

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme

epau

Mémoire pour l'obtention du diplôme

MASTER EN ARCHITECTURE

Laboratoire Ville, Architecture et Patrimoine

Axe de recherche :

Réduction de la vulnérabilité du Patrimoine Bâti



**Diagnostic structurel et réhabilitation du Haouch El Bey à
Médéa**

Mémoire dirigé par :
Dr. ATTARI NASSEREDDINE

Présenté et soutenu par :
Mr BELMEDJRAB AYOUB

Jury :

Président de jury : Dr. SI YUCEF Youcef...Maître de Conférences/ EPAU

Examineur : Dr. DJILLALI Dahmane...Maître de Conférences/ EPAU

Examineur : Dr. SOUICI Belgacem...Maître de Conférences /EPAU

MARS 2019

Remerciement :

Au nom du Bon Dieu ALLAH, et avec son aide que j'ai réussi à accomplir ce modeste travail de recherche.

Tout d'abord, je distingue mes sincères remerciements à mon encadreur, Dr Attari Nasser-Eddine, qui m'a orienté, guidé... tout le long de la recherche. Ainsi, et surtout de tous les efforts qu'a mis afin d'arriver à atteindre les objectifs de ce travail de recherche.

Ensuite, j'adresse mes remerciements au responsable de la direction de la préservation du patrimoine au niveau de la direction de la culture de la wilaya de Médéa, M. Merbouche Ahmed, ainsi au directeur de la circonscription archéologique de la wilaya de Médéa, M. Kehal Idris, qu'ils m'ont bien accueilli, de même, je remercie toutes les personnes qui travaillent au niveau de cette direction pour leurs aide, orientations, informations... etc.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury qui ont accepté de porter leur apport. J'espère que leurs remarques, critiques, orientations et conseils me seront très utiles pour une continuité dans le processus de recherche.

Enfin, je remercie tous mes collègues de l'école, qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail, ainsi que tous mes proches et mes amis.

Je dédie ce modeste travail de recherche à mes parents, qu'Allah les protège.

Résumé :

Haouch El Bey à Médéa, est un monument historique qui date de la dernière époque de la présence ottomane en Algérie, il a subi plusieurs stratifications durant l'époque coloniale française.

Le monument a été objet d'une étude de restauration et de mise en valeur à l'an 2000, mais les travaux n'ont pas entamé, et aujourd'hui le monument est dans un état vétuste et dégradé, surtout au niveau de ces ouvrages structuraux.

Notre recherche a pour but de mettre en évidence la notion du diagnostic structurel en tant que processus et donc une méthode, pour les monuments construits en maçonnerie avant l'ère préindustrielle, tels que Haouch El Bey, pour ensuite faire un diagnostic structurel du Haouch El Bey suivant l'une des méthodes de diagnostic structurel. La méthode que nous avons choisie nécessite l'utilisation de l'outil numérique et l'examen visuel des ouvrages de structure.

La finalité de ce travail de recherche est de proposer une stratégie de renforcement et de consolidation pour les ouvrages de structure du Haouch El Bey ayant des désordres et des altérations.

Mots clés : Haouch El Bey-diagnostic structurel-ouvrages de structure- outil numérique- examen visuel-désordres statique.

الملخص:

حوش الباي بالمدينة، هو معلم تاريخي يعود تاريخ بنائه إلى الفترة الأخيرة من الوجود العثماني في الجزائر، وقد شهد عدة تحويرات خلال فترة الاستعمار الفرنسي.

وقد خضع المعلم لدراسة ترميم وتهيئة في العام 2000، ولكن الأشغال لم تنطلق لحد الساعة، وحاليا المبنى متواجد في حالة مزرية ومرتدية، خاصة فيما يتعلق بجانبه الهيكلي.

ويهدف بحثنا لتسليط الضوء على مفهوم التشخيص الهيكلي كمجموعة مراحل متسلسلة وفق نظام معين وبالتالي كمنهجية، ويتناول التشخيص الهيكلي في هذا البحث المعالم المعمارية التي بنيت في الفترة ما قبل عصر التصنيع، مثل حوش الباي، ثم كمرحلة ثانية القيام بتشخيص هيكل حوش الباي وفق إحدى هذه المنهجيات، والمنهجية التي اخترناها تعتمد على استخدام الوسائل الرقمية والفحص البصري للهياكل الإنشائية.

والمرحلة الأخيرة من هذا البحث غرضها هو اقتراح استراتيجيات تعزيز وتقوية للهياكل الإنشائية لحوش الباي ضد التصدعات والاختلالات في الحالة الساكنة للبنية.

الكلمات المفتاحية: حوش الباي-التشخيص الهيكلي-الهياكل الإنشائية-وسائل رقمية-فحص بصري-التصدعات في الحالة الساكنة.

Abstract:

Haouch El Bey in Médéa, is a historical monument dating from the last period of the Ottoman presence in Algeria, it underwent several stratifications during the French colonial era.

The monument was the subject of a study of restoration and enhancement in the year 2000, but the work has not started, and today the monument is in a degraded state, especially at the level of his structural components.

Our research aims to highlight the notion of structural diagnosis as a process and therefore a method, for the monuments built in masonry before the pre-industrial era, such as Haouch El Bey. Then to make a structural diagnosis of Haouch El Bey following one of the structural diagnostic methods. The method we have chosen requires the use of the numerical tool and the visual examination of the structural components to bring out the static disorders.

The purpose of the work is to propose a reinforcement and consolidation strategy for structural components of Haouch El Bey with disturbances and alterations.

Key word: Haouch El Bey- structural diagnosis - structural components - digital tool- visual examination- static disorder.

Table des matières:

CHAPITRE INTRODUCTIF	1
1. Introduction :	1
2. Problématique générale et spécifique :	4
3. Hypothèses :.....	4
4. Objectifs :.....	4
5. Méthodologie :.....	5
6. Structure du mémoire :	6
PARTIE 1 (PARTIE THEORIQUE) : UNE ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE DIAGNOSTIC DU PRINCIPAUX OUVRAGES DE STRUCTURE D’UN BATIMENT CONSTRUIT EN MAÇONNERIE AVANT L’ERE PRES INDUSTRIELLE.	8
CHAPITRE 1 : OUVRAGES DE STRUCTURE D’UN BATIMENT CONSTRUIT EN MAÇONNERIE AVANT L’ERE PREINDUSTRIELLE.....	9
1.1. Introduction :	9
1.2. La maçonnerie :.....	9
1.2.1. Définition:	9
1.2.2. Type de maçonnerie :.....	9
1.2.2.1. La maçonnerie en pisé	9
1.2.2.2. La maçonnerie de moellon:.....	10
1.2.2.3. La maçonnerie de pierre de taille.....	10
1.2.2.4. La maçonnerie de libage :	11
1.2.2.5. La maçonnerie mixte:	11
1.3. Le chaînage :.....	11
1.3.1. Définition :.....	11

1.3.2. Types de chaînage :.....	11
1.3.2.1. Le chaînage horizontal :.....	11
1.3.2.2. Le chaînage vertical :.....	11
1.4. Les murs :	12
1.4.1. Mur de fondation :	12
1.4.2. Mur de face:	12
1.4.3. Mur mitoyen.....	12
1.4.4. Mur de refend :.....	13
1.5. Les fondations :	13
1.5.1. Fondation sur bon sol :.....	14
1.5.1.1. Sous un mur :	14
1.5.1.2. Sous un poteau ou un une colonne :.....	15
1.5.2. Fondations sur mauvais sol :.....	15
1.5.2.1. Fondation par pieux	15
1.5.2.2. Fondation par radier ou grille de charpente	15
1.5.2.3. Fondation par excavation et remplacement du mauvais sol	16
1.6. Les planchers :.....	16
1.6.1. Plancher à travure simple ou vulgaire :.....	17
1.6.2. Plancher à travure composée :	17
1.6.2.1. Plancher à la française avec poutre formant retombée :	17
1.6.2.2. Plancher à la française plafonné et sans retombée :.....	17
1.6.2.3. Plancher à solives d'enchevêtreure.....	18
1.6.3. Plancher à caisson :.....	18
1.6.3.1. Plancher à poutres superposées.....	18
1.6.3.2. Plancher à poutres croisées	18
1.7. La charpente en bois	19
1.7.2. Définition :.....	19
1.7.3. Types de charpente :	19
1.7.3.1. Charpente sans ferme	19
1.7.3.2. Charpente avec ferme	20
1.8. Conclusion :	20

CHAPITRE 2. DESORDRES ET ALTERATIONS STATIQUES DES PRINCIPAUX OUVRAGES DE STRUCTURE.....	21
2.1. Introduction :	21
2.2. Les fissures :	21
2.2.1. Les fissures superficielles :	21
2.2.1.1. Déformations statiques :	21
2.2.1.2. Les mouvements hygrothermiques :	22
2.2.1.3. Oxydation des fers	22
2.2.1.4. Joint de construction	23
2.2.1.5. Aux spectres.....	23
2.2.2. Les fissures lézardes (facteurs) :	23
2.3. Désordres statique dans les parois verticales :	23
2.3.1. Désordres statiques dus aux translations verticales :	24
2.3.1.1. Les tassements d'extrémité d'une paroi :	25
2.3.1.2. Les tassements intermédiaires :	26
2.3.1.3. Cas d'une paroi avec ouverture :	27
2.3.2. Désordres statiques dus aux translations horizontales :	28
2.3.2.1. Les glissements longitudinaux :	28
2.3.2.2. Les glissements transversaux :	28
2.3.3. Désordres statiques dues aux pivotements (rotation) :	29
2.3.3.1. La contre rotation :	29
2.3.3.2. Murs composés entre eux :	29
2.3.4. Désordre dues à l'action de l'eau et de l'humidité :	30
2.3.4.1. Echanges hypothermiques des parois :	30
2.4. Désordre statique dans les planchers :	31
2.4.1. Flèches et inclinaison des planchers :	31
2.4.1.1. Inclinaison vers les refends ou les poutres maitresses :	31
2.4.1.2. La contre flèche :	31
2.4.1.3. Dé liaisonnement entre planchers et façades :	32
2.4.1.4. Ruptures de pièces de charpentes :	32
2.4.2. Désordre statique dû à l'action de l'eau et d'humidité :	32

2.4.2.1. Le pourrissement des pièces de charpente :	32
2.4.2.2. Entre plancher apparents et planchers plafonnés :	33
2.5. Désordre statique dans les charpentes des combles :	33
2.5.1. Désordre statique dû à l'action de l'eau et d'humidité :	33
2.5.2. Poussée de la charpente du comble sur les murs périphériques :	34
2.5.2.1. Poussée par construction :	34
2.5.2.2. Poussée par altération :	35
2.6. Conclusion :	35
 CHAPITRE 3. METHODES ET APPROCHES DE DIAGNOSTIC STRUCTUREL DU BÂTI ANCIEN.	 36
3.1. Introduction :	36
3.2. Méthode de diagnostic structurel pour une réhabilitation classique non sismique :36	36
3.2.1. Le relevé constructif :	36
3.2.2. Analyse théorique :	36
3.2.2.1. Le schéma statique des forces :	37
3.2.2.2. La décente des charges :	37
3.2.2.3. La capacité portante théorique :	37
3.2.2.4. Le classement des éléments de structure :	37
3.2.3. Analyse clinique :	37
3.3. Méthodes de diagnostic pour une réhabilitation sismique :.....	38
3.3.1. Méthode simplifiée à l'usage des architectes :	38
3.3.2. Méthode proposée par le groupe de travail " Vulnérabilité du bâti existant " de l'Association française du génie parasismique (AFPS) :	38
.....	39
3.2.2.1. Approche qualitative	40
3.2.2.2. Approche quantitative :	41
3.2.3. Méthode FEMA 310 :	42
3.2.3.1. Présomption de vulnérabilité :	43
3.2.3.2. Analyse quantitative :	43
3.2.3.3. Analyse approfondie :	45

3.2.3.4. Le rapport final selon FEMA 310 :	45
3.2.3.5. Organigramme général de la méthode FEMA 310 :	46
3.2.4. Méthode ATC 40 :	47
3.3. Conclusion :	48
CHAPITRE 4. TECHNIQUE DE REHABILITATION STRUCTURELLE DU BÂTI ANCIEN CONSTRUIT EN MAÇONNERIE :	49
4.1. Introduction :	49
4.2. Modes d'intervention sur le patrimoine bâti :	49
4.2.1. La restauration :	49
4.2.2. La conservation :	50
4.2.3. L'entretien :	50
4.2.3.1. L'entretien correctif :	51
4.2.3.2. L'entretien d'urgence :	51
4.2.3.3. L'entretien planifié :	51
4.2.4. La rénovation :	51
4.2.5. La réhabilitation :	51
4.3. Techniques de renforcement structurel :	51
4.3.1. Définition :	51
4.3.2. Renforcement des murs en maçonnerie :	52
4.3.2.1. Renforcement par des tirants :	52
4.3.2.2. Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé :	52
4.3.2.3. Le chaînage :	52
4.3.2.4. Taxidermies avec des barres d'acier :	53
4.3.2.5. Les contreforts :	53
4.3.3. Renforcement des planchers :	53
4.3.3.1. Augmentation de la résistance pour les poutres et les poutrelles :	53
4.3.3.2. Montants intermédiaires :	54
4.4. Techniques de consolidation structurelle :	54
4.4.1. Définition :	54
4.4.2. Consolidation des murs en maçonnerie :	54

4.4.2.1. Consolidation par injection de coulis à la chaux :	54
4.4.2.2. Consolidation par cimentation :	55
4.4.2.3. Consolidation par parois armées :	55
4.4.2.4. Réfection des murs endommagés (remise en l'état initiale) :	55
4.4.3. Techniques de réparation des fissures :	56
4.4.3.1. La pose de témoin de contrôle de la fissure :	56
4.4.3.2. Technique des agrafes pour les fissures profondes :	56
4.4.3.3. Réparation d'une fissure par fixation de grillage :	57
4.4.3.4. Traitement des fissures par injection :	57
4.4.3.5. Traitement des fissures par colmatage	58
4.4.4. Consolidation des planchers :	58
4.4.4.1. Remplacement des appuis sur les poutres et poutrelles :	58
4.4.4.2. Pose additionnelle de dalles en béton armé :	58
4.4.4.3. Consolidation des ossatures et des fermes de couverture :	58
4.5. Consolidation et renforcement des fondations :	60
4.5.1. Consolidation et renforcement par injection de sol :	60
4.5.2. Elargissement des fondations en sous œuvre par semelle en béton armé :	60
4.5.3. La consolidation des fondations par des micropieux :	61
4.5. Conclusion :	61
 PARTIE 2 (PARTIE PRATIQUE) : UNE MISE A JOUR DU DIAGNOSTIC STRUCTUREL DU HAOUCH EL BEY, AVEC UNE PROPOSITION D'UNE STRATEGIE POUR LA REHABILITATION DE CE BATIMENT.....	
62	
 CHAPITRE 5. MISE A JOUR DU DIAGNOSTIC STRUCTUREL DU HAOUCH EL BEY :	
63	
 5.1. Lecture architecturale du Haouch El Bey :	
63	
5.1.1. Description architecturale des éléments de la cour 1 :	63
5.1.1.1. La partie est et sud :	63
5.1.1.2. La partie nord :	64
5.1.1.3. La partie ouest :	64
5.1.2. Description architecturale des éléments de la cour 2 :	64

5.2. Les techniques de construction du Haouch El Bey :	66
5.2.1. Les parties nord, est et sud de la cour 1 (Période ottomane) :	66
5.2.1.1. Les fondations :	66
5.2.1.2. Les murs :	66
5.2.1.3. La charpente de toiture :	67
5.2.2. Les parties de la cour 2 (période coloniale) :	67
5.2.2.1. Les fondations :	67
5.2.2.2. Les murs :	67
5.2.2.3. Les planchers :	67
5.2.2.4. La charpente de toiture :	68
5.3. Diagnostic structurel du Haouch El Bey :	68
5.3.1. Le relevé constructif :	68
5.3.1.1. Les parties nord, est et sud de la cour1 :	69
5.3.1.2. La partie est de la cour2 :	69
5.3.1.3. La parties nord, ouest et sud de la cour2 :	70
5.3.1.4. Synthèse :	71
5.3.2. Analyse théorique (par ETABS) :	73
5.3.2.1. Le logiciel Etabs :	73
5.3.2.2. Etapes de modélisation du Haouch El Bey sur Etabs 2016 :	73
5.3.2.3. Analyse théorique statique :	79
5.3.2.4. Analyse théorique dynamique :	81
5.3.2.5. Synthèse de l'analyse théorique :	84
5.3.3. Diagnostic structurel sur terrain :	84
5.3.3.1. Les murs de face extérieurs :	84
5.3.3.2. Les murs de face intérieurs :	88
5.3.3.3. Le plancher de l'étage du comble :	89
5.3.3.4. Les toitures :	90
5.3.4. Synthèse :	91
5.3.4.1. Les murs de face :	91
5.3.4.2. Le plancher de l'étage du comble :	91
5.3.4.3. La toiture :	91

CHAPITRE 06. STRATEGIE ET ACTIONS POUR LA REHABILITATION DU HAOUCH EL BEY.....	93
6.1. Stratégie de réhabilitation :.....	93
6.2. Actions pour la réhabilitation structurelle :.....	93
6.2.1. Travaux d’urgence :.....	93
6.2.1.1. Vérifier la stabilité du sol :.....	93
6.2.1.2. Stabilisation des murs du porche d’entrée :.....	94
6.2.2. Murs de renforts pour le porche d’entrée sud :.....	95
6.2.3. Le clouage des murs du porche d’entrée sud :.....	95
6.2.4. Retrouver la continuité des murs de l’angle sud-ouest :.....	96
6.2.5. Consolidation par des tirants métalliques des murs du porche d’entrée sud :.....	96
6.2.3.1. Objectifs :.....	96
6.2.3.2. Processus d’exécution :.....	97
6.2.6. Réparation des fissures lézardes :.....	100
6.2.7 Consolidation du plancher de l’étage du comble :.....	100
6.2.8. La flèche et l’inclinaison des pièces de charpente :.....	101
6.2.9. Consolidation des baies (façade ouest) :.....	101
6.3. Actions pour la réhabilitation architecturale :.....	102
6.3.1. Murs :.....	102
6.3.1.1. Enduits :.....	102
6.3.1.2. Drain périphérique des murs :.....	103
6.3.2. Toiture :.....	105
CONCLUSION GENERALE :.....	105
LIMITES ET PERSPECTIVES :	107
BIBLIOGRAPHIE :	108
ANNEXES :.....	111

