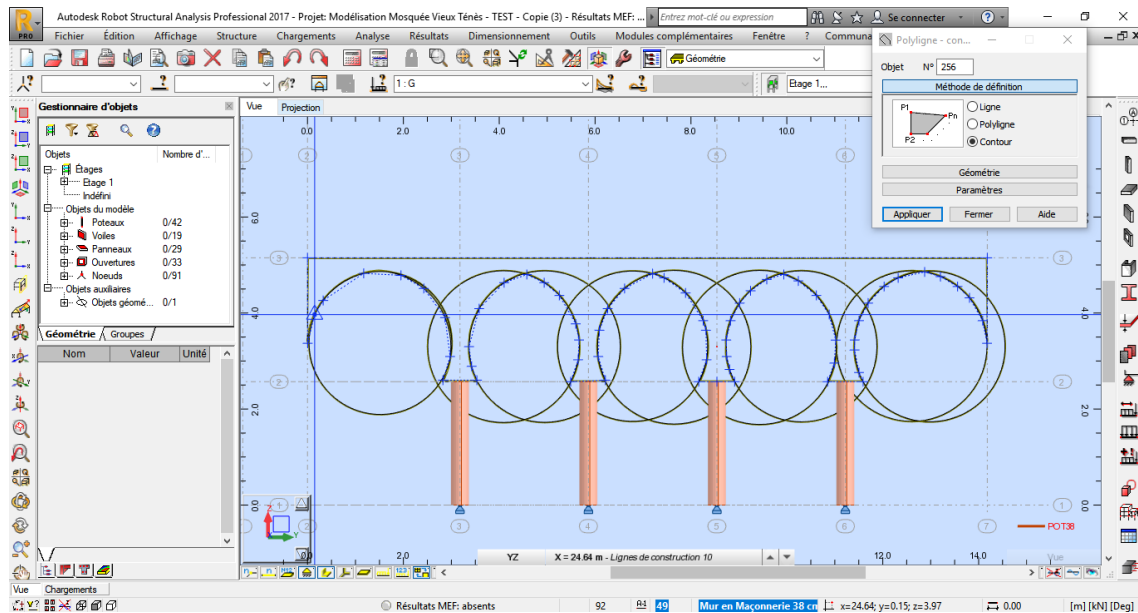


Figure 114 :Création du contour du mur(Auteur, 2018)

C) création du mur avec outil panneau

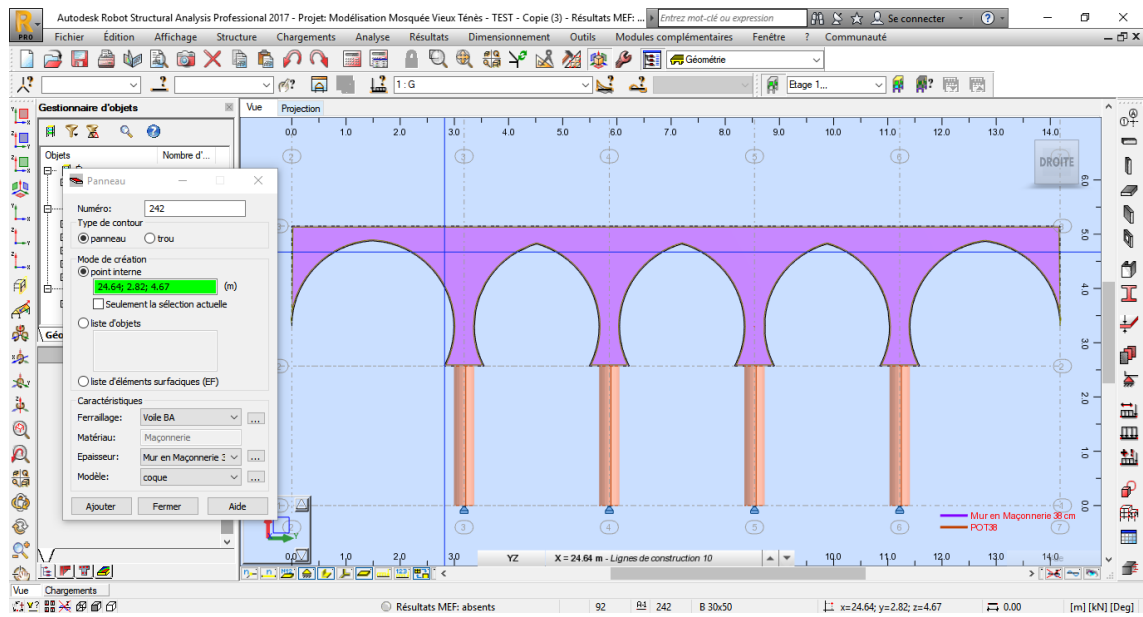


Figure 115 : création du mur avec outil panneau(Auteur, 2018)

D) résultat

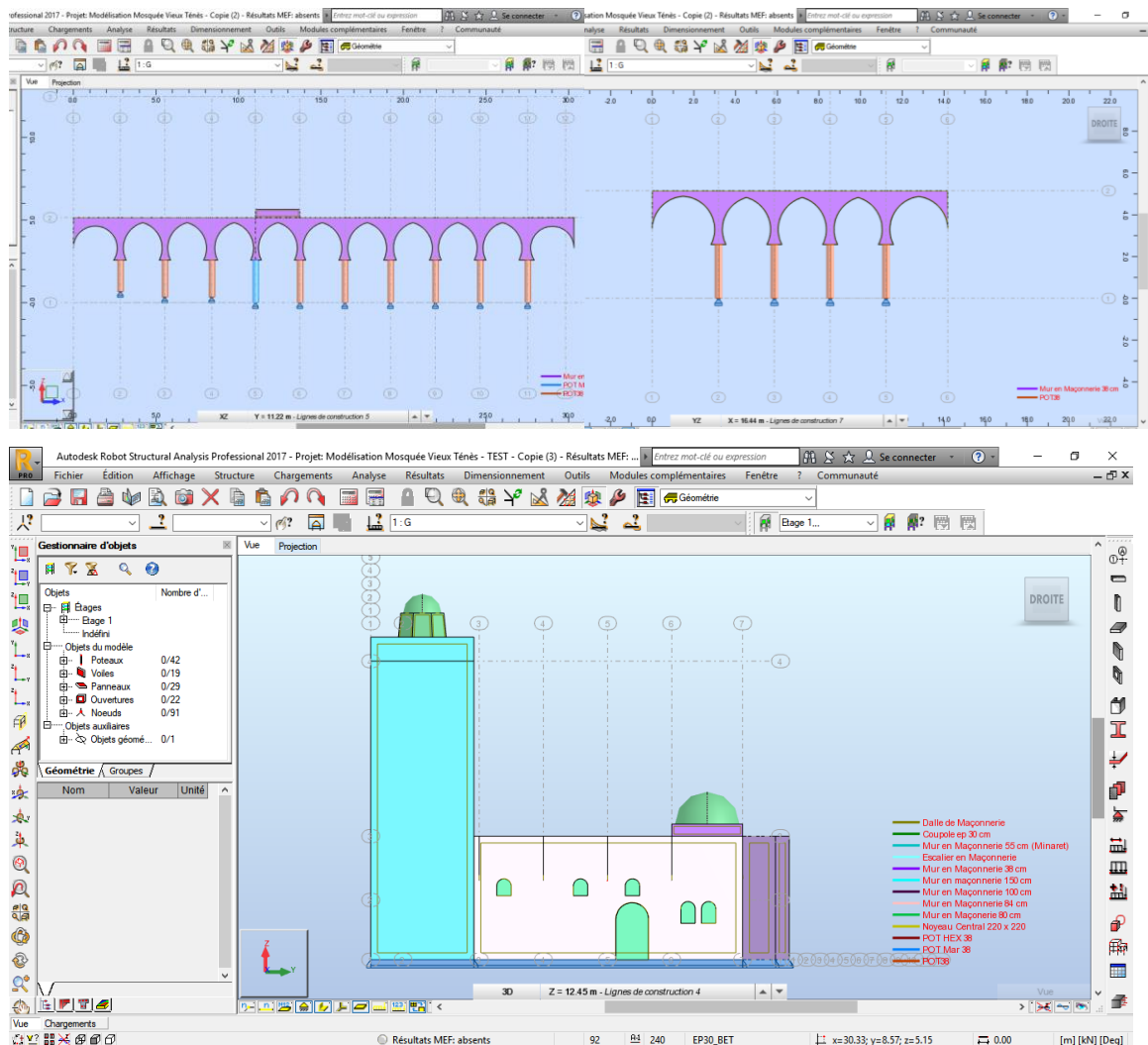


Figure 116 : Résultats(Auteur, 2018)

4. Modélisation de la toiture en charpente en Bois

Vue le manque d'information concernant cette partie de la mosquée, la partie toiture a été introduite au Robot sous forme d'un bardage qui possède un poids de 70 kg/m²

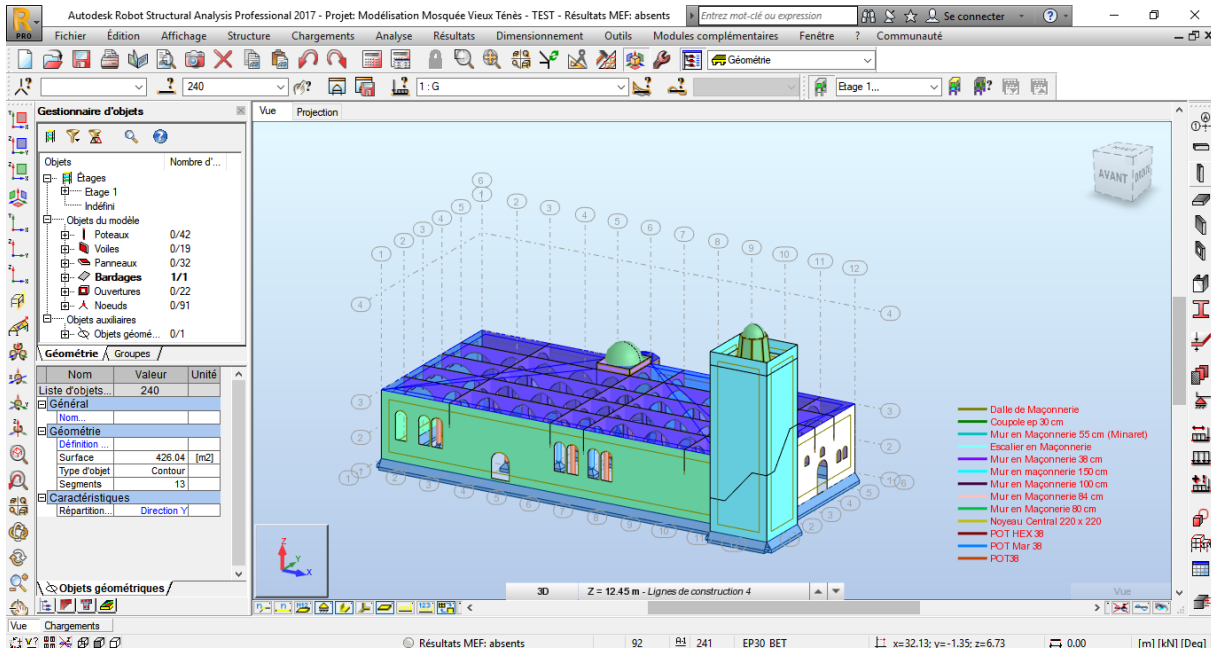


Figure 117 : Modélisation de la toiture en charpente en Bois (Auteur, 2018)

VII.2.2.2. Modèle 02 « La mosquée après le séisme du 1954 »

Suite aux étapes qu'on a montrées dans le modèle 01, la modélisation de la mosquée après la restauration du 1954 a englobée toute les modifications apportées lors de cette restauration, à savoir les mus, la dalle et les poutres en béton armé

1. Modélisation des murs en béton armé

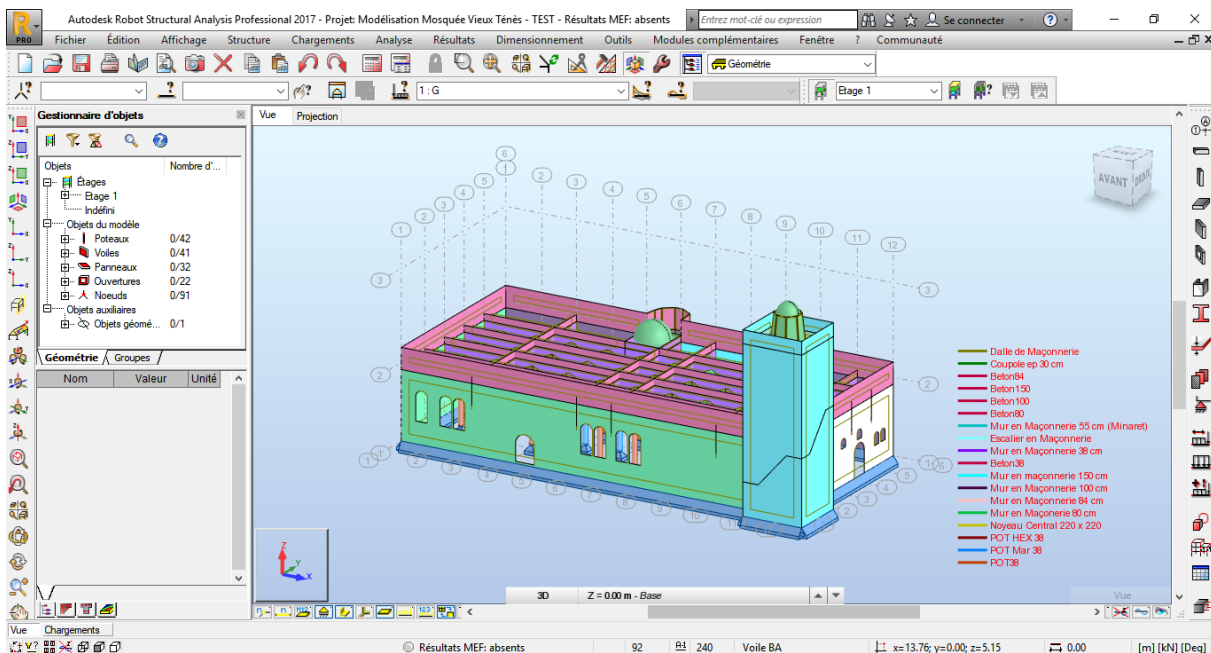


Figure 118 : Modélisation des murs en béton armé (Auteur, 2018)