Liste des figures:

Figure 1: Haouch El Bey, les années 1840.	1
Figure 2: Situation du Haouch El Bey.	2
Figure 3: Haouch el Bey, Décembre 2018.	2
Figure 4: Plan du Haouch El Bey, les années 1850.	3
Figure 5: Plan du Haouch El Bey, après 1870.	3
Figure 6 : Technique de pisé.	10
Figure 7: Vocabulaire de la maçonnerie de moellon.	10
Figure 8: Chaîne de harpe.	13
Figure 9: Jambe étrière.	13
Figure 10: Fondation à redans.	14
Figure 11: Fondation sur libage à empattement successifs.	14
Figure 12: Fondation par pieux.	15
Figure 13: Fondation à empattement successifs sous pile	15
Figure 14: Fondation par grille de charpente.	16
Figure 15 : Plancher à travure simple.	16
Figure 16: Poutre muralière.	17
Figure 17: Plancher à la française.	18
Figure 18: Appui des solives sur la poutre, plancher à la française.	18
Figure 19: Plancher à solives d'enchevêtrement.	19
Figure 20: Faux plancher.	19
Figure 21: Charpente sans ferme.	20
Figure 22: Ferme à entrain retroussée.	20
Figure 23: Cas courants du tassement d'extrémité d'une paroi verticale.	25
Figure 24: Types de fissures dans un tassement intermédiaire.	26

Figure 25: Fissures de flexion.....	27
Figure 26: Fissures de cisaillement.....	27
Figure 27: Fissure d'un glissement transversal intermédiaire d'une paroi longue.....	29
Figure 28: Fissure d'un glissement transversal d'extrémité d'une paroi longue.....	29
Figure 29: Glissement oblique à la rencontre de deux parois.....	30
Figure 30: La contre rotation.....	30
Figure 31: Inclinaison de plancher vers la poutre maitresse.....	31
Figure 32: La contre flèche.....	32
Figure 33: Vocabulaire de ferme à entrain retroussée.....	34
Figure 34: Pièces de charpente vulnérables à l'eau.....	34
Figure 35: Comble à surcroit/ à la Mansard.....	35
Figure 36: Ferme à entrain retroussée.....	35
Figure 37: Exemple d'une fiche de relevé.....	39
Figure 38: Organigramme de la méthode FEMA 310.....	46
Figure 39: Courbe de capacité de déplacement d'un bâtiment.....	47
Figure 40: Renforcement d'un mur par des tirants.....	52
Figure 41: Taxidermies avec des barres d'acier.....	53
Figure 42: Renforcement par chaînage.....	53
Figure 43: Renforcement d'un plancher par un montant intermédiaire.....	54
Figure 44: Renforcement d'un mur par un contrefort.....	54
Figure 45: Consolidation d'un mur par parois armée.....	55
Figure 46: Cimentation par injection sous pression.....	55
Figure 47: Traitement d'une fissure par un grillage.....	57
Figure 48: Consolidations des éléments d'une ferme par des armatures post-contraintes.....	59
Figure 49: Consolidation des éléments d'une ferme.....	59
Figure 50: Consolidation d'un plancher par la pose d'une dalle en béton armé.....	59

Figure 51: Consolidation d'une fondation par semelle en béton armé.....	61
Figure 52: Stratification historique du Haouch El Bey.....	63
Figure 53: Le coin nord-est de la cour 1.....	64
Figure 54: Le mur de la façade nord (vue de l'intérieur de cour 1).....	64
Figure 55: La ferme du comble.....	65
Figure 56: Langage architecturale de la partie coloniale.....	65
Figure 57: Vue sur les espaces de stockage.....	65
Figure 58: Un espace de la partie ouest de la cour 2.....	65
Figure 59: La fermeture de l'une des entrées principales de la cour 1 (façade est).....	66
Figure 60: La construction d'une nouvelle pièce (la cour 1).....	66
Figure 61: Murs extérieur (façade est, cour1).....	66
Figure 62: Pilier en pierre de taille.....	66
Figure 63: Mur en maçonnerie de moellon (partie coloniale).....	67
Figure 64: Tuiles demi circulaire.....	67
Figure 65: Plafonds de la partie ouest de la cour 2.....	68
Figure 66: Plancher à la française.....	68
Figure 67: La ferme du comble.....	68
Figure 68: La ferme de la partie nord de la cour 2.....	68
Figure 69: Ouvrages de structure, partie est et sud de la cour 1.....	69
Figure 70: Ouvrages du structure, partie est de la cour 2.....	70
Figure 71: Ouvrages de structure, partie nord de la cour2.....	70
Figure 72: Le squelette structurel de l'édifice.....	72
Figure 73: Model architectural du Haouch El Bey, Revit 2017.....	73
Figure 74: La grille des ouvrages de structure sur Autocad 2015.....	74
Figure 75: Propriété mécanique de la maçonnerie.....	75
Figure 76: Introduction du format Dxf sur Etabs.....	75

Figure 77: Propriété de la section des murs en maçonnerie.....	76
Figure 78: Propriété de la section du plancher en bois.	76
Figure 79: Propriété des piliers en pierre de taille.	76
Figure 80: Le model en 3d du bâtiment sur Etabs 2016.	77
Figure 81: Paramètres du spectre de réponse sismique.....	78
Figure 82: Spectre de réponse sismique sur Etabs.	78
Figure 83: Création du maillage au niveau du model.	79
Figure 84: Les forces internes à ELU, sous FVM. Etabs 2016.....	79
Figure 85: Contraintes internes à ELU, sous SVM, façade est, Etabs 2016.....	80
Figure 86: Contraintes internes à ELS, sous SVM, façade est, Etabs 2016.....	80
Figure 87: Les points critiques de déplacement (murs).	82
Figure 88: Déplacement maximum du bâtiment.....	82
Figure 89: Les forces internes à GQEx, sous F12, Etabs 2016.....	82
Figure 90: Contraintes internes à 0.8GEx, sous S12, Etabs 2016.....	83
Figure 91: Contraintes internes à GQEx, sous S12, Etabs 2016.....	83
Figure 92: Endroit à examiner visuellement, façade ouest	84
Figure 93: Fissures lézardes verticales et à 45°, mur de face extérieur ouest.....	85
Figure 94: Fissure vertical de type lézarde, mur de face extérieur ouest.....	85
Figure 95: Effondrement total d'une partie du mur de face extérieur ouest.....	85
Figure 96: Effondrement partielle de mur au-dessus de l'entrée principale sud de la cour 1.	86
Figure 97: Fissures lézardes à 45° au-dessus de l'entrée principale de la cour 2.	86
Figure 98: Effondrement partiel, mur de refend ouest, entrée de la cour 2	87
Figure 99: Tassement d'extrémité long, extrémité gauche de la paroi extérieure sud. L'an 2019.....	87
Figure 100: Fissures lézardes, entrée de la cour 2.	87
Figure 101: Inclinaison de la paroi sud, entrée cour 2.....	87

Figure 102: Tassement d'extrémité long, extrémité gauche de la paroi extérieure sud. L'an 2000.....	87
Figure 103: Effondrement partiel du plancher au-dessus de l'entrée de la cour 2.....	88
Figure 104: Fissures lézardes verticales le long de mur ouest de l'entrée sud, cour 2.	89
Figure 105: Fissure lézarde verticale, mur de face intérieur ouest, cour 1.	89
Figure 106: La disparition de quelques poutrelles et lames en bois.	89
Figure 107: Une flèche au niveau d'un entrain de la charpente.	90
Figure 108: Pourrissement, charpente du comble.....	90
Figure 109: Effondrement de la charpente du coin nord-est, cour 1.....	90
Figure 110: Disparition des tuiles, le coin nord-est, cour 1.	90
Figure 111: Synthèse des désordres au niveau des murs.	92
Figure 112: Stabilisation des murs de porche d'entrée de la cour 2.	94
Figure 113: Stabilisation des murs par des étalements.	94
Figure 114 : Consolidation par clouage de couture.	95
Figure 115: Murs de contreforts, face extérieur, porche d'entrée cour2.....	95
Figure 116: La cimentation par coulée, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.	96
Figure 117: Différentes forme d'ancre.	97
Figure 118: Tirant métallique.	97
Figure 119: principe de mise en place de tirants de stabilisation au moyen de plaques d'about	98
Figure 120: Principe de mise en place des tirants au-dessus de l'entrée sud, cour 2.....	98
Figure 121: Consolidation par des tirants métalliques, la mairie d'El Harrach.	99
Figure 122: Consolidation par des fibres de carbone.....	99
Figure 123: Technique de reprise des fissures.	100
Figure 124: Technique des suppléments de résistance pour les planchers.	101
Figure 125 : Différentes méthodes de consolidation des fenêtres.	102
Figure 126: Les Contraintes à ELU, cas d'une fenêtre de la façade extérieur ouest.	102

Figure 127: Utilisation du mortier à base du ciment, façade ouest, cour1	102
Figure 128: Application d'un mortier à base de chaux sur un mur en maçonnerie de moellon, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.	104
Figure 129: Remontées capillaires, façade extérieur est.....	104
Figure 130: Frottage à la main des joints, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.....	104
Figure 131: Principe de drain périphérique.....	105
Figure 132: La pose d'un drain périphérique, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.	105
Figure 133: Gouttières pendantes.	105

Liste des tableaux:

Table 1: Exemple d'une grille d'évaluation. 39

Table 2: Tableau d'évaluation de la présomption de la vulnérabilité. 40

Table 3: Typologie des dommages sismiques selon AFBS. 42

Table 4: *Checklist* FEMA 310..... 43

Table 5: Sélection du type d'analyse de vulnérabilité, méthode FEMA 310. 44

Tableau 6 : Charges statiques sur les planchers(Auteur)..... 78

Tableau 7 : Les déferentes combinaisons (Auteur)..... 79

Tableau 8 : Résultat de l'analyse théorique à ELU avec une comparaison (Auteur)..... 80

Tableau 9 : Le déplacement de quelque point critique (Auteur)..... 81

Tableau 10 : Résultat de l'analyse théorique à GQEx, avec une comparaison (Auteur)..... 83

Tableau 11 : Altérations et désordres, mur de face nord et est (Auteur)..... 84

Tableau 12 : Altérations et désordres, murs de face ouest et sud (Auteur)..... 85

Tableau 13 : Altérations et désordres, murs de face intérieur (Auteur)..... 88

Tableau 14 : Désordres et altérations des toitures (Auteur)..... 90

Chapitre introductif

1. Introduction :

MEDEAH ou Médéa, une ville algérienne à 90 km au sud de la capitale Alger, sur les hauts plateaux qui ferment la vallée de la Mitidja. Elle est à 920 m d'altitude au pied de coteaux couverts de vergers et de vignes, elle est classée zone sismique 2b.¹

Lors de la période de domination turque, Médéa était la capitale de Beylik sud (Titteri)², la période du Bey Mostefa Boumezrag (le dernier Bey de Beylik Titteri entre 1819-1830) était remarquable, il a été nommé Bey de Titteri comme successeur de Bey Ibrahim El Qertely, la ville a vécu en ruines dans la période du Bey Ibrahim, suite à l'épuisement des taxes imposées par la force et la révolution connue sous le nom de Révolution des Arabes et les koroughlis (les ottomans Algériens) aux autorités ottomanes en 1818, et brûla une partie de la ville jusqu'à l'incendie de la mosquée malikite.

La période du Dey Mostefa Boumezrag était la plus prospère sur le plan architectural, la ville a connu la réhabilitation et la construction de plusieurs édifices tels que : la réhabilitation de mosquée malikite, la construction de sa résidence d'hiver (actuellement Dar El Emir Abdelkader) et aussi sa résidence d'été appelé Haouch-El-Bey (voir figure1).

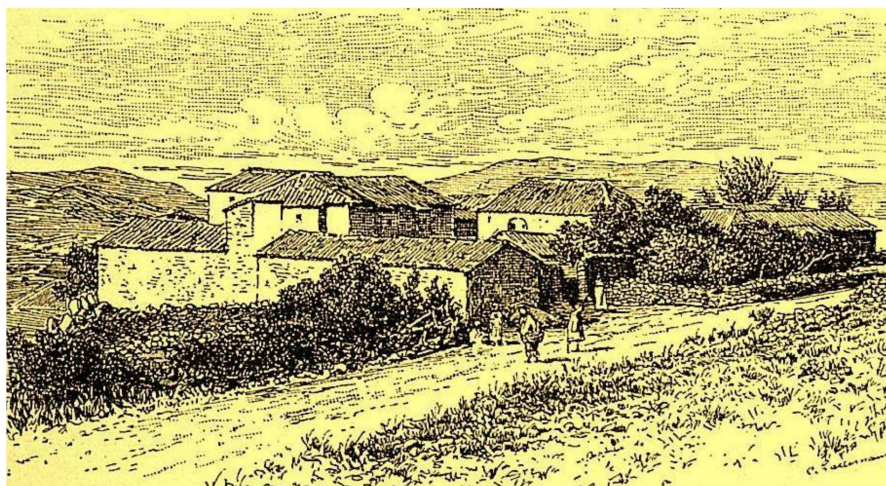


Figure 1: Haouch El Bey, les années 1840.

Source : Rouibah Omar 2018.

1 Centre National De Recherche Appliqué En Génie-Parasismique, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / Version 2003

2 عبد الرحمن الجليلي، تاريخ المدن الثلاث: الجزائر-المدينة-سليمانية، في موسمها الألفي، دار الأمة، 2007، صفحة 326

Haouch-El-Bey a été construit en 1820, il est situé sur le haut de la ville de Médéa à environ deux kilomètres du centre historique de la ville (voir figure2), c'est un ensemble constitué de deux parties, comprenant chacune une cour délimitée par des corps de ferme. Cette résidence d'été du Bey du Titteri a servi également de résidence provisoire à l'émir Abdelkader, durant l'organisation de la résistance populaire contre la colonisation française au Titteri, à l'époque française, il a été transformé en caserne, puis en ferme³ (voir figure 3).

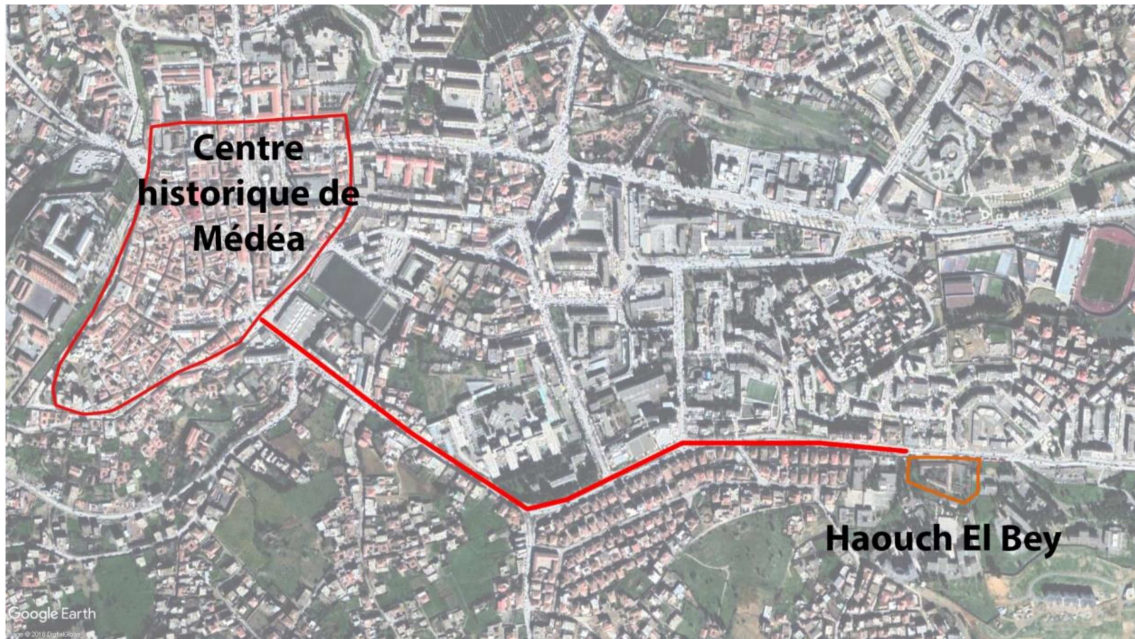


Figure 2: Situation du Haouch El Bey.

Source : Google Earth, modifier et compléter par auteur..



Figure 3: Haouch el Bey, Décembre 2018.

Source : Auteur.

3. دراسة ترميم وتهيئة حوش الباي، الحالة الراهنة، نبذة تاريخية حول المعلم.

En 2000, le bâtiment a fait l'objet d'une étude de restauration et de mise en valeur, lancé par la direction de la culture de la wilaya de Médéa, et fait par l'agence d'architecture « Atelier 3 Dimensions Algérie ».

Après l'élaboration de l'étude de restauration par BET A3D, les travaux n'ont pas commencé. Selon Mr. Merbouche Ahmed (responsable du service de la préservation du patrimoine au niveau de la direction de la culture de la wilaya de Médéa) cela est dû aux discours qui concernent la valeur du bâtiment actuel, vu qu'une partie importante du Haouch El Bey a été démolir et reconstruite par les Français, la question pour les responsables au niveau de la direction de la culture est :est-ce qu'on est en train de restaurer Haouch El Bey: la résidence d'été du Bey de Titteri et la résidence provisoire à l'Émir Abdelkader (voir figure 4)? Où est-ce qu'on est en train de restaurer une ferme coloniale (voir figure 5) ? Entre ceux qui disent que ces modifications importantes au niveau du Haouch El Bey font partie de la stratification historique du bâtiment et donc il faut entamer les travaux, et ceux qui disent que nous sommes en train de parler complètement d'un autre bâtiment, qui est une ferme de l'époque coloniale (certains hypothèse disent que le vrai Haouch El Bey a été démolir totalement dans les années 1870), les travaux n'ont jamais commencé jusqu'au aujourd'hui.

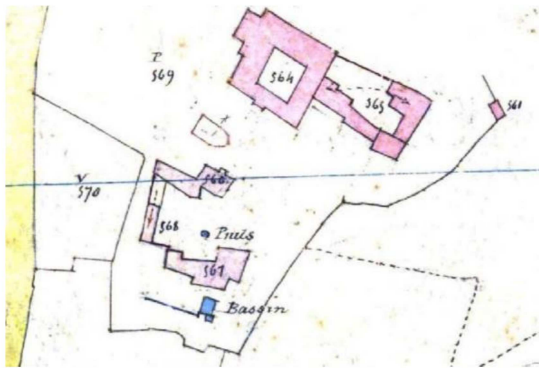


Figure 4: Plan du Haouch El Bey, les années 1850.

Source : Plan cadastral du génie militaire français, Rouibah Omar 2019.

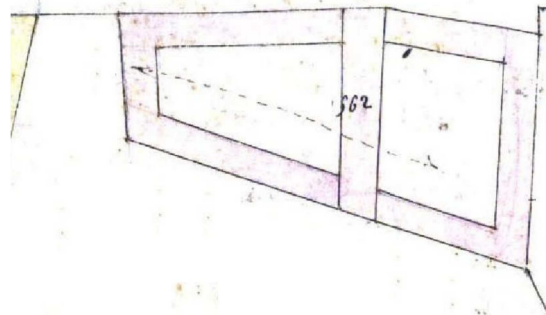


Figure 5: Plan du Haouch El Bey, après 1870.

Source : Plan cadastral du génie militaire français, Rouibah Omar 2019.

En 2015, le bâtiment a été récupéré par le OGEBC (office national de gestion et d'exploitation des biens culturels), et une volante de la part des responsables de la direction de la culture pour entamer les travaux de réhabilitation du Haouch El Bey, selon Mr Merbouche Ahmed : un dossier a été envoyé au ministère de la culture contient un ensemble des arguments pour démontrer pas la valeur du bâtiment actuel, mais la valeur du lieu où le bâtiment a été construit, selon Mr Mermouche Ahmed : le lieu du bâtiment était un endroit de rencontre entre

les chefs de tribus de la région du Titteri et le Bey ottomane, pour ensuite inscrire le bâtiment dans une opération de valorisation de ce lieu.

2. Problématique générale et spécifique :

La connaissance des ouvrages de structure d'un bâtiment, ainsi que ces comportements à l'état statique et dynamique, est primordiale dans une opération de diagnostic, la finalité d'un diagnostic structurel est une opération de réhabilitation structurelle, cette dernière vise la sauvegarde des vies humaines.

Aujourd'hui, après 19 ans de dernier diagnostic structurel du bâtiment actuel, ce dernier a connu des nouvelles dégradations dus aux facteurs humains et naturels,

Si le bâtiment sera objet d'une opération de réhabilitation :

Comment pouvons-nous évaluer le comportement structurel de ce type de bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle ? Est-ce que le diagnostic qu'a été fait en 2000 est valable aujourd'hui sur son aspect structurel ?

3. Hypothèses :

Les hypothèses de départ de notre recherche se résument comme suit :

- L'évaluation du comportement structurel du bâtiment peut se faire sur terrain par un examen visuel.
- L'évaluation du comportement structurel du bâtiment peut se faire à l'aide de l'outil informatique.
- L'évaluation du comportement structurel du bâtiment peut se faire à l'aide des méthodes de diagnostic structurel.
- Le diagnostic structurel du Haouch El Bey est valable, et nous pouvons entamer les travaux de réhabilitation structurelle telle qu'ils sont préconisés dans l'étude.
- Le diagnostic structurel du Haouch El Bey n'est pas valable, et nous ne pouvons pas entamer les travaux de réhabilitation structurelle telle qu'ils sont préconisés dans l'étude.

4. Objectifs :

Le présent travail a comme objectif :

- Connaitre les principaux désordres et altérations des ouvrages de structure d'un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle, y compris notre bâtiment objet d'étude.
- Déterminer le comportement structurel du Haouch El Bey.
- Valider ou pas le diagnostic qu'a été fait l'an 2000 sur son aspect structurel.
- Proposer des solutions pour la réhabilitation structurelle des ouvrages de structure du Haouch El Bey ayant des désordres et des altérations.

5. Méthodologie :

Le diagnostic d'une manière générale est *l'identification d'une maladie par ses symptômes* (Antidote 8). Pareilles pour les bâtiments, l'identification d'une maladie ou pathologies par ses symptômes—dans notre cas les désordres et altérations des ouvrages structurales—passe par trois étapes clés : connaître le bâtiment, comprendre le comportement structural du bâtiment et agir pour assurer l'équilibre statique et dynamique du bâtiment.

➤ *Connaitre le bâtiment:*

Pour la connaissance d'un bâtiment—surtout un bâtiment ancien —, nous avons deux éléments qu'on doit les maîtriser : la composition structurale du bâtiment et les désordres au niveau des ouvrages structurels.

- La composition structurale du bâtiment :

Pour connaître la composition structurale d'un bâtiment, on doit obligatoirement passer par la stratification historique du bâtiment, c'est les différentes phases et les diverses modifications que le bâtiment a subies de sa première date de construction jusqu'à notre jour, ensuite en basant sur cette première phase, on peut identifier les différents ouvrages de structure, ainsi que ces matériaux de construction.

- Les désordres des ouvrages structurels :

Après avoir identifié les ouvrages de structure du bâtiment et ces matériaux de construction, on arrive au diagnostic structurel de ces derniers, c'est la phase qui permet de ressortir les désordres et les altérations statiques dans chaque type d'ouvrage structural : les fondations, les parois verticales, les planchers et les charpentes de comble.

➤ *Comprendre le comportement structural du bâtiment :*

Les désordres et les altérations statiques sont de simples informations, qui ne donnent pas une vraie lecture du comportement structural du bâtiment qu'est le principal objectif d'un diagnostic structural, pour cela, on a besoin d'une ou des méthodes pour rassembler ces informations, et donner une vraie lecture sur le comportement structural. Il y a plusieurs méthodes, mais on peut les classer en deux catégories : les méthodes classiques statiques non sismiques, et les méthodes dynamiques destinées à évaluer la vulnérabilité sismique du bâtiment.

➤ *Agir pour un équilibre statique et dynamique du bâtiment :*

Enfin, après ressortir les désordres et les altérations, et comprendre le comportement structural du bâtiment, on doit superposer ces deux éléments pour ressortir les zones à renforcer ou à consolider. Le renforcement concerne les parties sous dimensionnées, résultat de l'analyse théorique (à travers les différentes méthodes situées précédemment), et la consolidation concerne les parties ayant des désordres ou des altérations.

Donc, la méthode qui sera utilisée dans la recherche est une combinaison entre la méthode quantitative, qui assure la collecte des données quantifiables qui aboutissent à des résultats chiffrés et numériques, c'est une mathématisation de la réalité⁴, et la méthode qualitative, on parle d'une méthode mixte.⁵

6. Structure du mémoire :

Dans le but de répondre aux problèmes posés, on va structurer notre travail de recherche en deux parties avec six chapitres en tous, comme suit :

Partie 1 (partie théorique) : Une étude bibliographique sur le diagnostic du principaux ouvrages de structure d'un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère prés industrielle.

Chapitre 1 : Ouvrages de structure d'un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle.

Chapitre 2 : Désordres et altérations statiques des principaux ouvrages de structure.

Chapitre 3 : Méthodes et approches de diagnostic structural du bâti ancien.

Chapitre 4 : Techniques de réhabilitation structurelle du bâti ancien construit en maçonnerie.

⁴ Maha, Messaouden. «*Cour de méthodologie de recherche.*» Alger : Ecole Polytechnique d'Architecture et D'Urbanisme (EPAU), 2017.

⁵ Idem.

Partie 2 (partie pratique) : Une mise à jour du diagnostic structurel du Haouch El Bey, avec une proposition d'une stratégie pour la réhabilitation de ce bâtiment.

Chapitre 5 : Mise à jour du diagnostic structurel du Haouch El Bey.

Chapitre 6 : Stratégie et actions pour la réhabilitation du Haouch El Bey.

Partie 1 (partie théorique) : Une étude bibliographique sur le diagnostic du principaux ouvrages de structure d'un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère prés industrielle.

Chapitre 1 : Ouvrages de structure d'un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle.

1.1. Introduction :

La connaissance des ouvrages structurels d'un bâtiment est une phase primordiale avant d'entamer un diagnostic structurel de ce dernier, elle permet de donner une première idée sur le type de comportement structurel qui peut présenter le bâtiment, donc l'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux ouvrages de structure d'un bâtiment ancien construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle, cette dernière signifiée : avant l'introduction du fer comme élément de construction.

1.2. La maçonnerie :

1.2.1. Définition:

Le terme maçonnerie désigne un assemblage de plusieurs matériaux de mêmes genres ou de genres déférents, naturels ou artificiels, de taille plus ou moins importante, liés par du mortier, ou encore simplement posés à sec sans liant. « *Ces assemblages forment les parois verticales des ouvrages appelés murs ou réalisent des surfaces courbes ou gauches appelées voutes* »⁶.

1.2.2. Type de maçonnerie :

La distinction entre les maçonneries se fait par la nature des matériaux utilisés pour leur exécution, basant sur cette description, on distingue :

1.2.2.1. La maçonnerie en pisé :

Le pisé est une maçonnerie de terre crue, on l'obtient par la mise en œuvre et le compactage de la terre cuite dans un moule réalisé à l'aide de planches de bois appelées « banches »⁷ (voir figure 6). Un mur en pisé doit être protégé face aux remontées capillaires par un soubassement en maçonnerie de pierre, aussi. Il doit être aussi protégé de l'action de la pluie par un enduit de mortier ou par le débord du toit du bâti.

⁶ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p290.

⁷ Ibid.p291.

1.2.2.2. La maçonnerie de moellon:

La maçonnerie de moellon ou limousinage est réalisée avec des pierres appelées moellons, dont les dimensions sont telles qu'un homme peut les soulever et les transporter facilement⁸, elle est classée suivant la dureté et la résistance de la roche d'origine, on distingue :

Les moellons durs ou de roches, destinées aux fondations et aux soubassements, les travaux hydrauliques, les murs et massifs demandant une grande résistance, etc.

Les moellons dits traitables ou demi-durs ou de banc franc.

Les moellons dits tendres, de faible résistance à l'écrasement, mais faciles à tailler, qui sont employés pour la partie haute des ouvrages et pour réaliser des parements parfaitement dressés à peu des frais.

A noter que le principal défaut des maçonneries de moellons provient de cette hétérogénéité entre les parements et la maçonnerie de blocage que constitue le remplissage central (voir figure 7). Du fait de la grande plasticité des mortiers utilisés, le noyau central se tasse plus que les parements, ce que peut entraîner une désolidarisation de ceux-ci, surtout en cas d'insuffisance ou de mauvaise répartition des parpaings ou longues boutisses, ce désordre se caractérise par une déformation convexe des parements appelée « bouclage », ce qui est très préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage.⁹

1.2.2.3. La maçonnerie de pierre de taille :

La pierre de taille ou pierres d'appareil sont des blocs de grandes dimensions dont les formes prédéterminés sont obtenus par une taille spéciale. Ce sont d'ordinaire des parallélépipèdes rectangles¹⁰.

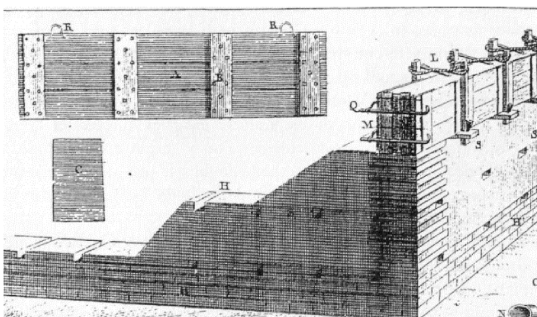


Figure 6 : Technique de pisé.

Source : Abbé Rozier 1793 : t. VII et p. 659. Disponible sur <<https://journals.openedition.org>>. Consulté le 12 décembre 2018.

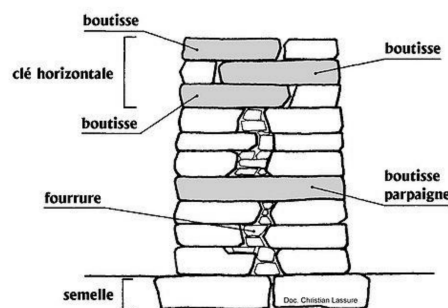


Figure 7: Vocabulaire de la maçonnerie de moellon.

Source : Laurent Busseau, Disponible sur <<http://www.historien-sans-frontiere.com>>.12 décembre 2018.

⁸ Idem.

⁹ Ibid.p293.

¹⁰ Ibid.p295.

1.2.2.4. La maçonnerie de libage :

Le libage est un moellon de fort échantillon dont les lits ont été taillés, les autres faces étant simplement dégrossies au marteau ou taillées grossièrement à l'aide du poinçon, elle est utilisée dans les ouvrages de fondation, ainsi que comme chaînage ou sommier dans des maçonneries très ordinaires, entièrement en moellons¹¹.

1.2.2.5. La maçonnerie mixte:

La maçonnerie mixte est celle dont les parements et l'intérieur sont construits d'une manière différente. Plus souvent, ce type de construction est employé pour des raisons purement économiques.

A noter que ce type de maçonnerie exige de très grandes précautions pour éviter les tassements différentiels.

1.3. Le chaînage :

1.3.1. Définition :

En architecture, la chaîne est un pilier de pierre, de brique, de béton ou même métallique, avec peu de points de saillie, et il est destiné à consolider un mur en maçonnerie.

1.3.2. Types de chaînage :

1.3.2.1. Le chaînage horizontal :

Le chaînage horizontal est un élément de renfort intégré dans les murs. Le chaînage horizontal est réalisé soit en béton armé, c'est-à-dire qu'il est constitué d'aciers longitudinaux enrobés dans le béton¹² ou par « *des bandeaux horizontaux en pierre de taille parpaing, recoupant les façades dans leur hauteur, en général au niveau des planchers* »¹³.

1.3.2.2. Le chaînage vertical :

Le chaînage vertical ou raidisseur vertical est comme le chaînage horizontal est un élément de renfort intégré dans les murs. Le chaînage vertical est réalisé soit en béton armé ou par l'emploi de la pierre de taille, ce dernier est courant dans la maçonnerie mixte¹⁴. La liaison de ces chaînes en pierre de taille avec le corps courant du mur en moellons ou en briques,

¹¹ Ibid.p295.

¹² Ooreka.fr, Disponible dans <<https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/727323/chainage-horizontal>> consulté le 08 octobre 2018.

¹³ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p297.

¹⁴ Idem.

nécessite la réalisation des harpes dont le rôle est proposé des surfaces horizontales de contact, permettant par frottement la transmission d'efforts horizontaux, donc une chaîne verticale de pierre de taille travaille en compression et en traction. (Voir figure 8).

1.4. Les murs :

Il existe plusieurs types de murs. Selon leur situation dans l'édifice ou suivant leur rôle structurel ou fonctionnel dans le bâtiment, ils sont appelés :

1.4.1. Mur de fondation :

Les murs de fondation sont des murs épais, la plupart du temps enterrés, son rôle est de transmettre et de répartir sur le sol les forces verticales et horizontales apportées par le bâti¹⁵, généralement construit de grosse pierre de bonne qualité telle que la maçonnerie de moellon et de libage.

1.4.2. Mur de face:

Le mur de face est celui qui donne sur la rue ou sur la cour. Ces murs sont souvent en maçonnerie de pierre de taille ou maçonnerie mixte (le choix de type de maçonnerie est dépend de la situation économique du maître d'ouvrage ou le besoin de la rapidité d'exécution des travaux).

Un mur de face est généralement construit plus épais à sa base qu'à son sommet (le fruit). On augmente ainsi la stabilité du mur tout en faisant une économie de matériau. Un mur est dit d'aplomb, lorsqu'il est construit avec des parois verticales, si par suite de malfaçons, d'affaiblissement du terrain ou de poussée quelconque, le parement du mur vient en dehors de la verticale, on dit qu'il y a un surplomb ou contre fruit¹⁶.

1.4.3. Mur mitoyen :

Le mur mitoyen est placé sur la ligne séparant deux propriétés, appartient pour moitié aux deux propriétaires. L'intersection d'un mur mitoyen avec un mur de face sur la hauteur de rez-de-chaussée est appelée « jambe étrière » ou « jambe boutisse ». À Paris par exemple, ce type de mur est réalisé en pierre de taille (voir figure 9).

¹⁵ Ibid.p287.

¹⁶ Ibid.p288.

1.4.4. Mur de refend :

Le refend est un mur porteur séparatif à l'intérieur du bâtiment, il participe à sa stabilité horizontale et verticale, c'est un élément de contreventement¹⁷. Dans les constructions anciennes, « ils servent d'appui aux planchers et participent à la descente des charges jusqu'au niveau du sol. Ils sont également utilisés pour reprendre les poussées de voutes de cave et assurent les liaisons indispensables à la stabilité des différentes parties de la construction, ils peuvent aussi servir de support aux conduits de fumée »¹⁸.

Mur d'allège : Le mur d'allège est en générale un mur situé sous une baie de fenêtre¹⁹. Dans les constructions anciennes « un mur de peu d'épaisseur, qui supporte la pierre d'appui d'une fenêtre. Monté le plus souvent après les trumeaux, c'est une maçonnerie de remplissage exécutée entre les tableaux des baies »²⁰

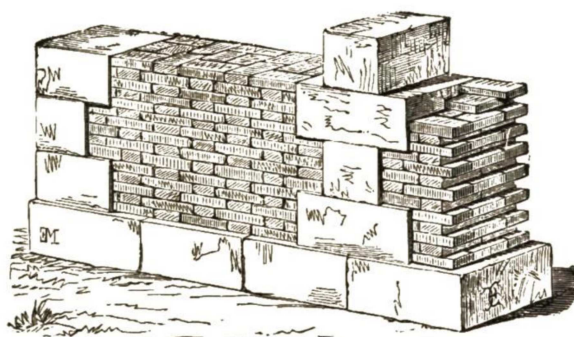


Figure 8: Chaîne de harpe.

Source : meubliz.com.