2. Modélisation de la dalle en béton armé

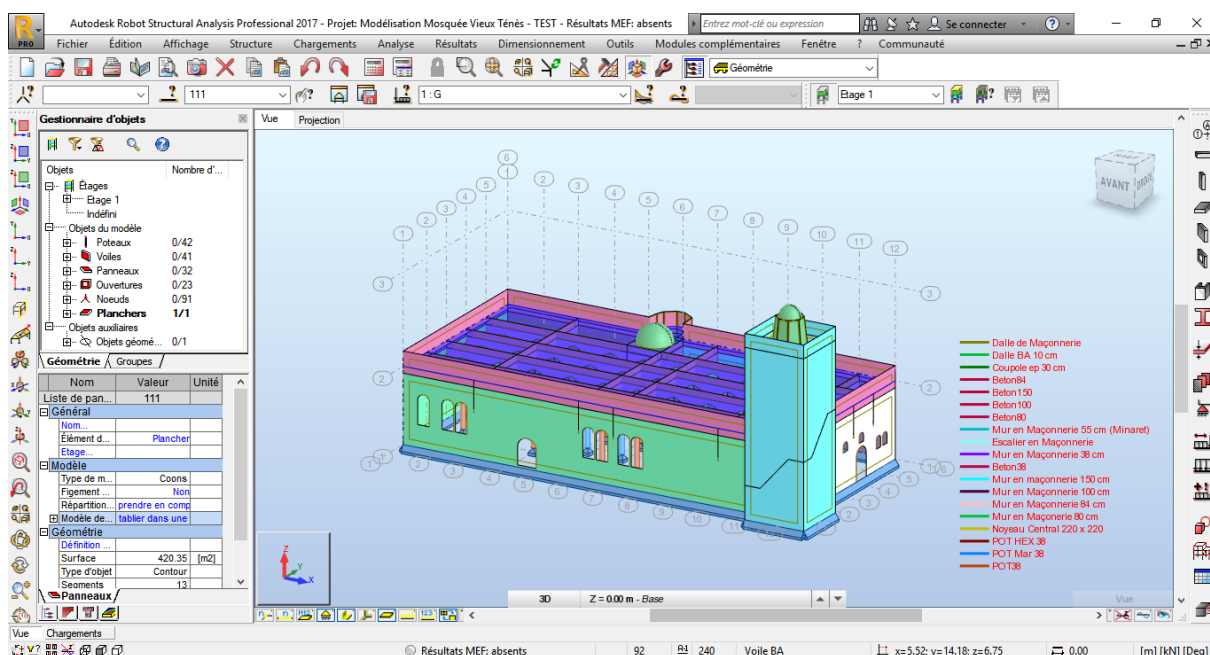


Figure 119 : Modélisation de la dalle en béton armé (Auteur, 2018)

3. Modélisation des poutres en béton armé

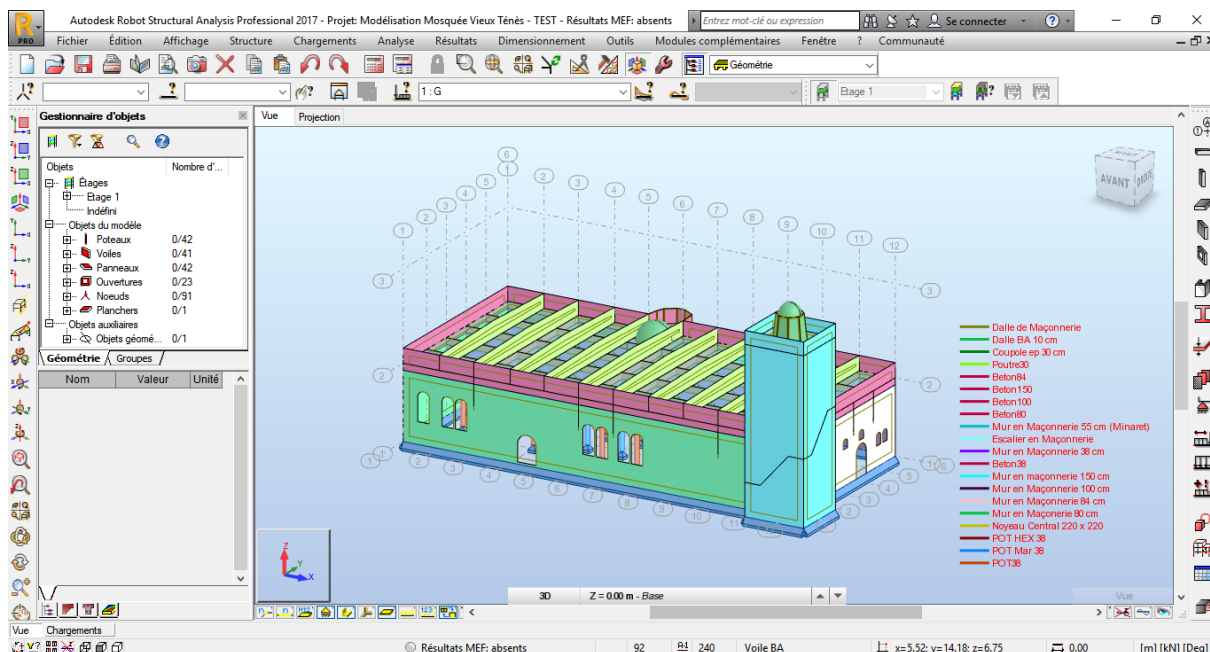


Figure 120 : Modélisation des poutres en béton armé (Auteur, 2018)

VII.2.2.3. Introduction des propriétés mécaniques des matériaux

1. Propriété mécanique de la maçonnerie

The screenshot shows the 'Définition du matériau' dialog box with the 'Maçonnerie' material selected. The 'Nom' field is set to 'Maçonnerie' and the 'Description' field is set to 'Maçonnerie'. The 'Elasticité' section contains the following values: module de Young E: 8500.00 (MPa), coefficient de Poisson ν : 0.3, and module de cisaillement G: 800.00 (MPa). The 'Résistance' section contains: de calcul: 22.00 (MPa) and réduction pour le cisaillement: 1.54. The 'Poids spécifique (poids)' is 4.00 (kN/m³), 'Expansion thermique' is 0.000011 (1/°C), and 'Coefficient d'amortissement' is 0.02. The 'Ajouter' button is highlighted.

Figure 121 : Propriété mécanique de la maçonnerie (Auteur, 2018)

2. Propriété mécanique du béton armé

On suppose que la partie Béton a été réalisée avec un béton de 25 MPa

The screenshot shows the 'Définition du matériau' dialog box with the 'Béton' material selected. The 'Nom' field is set to 'BETON25' and the 'Description' field is set to 'Béton $f_{c28}=25$ Mpa (C25/30)'. The 'Elasticité' section contains the following values: module de Young E: 32000.00 (MPa), coefficient de Poisson ν : 0.2, and module de cisaillement G: 13300.00 (MPa). The 'Résistance' section contains: Caractéristique: 25.00 (MPa) and Échantillon: Cylindrique. The 'Poids spécifique (poids unitaire)' is 24.53 (kN/m³), 'Expansion thermique' is 0.000010 (1/°C), and 'Coefficient d'amortissement' is 0.04. The 'OK' button is highlighted.

Figure 122 : Propriété mécanique du béton armé (Auteur, 2018)

VII.2.2.4. Introduction des charges

1. Introduction du poids propre de la mosquée

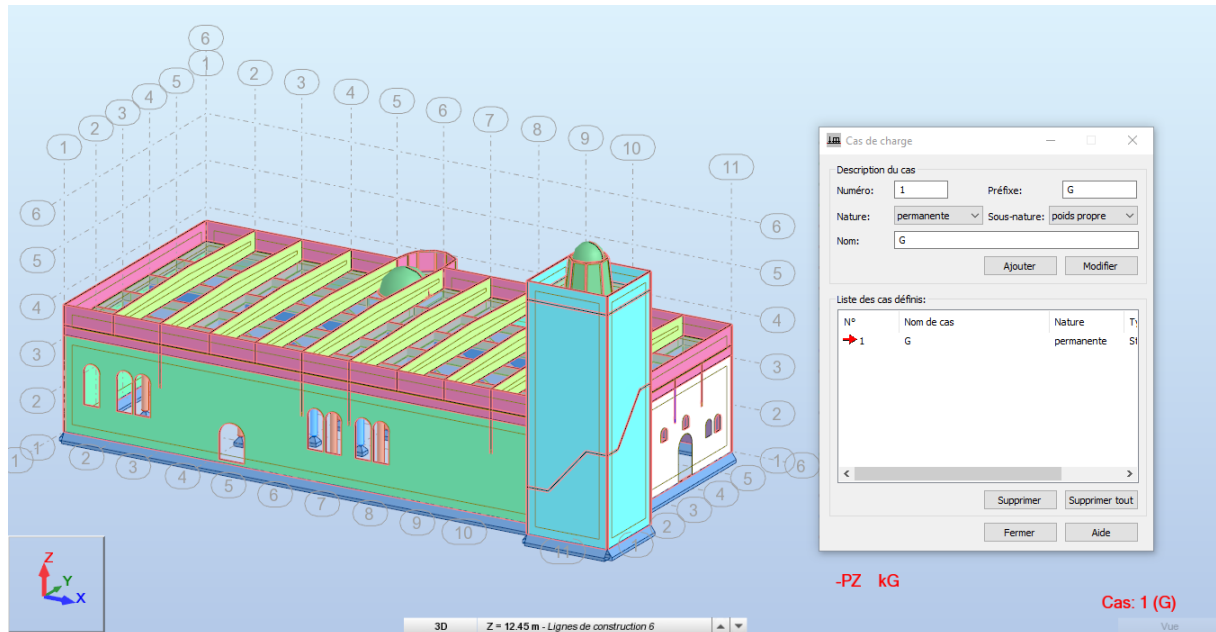


Figure 123 : Introduction du poids propre de la mosquée(Auteur, 2018)

2. Introduction de la charge permanente de la dalle

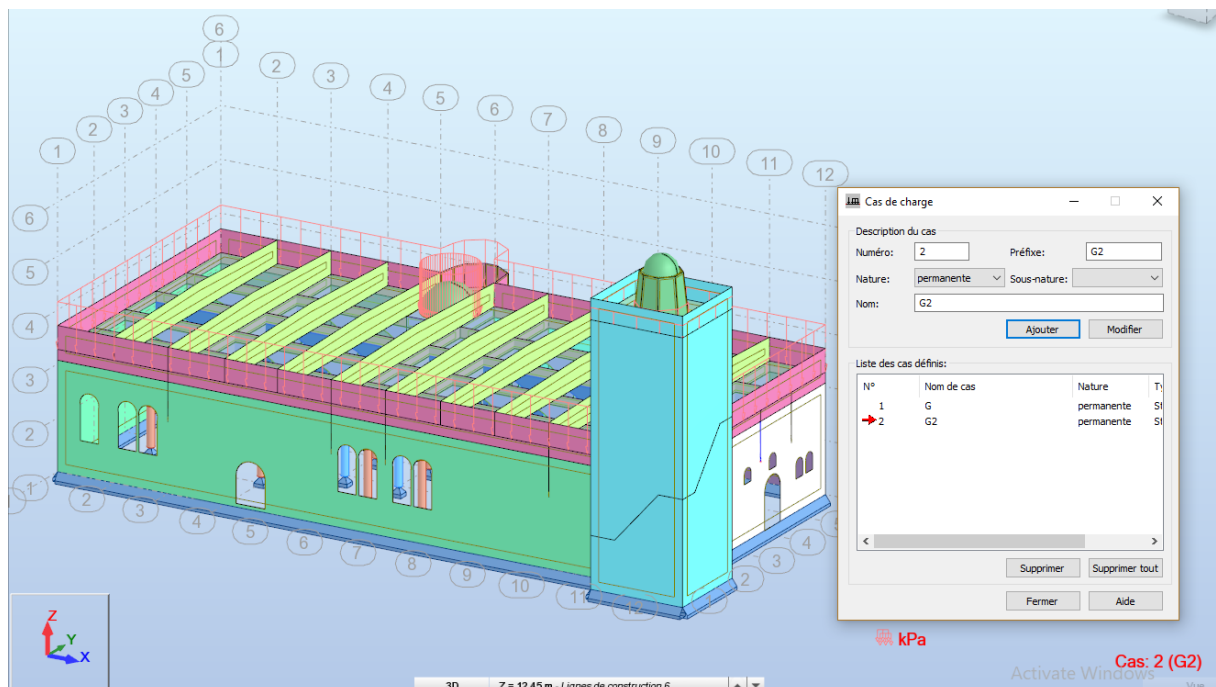


Figure 124 : Introduction de la charge permanente de la dalle (Auteur, 2018)

3. Introduction de la charge d'exploitation de la dalle

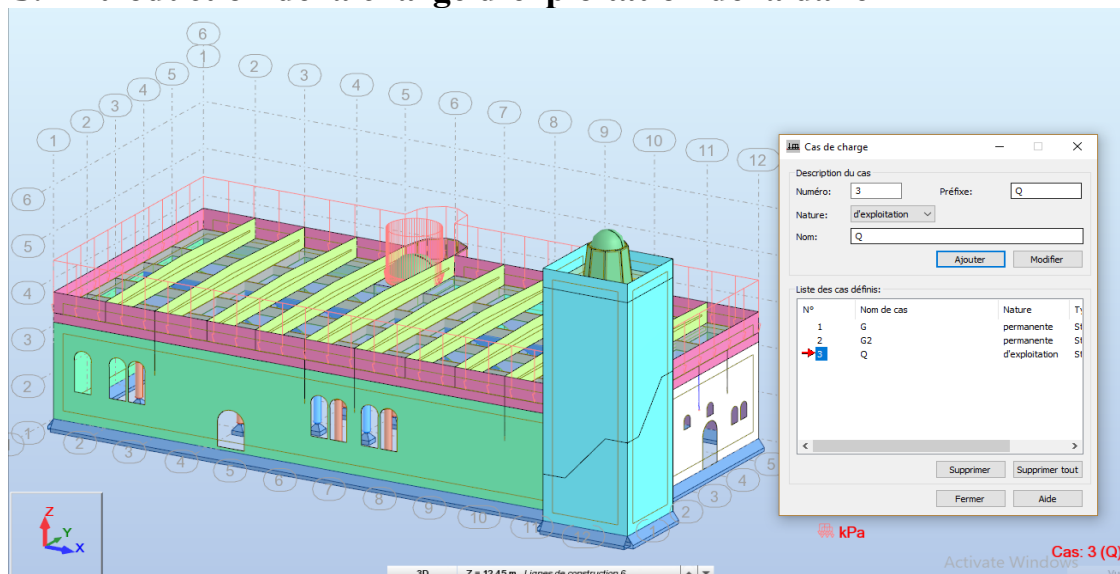


Figure 125 : Introduction de la charge d'exploitation de la dalle (Auteur, 2018)