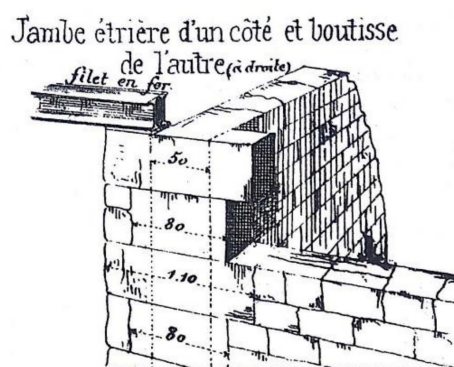


Figure 9: Jambe étrière.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

1.5. Les fondations :

Une fondation est un ouvrage de structure qui prend toujours appui sur un sol d'assise. Elle joue le rôle d'interface entre la construction et le sol. Ainsi, quel que soit le matériau utilisé, sous chaque porteur vertical, mur, voile ou poteau, il existe une fondation.²¹

¹⁷ Ooreka.fr, disponible dans <<https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/280755/mur-de-refend-qu-est-ce-que-c-est>> consulté le 09 octobre 2018.

¹⁸ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p288.

¹⁹ Dictionnaire BTP. Disponible dans <<https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=6156>> consulté le 09 octobre 2018.

²⁰ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p290.

²¹ Prof. Amar KASSOUL, Cours : Ossatures Bâtiment–MASTER Génie Civil–Option : Structures civiles et industrielles, année universitaire 2015/2016, UHB Chlef.

La nature de sol ainsi que la nature de construction sont deux éléments primordiaux pour le choix de type de fondation. Dès le 19^e siècle, une reconnaissance de sol était effectuée à l'aide d'une tarière à main en fer, les sols rencontrés étaient de natures très diverses, mais il était classé en deux groupes définissant le mode de fondation à utiliser :²²

Les bons sols : ce sont des sols incompressibles ou peu compressibles, tels ceux à base de roche, de gravier, de sable ou même d'argile compacte.

Les mauvais sols : ce sont des sols fortement compressibles, tels les terrains argileux ou glaiseux à forte teneur en eau, les terrains tourbeux, les sables mouvants, la terre végétale ou les remblais.

1.5.1. Fondation sur bon sol :

1.5.1.1. Sous un mur :

Fondation sur libage à empattement successifs : Ce type de fondation est constitué d'un mur en maçonnerie de libage (voir §1.2.2.4), plus épais que le mur qui serait situé au-dessus. Le dimensionnement de cette largeur de fondation est variable suivant les architectes²³, la différence d'épaisseur entre la fondation et le mur était absorbée, suivant son importance, par une, deux ou même trois retraites successives, qui la répartissaient également de part et d'autre du mur (voir figure 10).

Fondation à redans : Lorsque le sol est incliné, la fondation comportait une série de redans (voir figure 11).

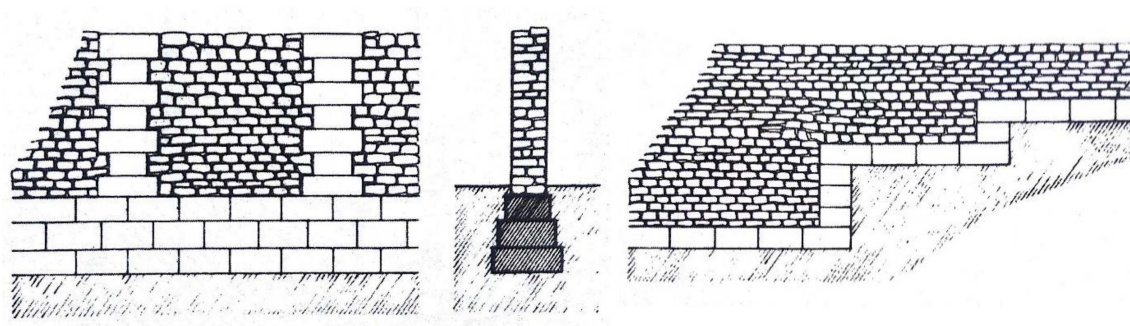


Figure 10: Fondation sur libage à empattement successifs.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

Figure 11: Fondation à redans.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

²² Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p325.

²³ Idem.

1.5.1.2. Sous un poteau ou un une colonne :

Fondation à empiètement successif sous pile : Ce type de fondation est destiné à l'élément porteur isolé. De forme parallélépipédique ou à gradins, il était centré à l'axe du poteau ou de la colonne (voir figure 12).

1.5.2. Fondations sur mauvais sol :

1.5.2.1. Fondation par pieux:

Les pieux en bois sont battus jusqu'au refus, c'est-à-dire enfoncés jusqu'à ce que le sol ne l'accepte plus. Le battage terminé, les pieux sont coupés au niveau du sol (recépage), et leurs têtes sont liaisonnées à l'aide d'une grille de charpente formée de longrines et de traversines, le tout est surmonté par une plateforme en madriers de 8 à 12 cm d'épaisseur qui servait de support au mur²⁴ (Voir figure 13).

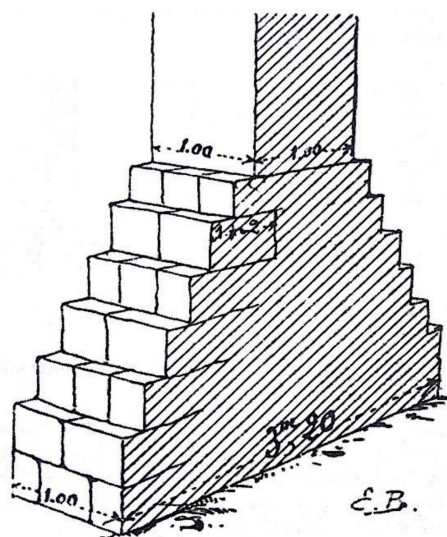


Figure 12: Fondation à empiètement successifs sous pile
Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

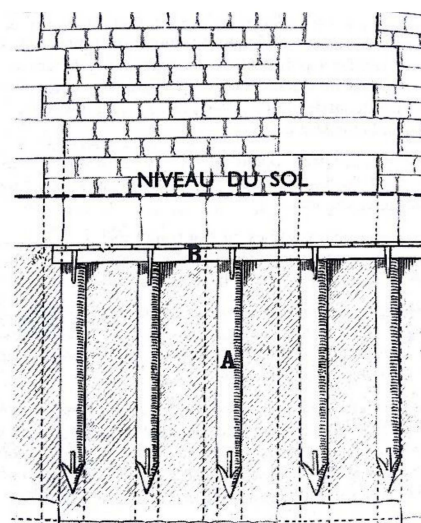


Figure 13: Fondation par pieux.
Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

1.5.2.2. Fondation par radier ou grille de charpente :

Dans un sol argileux, le battage est inefficace (pas d'effet de pointe et forces de frottement insuffisantes), la méthode consiste à disposer directement sur le sol une grille de charpente « tant pleins que vides ». Les intervalles entre les pièces de bois sont dégagés, le vide

²⁴ Ibid, p326.

est rempli par un empierrement maçonné recouvert d'un plancher en madriers jointifs comme pour la fondation sur pieux (voir figure 14).

1.5.2.3. Fondation par excavation et remplacement du mauvais sol

Avant l'excavation et le remplacement de mauvais sol, une enceinte fermée à l'aide de pieux et de palplanches jointives est réalisée à la périphérie de l'emprise du futur bâtiment. Le sol situé à l'intérieur du volume circonscrit est excavé jusqu'à trouver un terrain suffisamment incompressible et résistant. L'excavation est remplie de pierrailles maçonnées formant une concrétion (béton), jusqu'à la hauteur fixée pour l'établissement de la première assise de maçonnerie²⁵.

1.6. Les planchers :

Le plancher est une aire plane horizontale séparant deux niveaux d'une construction et il est capable de supporter des charges, donc le plancher est un élément porteur. « *Les dallages sur terre-plein peuvent être assimilés à des planchers. Il peut être exécuté en bois, en acier ou en béton armé* »²⁶. Dans les constructions anciennes construites avant l'ère préindustrielle, on a seulement des planchers exécutés en bois.

Un plancher en bois est une structure porteuse constituée de pièces de charpente horizontales, qui sépare une construction en plusieurs niveaux²⁷, cette charpente horizontale qu'est l'ossature de plancher est appelée travure²⁸.

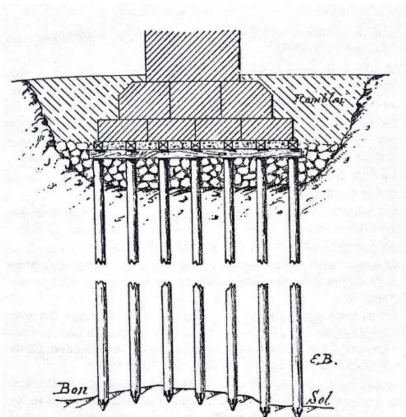


Figure 14: Fondation par grille de charpente.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent.

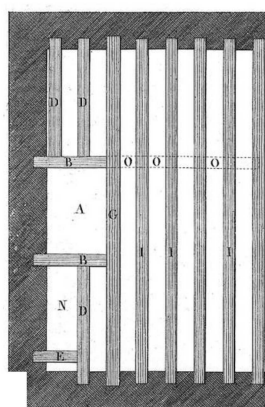


Figure 15 : Plancher à travure simple.

Source : Rondelet 1810 [20, p.138] – Pl. LXXXV de l'édition de 1828. Disponible sur [http : //bestrema.fr/planchers-bois-anciens/](http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens/), consulté le 24 décembre 2018.

²⁵ Ibid. p327.

²⁶ Prof. Amar KASSOUL, *Cours : Bâtiment 2*, Licence Génie Civil-Option : Construction Bâtiment, année universitaire 2012/2013, UHB Chlef.

²⁷ Jean-François GARDÈRE, *Les 8 Conseils d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de Midi-Pyrénées*, CAUE du Gers, juillet 2014.

²⁸ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p365.

1.6.1. Plancher à travure simple ou vulgaire :

Elle se compose d'un simple ensemble de solives posées sur des murs qualifiés comme porteurs de plancher. La portée de ce type de plancher excède rarement 6m²⁹ (voir figure 15).

1.6.2. Plancher à travure composée :

1.6.2.1. Plancher à la française avec poutre formant retombée :

Dans ce type de plancher, les solives reposent sur des poutres maitresses, l'appui des solives sur les murs extrêmes se fait le plus souvent, par l'intermédiaire d'une poutre appelée poutre muralière (voir figure 16).

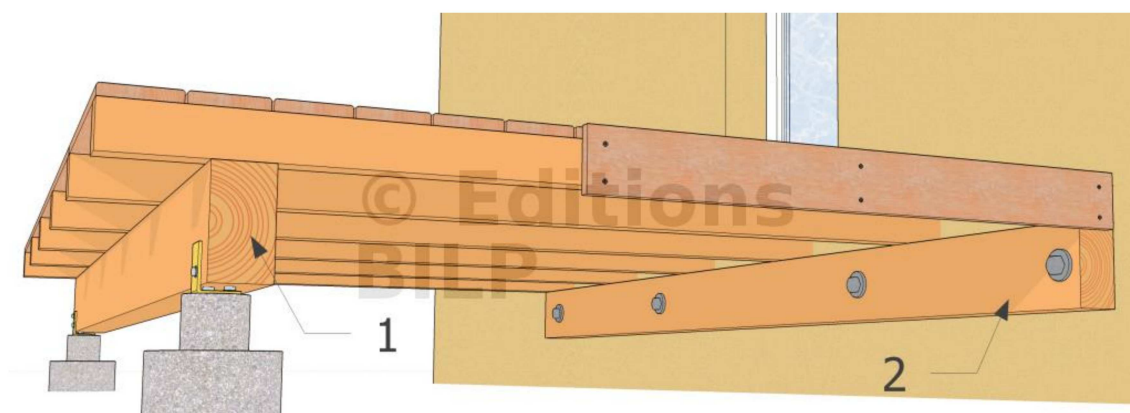


Figure 16: Poutre muralière.

Source : Editions BILP. Disponible sur <<https://www.bilp.fr/>> consulté le 24 décembre 2018.

1.6.2.2. Plancher à la française plafonné et sans retombée :

Appeler aussi plancher à l'italienne³⁰, ce type de plancher place l'ensemble des éléments porteurs, dans un même plan, supprimant ainsi la retombée des poutres (voir figure 17). Il permet ainsi la mise en place d'un plafond lisse, où les traces des éléments porteurs principaux et secondaires ont disparu. Des lambourdes de plancher sont placées le long des poutres pour permettre l'appui des solives. Ce type de plancher est dit sans retombée, car les faces inférieures des poutres et solives forment un plan continu (voir figure 18).

²⁹ Idem.

³⁰ Association ouvrière des Compagnons du devoir France : *La charpente et la construction en bois*, vol. 6bis d'*Encyclopédie des métiers*. Librairie du Compagnonnage, Paris, 1990. Disponible sur <<http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens>> consulté le 24 décembre 2018.

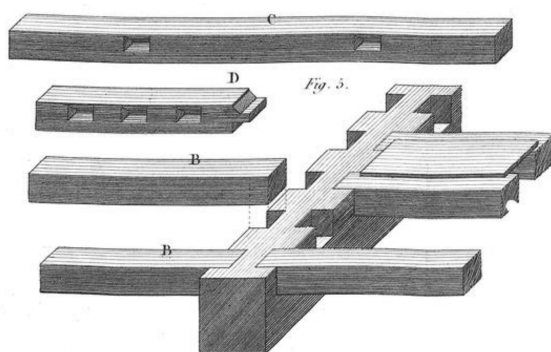


Figure 17: Appui des solives sur la poutre, plancher à la française.

Source : Rondelet 1810 [20, p.138] – Pl. LXXXV de l'édition de 1828. Disponible sur <<http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens/>> consulté le 24 décembre 2018.

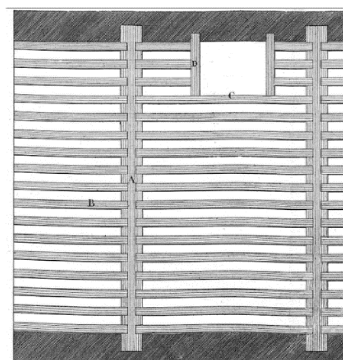


Figure 18: Plancher à la française.

Source : Rondelet 1810 [20, p.138] – Pl. LXXXV de l'édition de 1828. Disponible sur <<http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens/>> consulté le 24 décembre 2018.

1.6.2.3. Plancher à solives d'enchevêtrement :

Appeler aussi plancher d'assemblage³¹. Les solives principales (d'enchevêtrement) portent de mur à mur, l'espace entre eux est rempli par des solives courantes, et prennent appui sur des chevêtres ou linçoirs. Les solives les plus larges qui portent les chevêtres sont appelées solives d'enchevêtrement³² (voir figure 19).

1.6.3. Plancher à caisson :

1.6.3.1. Plancher à poutres superposées :

Le plancher à poutres superposées est composé de : poutres principales (ou maîtresses) ; poutres secondaires perpendiculaires et simplement posées sur les premières ; solives posées sur les poutres secondaires et parallèles aux poutres principales.³³

1.6.3.2. Plancher à poutres croisées :

Le plancher à poutres croisées reprend les mêmes dispositions que le plancher à poutres superposées, à ceci près que les poutres secondaires sont placées dans le même plan que les poutres maîtresses, auxquelles, elles s'assemblent. Ce type de plancher permet de réduire la hauteur totale du plancher, mais induit une perte de résistance au niveau des assemblages³⁴.

1.6.4. Les faux planchers :

³¹ Idem.

³² Idem.

³³ Idem.

³⁴ Idem.

Selon Pérouse De Montclos (historien de l'architecture) « *Le faux-plancher est une sorte de plancher léger établi à quelque distance au-dessous d'un plancher ou d'une voûte pour réduire la hauteur d'une pièce ou d'un vaisseau* »³⁵ (voir figure 20).

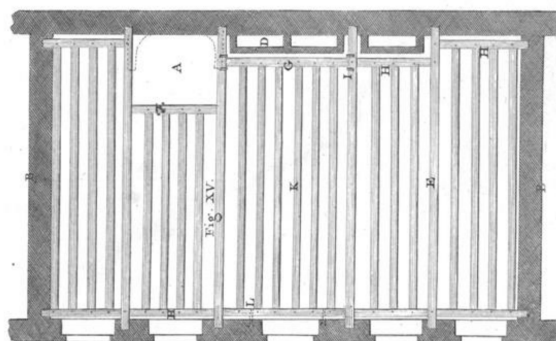


Figure 19: Flancher à solives d'enchevêtrement.

Source : Diderot et d'Alembert. Disponible sur <http://bestrema.fr>. Consulté le 26 décembre 2018.



Figure 20: Faux plancher.

Source : Blondel et Patte. Disponible sur <http://bestrema.fr>. Consulté le 26 décembre 2018.

1.7. La charpente en bois

1.7.2. Définition :

La charpente en bois est l'ensemble des éléments de structure destinés à supporter la couverture. Elle donne forme au toit et permet l'écoulement des eaux et leur rejet à distance des murs³⁶. La réalisation d'une toiture à une seule pente est possible, mais les cas les plus courants sont les toitures à deux pentes, parce qu'ils permettent la protection correcte d'un immeuble.

1.7.3. Types de charpente :

1.7.3.1. Charpente sans ferme :

« *La ferme est l'assemblage de pièces destinées à porter le faîtage, les pannes et les chevrons d'un comble* »³⁷, si la construction présente des murs de refend formant pignons perpendiculaires au faîtage et suffisamment rapprochés (de l'ordre de 5 m)³⁸, les pannes seront

³⁵ J.-M. Pérouse de Montclos : *Architecture : méthode et vocabulaire*. Impr. nationale : Ed. Du patrimoine, Paris, 6e éd., 2007. Disponible sur <http://bestrema.fr>.

³⁶ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p411.

³⁷ Antidote 8.

³⁸ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p411.

posées sur ces murs, donc la notion d'assemblage entre les pièces n'existe plus, alors nous parlons d'une charpente sans ferme (voir figure 21).

1.7.3.2. Charpente avec ferme :

Si la distance entre les murs ne permet pas de poser les pannes (généralement lorsque la distance dépasse 5 m), la mise en place d'un assemblage indéformable de pièces de charpente dans un plan vertical est obligatoire, c'est la mise en place d'une ferme (voir figure 22).



Figure 21: Charpente sans ferme.

Source : <<http://www.strikto.fr>>, consulté le 26 décembre 2018.

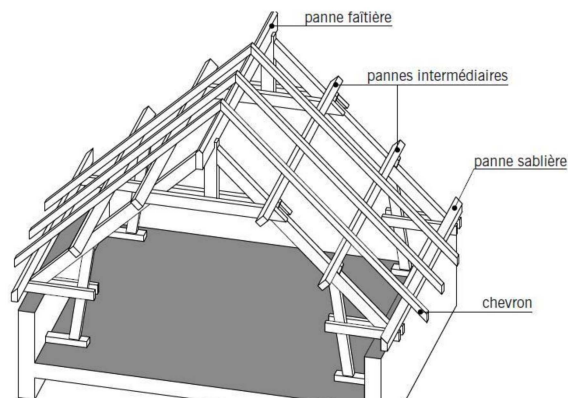


Figure 22: Ferme à entrait retroussée.

Source : <<http://www.charpenteberleau.com>>, consulté le 26 décembre 2018.

Nous avons plusieurs types de ferme : ferme à surcroit, ferme à entrait retroussée, ferme courbe à la Philibert Delorme, ferme droit à surcroit, ferme brisé à la Mansart.

Charpente à ferme chevronnée : ce type de charpente est apparu au Moyen Âge, et souvent utilisé pour des combles de grande hauteur, par rapport au type précédent, il se caractérise par la disparition des pannes et chevrons, simplement remplacés par des fermes beaucoup plus rapprochées.

L'avantage de ce type de charpente est de limiter les pièces de forte section et répartir les charges uniformément sur le sommet des murs.

1.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux ouvrages de structure dans un bâtiment construit en maçonnerie avant l'ère préindustrielle, qui est les fondations, qui — selon la nature du sol et la nature des éléments qui les portent — peuvent être sous plusieurs formes, les murs en maçonnerie de différent type, les planchers qui sont principalement en bois, et les charpentes en bois, qui peuvent être avec une ferme ou sans ferme.

Chapitre 2. Désordres et altérations statiques des principaux ouvrages de structure

2.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va parler des petites déformations, et non pas des déformations immédiatement suivies d'effets labiles d'ordre catastrophique tel que le séisme.

Dans un premier temps, on doit distinguer entre les altérations des surfaces, et autres plus dommageables ayant une incidence sur la structure, et sur lesquelles le diagnostic classique non sismique doit chercher à diriger son intention.

2.2. Les fissures :

Dans le bâtiment, les fissures se traduisent par une fente qui affecte des éléments de construction tels que les murs, plafonds et planchers. On parle également de brèches, brisures ou déchirures. Les fissures peuvent être verticales, horizontales, obliques, etc.³⁹

Nous avons deux types de fissures : les fissures superficielles (microfissures) et les fissures lézardes.

2.2.1. Les fissures superficielles :

Les fissures superficielles peuvent être son importance dans un premier temps, ou bien témoigner d'un désordre statique, elles peuvent être dues aux :

2.2.1.1. Déformations statiques :

Changement dans les dimensions et la géométrie du matériau sous l'effet des forces qu'ils les sollicitent (compression et surtout traction), permet ces forces : les charges d'exploitation, action du vent, mouvement dans le sol d'assise.⁴⁰

Permet les fissures superficielles dues aux petites déformations de la structure, celles qui apparaissent avec la fonction normale d'un composant structurel (champ de comportement élastique), elles peuvent être appelé « fissures témoins », d'ordre superficiel⁴¹.

³⁹ Yoann GLASSON, *Fissures : mieux comprendre les fissures*, LAMY SA Expertise, France

⁴⁰ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p439.

⁴¹ Idem.

2.2.1.2. Les mouvements hygrothermiques :

Au niveau des enduits des murs⁴² :

Retraits hydriques : ils sont dus principalement à l'évaporation de l'eau de gâchage, l'eau dite libre. Les fissures qui sont dues aux retraits hydriques se coupent en formant des réseaux des nœuds à trois branches, qui répondent sur toute la surface, ce qui donne l'aspect du faïençage.

Retraits thermiques : les fissures qui sont dues aux retraits thermiques sont similaires à celles qui sont dues aux retraits hydriques, mais généralement avec des fissures plus profondes et plus largement espacées.

Dilatations thermiques : la différence entre une dilatation thermique et un retrait thermique est : dans une dilatation thermique, c'est la résistance à la compression du liant qu'est prise en compte.

Gonflements hygrothermique : lorsque les sortes de variation du taux d'humidité des matériaux l'emportent, un phénomène de gonflement hygrothermique a lieu.

Au niveau du bois :⁴³

Gerces : La gerce est une fente dans le bois, elle est due à la dessiccation (retrait tangentiel perpendiculaire à la fente).

Pourrissement : à la suite de la pénétration de l'eau ou de l'humidité à travers les gerces ou d'autres défauts de croissance, le bois peut subir une altération par pourrissement. Les fissures dans le bois dues aux pourrissements sont courantes au niveau des caves et des enduits d'ouvrages insuffisamment ventilés. La pourriture cubique et la pourriture lamellaire sont les formes les plus fréquentes de pourrissement.

2.2.1.3. Oxydation des fers

L'oxydation de fer entraîne un foisonnement du métal qui provoque des gonflements et des fissures sous forme d'écailles, de lamelles ou de plaques de la périphérie du profilé en contact avec l'humidité, il s'ensuit un éclatement de la maçonnerie qui les enrobe. Les fissures

⁴² Ibid.p440.

⁴³ Ibid.p443.

suivent le plus souvent la direction des profilés et révèlent leur disposition à travers la maçonnerie qui les enrobe.⁴⁴

2.2.1.4. Joint de construction

Lorsqu'il y a un changement dans les matériaux de construction ou entre des pièces distinctes ou encore lorsqu'il y a une déference au niveau de la mise en œuvre, il peut conduire à l'établissement — dès l'origine — du joint de construction intégré aux ouvrages et visible de l'extérieur (généralement traité sous forme d'un ornement), ou des fissures d'ordre superficielles⁴⁵.

2.2.1.5. Aux spectres

Ce sont les spectres révélateurs du sens de portée et la composition des travures de plancher : c'est le cas des plafonds en plâtre établis sur lattis ou sur Bacula, aussi, les spectres dans un pan de bois, dans un appareil en pierre de taille, et dans les murs incorporent les conduits de cheminée. Les fissures superficielles qui sont dues aux spectres sont sans gravité dans un premier temps, mais elles peuvent devenir préjudiciables, par exemple : lorsque les ambiances hygrothermique dépassent certains seuils⁴⁶.

2.2.2. Les fissures lézardes (facteurs) :

Les fissures de type lézardes sont des fissures plus épaisses que les fissures superficielles, elles ont une largeur supérieure à 2 mm⁴⁷, et elles sont généralement provoquées par des mouvements de sol ou des sollicitations inhabituelles auxquelles ne résiste pas la structure du bâtiment comme le cas d'un séisme. Le reste du chapitre va expliquer les principales causes pour ce type de fissures.

2.3. Désordres statique dans les parois verticales :

Les parois verticales offrent un premier aperçu sur l'état de santé structurel du bâtiment, et elles peuvent donner une quantité intéressante d'informations à un regard exercé, « une grande partie de leurs fissures présentent des configurations directement interprétables,

⁴⁴ Ibid.p445.

⁴⁵ Ibid.p448.

⁴⁶ Ibid.p449.

⁴⁷ Yoann GLASSON, *Fissures : mieux comprendre les fissures*, LAMY SA Expertise, France.p3

donnant des indications sur l'origine de désordre »⁴⁸. Les parois verticales sont sollicitées par deux types des efforts :

- Ceux résultant de l'action des charges cumulées de leur poids propre et des charges d'exploitation transmise par les planchers, ainsi que les efforts dus aux pressions du vent.
- Ceux résultant de la réaction du sol d'assise à travers ces murs enterrés, selon la capacité portante du sol.

La variation de la capacité portante du sol, ainsi que les variations des contraintes dans les parois verticales correspondent à une distribution inégalement répartie de ces contraintes sur les fondations, ces variations nécessitent la redistribution des contraintes, cela est accompagné de ruptures locales ou de fractures correspond à un nouvel équilibre entre parois et sol. Les fissures de type fracture sont des manifestations qui nous enseignent que la paroi verticale est en recherche d'un nouvel équilibre statique. On distingue : les fissures dues aux translations horizontales (glissements), les fissures dues aux translations verticales (tassements) et les fissures dues aux rotations (pivotements)⁴⁹.

2.3.1. Désordres statiques dus aux translations verticales :

Les translations verticales ou les tassements se produisent principalement à la suite d'une compression des couches des terrains sous le poids du bâtiment, ainsi que de variation de sa teneur d'eau. Il existe deux types de translation verticale : uniforme et différentiel. C'est le tassement différentiel du sol sous la même paroi verticale qui entraîne des fissures de type fracture.

La construction des nouveaux niveaux, l'ouverture des baies nouvelles ou l'élargissement d'anciennes baies, de même que le sous-dimensionnement de l'épaisseur des murs constituent autant de causes additionnelles conduisent à des tassements différentiels par surcharge d'un ouvrage ou par formation d'un arc de décharge.

Une translation verticale peut être à l'extrémité ou au milieu (intermédiaire) d'une paroi.

⁴⁸ Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013, p455.

⁴⁹ Idem.

2.3.1.1. Les tassements d'extrémité d'une paroi :

Dans ce cas, la paroi est considérée comme une poutre uniformément chargée, reposant dans sa longueur sur le sol d'assise et dont une extrémité se trouve en porte à faux sur ce sol.

On peut classer les fissures de type fracture, qui sont dues à ce type de tassement en trois catégories :⁵⁰ (voir figure 23)

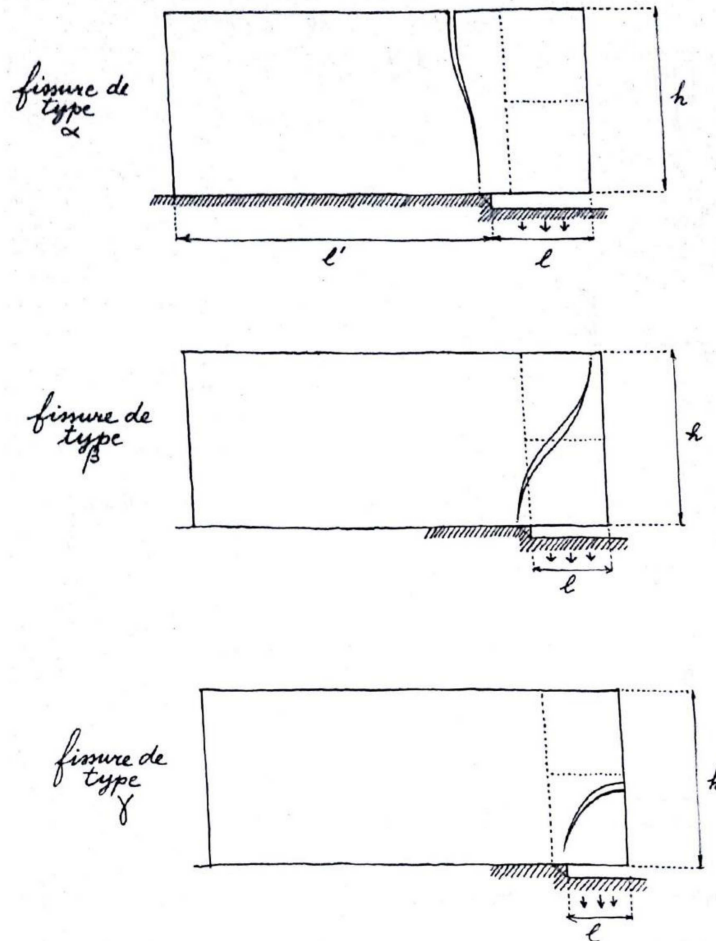


Figure 23: Cas courants du tassement d'extrémité d'une paroi verticale.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

Les fissures de type α lorsque $L > h/2$ (tassement long) : Parois de grande longueur ; inclinaison de la fissure à l'opposé du tassement ; amorce d'allure verticale en partie haute avec grand écartement des lèvres à cet endroit. Leur allure est celle d'une courbe très tendue de

⁵⁰ Ibid. p 460.

forme de « S ». Le premier mouvement qui s’amorce d’un tassement long est une rotation de la partie de la paroi sujette au tassement.

Les fissures de type β lorsque $L=h/2$ (tassement moyen) : appelé aussi fissure à 45° : Inclinaison dans le sens du tassement, maximum d’ouverture en partie médiane avec inclinaison à 45° , courbure inversée avec point d’inflexion à mi-hauteur, cas le plus fréquent ; allure inclinée en partie haute, avec ouverture maximale des lèvres à mi-hauteur.

Aussi, ce type de fissures est très observé à la rencontre de deux parois ou à la rencontre d’un mur de refend avec un mur de face.⁵¹

Les fissures de type γ lorsque $L<h/2$ (tassement court) : Inclinaison dans le sens du tassement, ouverture des lèvres sur le bord vertical à mi-hauteur et allure semi-parabolique.

2.3.1.2. Les tassements intermédiaires :

Le tassement intermédiaire d’une paroi verticale peut être considéré comme le résultat de deux tassements d’extrémité composé en symétrie bilatérale, la paroi concernée se comporte comme « une poutre encastrée aux deux extrémités sollicitée par son poids propre et le poids des planchers »⁵². Les types de fissures fractures qui sont dus au tassement intermédiaire sont les mêmes que ceux dus aux tassements d’extrémité des parois avec des rapports différents (voir figure 24) :

Les fissures de type α lorsque $L>3/2h$ (tassement long)

Les fissures de type β lorsque $L=3/2h$ (tassement moyen)

Les fissures de type γ lorsque $L<3/2h$ (tassement court) : ce dernier correspond à la formation d’un arc de décharge.

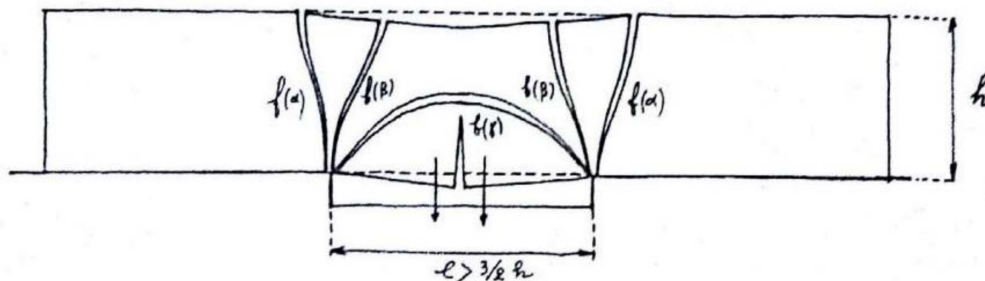


Figure 24: Types de fissures dans un tassement intermédiaire.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

⁵¹ Ibid. p462.

⁵² Ibid. p464.

2.3.1.3. Cas d'une paroi avec ouverture :

La présence des baies modifie l'allure caractéristique des fissures observées dans les parois pleines. Les parties de mur situées entre deux baies peuvent être assimilées à de courtes poutres continues incorporées à leurs extrémités dans les trumeaux voisines, les endroits où apparaissent les fissures sont ceux où les contraintes de traction sont maximales et dépassent le seuil de rupture.

Au niveau des baies qui se rapprochées ou éloignées verticalement, et selon les proportions du rectangle : largeur L et hauteur H , qui forme chaque linteau-allège, nous avons deux cas⁵³ :

Lorsque $L > 3/2H$ (rapprochement vertical des baies) : les fissures d'allure verticale se produisent aux extrémités (fissures de flexion) (voir figure 25).

Lorsque $L < 3/2H$ (éloignement vertical des baies) : les fissures à 45° se produisent (fissures de cisaillement) (voir figure 26).

Il faut noter que l'allure générale des fissures varie en fonction de la composition matérielle des maçonneries de la paroi, les fissures se développent selon les directions de moindres résistances.

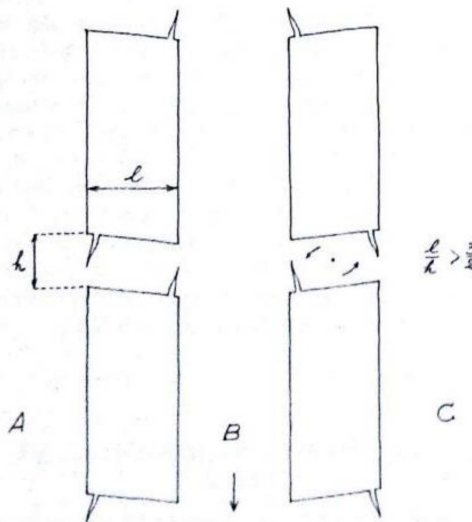


Figure 25: Fissures de flexion.

Source Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

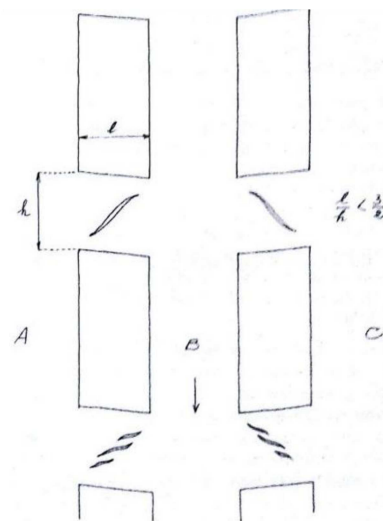


Figure 26: Fissures de cisaillement.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

⁵³ Ibid. p 470.

2.3.2. Désordres statiques dus aux translations horizontales :

Les translations horizontales — appelées aussi glissements — est un phénomène fréquent sur les sols argileux, l'argile gonfle durant les saisons humides et se contracte pendant les saisons sèches, ce qui provoque des séries de fractures d'allure verticale au voisinage du fond de fouille. Il existe trois types de glissement : longitudinal, transversal, et oblique⁵⁴.

2.3.2.1. Les glissements longitudinaux :

Ce type de glissement se produit souvent lorsque les mouvements de dilatation et de retrait des couches de terrain s'exercent dans un plan horizontal.