Les deux tableaux ci-après représentent l'ensemble des charges introduites dans le model Robot

Cas	Type de charge	Nature d'élément	Valeur
G	Poids propre	Structure entière	/
G2	Charge permanente	Toiture en tuile en charpente en bois	70 kg/m²
G2	Charge permanente	Dalle de maçonnerie avec rondins du bois du minaret	70 kg/m²
Q	Charge d'exploitation	Dalle de maçonnerie avec rondins du bois du minaret	40 kg/m²

Tableau 18 : charges introduites dans le model Robot, Model Avant 1954 (Auteur, 2018)

Cas	Type de charge	Nature d'élément	Valeur
G	Poids propre	Structure entière	/
G2	Charge permanente	Dalle en béton armé	270 kg/m²
Q	Charge d'exploitation	Dalle en béton armé	100 kg/m²
G2	Charge permanente	Dalle de maçonnerie avec rondins du bois du minaret	70 kg/m²
Q	Charge d'exploitation	Dalle de maçonnerie avec rondins du bois du minaret	40 kg/m²

Tableau 19 charges introduites dans le model Robot, Model Apres 1954 (Auteur, 2018)

4. Introduction de la charge sismique

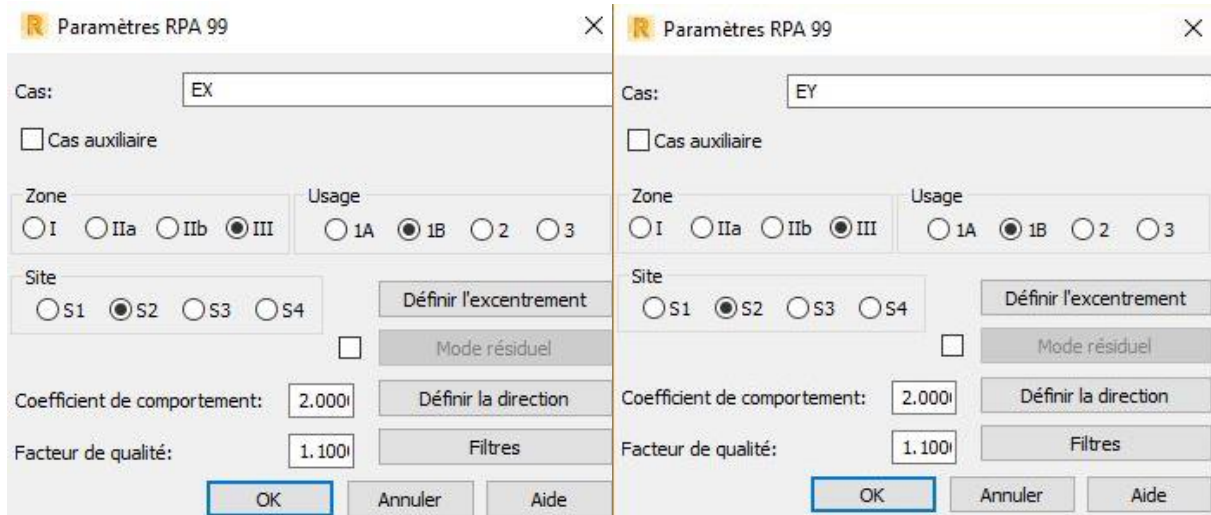
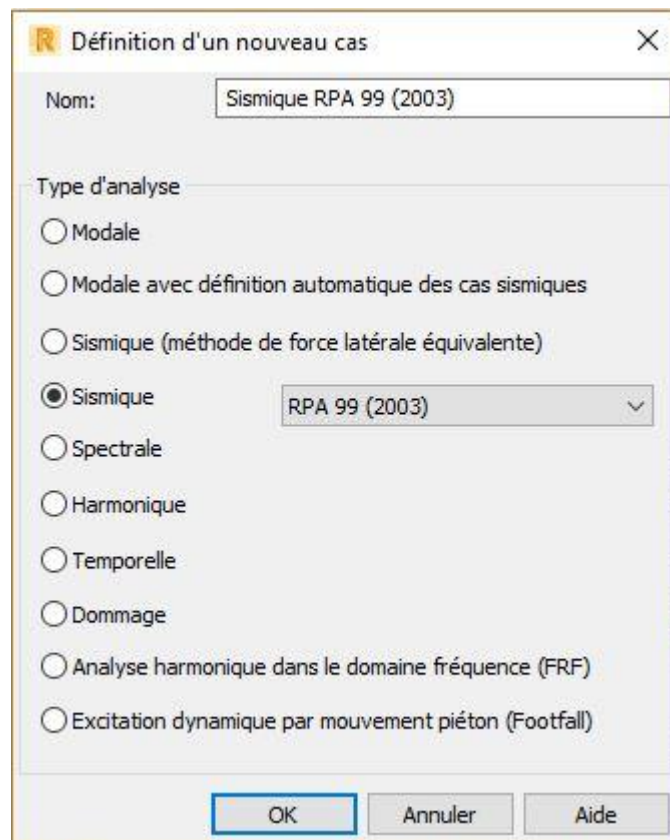


Figure 126 : Introduction de la charge sismique(Auteur, 2018)

Coefficient du poids total de la structure

Le coefficient de pondération de la charge d'exploitation de la mosquée est $\beta = 0.3$

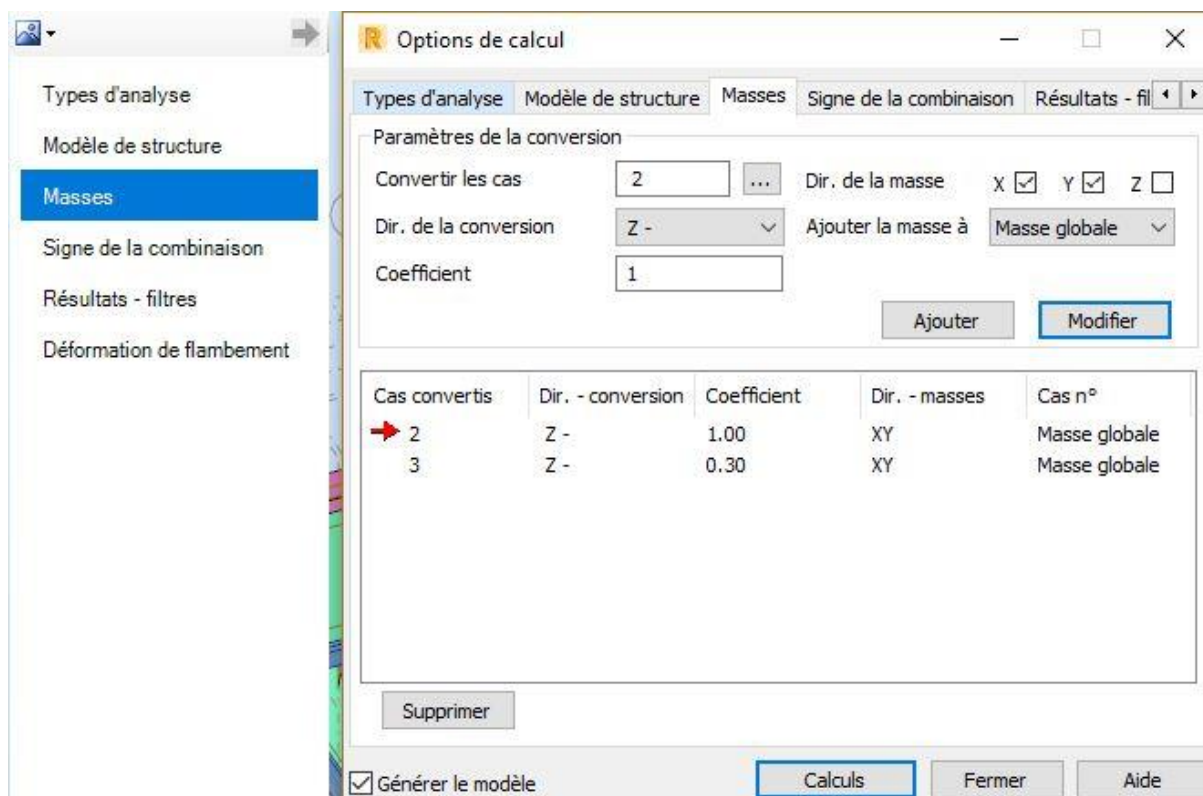


Figure 127 : Coefficient du poids total de la structure (Auteur, 2018)

Rappel : les cas 2 et 3 signifient respectivement la charge permanente G2, et la charge d'exploitation Q

VII.2.2.5. Introduction des combinaisons

Type de combinaison	Combinaison	Nature du cas
ELU	$1,35G + 1,5Q$	/
ELS	$G + Q$	/
Accidentelle	$G + Q + Ex$	Sismique
Accidentelle	$G + Q + Ey$	Sismique
Accidentelle	$0,8G \pm Ex$	Sismique
Accidentelle	$0,8G \pm Ey$	Sismique

Tableau 20 : Introduction des combinaisons(Auteur, 2018)

VII.2.2.6. Création du maillage

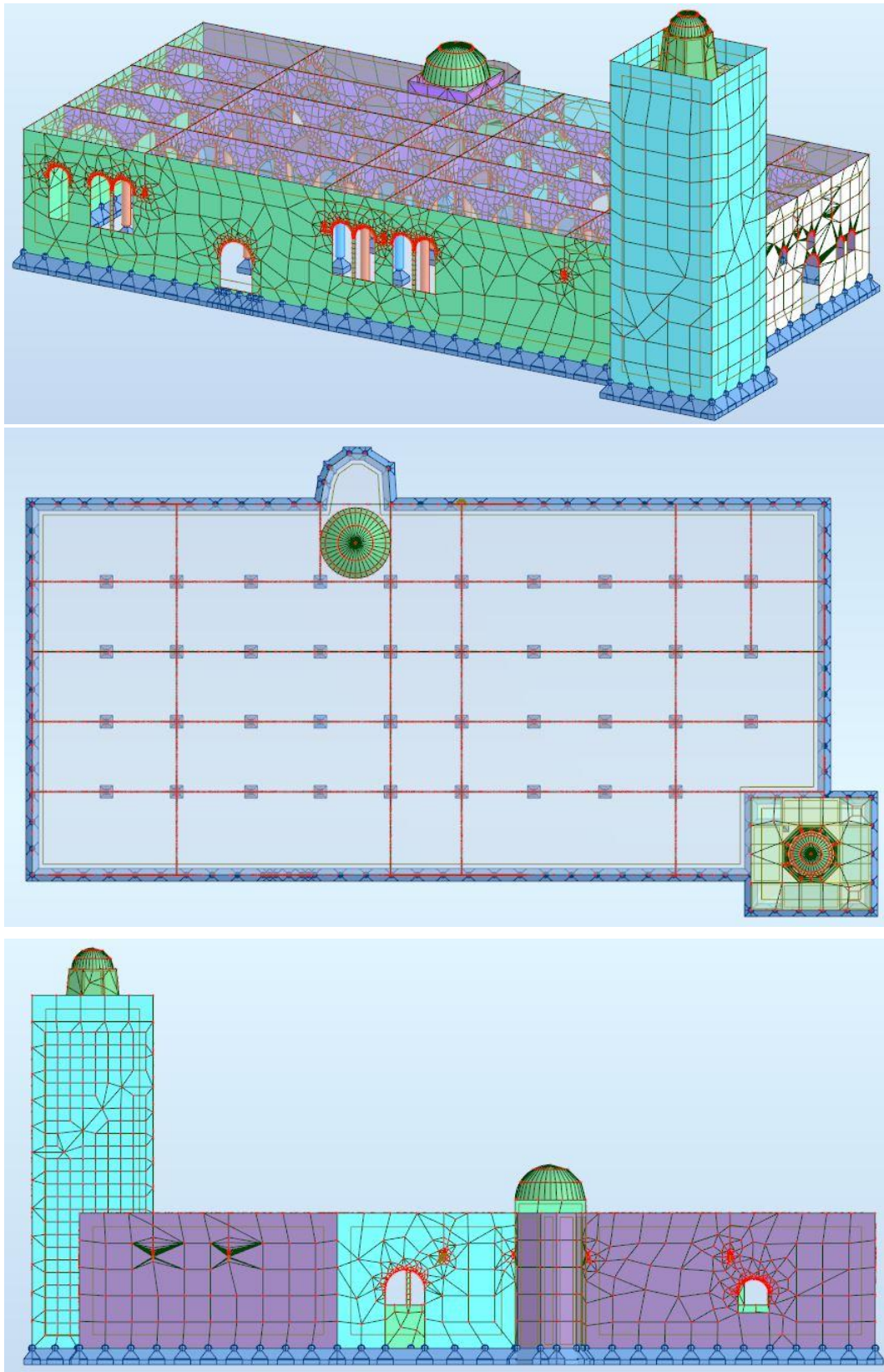


Figure 128 :Création du maillage(a) avant modification (Auteur, 2018)

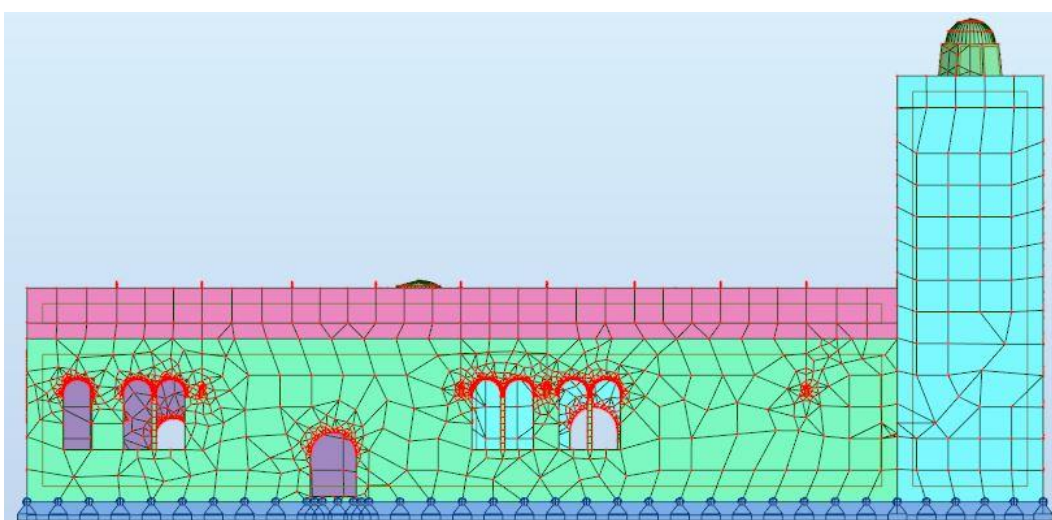
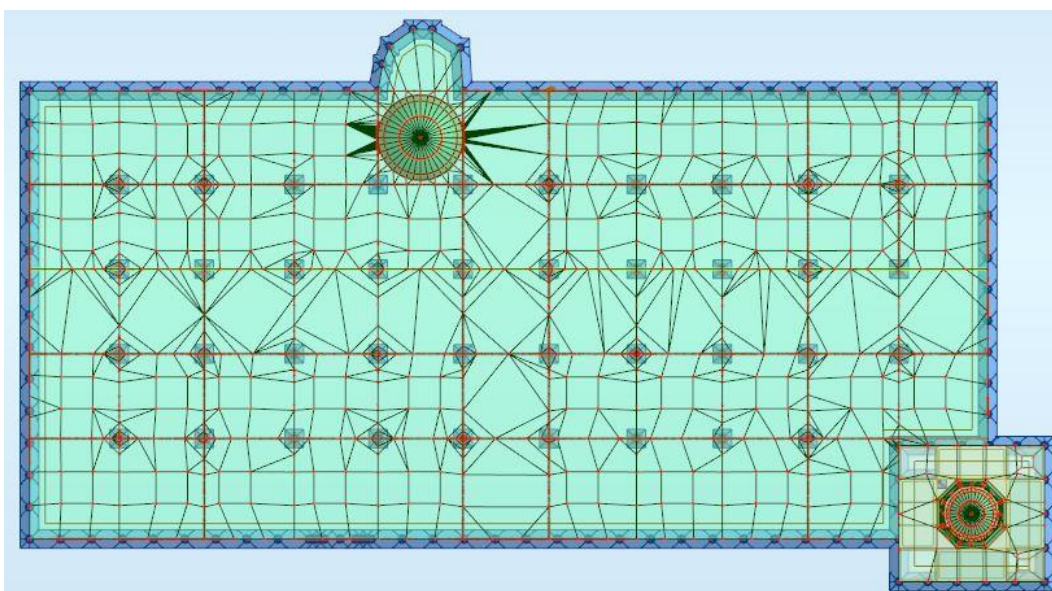
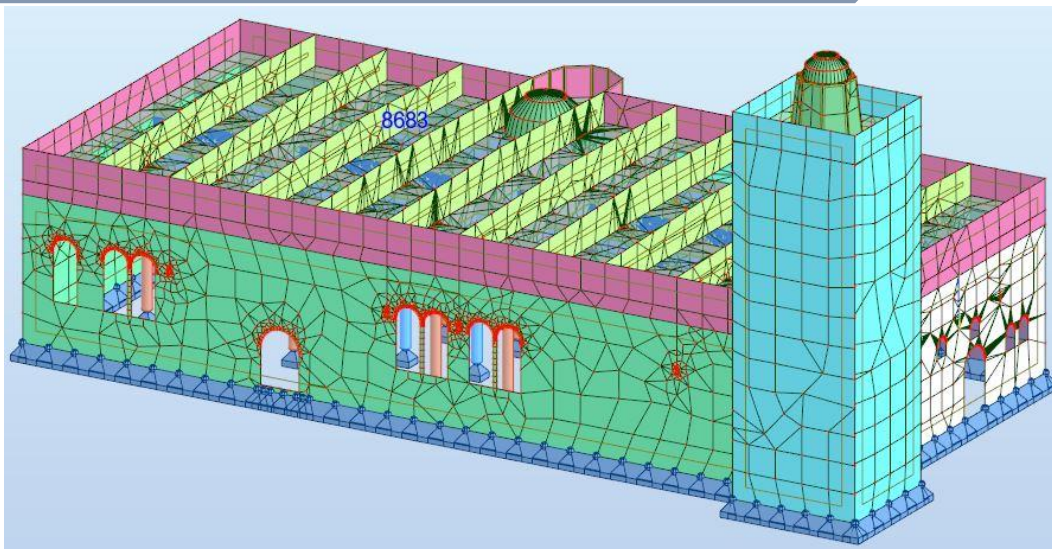


Figure 129 : Création du maillage (b) après modification (Auteur, 2018)

VII.3. Etudes numérique Sur Robot Structural Analysis 2017

Les analyses structurales qui ont été élaborées sur les modèles de la mosquée du vieux Ténès sont les suivants :

- Analyse modale
- Charges permanente, d'exploitation et sismique E_x ($G+Q\pm E_x$)
- Charges permanente, d'exploitation et sismique E_y ($G+Q\pm E_y$)

VII.3.1. Analyse modale

Les résultats de l'analyse dynamique ont été obtenus sous formes de 20 modes programmés dans le model Robot, les trois premiers modes pour chaque modèle sont présentés ci-après ;

VII.3.1.1. Les modes propres de la mosquée du vieux Ténès avant le séisme de 1954

- **1^{er} mode** : le mode indique une translation suivant l'axe X, à une fréquence de 8,13 Hz, on remarque ceci :
 1. Une translation excessive des nefs perpendiculaire au mur de qibla et les deux murs porteurs Est et ouest ;
 2. Une translation minime pour la coupole.

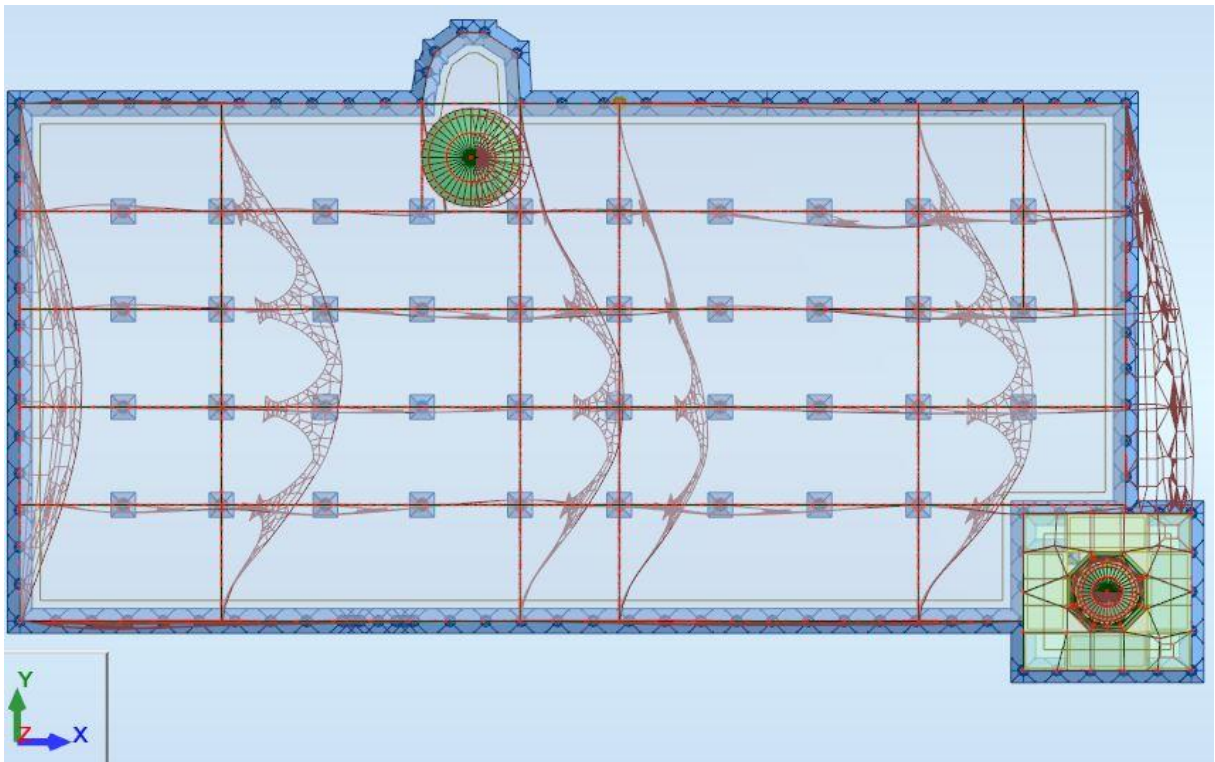


Figure 130 : 1er mode (Auteur, 2018)

- **2^e mode** : le mode indique une translation suivant l'axe Y, à une fréquence de 11,13 Hz, on remarque ceci :
 1. Une translation excessive des nefs parallèle au mur de qibla ;
 2. Une translation minimale des murs porteurs longitudinaux.

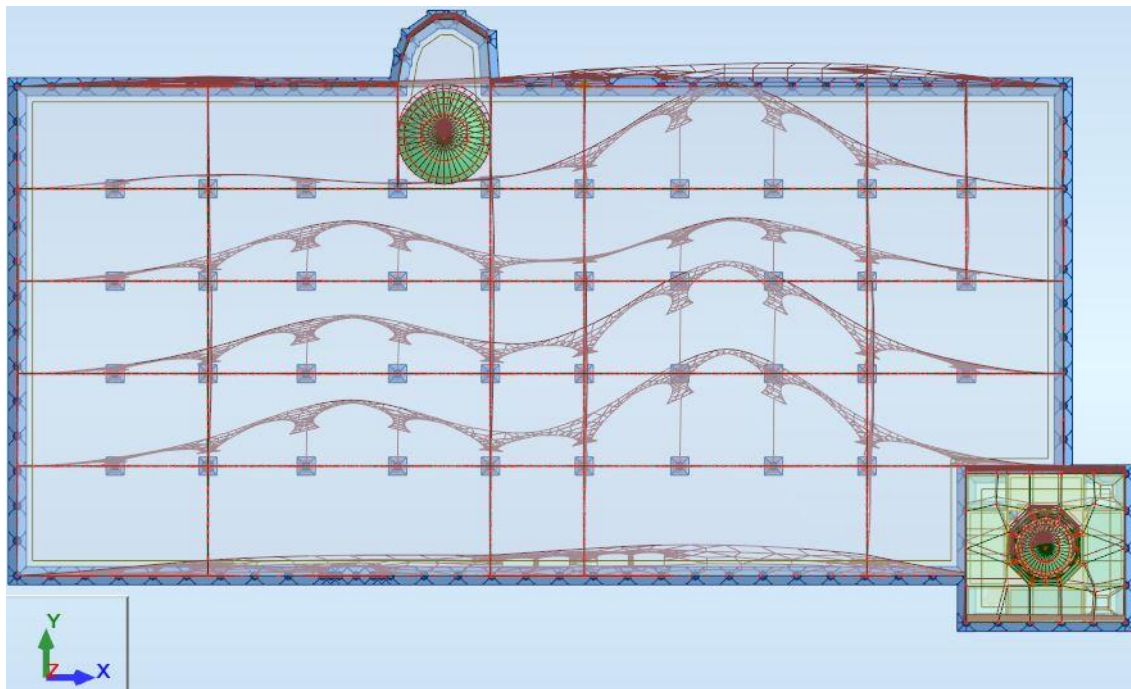


Figure 131 : 2e mode (Auteur, 2018)

- **3^e mode** : le mode indique une torsion, à une fréquence de 11,69 Hz, on remarque des translations excessives pour l'ensemble des nefs dans les deux sens.

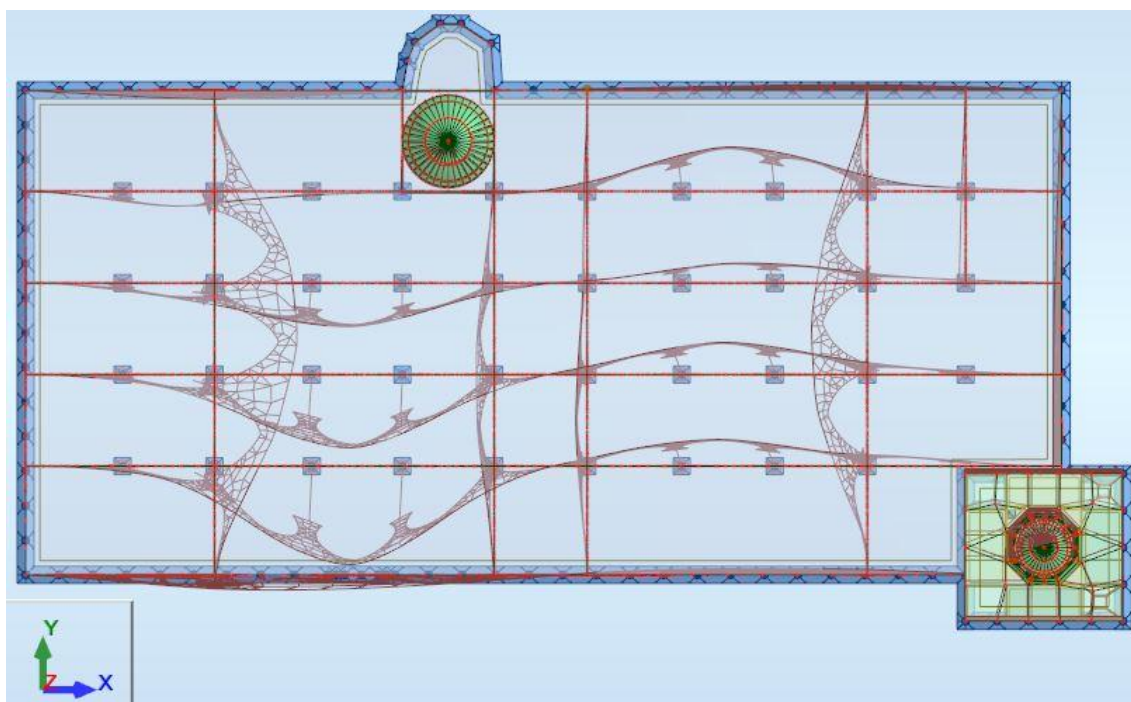


Figure 132 : 3e mode

- **Tableau des périodes :** ci-dessous un tableau qui présente les périodes obtenues des trois premiers modes de la mosquée ;

Mode	Fréquence (Hz)	Période (Sec)
1	8,13	0,12
2	11,13	0,09
3	11,69	0,09

Tableau 21: les périodes de la mosquée avant modification (Auteur, 2018)

VII.3.1.2. Les modes propres de la mosquée du vieux Ténès après le séisme de 1954

- **1^{er} mode :** le mode indique une translation suivant l'axe Y, à une fréquence de 12,16 Hz, on remarque les points suivant :
 1. Une translation excessive du minaret,
 2. Une translation forte du mur du mihrab ;
 3. Une translation forte de la coupole.