2.3.2.2. Les glissements transversaux :

Le glissement transversal se produit lorsque les mouvements de dilatation et de retrait des couches de terrain s'exercent perpendiculairement aux fondations linéaires, ces cas sont plus dangereux que les précédents, parce qu'il provoque des poussées horizontales dans la maçonnerie. Nous avons trois cas du glissement transversal dans une paroi :

Glissement transversal d'extrémité d'une paroi : les dilatations et les contractions du terrain provoquent un moment M de déplacement, ce moment est associé avec deux autres moments : un moment de flexion horizontale M_x dans le sens de glissement et un moment M_y dans le sens opposé du glissement et qu'engendre une torsion. Le résultat une fissure de fracture résultante des effets composés de cisaillement, flexion et torsion (fissure de forme de torque) (voir figure 27).

Glissement transversal intermédiaire d'une paroi : les fissures probables dues à ce type de glissement sont similaires à celles décrites pour le glissement d'extrémité, à la symétrie bilatérale comme dans le cas des tassements verticaux (voir figure 28).

Glissement oblique : Le glissement oblique est le résultat de la composition de deux glissements précédemment définie : le glissement longitudinal et le glissement transversal. Les fissures observées ont une disposition intermédiaire à celles présentées pour les cas élémentaires. Les glissements obliques sont plus dangereux lorsqu'il s'agit d'un angle de deux parois⁵⁵.

⁵⁴ Ibid. p 473.

⁵⁵ Ibid. p 480.

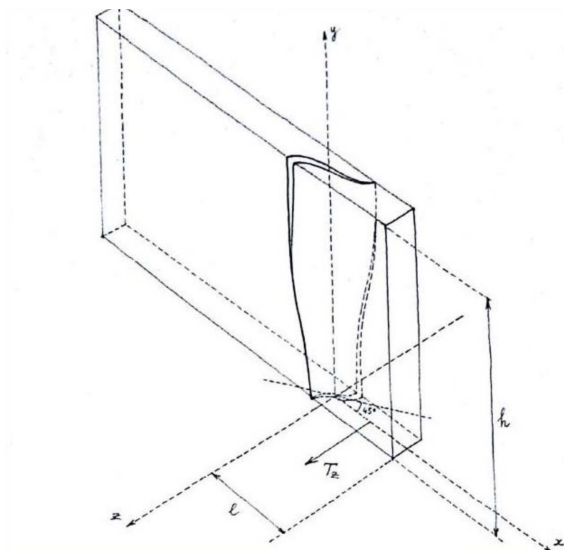


Figure 27: Fissure d'un glissement transversal d'extrémité d'une paroi longue.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

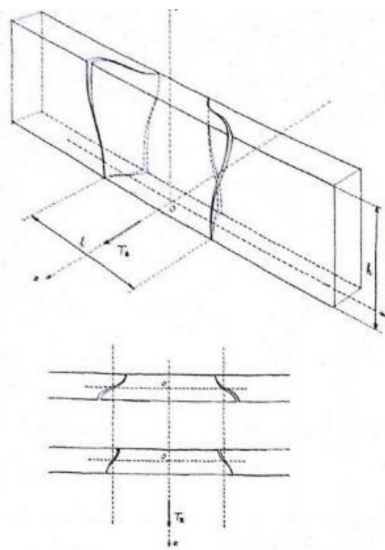


Figure 28: Fissure d'un glissement transversal intermédiaire d'une paroi longue.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

2.3.3. Désordres statiques dues aux pivotements (rotation) :

2.3.3.1. La contre rotation :

Elle est observée dans les parois longues, lorsqu'elles subissent un tassement vertical (voir Figure 29).

2.3.3.2. Murs composés entre eux :

Dans ce cas, on parle d'une liaison entre murs (liaison d'angle ou liaison par refend). Pour cette situation, nous avons deux cas :

Lorsque la cohésion est mal assurée ; les murs se séparent selon leur surface de contact, ils se comportent comme s'ils étaient isolés.

Lorsque la cohésion entre les murs est bien assurée ; une fissure de forme sinusoïdale aura lieu (voir figure 30).

Dans le cas où il y aurait une rotation au niveau de la fondation des façades, les fissures au niveau du mur de refend se modifient pour suivre les directions de moindre résistance (au voisinage des baies).

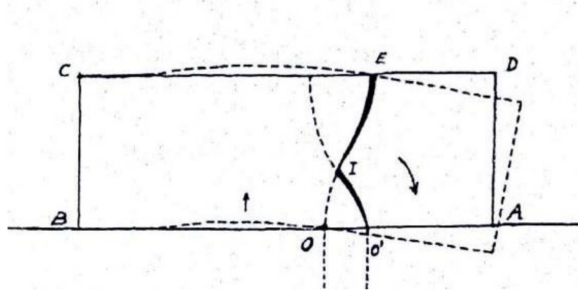


Figure 29: La contre rotation.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

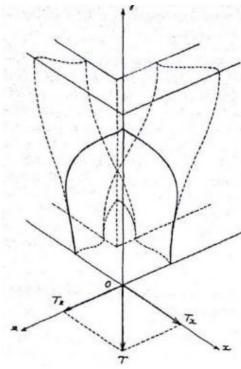


Figure 30: Glissement oblique à la rencontre de deux parois.

Source : Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, 2013.

2.3.4. Désordre dues à l'action de l'eau et de l'humidité :

L'eau sous toutes ses formes est l'une des causes majeures les plus répandues des désordres des façades, elle provient de l'extérieur et de l'intérieur du bâtiment. L'eau travaille avec le temps, et ce sont surtout les alternances de séchage et d'humidité qui sont les plus déterminantes dans l'apparition des désordres dans les maçonneries⁵⁶.

2.3.4.1. Echanges hypothermiques des parois :

Entre l'extérieur du bâtiment et l'intérieur habité, la notion de la perméabilité des murs à l'air chargé du vapeur d'eau est décisive dans l'équilibre dynamique des échanges hygrothermiques. Des flux traversent les pores et les interstices de tous les matériaux anciens, donc le bâti ancien est capable de « respirer »⁵⁷.

La recherche d'une étanchéité complète à l'air et à la vapeur d'eau est interdite dans le bâti ancien, donc il s'agit de contrôler les flux sans les supprimer. Dans le cas où il ne serait pas possible d'empêcher l'eau et l'humidité de rentrer, il ne faut jamais l'empêcher de sortir.

L'action de l'eau et l'humidité en provenance de l'extérieur ou de l'intérieur du bâtiment peuvent participer à la dégradation des parois par : d'écoulement d'enduits, dégradation des mortiers, éclatement des pierres dû au gel, et décomposition des matériaux pierreux, des briques, etc.

⁵⁶Ibid. p 533.

⁵⁷Ibid. p535.

2.4. Désordre statique dans les planchers :

2.4.1. Flèches et inclinaison des planchers :

2.4.1.1. Inclinaison vers les refends ou les poutres maitresses :

Ce phénomène est dû principalement à cause du déboitement des appuis de plancher (refend et poutre maitresse), ce dernier est dû généralement à cause de la translation verticale (glissement) des parois (voir figure 31).

Le déboitement des appuis du plancher a comme conséquence :

« Dérobement partiel ou total du solivage de ses appuis avec des conséquences allant de l'affaissement local à l'effondrement complet...Poussées résiduelles dans la paroi de façade (chargement excentré)... ».⁵⁸

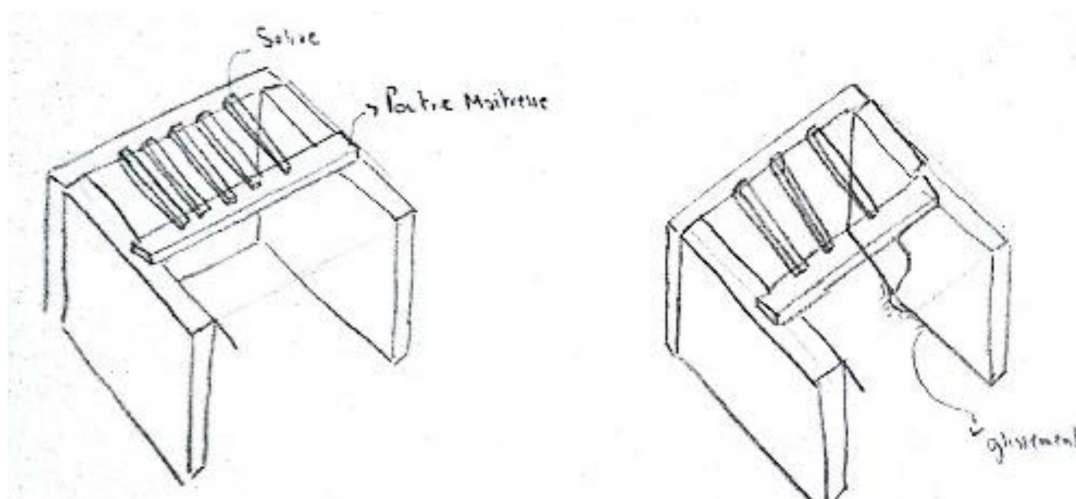


Figure 31: Inclinaison de plancher vers la poutre maitresse.

Source : Auteur.

2.4.1.2. La contre flèche :

La contre-flèche est le résultat d'accumulation des corrections des défauts d'horizontalité d'un plancher, l'accumulation des corrections pendant plusieurs décennies augmente la masse portée par le plancher (surtout au niveau du mi — portée) jusqu'à amener les poutres du plancher dans une phase de rupture (voir figure 32).

⁵⁸ Ibid. p 584.

2.4.1.3. Dé liaisonnement entre planchers et façades :

Le dé liaisonnement entre planchers et façades peut se produire à la suite d'une dénivelée excessive des appuis des planchers à cause des translations horizontales ou verticales du sol, suivi de déboitements des solives et des ancrages horizontaux.

2.4.1.4. Ruptures de pièces de charpentes :

Ce type de désordre est difficile à repérer et à prévenir dans les planchers plafonnés que dans ceux qui appants. Le bon diagnostic d'un plancher commence par la connaissance du type de cette dernière, parce qu'elle est indispensable pour connaître les points névralgiques et pouvoir évaluer leur état de conservation « *la distinction entre planchers disposés en travée simple et en travée composée est importante pour évaluer la gravité des risques et des dommages, la déficience d'une solive de remplissage, par exemple, ne produisant certainement pas les mêmes effets que celles d'une solive d'enchevêtreure* »⁵⁹.

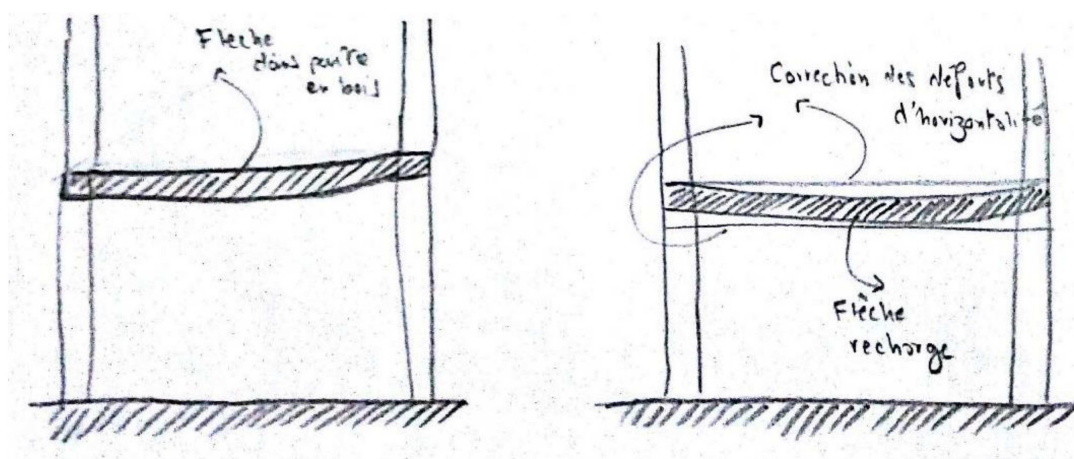


Figure 32: La contre flèche.

Source : Auteur.

2.4.2. Désordre statique dû à l'action de l'eau et d'humidité :

2.4.2.1. Le pourrissement des pièces de charpente :

Le pourrissement (voir §2.2.1.2) peut provoquer un désordre grave dans les pièces de charpente jusqu'à la disparition complète des appuis de poutre, des poitrails, des solives d'enchevêtreures et des solives courantes.

⁵⁹ Ibid. p 585.

2.4.2.2. Entre plancher apparents et planchers plafonnés :

Les planchers apparents sont moins sujets au pourrissement que les planchers plafonnés, car les infiltrations sont visibles, donc plus rapidement repérées, aussi les planchers apparents sont mieux ventilés que les planchers plafonnés. Dans le cas des planchers plafonnés en plâtre, seul l'enduit donne un témoignage, tardif, de l'altération.

2.5. Désordre statique dans les charpentes des combles :

2.5.1. Désordre statique dû à l'action de l'eau et d'humidité :

L'action de l'eau et de l'humidité sur les charpentes en bois des combles peut se résumer en un mot le pourrissement des pièces en bois, et selon la position et l'importance des pièces de charpente sur le plan structurel, la gravité de désordre est déterminée. Pour cela la détermination des pièces de charpente les plus vulnérables au pourrissement est primordiale : les endroits de la charpente de comble à inspecter sont dépendre de la localisation de la collecte des eaux : noues, noulets, banquettes, jouées de lucarne, gouttières et chéneaux, ces dernières désignent les pièces de la charpente les plus vulnérables : arbalétriers de noue, pannes sablières, pieds d'arbalétriers, extrémités d'entrants, chevrons de jouées et pieds des chevrons (voir figure 33)⁶⁰.

Les pieds de chevrons et coyaux, situés en bas de pente, pourrissent très rapidement, tout comme la panne sablière. Les signes d'altération de ces pièces sont : les taches d'humidité sur les enduits et les défauts de planéité dans le plafond des planchers situés en dessous, les flèches des pannes et des chevrons, qui peuvent être prononcés sans que le matériau de couverture soit défaillant⁶¹.

Le pourrissement des appuis des entrants de ferme, jambes de force et pieds d'arbalétriers (voir figure 34) sur les maçonneries est dû aux déficiences de couverture ou aux infiltrations à travers les maçonneries des corniches, les signes sont : extérieurement au comble, toute altération du matériau de couverture au voisinage de ces pièces. Intérieurement, des efflorescences, des colorations du bois et une décomposition progressive des mortiers de maçonnerie⁶².

⁶⁰ Ibid. p 612.

⁶¹ Idem.

⁶² Idem.

Les pannes avec les contres fiches assurent une partie de la stabilité latérale des fermes, avec leur fonction primaire de soutenir les versants de toiture. Le pourrissement de ces pièces peut provoquer des désordres structuraux dans le comble. Les signes visibles du pourrissement de ces pièces sont les flèches anormales des versants de toiture dans le sens perpendiculaire à la pente⁶³.

Au niveau pannes et des chevrons aux voisinages des souches de cheminée, les signes visibles de pourrissement de ces pièces sont les taches de l'humidité et l'altération des enduits, les défauts dans les ouvrages de couverture désignent des pièces de charpente potentiellement touchées.⁶⁴

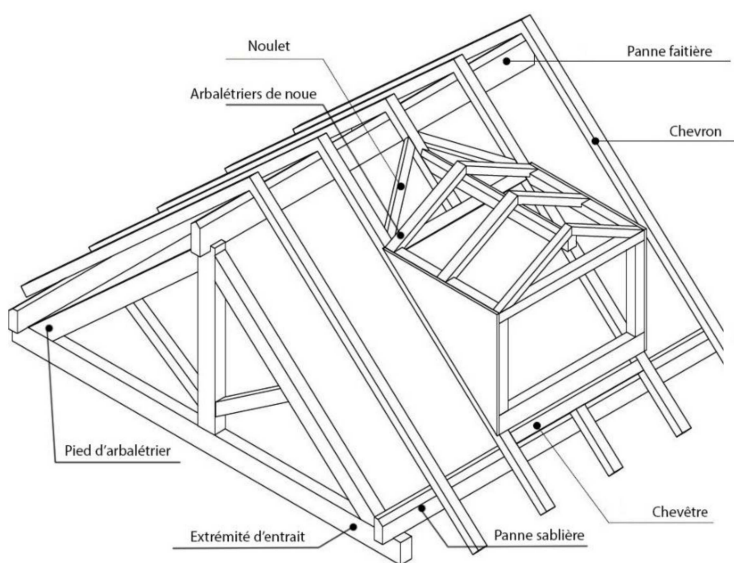


Figure 33: Pièces de charpente vulnérables à l'eau.

Source : Auteur.

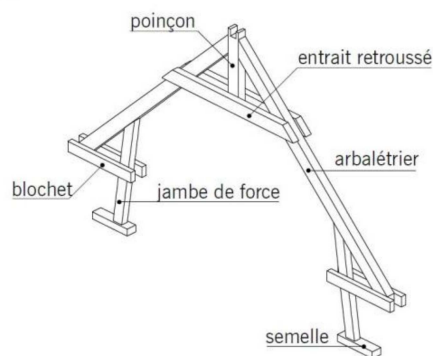


Figure 34: Vocabulaire de ferme à entrait retroussée.

Source : Auteur.

2.5.2. Poussée de la charpente du comble sur les murs périphériques :

2.5.2.1. Poussée par construction :

En général, les types de charpentes n'induisent pas des poussées sur les murs de soutien. Ils contribuent au contraire à leur stabilité en leur donnant un surcroit de rigidité horizontale.

Mais, il existe certains types de charpentes de comble qui, selon certaines conditions, induisent des poussées sur les murs d'appui, telles que : le comble à surcroit, la ferme à la Mansart (voir figure 35), la ferme à entrait retroussé (voir figure 36).

⁶³ Idem.

⁶⁴ Ibid. p 613.

Les signes visibles de cette poussée sur les murs sont les fissures dans l'appareil des maçonneries, déformations induites dans les parois verticales.

2.5.2.2. Poussée par altération :

Ce sont les altérations au niveau des pièces des charpentes qui induisent ce type de poussée, telles que les altérations dans les liaisons avec les tirants reliant les jambes de force, déconnexion entre arbalétriers et entrants, déficiences des aisseliers, début de déversement des parois d'appui.