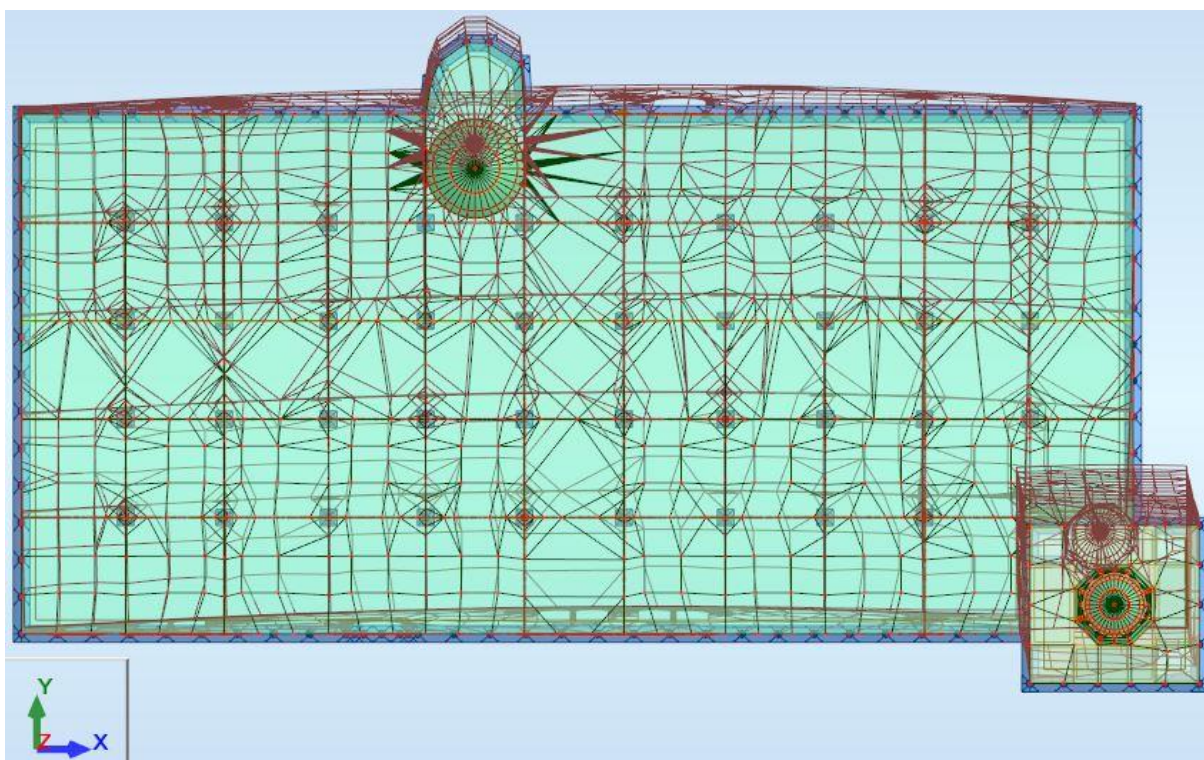


Figure 133 : 1er mode (Auteur, 2018)

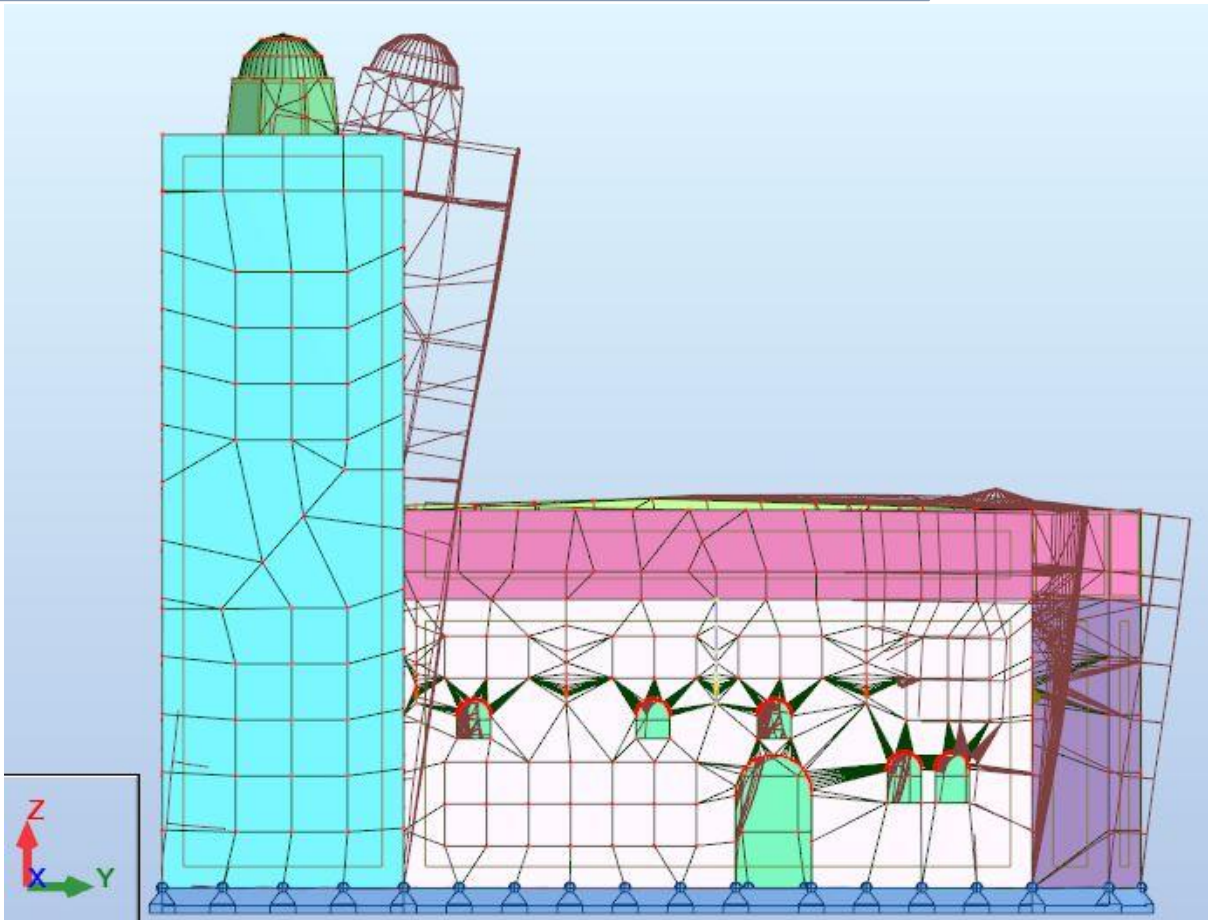


Figure 134 :1er mode (Auteur, 2018)

- **2e mode** : le mode indique une translation suivant l'axe Y, à une fréquence de 14,83 Hz, on remarque les points suivant :
 1. Une translation excessive du minaret ainsi que la coupole ;
 2. Une translation forte des deux murs porteurs longitudinaux de la mosquée ;

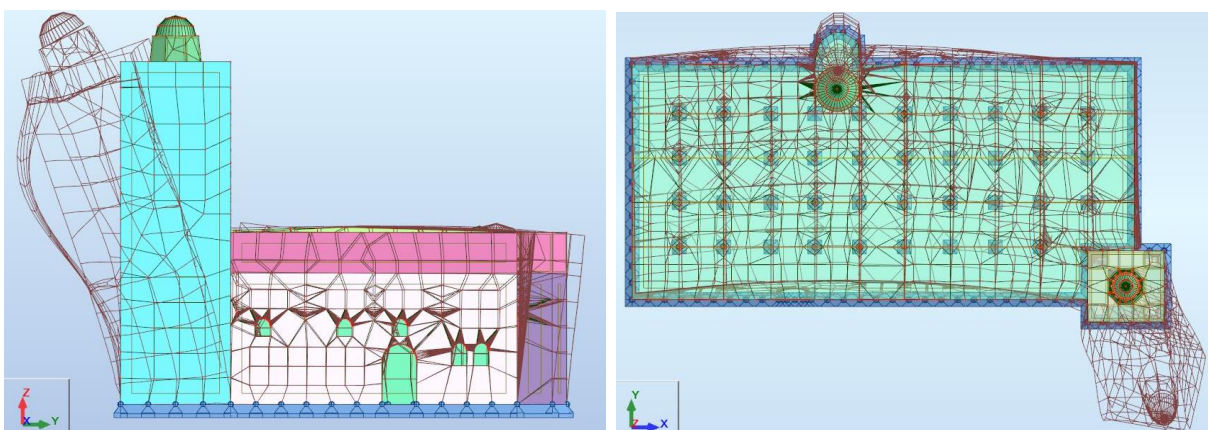


Figure 135 : 2e mode (Auteur, 2018)

- **3e mode** : le mode indique une torsion, à une fréquence de 16,08 Hz, on remarque les points suivant :
 1. Une translation excessive du minaret ainsi que la coupole ;
 2. Une translation forte des deux murs porteurs longitudinaux de la mosquée ;

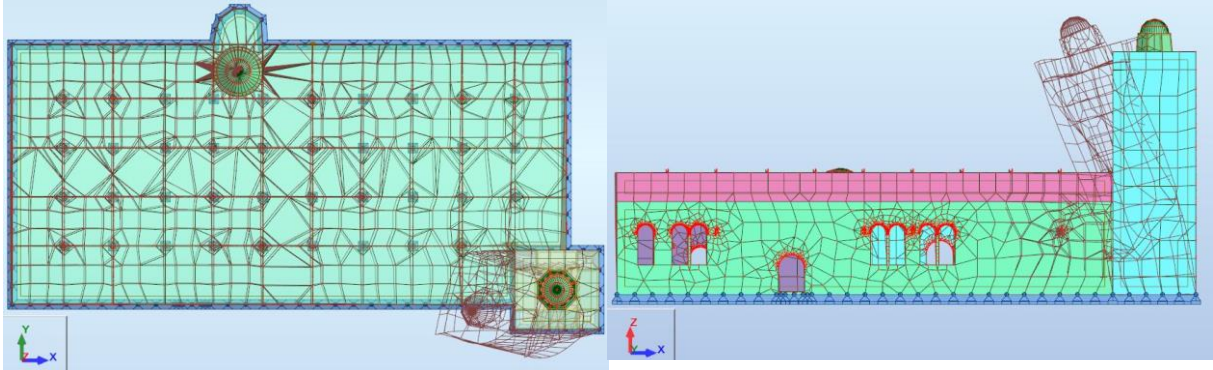


Figure 136 : 3e mode (Auteur, 2018)

- **Tableau des périodes** : ci-dessous un tableau qui présente les périodes obtenues des trois premiers modes de la mosquée ;

Mode	Fréquence (Hz)	Période (Sec)
1	12,16	0,08
2	14,83	0,07
3	16,08	0,06

Tableau 22 : périodes de la mosquée après modification (Auteur,2018)

VII.3.1.3. Etude comparative entre les deux résultats

Mode	Résultat avant modification du 1954		Résultat après modification du 1954	
	Fréquence (Hz)	Période (Sec)	Fréquence (Hz)	Période (Sec)
1	8,13	0,12	12,16	0,08 (33%)
2	11,13	0,09	14,83	0,07 (22%)
3	11,69	0,09	16,08	0,06 (33%)

Tableau 23 : Etude comparative entre les deux résultats(Auteur, 2018)

Le tableau ci-dessus nous montre la différence en pourcentage des valeurs obtenues de la fréquence et la période propre entre les deux cas analysés, nous remarquons que les résultats après les modifications du 1954 ont provoqué une diminution qui varie entre 22 et 33%, un meilleur comportement de la structure de la mosquée est visible en raison de la très faible période fondamentale obtenue.

- Dans le cas de la mosquée avant la modification de 1954, les modes nous montrent une grande fragilité des nefs de la salle de prière, ce qui nous donne une idée sur l'état de fragilité du système (Arc + colonne) ;
- Pour le cas de la mosquée après les modifications de 1954, on remarque les points suivant :
 1. les extrémités sont plus rigides que le reste de la structure (voir fig X), ce qui a engendré une translation progressive qui augmente en allant vers le centre de rigidité du mur de la qibla ;
 2. Le minaret présente une grande vulnérabilité en raison de la forte articulation excentrée de ce dernier, ainsi que la grande différence de rigidité entre la partie béton armé de la salle de prière et le minaret en maçonnerie, ce qui a engendré ce qu'on appelle « un coup de fouet ».

VII.3.2. Réponse structurel de la mosquée du vieux Ténès sous G+Q+Ex et G+Q+Ey

VII.3.2.1. Déplacements de la mosquée avant modification de 1954

Le déplacement maximal de la mosquée du vieux Ténès avant modification de 1954 sous G+Q+Ex est visible depuis la fig 137, on peut remarquer que le déplacement maximal obtenue dans ce cas est d'environ 4,3 mm au niveau des arcs longitudinaux de la salle de prière ;

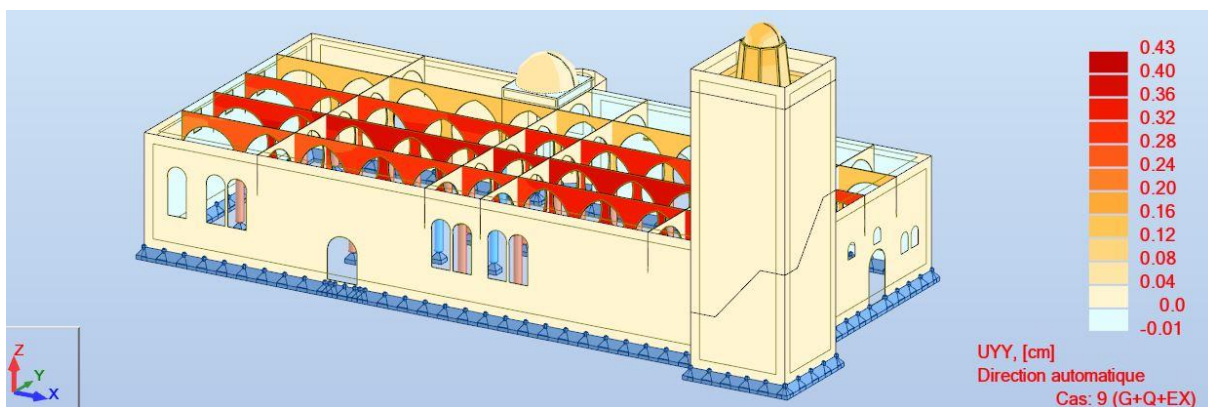


Figure 137 : Déplacements de la mosquée avant modification de 1954 « G+Q+Ex »(Auteur, 2018)

Le déplacement maximal de la mosquée du vieux Ténès avant modification de 1954 sous $G+Q+E_y$ est visible depuis la fig 138, on remarque que le déplacement maximal obtenu dans ce cas est d'environ 2,0 mm au niveau des arcs transversaux ;