Les signes visibles sont les fissures dans l'appareil des maçonneries de façade, les déformations des extrémités hautes de la façade, découlements visibles intérieurement entre façade planchers, plafonds et parois perpendiculaires.

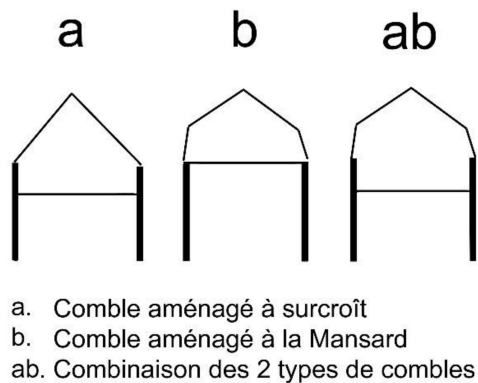


Figure 35: Comble à surcroît/ à la Mansard.

Source : <www.larousse.fr>, consulté le 15/11/18.

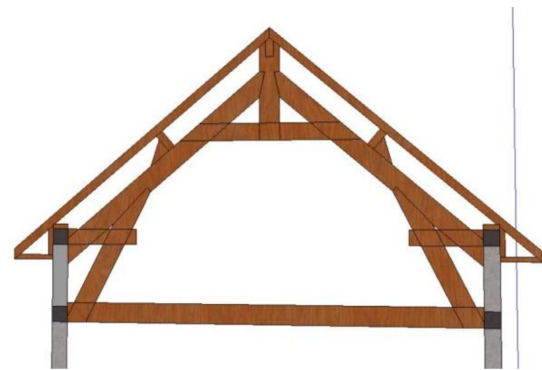


Figure 36: Ferme à entrain retroussée.

Source : <<https://www.forumconstruire.com>>, consulté le 15 novembre 2018.

2.6. Conclusion :

À travers cette recherche bibliographique, nous avons constaté que les causes de désordres et d'altérations au niveau des ouvrages de structure, sont soit dues aux déformations statiques dues principalement aux mouvements du sol, soit aux mouvements hygrothermiques de matériaux de construction, et soit à l'action de l'eau et de l'humidité surtout pour les ouvrages de structure qui présentent des pièces en bois telles que les charpentes du comble.

Chapitre 3. Méthodes et approches de diagnostic structurel du bâti ancien.

3.1. Introduction :

Une méthode de diagnostic permet d'apprécier l'état de santé du bâtiment, donc apprécier la qualité des structures de ce dernier par le recensement des éléments de structure déficients devant faire l'objet d'un renforcement, d'une consolidation ou même d'un remplacement et par l'estimation des possibilités de transformation que recèlent les éléments de structure surabondants.

3.2. Méthode de diagnostic structurel pour une réhabilitation classique non sismique :

Cette méthode a été développée par les architectes Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent dans leur livre « guide de diagnostic des structures des bâtiments d'habitation anciens », elle a comme objectif la détermination de la vulnérabilité du bâtiment en dehors du séisme. Elle comporte trois parties : un relevé constructif, une analyse théorique et une analyse clinique.

3.2.1. Le relevé constructif :

Le relevé constructif est un relevé architectural classique (plans, coupes, élévations) complété par des croquis cotés définissant l'anatomie et le squelette de l'édifice. Il précise le matériau constructif et les dimensions géométriques des ouvrages de structure. Le relevé constructif fait abstraction du second œuvre et de l'ornementation, parce que généralement elle n'a pas de rôle structurel.

Les principaux objectifs du relevé constructif, est d'établir les relations entre ouvrages portés et ouvrages porteurs, pour cela, il est recommandé d'employer la représentation appelée par les architectes miroir et par les ingénieurs *plan de structure*.

3.2.2. Analyse théorique :

L'analyse théorique est une quantification de la capacité structurelle du bâtiment par calcul, avec une abstraction des désordres et des altérations des ouvrages de structure. Cette connaissance quantifiée permet de classer les éléments de structure en : éléments sous-dimensionnés, correctement dimensionnés et largement surdimensionnés.

Cette analyse théorique a comme objectif principal la réduction du nombre des éléments devant faire l'objet d'une auscultation et de sondages.

La démarche de l'analyse théorique contient quatre phases :

3.2.2.1. Le schéma statique des forces :

« C'est l'expression graphique du mode de fonctionnement de l'édifice sous l'action des charges verticales et les forces horizontales »⁶⁵. L'objectif est de définir les cheminements des charges et la transmission des efforts verticaux et horizontaux sur la totalité du bâtiment.

3.2.2.2. La décente des charges :

C'est une quantification du schéma statique, l'objectif est la vérification de la capacité portante des ouvrages lorsque la destination des locaux du bâtiment est connue ou la définition des potentialités programmatiques du bâtiment lorsque la destination des locaux est à définir.

3.2.2.3. La capacité portante théorique :

C'est la charge totale qu'un élément de structure peut supporter en toute sécurité, elle permet une bonne connaissance des différents éléments de structure, donc de réduire le nombre d'éléments devant faire l'objet de sondage.

3.2.2.4. Le classement des éléments de structure :

Cette phase consiste à faire des fiches de répertoire qui doivent regrouper tous les éléments de structure sauf les combles qui nécessitent un calcul spécifique. Les fiches de répertoire doivent contenir les renseignements suivants ; le repérage, les caractéristiques géométriques, l'intensité des charges permanentes et la surface de plancher concerné et la capacité portante théorique.

3.2.3. Analyse clinique :

L'objectif de l'analyse clinique est la détermination de la capacité portante réelle des éléments de structure, en prenant en considération l'altération de ces éléments.

L'analyse clinique consiste à faire une auscultation, qui permet de détecter l'altération d'un élément et d'estimer son importance, la plupart de temps, par des sondages dits destructifs, afin d'examiner l'élément de structure visuellement.

⁶⁵ Ibid. p 655.

3.3. Méthodes de diagnostic pour une réhabilitation sismique :

L'objectif principal de ces méthodes présentées prochainement est l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments.

3.3.1. Méthode simplifiée à l'usage des architectes :

Rédigée en 1993 par Milan Zacek (professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture (ENSA) de Marseille-Luminy. Architecte et ingénieur de formation, il est expert en construction parasismique)⁶⁶. A l'origine, il s'agissait d'un guide destiné à l'Agence d'urbanisme et d'aménagement de la Guadeloupe (ADUAG)⁶⁷.

La méthode consiste à réaliser une fiche de relevée des facteurs de vulnérabilité des ouvrages de structure (voir figure 37). Ensuite, de les présenter dans une grille, en même temps qu'une évaluation des dommages correspondants qu'ils pourraient subir pendant des oscillations du sol (voir table 1), enfin le résultat de la vulnérabilité sismique du bâtiment est obtenu par une simple lecture de la grille, en retenant la situation la plus grave. À noter que « *Ni l'interaction avec le sol ni les effets de site ne sont pris en compte. Toutefois, les différentes situations pénalisantes sont citées et doivent être signalées sur la fiche de relevé. L'avis d'un géotechnicien spécialisé peut ainsi être sollicité* »⁶⁸.

3.3.2. Méthode proposée par le groupe de travail " Vulnérabilité du bâti existant " de l'Association française du génie parasismique (AFPS) :

L'association française du génie parasismique (AFPS) est une association fondée le 14 décembre 1983. Elle a pour objet l'étude des tremblements de terre, celle de leurs conséquences sur le sol, sur les constructions et sur leur environnement, la recherche et la promotion de toutes mesures tendant à minimiser ces conséquences et à protéger les vies humaines⁶⁹.

La méthode vise deux niveaux d'évaluation : le premier consiste en une approche qualitative et le second en une vérification quantitative.

⁶⁶ Interview avec Milan Zacek, disponible sur <<http://www.planseisme.fr/Interview-de-Milan-Zacek.html>>, consulté le 29 novembre 2018.

⁶⁷ Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p14.

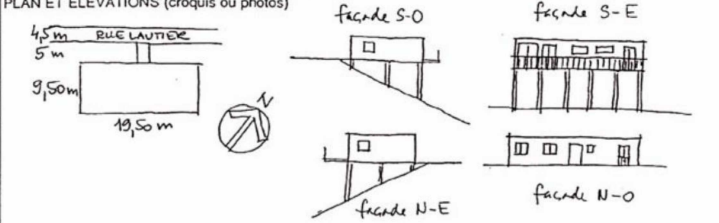
⁶⁸ Idem.

⁶⁹ <<http://www.afps-seisme.org>>, consulté le 29 novembre 2018.

FICHE DE RELEVÉ - exemple d'application

LOCALISATION : 124, rue Lantier 13100 Beauvois

CARACTERISTIQUES GENERALES
 Propriétaire : Mr. François JOLI
 Occupant : idem
 Nombre maximal d'occupants : 6
 Destination (usage) : habitation individuelle
 Nombre de niveaux : 1 + surbassement des pilotis
 Type de construction : portiques bois - murs murs de remplissage
 Type de toiture : toiture terrasse non accessible
 Année de construction : entre 1980 et 1985
 Surface au sol (m2) : 120
 Hauteur en mètres : 3,20 à 8
 Epaisseur des murs extérieurs : 30 cm
 Présence d'un sous-sol : oui (non)

PLAN ET ELEVATIONS (croquis ou photos)


FACTEURS DE VULNERABILITE
 1. Construction
 1.1. Caractéristiques
 Forme en plan symétrique selon deux axes - forme symétrique selon un axe - forme irrégulière - construction de grande longueur - asymétrie des parties rigides (niveau sur pilotis) - niveaux en retrait - niveaux en saillie (poteaux courts) (poteaux trop élancés) - angle affaibli - absence de chaînages horizontaux et verticaux - absence d'encadrements de baies (ossature non contreventée) - ossature à étage en bois avec poteaux non continus - liaisons précaires entre éléments constructifs - auvents importants - consoles non contreventées - avancée de toiture importante - toiture-terrasse plantée - acrotère haut lourd - balustrade en pierre ou béton - conduit de fumée élancé - bâtiment mitoyen sans joint vide d'au moins 4 cm - autres caractéristiques : garde-corps en bois
 1.2. Etat de conservation : normal (excellent) mauvais
 1.3. Evaluation sommaire de vulnérabilité :
 en cas de séisme faible : dommages modérés - importants (graves)
 en cas de séisme moyen : dommages modérés - importants (graves)
 en cas de séisme fort : dommages modérés - importants (graves)
 2. Nature du sol
 Rocher sain (rocher altéré ou fracturé) - graviers et sables secs et compacts - graviers et sables humides - argiles ou marnes dures - argiles et marnes molles - autres alluvions molles - sables lâches - remblais anciens - remblais récents - terrain inondable - autres sols :
 3. Situation dans le site
 Terrain plat - pente modérée uniforme (pente forte uniforme) (proximité d'un changement de pente) - abord de falaise - sommet - crête - proximité d'une limite entre roche et alluvions - plaine - vallée alluviale - plateau - proximité de murs de soutènement en amont - autres cas :
 AUTRES RENSEIGNEMENTS
 1. Etude approfondie nécessaire (oui) non
 2. Observations :
 - le niveau des pilotis ne comporte aucun mur pouvant contribuer à la stabilité latérale
 3. Auteur du relevé (nom, organisme) : Jean Sérin, maire de Beauvois
 4. Date du relevé : le 25 février 1993

Figure 37: Exemple d'une fiche de relevé.

Source : Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p14



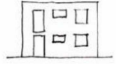





FACTEURS DE VULNERABILITE	DOMMAGES TYPIQUES	SEISME FAIBLE			SEISME MOYEN			SEISME FORT		
		dommages			dommages			dommages		
		modérés	import.	graves	modérés	import.	graves	modérés	import.	graves
• POTEAUX TROP ELANCÉS 				○			○			○
2. PERCEMENTS ET OUVERTURES • NOMBREUSES FENETRES OU PORTES (AIRE TOTALE > 50% DU PANNON PORTIF) 		○	○		○	○				○
• ANGLE AFFAIBLI 				○			○			○
3. PORTIQUES AVEC MURS DE REMPLISSAGE 		○				○				○

Table 1: Exemple d'une grille d'évaluation.

Source : Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p15.

3.2.2.1. Approche qualitative

L'approche qualitative consiste à remplir une grille de relevé détaillé, cette grille est représentée sous forme d'un tableau d'évaluation, dans lequel un coefficient de pénalité est attribué aux divers facteurs de pénalité (voir table 2), la somme de ces coefficients de pénalité est une valeur K, elle varie entre 0 et 100. Selon la valeur K on conclut sur une présomption :⁷⁰

- Très forte vulnérabilité, $K > 100$.
- Forte vulnérabilité, $50 < K < 100$.
- Moyenne vulnérabilité, $25 < K < 50$.
- Faible vulnérabilité, $10 < K < 25$.
- Très faible vulnérabilité, $K < 10$.

A Implantation du bâtiment	1 Pente générale du terrain > 40 % 5		2 Proximité d'un changement de pente D < 2H du bâtiment 15		Observations			
B Environnement du bâtiment	1 Bâtiments accolés : joint = 0 ou rempli d'un matériau 25		2 Joints entre blocs adjacents 2 à 4 cm 10 < 2 cm 5 > 4 cm					
C Type de structure	1 Murs en maçonnerie de blocs 15	2 Murs en béton non armé 10	3 Murs en béton armé 5	4 Ossature poteaux-poutres sans remplissage 20	5 Ossature poteaux-poutres avec remplissage 25	6 Système mixte murs en maçonnerie et ossature 20	7 Panneaux de façade BA préfabriqués porteurs 10	8 Ossature BA préfabriquée porteuse 50
D Forme en plan	1 Irrégulière 5		2 Elancement en plan L/I > 4 5		3 Parties saillantes ou rentrantes 5			
E Forme en élévation	1 Etages en encorbellement > 2 m 15	2 Retrait en façade > 40 % 20	3 Planchers d'un même étage situés à des hauteurs différentes 10	4 Présence d'un plancher lourd ou d'une toiture lourde 10	5 Absence de diaphragme horizontal en toiture 20			
F Contreventement	1 Variation verticale croissante des rigidités 0 à 100 (voir formule 1)		2 Dissymétrie : torsion faible : 5 accusée : 50		3 Absence de contreventement dans le sens des x ou y 100		4 Densité de voiles de contreventement sens x ou y 0 à 100 (voir formule 2)	
G Zones ou éléments critiques	1 Descente de charge en baïonnette 25	2 Présence de poteaux courts ou partiellement bridés participant au contreventement 50		3 Présence de poteaux élancés 10		4 Percements inserts dans les poteaux e > d/3 25	5 Percements inserts dans les poutres e > d/3 10	6 Percements inserts dans les nœuds e > d/3 50
	7 Présence d'un angle de façade affaibli 15		8 Axes poteaux et poutres non concourants e > c/2 10		9 Diaphragmes horizontaux avec grandes ouvertures s > 10 % S 10		10 Absence de chaînages encadrant les murs de contreventement en MAC verticaux : 25 horizontaux : 75	
H Divers	1 Etat de conservation du gros œuvre médiocre : 10 mauvais : 25		2 Risque de chute d'éléments non structuraux 5		3 Façade BA préfabriquée non porteuse 10			
Total des pénalités								

Table 2: Tableau d'évaluation de la présomption de la vulnérabilité.

Source : AFPS, (2000), *Vulnérabilité aux séismes du bâti existant*, document de travail non-publié, Association française du génie parasismique, Paris, France.

⁷⁰ Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p14.

Mais afin d'éviter d'exaspérer les résultats par un nombre important de facteurs de vulnérabilité faibles, une correction de résultat est prévue :

Pour $K > 50$, une évaluation quantitative est nécessaire.

Pour $k < 50$, la correspondance avec le degré de dommage est la suivante⁷¹ :

- Présomption de vulnérabilité moyenne : $25 < K < 50$
 - ✓ 0.1g : dommages légers.
 - ✓ 0.2g : dommages modérés.
 - ✓ 0.4g : dommages graves.
- Présomption de vulnérabilité faible : $10 < K < 25$
 - ✓ 0.1g : dommages négligeables.
 - ✓ 0.2g : dommages légers.
 - ✓ 0.4g : dommages modérés.
- Présomption de vulnérabilité très faible : $K < 10$
 - ✓ 0.1g : dommages nuls à négligeables.
 - ✓ 0.2g : dommages négligeables à légers.
 - ✓ 0.4g : dommages légers à modérés.

Dans ce cas, les types de dommages sont définis dans le guide. Ces types sont les degrés de dommages 2, 3, 4 et 5 de l'échelle macrosismique européenne EMS 92. (Voir table 3).

3.2.2.2. Approche quantitative :

L'évaluation dans cette approche est faite pour les trois niveaux d'agression sismique :

- Séisme faible, correspondant au degré VII à l'échelle d'intensité macrosismique EMS 92 ou à une accélération maximale du sol, $a_s = 1 \text{ m/s}^2$.
- Séisme moyen, correspondant à l'intensité VIII ou à $a_s = 2 \text{ m/s}^2$.
- Séisme fort, correspondant à l'intensité IX ou à $a_s = 4 \text{ m/s}^2$.

Par une des méthodes d'analyse théorique (basée sur le calcul), choisie en fonction des critères de régularité figurant dans les règles PS 92⁷² (La norme PS92 énonce les règles

⁷¹ Idem.

⁷² Ibid. p 20.

parasismiques de conception et de vérification de projets de bâtiment en complément des règles relatives aux différents types de construction en béton, en acier, en bois, en maçonnerie, etc.)⁷³

TYPE DE DOMMAGES	NATURE DES DOMMAGES	REPARATION	PERTES EN VIES HUMAINES
Nuls à négligeables	Microfissures (1mm) dans quelques cloisons. Fatigue des bâtiments sans signe apparent d'endommagement	Appréciation au cas par cas	Nulles
Légers	Dégâts mineurs aux éléments non structuraux: - fissures dans cloisons de distribution, - chute de plâtras, - chute d'éléments légers de plafonds suspendus	Réparation sans évacuation des occupants	Rares
Modérés	Dégâts importants aux éléments non structuraux ; chute de cheminées Dégâts possibles aux éléments structuraux, fissurés ou plastifiés, mais non détruits	Réparation pouvant nécessiter l'évacuation des occupants	Peu nombreuses
Graves	Dégâts très importants aux éléments non structuraux, rupture ou effondrement localisé d'éléments structuraux	Expertise pour décision de réparer ou non	Possibilité de pertes nombreuses
Effondrement	Effondrement partiel ou total du bâtiment	Réparation lourde ou non envisageable	Possibilité de pertes très nombreuses

Table 3: Typologie des dommages sismiques selon AFBS.