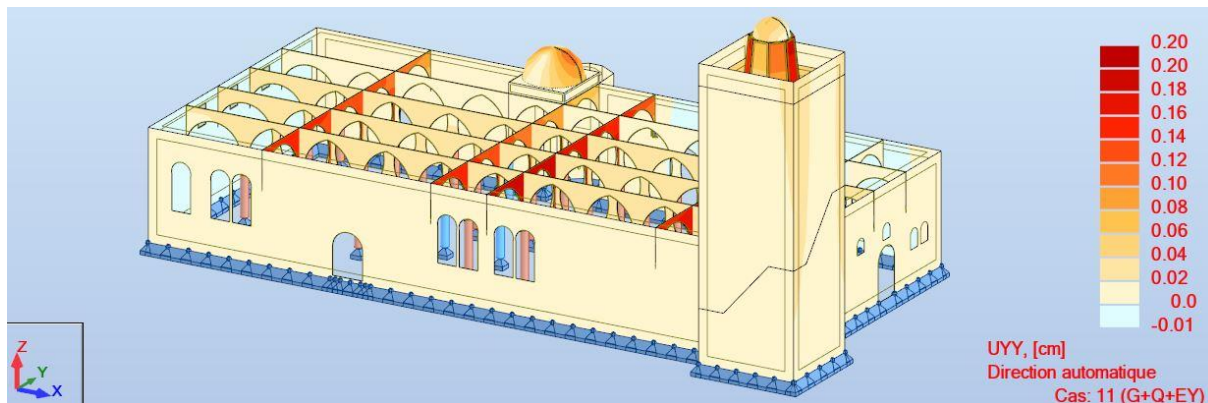


Figure 138 : Déplacements de la mosquée avant modification de 1954 « $G+Q+E_y$ » Auteur, 2018)

VII.3.2.2. Déplacements de la mosquée après modification de 1954

Le déplacement maximal de la mosquée du vieux Ténès après modification de 1954 sous $G+Q+E_x$ est visible depuis la fig 139, on remarque que le déplacement maximal obtenu dans ce cas est d'environ 2,0 mm au sommet du minaret ;

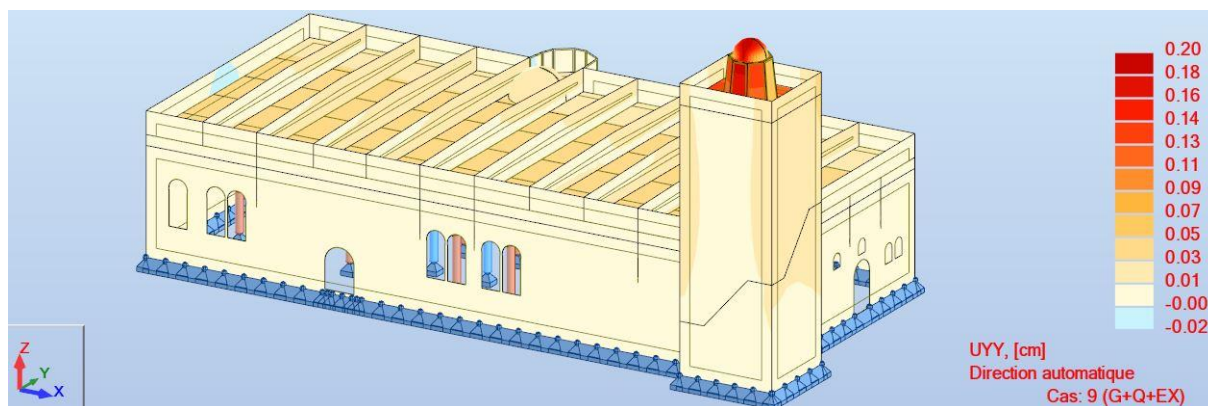


Figure 139 Déplacements de la mosquée après modification de 1954 « $G+Q+E_x$ » (Auteur, 2018)

Le déplacement maximal de la mosquée du vieux Ténès avant modification de 1954 sous $G+Q+E_y$ est visible depuis la fig 140, on remarque que le déplacement maximal obtenu dans ce cas est d'environ 4,6 mm au sommet du minaret, avec des déplacements minime au niveau de l'articulation entre l'ancienne et la nouvelle structure,

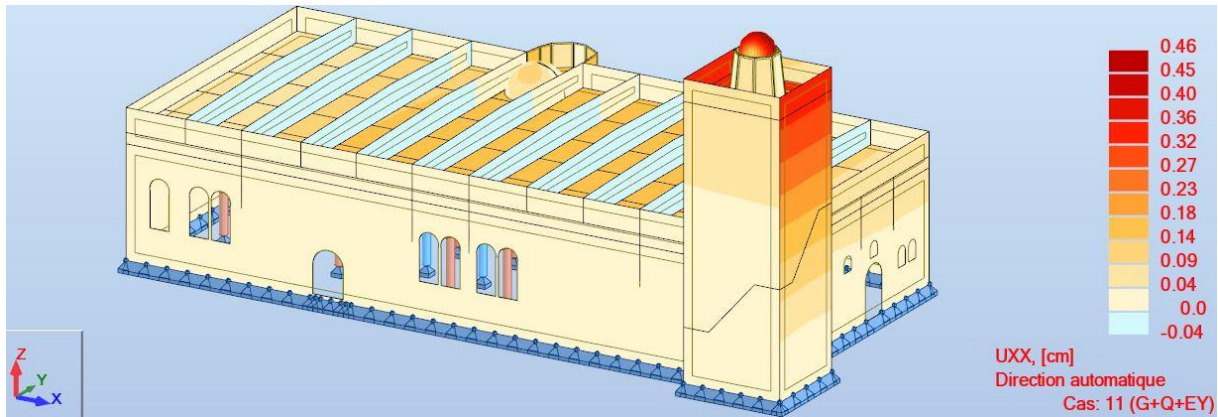


Figure 140 : Déplacements de la mosquée après modification de 1954 « $G+Q+E_y$ » (Auteur, 2018)

VII.3.2.3. Etude comparative entre les deux résultats

Ci-dessous un plan de repérage des quatre points choisis afin de comparer les déformations sous charge sismique E_x et E_y entre les deux cas en question

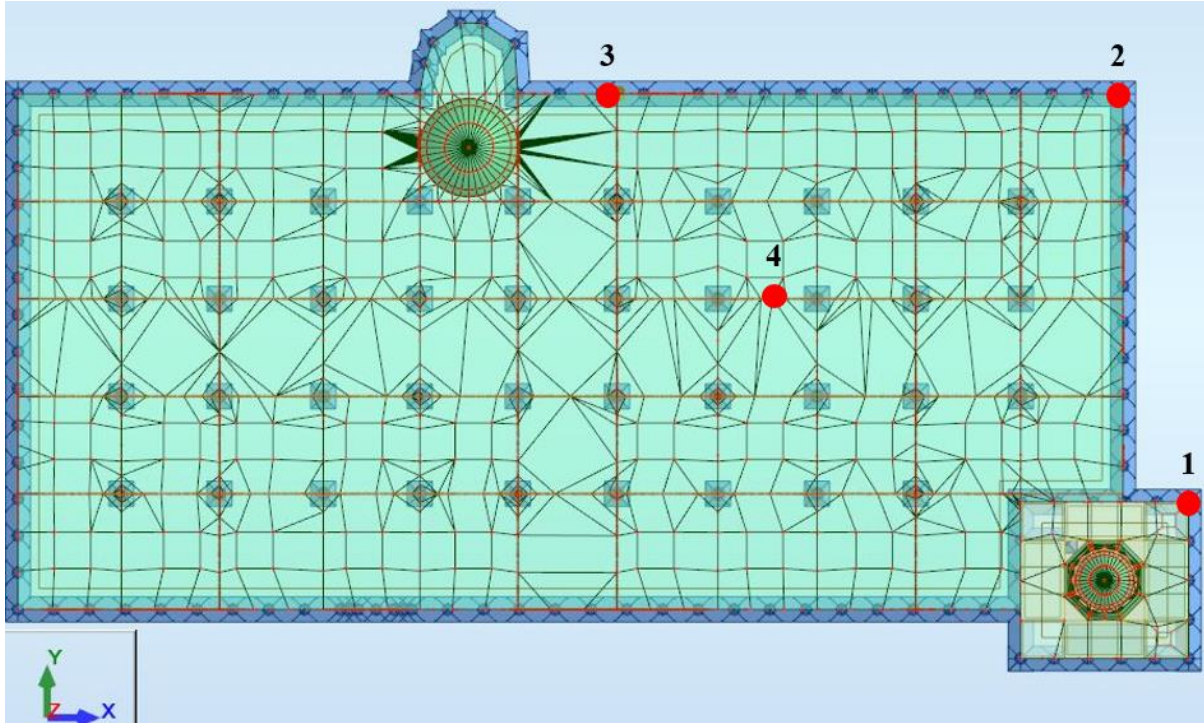


Figure 141 : Plan de repérage des points de mesures de déformations (Auteur, 2018)

Les deux tableaux suivant résument les résultats obtenus

	Résultats avant modification du 1954			Résultats après modifications du 1954	
	Déformation (mm)			Déformation (mm)	
Points	Ex	Ey		Ex	Ey
1	1,03	1,4		1,2	4,8 (+70%)
2	0,05	0,06		0,4	0,8
3	0,2	1,52		0,15	2,75 (+45%)
4	6,7	8,9		0,43 (-93%)	1,59 (-82%)

Tableau 24 : Etude comparative entre les deux résultats(Auteur, 2018)

- La mosquée à son état initial présente une grande vulnérabilité des arcs de la salle de prière, une vulnérabilité qui s'est diminué considérablement (jusqu'à 93%) après les modifications apporté après le séisme de 1954 ;
- De l'autre côté il est remarquable encore une fois que le minaret après cette modification est devenue plus vulnérable avec une augmentation de déformation d'environ 70% ;

VII.4.Conclusion

L'étude numérique sur le logiciel Robot Structural Analysis 2017, nous a permis d'analyser le comportement structurel de la mosquée du vieux Ténès avant et après le projet de restauration entamé après le séisme de 1954 ;

L'étude s'est faite à travers une analyse modale et une analyse de la réponse structurelle sous charge sismique,

En comparant les résultats des deux cas, nous avons interprété ce qui suit :

- L'analyse de la mosquée du vieux Ténès avant les modifications du 1954, démontre une grande vulnérabilité des arcs de la salle de prière sous charge sismique, ce qui affirme l'état de fragilité grave de l'ensemble (Colonne + arc) ;
- L'analyse de la mosquée du vieux Ténès après les modifications du 1954 indique que la structure a dévoilé un comportement élastique, vue la très faible période fondamentale obtenue, néanmoins cette structure n'a pas présenté un comportement d'un corps rigide dans la totalité du volume de la mosquée, ce qui a influencé sur le minaret et a produit ce qu'on appelle « un coup de fouet » ,c'est-à-dire que la structure actuelle de la salle de prière joue un rôle d'articulation excentrée sur le minaret et donc rend ce derniers très vulnérable vis-à-vis à l'aléa sismique ;

- La nouvelle structure en béton armé a ajouté à l'ancienne une masse considérable au niveau de la toiture, ce système a permis d'articuler le volume de la salle de prière et de bien tenir les nefs intérieures de la mosquée ;

En conséquence, on peut dire que la grande retombée des poutres qui prennent appuis sur le mur nord et sud de la salle de prière ont permis de rigidifier la structure de la mosquée et de libérer les colonnes intérieures en raison de leur mauvais état; ceci atteste que la restauration de la mosquée du vieux Ténès n'a pas considéré l'ensemble (colonne + arc) en tant qu'élément porteur qui participe à la répartition des charges.

Conclusion générale

Le travail élaboré dans ce master s'est intéressé à la simulation numérique du vieux bâti à l'aide de l'outil informatique, dans le but de mettre en évidence les zones critiques de ces biens patrimoniaux, un sujet d'actualité qui nous a incité tout d'abords à construire une base des pré requis afin de pouvoir comprendre le sujet et forger par la suite notre analyse structurelle sous effet sismique sur la mosquée du vieux Ténès,

Pour cela, nous avons commencé dans un premier temps, par définir la racine du problème à savoir le séisme, et son rapport avec le bâti ancien, une recherche sur laquelle on a pris conscience du danger et de la vulnérabilité de ce patrimoine vis-à-vis de ce phénomène naturels,

La complexité de l'opération de restauration sismique pour différents raisons, étant donné qu'on parle d'une ancienneté du bâtiment et donc un matériau ancien, des techniques et des méthodes de construction anciennes, ceci nous a emmenées à la recherche des stratégies d'analyse et de restauration qui font face à ce risque, et parmi plusieurs stratégies on a trouvé des guides techniques tels que le RehabiMed et le FEMA, ce derniers sert à fournir une feuille de route au services des spécialistes afin de remédier à une problématique donné suivant la situation auquel on est confortée (renforcement, réparation ou protection...etc.).

La grande vulnérabilité du bâti ancien très souvent en maçonnerie nous a poussé par la suite à s'intéresser au moyen d'analyse et de mise en évidence du comportement sismique d'une structure ancienne, et pour cela, notre recherche est orienté principalement vers le domaine de la modélisation et de la simulation numérique, une étape qu'on a jugé très importante auquel on a pu avoir une idée sur les moyens de simulation numérique, ainsi que quelques outils de modélisation tels que le Robot Structural Analysis 2017, le logiciel qui va nous accompagner par la suite dans le reste de notre travail.

Nos connaissances avec ce domaine, de simulation numérique s'est approfondi en plus en analysant des cas d'étude déjà entamé à travers le monde tels que les projets PERPETUTATE, à ce stade, on s'est rendu compte encore une fois de la complexité de l'approche de modélisation numérique.

Comme cité auparavant, l'ingrédient principal pour entamer une analyse numérique d'une construction ancienne, est la connaissance des propriétés mécaniques et physico-chimiques des structures maçonnées.

Une étape charnière est compliquée, en raison de la non-homogénéité de la maçonnerie, ceci est approuvé à travers notre recherche sur les différentes typologies

d'architecture traditionnelles et leurs comportements vis-à-vis de l'action sismique, ainsi que les différentes techniques de renforcements structurelles.

Par la suite, on a entamé notre étude numérique à l'aide de logiciel Robot Structural Analysis 2017, sur la mosquée du vieux Ténès, un monument qui présente un intérêt architectural et patrimoniale assez intéressant, à qui on a remarqué la richesse de son histoire avec l'action sismique dans la région de Chlef.

Une histoire qui décrit que cette mosquée a été ébranlée plusieurs fois par le séisme et ce qui a engendré par la suite plusieurs projets de restauration et donc plusieurs modifications ont été apportées sur son système structurel et sur son aspect architectural

L'étude numérique de la mosquée du vieux Ténès, a été faite sous charges sismique en vérifiant les périodes, les modes et les déformations de la structure, cette analyse est basée sur la comparaison entre deux modèles qui renvoie vers deux périodes différentes, ou on a remarqué une grande différence sur le plan structurel, justement le but de cette analyse est de chercher l'effet des modifications sur le comportement de la mosquée en passant par un phasage de modélisation basée sur un relevé de la mosquée établie au préalable.

Les résultats d'analyse aux éléments finis, sont les suivants :

- La salle de prière à son initial présente une grande vulnérabilité au niveau des arcs et cela est due à la faible fragilité du système (Arc + Colonne) ;
- Les modifications apportées à la mosquée du vieux Ténès ont affecté positivement son comportement structurel, ceci est approuvé à travers la très faible période fondamentale obtenue en limitant les déplacements excessive des arcs ;
- Ceci dit, il est important de signaler que ces modifications ont un apport négatif sur la structure ou on a remarqué que la structure n'a pas montré un comportement d'un corps rigide dans sa totalité, ce qui est visible à travers le minaret vue son déplacement excessive, cette contraintes peut engendrer ce qu'on appelle « un coup de fouet » en cas d'un éventuel tremblement de terre.

Cette analyse nous suggère à la fin que le projet de restauration effectué sur la mosquée du vieux Ténès est parti dans l'optique de libérer la structure intérieure à savoir le système (Arc + colonne), et utiliser le système de poutre renversé qui prend appuis sur les murs nord et sud en tant que nouveau système porteurs.

Limites et perspectives

Notre recherche de mise en évidence des zones critiques à l'aide de l'outil informatique, avait comme objectifs de détecter les différentes zones vulnérables face au risque sismique et établir par la suite un bilan de santé détaillé sur la mosquée du vieux Ténès ; Cependant, nous jugeons qu'on n'a pas atteint tous nos objectifs principaux, et nous qualifions notre recherche en tant qu'analyse structurel du première approche, ceci est dû à plusieurs contraintes, tels que :

- La difficulté d'accès à la mosquée ;
- La difficulté de faire un sondage pour explorer l'existence des chainages verticaux, un détail qu'on a supposé son existence, mais on n'a pas pu le vérifier pour des raisons du manque de temps et des moyens ;
- La difficulté d'analyse des propriétés mécaniques et physico-chimiques de la maçonnerie vue son hétérogénéité ;

Pour toutes ces raisons les analyses ont été faites par des méthodes linéaires.

Pour cela, nous pensons que le travail qu'a été fait dans cette recherche, ce n'est qu'un début pour d'autres recherches très vaste, et qui nous ouvre la porte de recherche vers différents pistes à savoir :

- Etablir une analyse numérique non linéaire « Pushover », qui peut nous donner des résultats plus précis et juste si les propriétés des matériaux sont définis dans des études correctement faites, et elle doit tenir compte bien évidemment des facteurs environnementales et humaines ;
- Poursuivre la recherche, avec comme appuis l'essai sur table vibrante, tels qu'a été utilisé dans l'étude de confortement structurel de la basilique saint sophie en Turquie, ou l'étude a été basé sur une analyse numérique avec des essais sur table vibrante¹³¹, un mécanisme disponible en Algérie et qui mérité d'être exploité au service du patrimoine national ;

En conclusion, cette recherche peut nous donner la possibilité de s'interroger encore une fois sur les modifications de la toiture de la mosquée du vieux Ténès, vu son importance historique et vu l'exceptionnelle qualité de son environnement géographique on estime qu'il serait souhaitable de redonner à la mosquée son volume et ses dispositions initiales, l'étude d'une couverture en terrasse devra être entreprise, tenant compte à la fois des impératifs techniques (anti sismique) et historiques.

¹³¹ France, ARTE, et al. Monuments éternels, la basilique Sainte Sophie. 26 juin 2016.

Bibliographie

- Abaci M'hamed** Séisme d'El Asnam, actuelle chlef, 37 ans après... [En ligne] // vitaminedz. - 2016. - www.vitaminedz.org/seisme-d-el-asnam-l-actuelle-chlef-37/articles_14176_6146362_0_1.html.
- AFPS-CSTB** Guide construction parasismique, Diagnostique et renforcement du bati existant vis-à-vis du seisme [Ouvrage]. - 2013.
- Ahmet Can Altunışık Ali Fuat Genç** Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques after Restoration [Article] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 20 Avril 2017.
- American Society of Civil Engineers** Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings [Ouvrage]. - [s.l.] : FEMA 310, Federal Emergency Management Agency, 1998.
- American Society of Civil Engineers** PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS [Ouvrage]. - Washington : FEMA 356, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, 2000.
- ANSYS structures** [En ligne] // ANSYS. - aout 2017. - www.ansys.com/fr-fr/products/structures.
- Assosiation El athar Chlef** Les sites Historiques [En ligne] // www.castellum-tingitanum.org. - Novembre 2016. - www.castellum-tingitanum.org/index.php?id=8&cat=sites&id2=14.
- Attari N** Risque, rehabilitation et reduction de la vulnérabilité du bati. - Alger : Cour, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), 2016.
- Billard Alain** Risque sismique et patrimoine bati, Comment reduire la vulnérabilité: Savoir et savoir-faire [Ouvrage]. - Paris : Eyrolles, 2014.
- Bossu Jean (1912-1983)** 192 Ifa • Objet BOSJE-H-55-2. Orléansville (aujourd'hui El Asnam, Algérie) :reconstruction (séisme) [Rapport]. - 1955-1964.
- Bourouiba R** Apports de l'Algerie à l'architecture arabo-islamique [Ouvrage]. - Alger : OPNA, 1956.
- BRIGAUX Guy** La maçonnerie [Ouvrage]. - Paris : Eyrolles.
- CDHA** Tremblement de terre d'Orleansville [En ligne] // CDHA. - 2016. - www.cdha.fr/tremblement-de-terre-dorleansville.
- CHERAÏT Yacine** Conception des batiments en zone sismique [Ouvrage]. - Guelma : Direction de la publication universitaire, 2012.
- Compte rendu de la mission effectuée dans la daïra de Ténès du 30 juillet au 01 septembre 1996 [Article]. - 16 septembre 1996. - pp. Réf DACA 111 n° 96, Archives de l'OGEBEC.
- Conseil General d'Alger** Procès-Verbal de la séance de 23/04/1947 [Rapport]. - [s.l.] : Dossier n° 268, Archives de l'OGEBEC, 1947.
- Davidovic Victor [et al.]** Pratique du calcul sismique Guide d'application de l'eurocode 8 [Ouvrage]. - Paris : Eyrolles, 2016.
- Dessus-Lamare A et Marcais G** La mosquée du vieux Tenes [Article] // Revue Africaine. - 1924. - pp. 530-540.

Dictionnaire Le petit Larousse illustré [Ouvrage]. - [s.l.] : Presses, 1972. - p. 936.

E.J.BRILL'S "El-Bakri" in: Encyclopaedia of Islam [Ouvrage] / éd. M Th.Houtsman [et al.]. - 1913-1936.

EIFFAGE Grand Hotel Dieu Lyon, La Renovation des poutres et plancher historiques. - Juillet 2017.

F.Letertre et H.Renaud Travaux de maçonnerie et finitions [Ouvrage]. - Paris : FOUCHER, 1978.

Ferit Cakir Eren Uckan, Jay Shen, Burcin S. Seker, Bulent Akbas Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011 [Article] // Engineering Failure Analysis. - 2015. - 58. - pp. 249-266.

France ARTE [et al.] Monuments éternels, la basilique Sainte Sophie. - 26 juin 2016.

Giulio Castori [et al.] Seismic vulnerability assessment of a monumental masonry building [Article] // Engineering Structures. - Avril 2017. - 136. - pp. 454-465.

Hakima SLIMANI Toponymie au Dahra au Nord du Chlef [Rapport] : Memoire de Magister. - Chlef : Université Hassiba Benbouali, Faculté des lettres et sciences sociales, Departement de Français.

HARROUNI Khalid EL et HAMMOUMI Abdallah EL La modélisation numérique en tant qu'outil de pilotage de la durabilité du patrimoine bâti [Article] // J.of Herit. Archit, Vol 1, N° 3. - 2017. - pp. 401-410.

Jean-François GARCIA Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments [Rapport] : Rapport final de PFE. - Strasbourg : INSA, Mars-Juillet 2007.

l'architecte des monuments historiques la mosquée de vieux Tenes [Rapport]. - [s.l.] : Ref DACA 2 N°652/ Mts.H. Archives de l'OGEBEC, 1970.

Lettre du M.Christofle architecte en chef des monuments historiques à monsieur le directeur de l'intérieur et des beaux-arts La mosquée du vieux [Article]. - 21 Juillet 1947.

M. Belazougui [et al.] Catalogue des methodes de reparation et de renforcement des ouvrages [Ouvrage]. - [s.l.] : CGS, 1992.

MAPEI Polymères renforcés de fbres (PRF) Systèmes composites [Ouvrage]. - 2015.

Marçais G L'Algerie medievale, Monuments et paysage Historiques [Ouvrage]. - Paris : Arts et métiers graphiques, 1957.

Messaouden Maha Cour de methodologie de recherche. - Alger : Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), 2015.

Minister des Habous Restauration des edifices reigieux à caractere historique [Rapport]. - [s.l.] : 81.271 / BHZ. Archives de l'OGEBEC.

Ministere de l'habitat et d'urbanisme CGS DTR B C 2 48 Regles parasismiques Algeriennes RPA99 [Ouvrage]. - 2003.

Ministere des transports (France) Les ponts en maçonnerie [Ouvrage]. - Paris : Département des Ouvrages d'Art, 1982.

Moussaoui Rachid Tenes: une ville historique enclavée et ignorée [Article] // la Nouvelle Revue de Presse. - Oran : [s.n.], Juin 2016. - 32. - pp. 5-6.

OLIVIER Emile Les maçonneries [Ouvrage]. - [s.l.] : Technique et Documentation Lavoisier, 1990. - Vol. II, Technologie des methodes de construction.

Pecker A Dynamique des soles [Ouvrage]. - [s.l.] : Presses de l'ecole nationale des ponts et chaussées, 1984.

POLO Marco les voyages interdits [Ouvrage]. - [s.l.] : Telemaque, 2008. - Vol. II, à la cour du grand Khan.

Procès verbal de la séance du 23 avril 1947 du conseil général d'Alger [Article] // Dossier n° 268. - p. Archives de l'OGEBEC.

R.CHAISE Restauration des anciennes maçonneries et percement des ouvertures en sous-oeuvre. [Ouvrage]. - [s.l.] : Eyrolles.

Raverau Andre Mission du 18/06/1968 à Tenes et Miliana [Rapport]. - [s.l.] : Ref DACA 2 N°887 / Mts.h. Archive de l'OGEBEC, 1968.

RehabiMed Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne [Ouvrage]. - Barcelona : [s.n.], 2007. - Vol. II. Réhabilitation Bâtiments.

Robot Structural Analysis Professional [En ligne] // AUTODESK. - Aout 2017. - www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview.

Rutherford & Chekene (R & C) Consulting Engineers Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings [Ouvrage]. - Washington : FEMA 547, 2006.

S. Lagomarsino [et al.] [En ligne] // TREMURI. - Aout 2017. - www.tremuri.com.

SAAD Mazen Modelisation et simulation numerique par l'exemple [Représentation]. - Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire de Mathematiques Jean Leray : [s.n.], 10 Avril 2014.

Techniques de l'ingenieur Construire avec des materiaux naturels [Ouvrage]. - [s.l.] : Ref.Internet : 43807.

Thomaz Ercio [et al.] Defects in Masonry Walls Guidance on Cracking: Identifcation, Prevention and Repair [Ouvrage]. - Rotterdam : CIB, 2015.

Ville de Quebec Guide technique, La maçonnerie de pierre [Ouvrage]. - 1989.

Vitiello Bernard CHRONIQUES du GRAND HÔTEL-DIEU [Rapport]. - Lyon : N°9, 2017.

YELLES-CHAOUCHE Abdelkrim COMMEMORATION : Seisme d'El Asnam 10 octobre 1980 [Article] // CRAAG INFOS. - octobre 2010. - p. 4.

Zacek Milan Vulnérabilité et renforcement [Ouvrage]. - 2004.

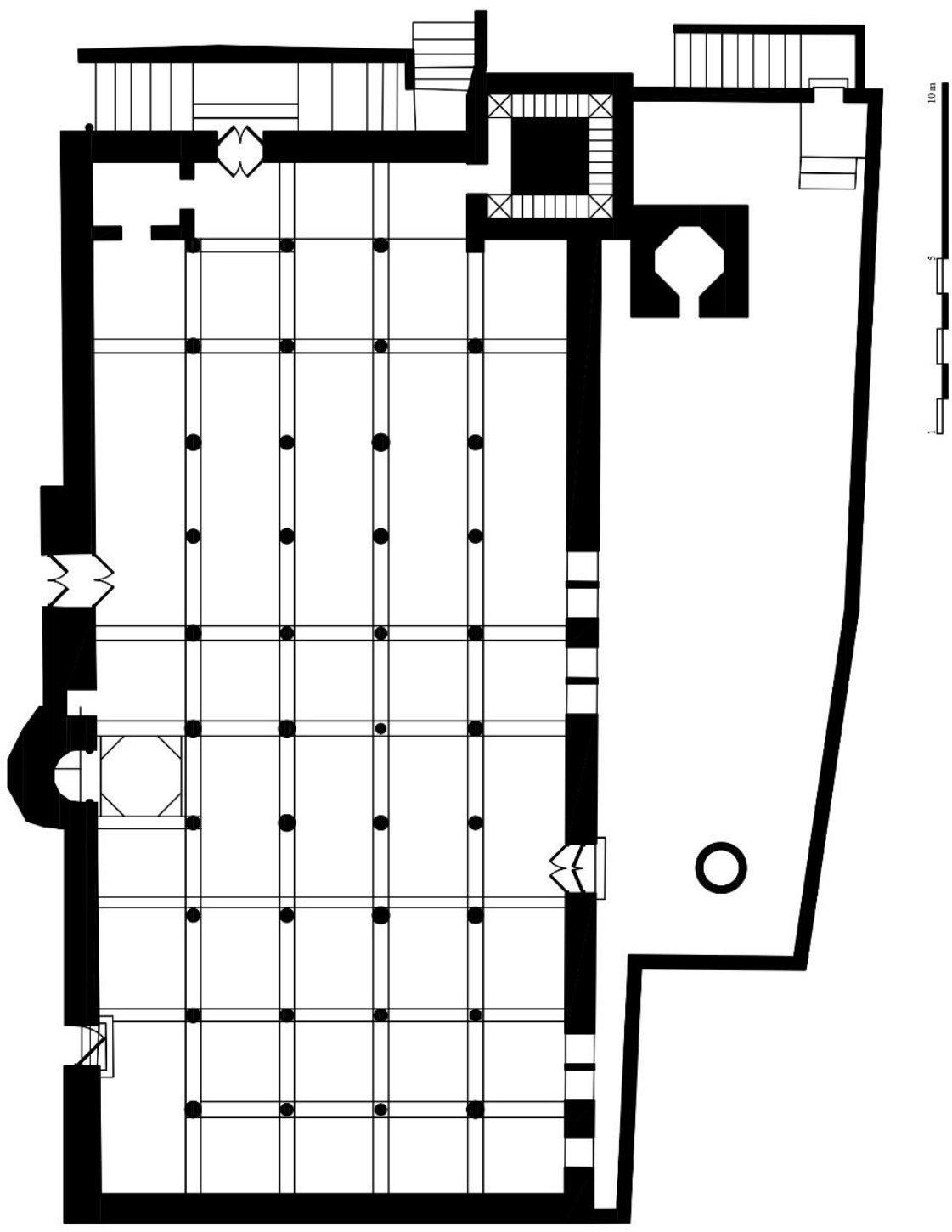
Annexes



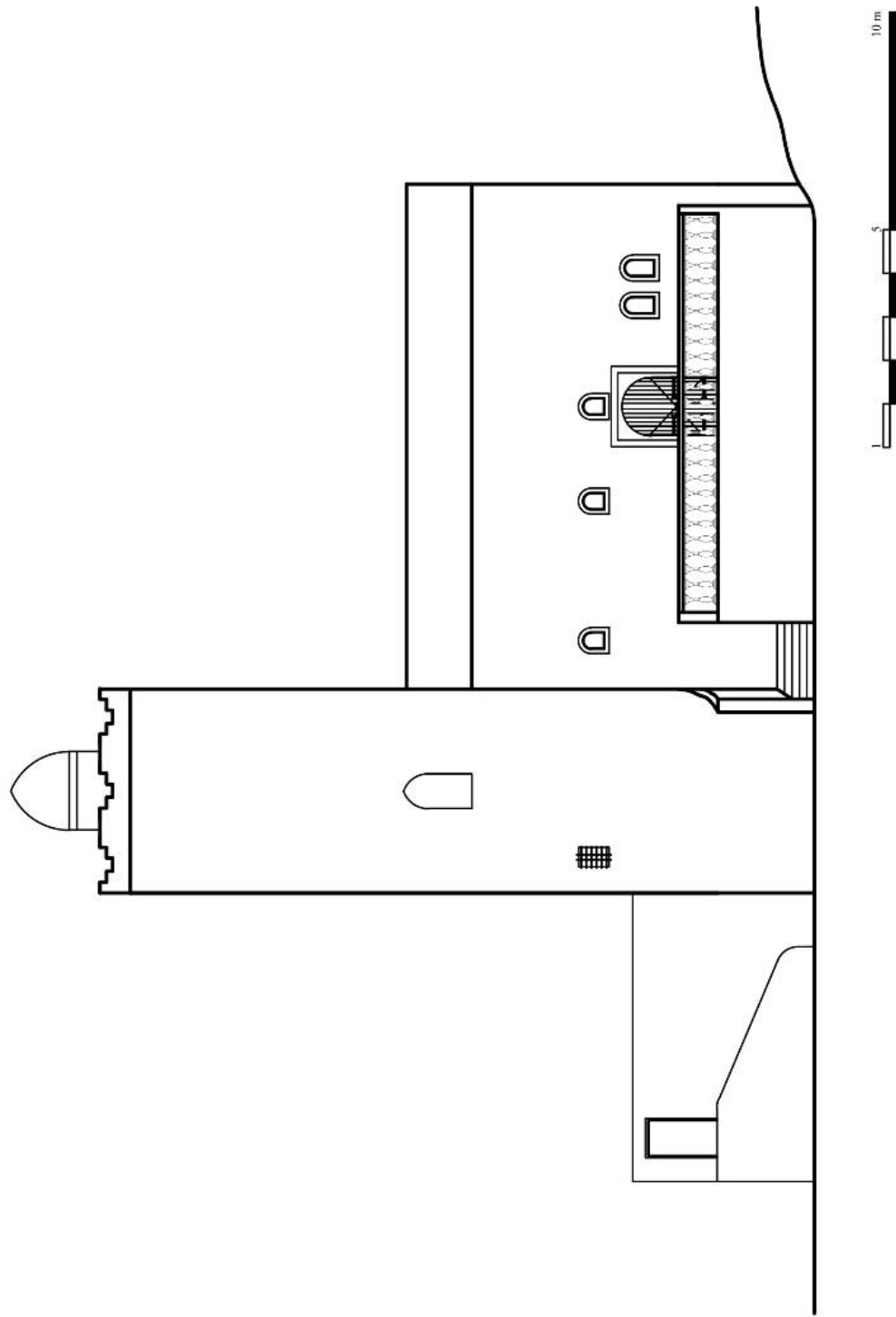
Elévation OUEST de la mosquée de vieux Ténès



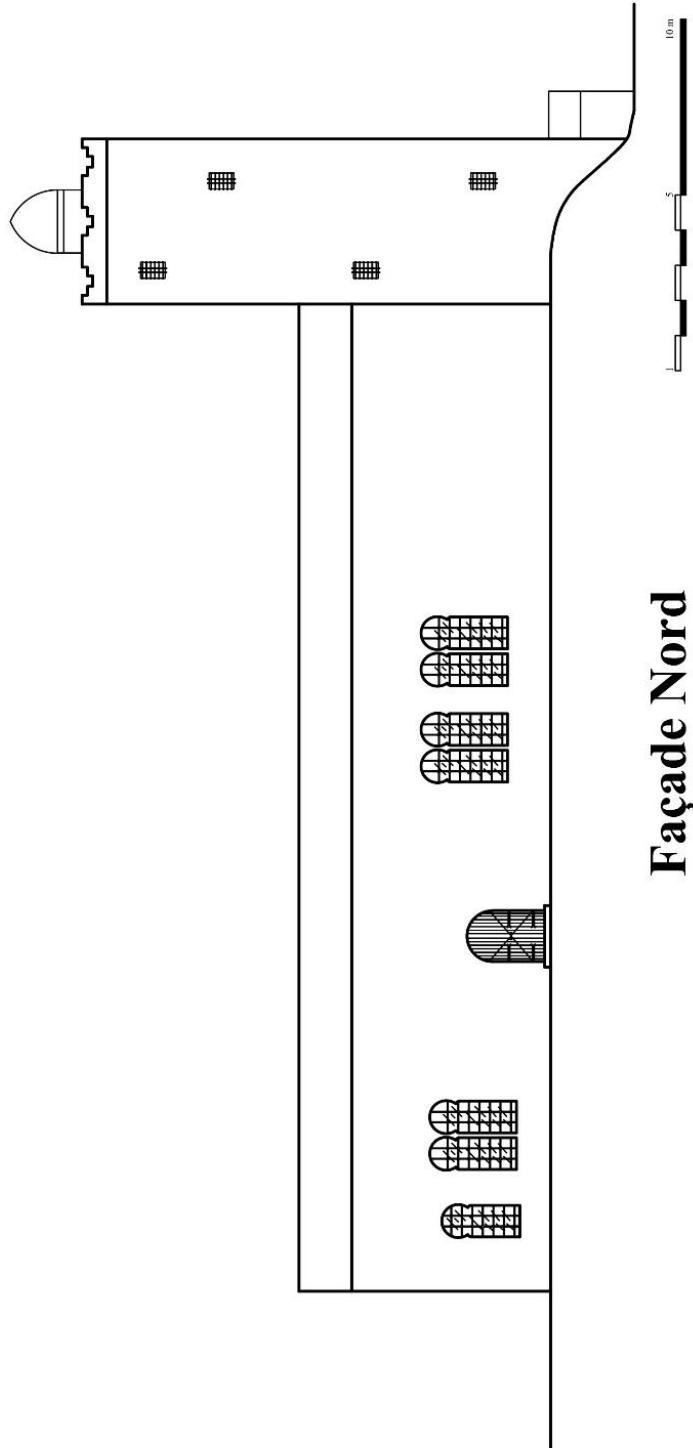
Coupe longitudinale de la mosquée de vieux Ténès



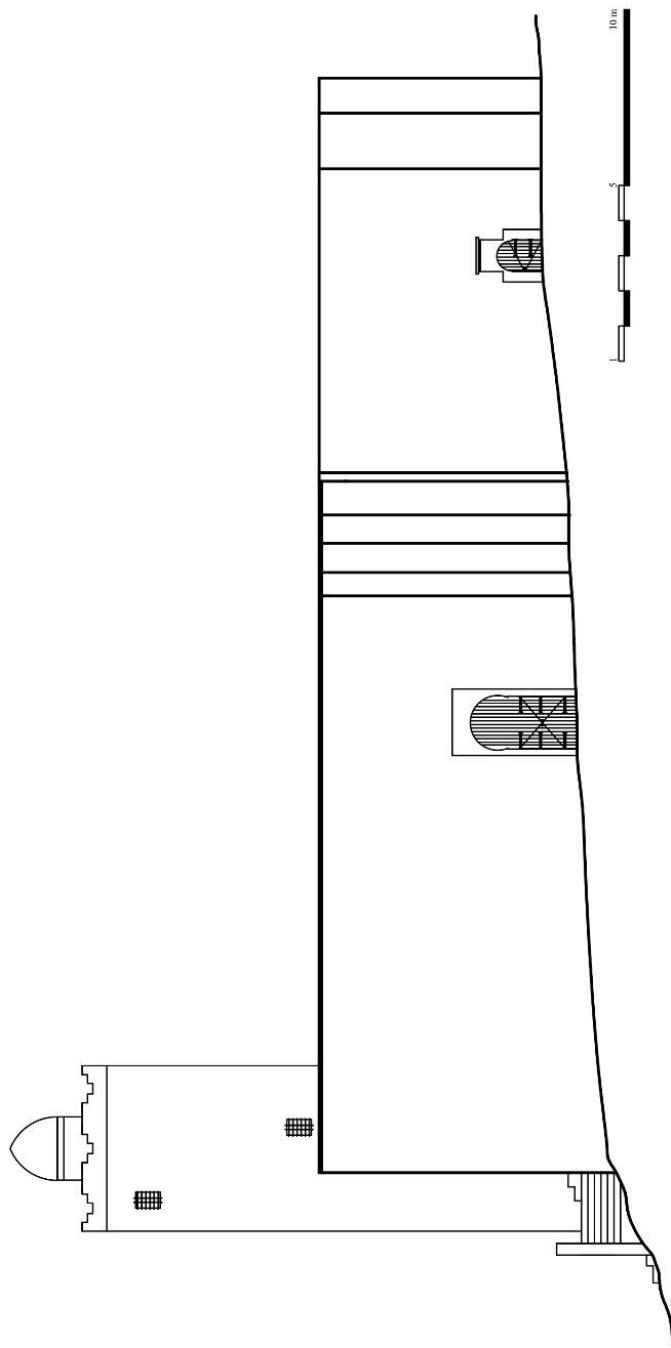
plan de REZ DE CHAUSSEE



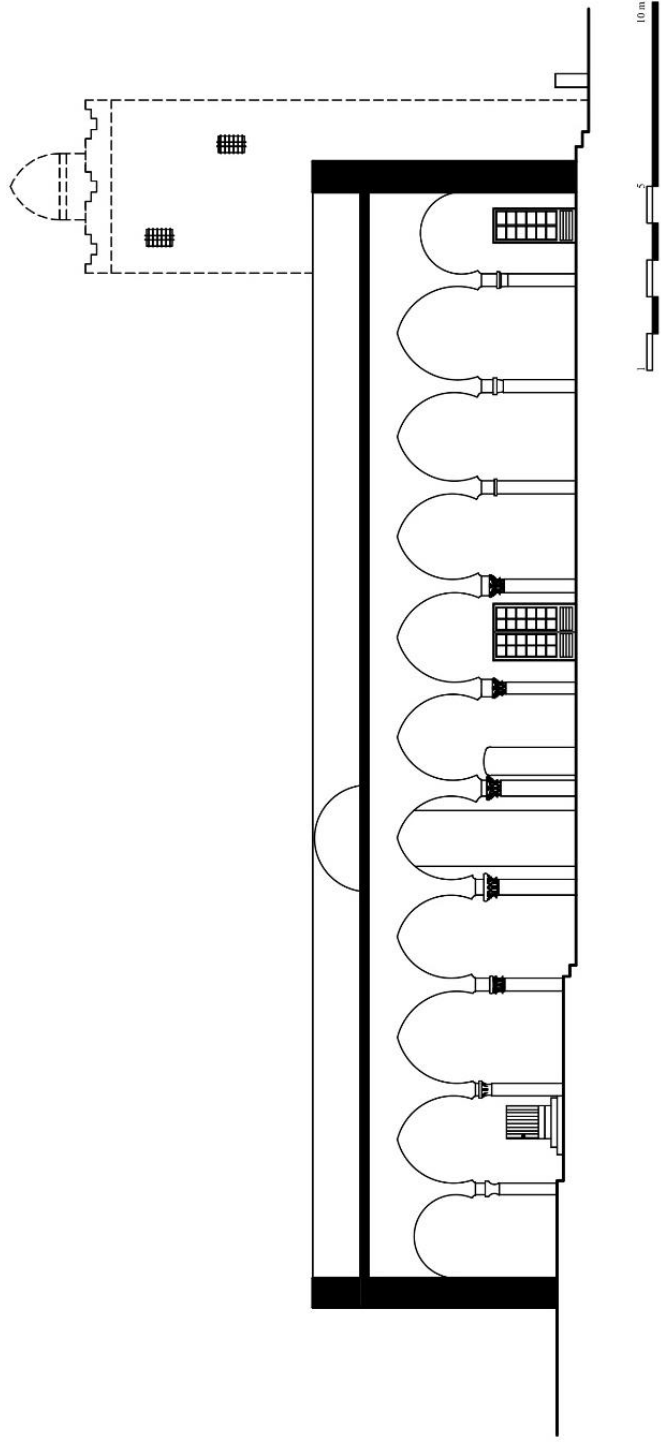
Façade OUEST



Façade Nord



Façade SUD



Coupe Longitudinale