Source : AFPS, (2000), *Vulnérabilité aux séismes du bâti existant*, document de travail non-publié, Association française du génie parasismique, Paris, France.

3.2.3. Méthode FEMA 310 :

La méthode FEMA 310 faite par la *Federal Emergency Management Agency américaine* et présentée sous forme de guide (*Handbook*), datant de 1998, elle consiste une prénorme, Elle est le résultat de mises à jour de méthodes antérieures, intégrant les

⁷³ <<https://www.icab.fr/guide/ps92/>>, consulté le 02 décembre 2018.

enseignements des études post sismique récentes.⁷⁴ Dans cette méthode, l'évaluation est faite selon deux niveaux de performances : la sauvegarde des vies humaines et la fonctionnalité immédiate.

La méthode FEMA 310 propose trois niveaux d'évaluation : présomption de vulnérabilité, analyse quantitative et analyse approfondie.

3.2.3.1. Présomption de vulnérabilité :

Ce premier niveau d'évaluation concerne tous les bâtiments et vise à identifier ceux qui n'atteignent pas les niveaux de performances décrits précédemment. Cette évaluation est faite à l'aide d'une série de *check-lists* (voir table 4), une lecture de cette dernière permet de procéder ou non vers le deuxième type d'évaluation (analyse théorique).

Nb : Il faut noté qu'il y a pour chaque type de structure une série de Check Liste de base, et chaque élément de la liste contient une description sur l'état idéal de son fonctionnement.

3.2.3.2. Analyse quantitative :

L'analyse quantitative consiste à appliquer une méthode de calcul élastique non linéaire, et cela pour tous les bâtiments qui ne sont pas conformes au niveau d'évaluation, ou les bâtiments qui dépassent les nombres de niveaux, bien qu'ils soient conformes au niveau d'évaluation (voir table 5).

Région de sismicité	Niveau de performance	Check-listes					
		Sommaire	Structure base	Structure compléments	Sol et fondations	él. non structuraux base	él. non structuraux compléments
Faible	SVH	x					
	FI		x		x	x	
Moyenne	SVH		x		x	x	
	FI		x	x	x	x	x
Forte	SVH		x	x	x	x	
	FI		x	x	x	x	x

Table 4: Checklist FEMA 310.

Source: BSSC, (1998), *Handbook for Seismic Evaluation of Buildings*. A Prestandard, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 310), Washington D.C. Etats-Unis.

⁷⁴ Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p21.

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
Ossatures bois :						
- maisons individuelles		3		3		3
- idem avec grandes portes de garage en rez-de-chaussée		4		3		3
- bât. industriels et commerciaux		3		3		3
Portiques en acier :						
- diaphragmes rigides		4	1		1	
- diaphragmes flexibles	4	1		1		
Ossatures en acier contreventées par triangulation :						
- diaphragmes rigides		4	3		3	
- diaphragmes flexibles		4	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		3		1		1
- diaphragmes flexibles		3	1		1	
Portiques en béton armé		3	1		1	
Voiles en béton :						
- diaphragmes rigides		5		5		4
- diaphragmes flexibles	5		5		4	
Ossature en béton armé avec remplissages en maçonnerie rigides :						
- diaphragmes rigides		3		1		1
- diaphragmes flexibles		3		1		1
Panneaux préfabriqués en béton armé :						
- diaphragmes rigides		2	1		1	
- diaphragmes flexibles		2	1		1	
Ossatures en béton armé préfabriqué :						
- contreventement par voiles		5	5		4	
- contreventement par effet de portique		1	1		1	
Maçonnerie armée :						
- diaphragmes rigides		4	3		2	
- diaphragmes flexibles		4	1		1	
Maçonnerie non armée :						
- diaphragmes rigides		2		N3		N3
- diaphragmes flexibles		N3	1	N3	1	N3
Systèmes mixtes		3		1		1

Table 5: Sélection du type d'analyse de vulnérabilité, méthode FEMA 310.

Source: BSSC, (1998), *Handbook for Seismic Evaluation of Buildings*. A Prestandard, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 310), Washington D.C. Etats-Unis.

3.2.3.3. Analyse approfondie :

Les évaluations dans les niveaux précédentes sont basées sur des approches simplifiées, l'analyse du niveau trois vise à une évaluation précise qui ne se justifie que dans des cas spécifiques.

Dans ce type d'analyse, on peut utiliser des méthodes statiques ou dynamiques linéaires ou non linéaires, non précisées dans le guide FEMA 310, la lecture est envoyée au guide BSSC 1997 (NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Buildings Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 273), Washington D.C., Etats-Unis)⁷⁵.

3.2.3.4. Le rapport final selon FEMA 310 :

Le rapport final d'évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiment selon FEMA 310 doit comporter au moins les éléments suivants⁷⁶ :

- 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, etc.
- Description du site : topographie, sismicité, type de sol, etc.
- Liste des hypothèses adoptées : propriétés des matériaux, effets liés au site, nature du sol, etc.
- Liste des points faibles constatés.
- Annexes : références, notes de calcul, etc. L'ensemble des démarches préconisées dans le guide est résumé dans le tableau de la page suivante.

⁷⁵ Ibid. p26.

⁷⁶ Idem.

3.2.3.5. Organigramme général de la méthode FEMA 310 :

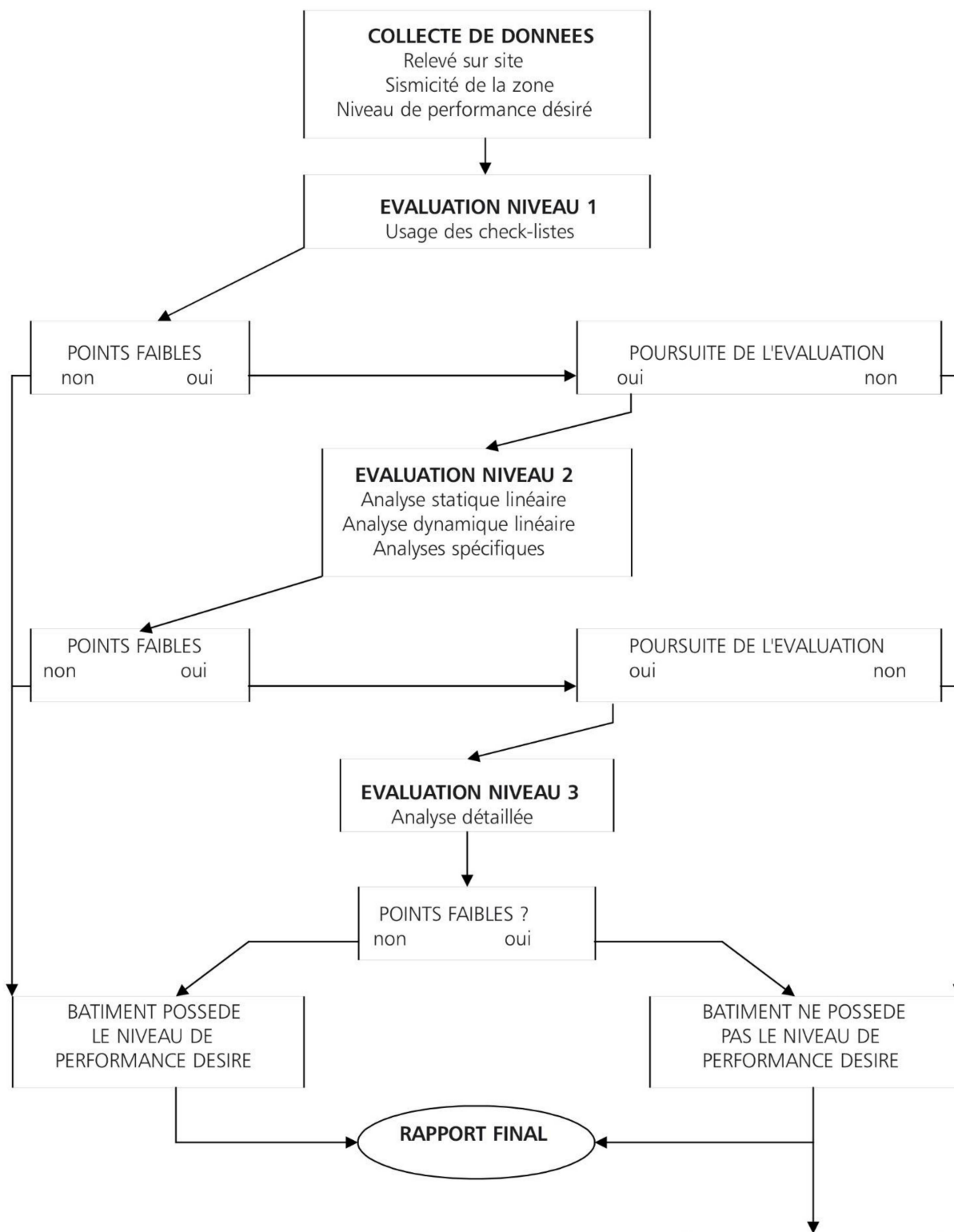


Figure 38: Organigramme de la méthode FEMA 310.

Source: BSSC, (1998), *Handbook for Seismic Evaluation of Buildings*. A Prestandard, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 310), Washington D.C. Etats-Unis.

3.2.4. Méthode ATC 40 :

La méthode ATC 40 publiée aux états unis en 1986 par *Applied Technology Council*, elle est conçue principalement pour les constructions en béton armé.

Le principe de cette méthode — pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâtiment — est basé sur la détermination du déplacement du bâtiment, et non pas des forces, parce que dans les déformations post élastique, l'importance des dommages est en général en fonction des déplacements, et non pas aux forces sismiques.

La méthode ATC 40 est évaluée pour les mêmes niveaux de performances que dans la méthode FEMA 310 « sauvegarde des vies humaines et fonctionnalité immédiate », par une méthode statique non linéaire, cette dernière consiste à tracer une courbe de capacité de déplacement pour les bâtiments objet de l'étude sismique. Donc, la méthode dépend des caractéristiques des bâtiments et non pas de l'agression sismique.

En corrélant la courbe de capacité de déplacement du bâtiment avec le déplacement maximal provoqué par un mouvement sismique de sol donné, on obtient un point appelé « point de performance » ou « un point de fonctionnement », sa position par rapport au niveau de performance recherché indique si ce niveau est atteint ou non (voir figure 39).

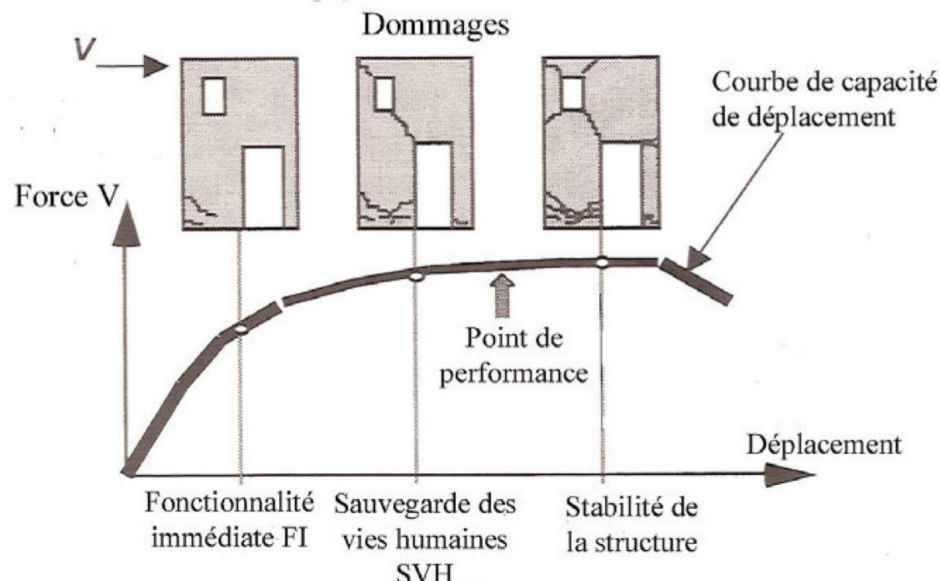
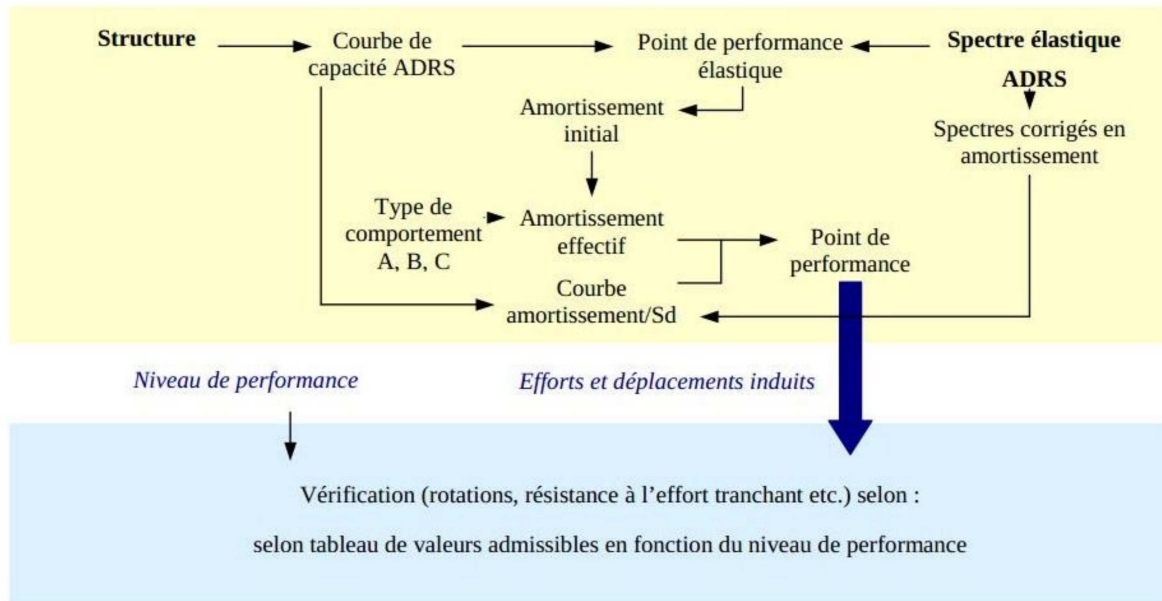


Figure 39: Courbe de capacité de déplacement d'un bâtiment.

Source : ATC, (1996), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC 40*, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats-Unis.

Schéma méthodologique de l'ATC 40⁷⁷ :



3.3. Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons vu qu'une méthode de diagnostic structurel est un processus qui permet d'évaluer le comportement structurel des ouvrages de structure, par le regroupement des informations concernant les ouvrages de structure et ses désordres selon une certaine logique. La complexité de ces méthodes est diverse, entre les méthodes simplifiées qui utilisent des grilles d'évaluation remplies par un simple examen visuel, tel que la méthode développée par Milan Zacek pour les architectes, et les méthodes complexes qui nécessitent la combinaison de l'examen visuel et l'analyse théorique comme la méthode développée par les architectes Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent.

⁷⁷ *Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme*, Guide construction parasismique, Groupe de travail AFPS-CSTB, Mars 2013, p39

Chapitre 4. Technique de réhabilitation structurelle du bâti ancien construit en maçonnerie

4.1. Introduction :

La réhabilitation structurelle d'un bâtiment ancien est une opération sensible, deux paramètres doivent être pris en considération : la compréhension du contexte de la réhabilitation structurelle et la compréhension du bâtiment. Les chapitres 1, 2 et 3 sont destinés à comprendre le bâtiment (*sa composition et son comportement structurel*), alors que l'un des objectifs principaux de ce chapitre est de comprendre dans quel mode d'intervention on est, pour ensuite permettre le choix d'une stratégie de renforcement ou de consolidation qui lui convient.

4.2. Modes d'intervention sur le patrimoine bâti :

La disponibilité d'un grand nombre de techniques applicables aux interventions de réhabilitation structurelle du bâtiment ancien, elle nous incite, à connaître la spécificité de chaque mode d'intervention sur le patrimoine bâti.

4.2.1. La restauration :

Selon Viollet-le-Duc « *Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné* »⁷⁸. Pour Viollet-le-Duc, la restauration consiste à mettre le bâtiment dans un état complet, même cette dernière n'a jamais existé dans une période donnée.

Selon John Ruskin « *Le vrai sens du mot restauration, écrit-il, n'est compris ni par le public ni par ceux qui ont la charge de l'entretien des monuments publics. Ce mot signifie aujourd'hui la plus totale destruction qu'un bâtiment puisse souffrir (...) une destruction accompagnée d'une fausse description de la chose détruite (...) il est aussi impossible que de ressusciter les morts de restaurer ce qui a été grand ou beau en architecture (...) la vie de tout l'ensemble (architectural), cet esprit qui est donné seulement par la main et l'œil de l'artisan, ne peut jamais être rappelé. Un esprit peut être donné par une autre époque, mais alors nous avons un nouveau bâtiment. (...) Ne parlons pas de restauration. La chose est un mensonge*

⁷⁸M. Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11^{ème} au 16^{ème} siècle*, 8^{ème} tome, A. Morel, Paris.

»⁷⁹, donc pour lui, la bonne restauration est celle qui nous permette de voir l'œuvre originale, même cette dernière n'est pas complète à notre jour.

Selon la charte de Venise : « La restauration est une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse »⁸⁰.

Aujourd'hui, les concepts conservation, restauration et restitution continuent de peser sur les pratiques patrimoniales malgré les efforts théoriques pour le dépasser au cours du XXe siècle.

4.2.2. La conservation :

Le concept de la conservation est une réaction aux conséquences de démolition du mouvement moderne dans les années 1960, se portant à la défense, à la valorisation du patrimoine et à sa protection⁸¹. Elle est définie comme « *domaine d'intérêt professionnel visant la préservation du bien matériel ou comme champs d'intérêt divers visant la protection du patrimoine* »⁸².

La notion de conservation du patrimoine bâti dépasse celle de la restauration, la conservation cherche à mettre en valeur le bâtiment sur tous les aspects : économique, social, etc.

4.2.3. L'entretien :

L'entretien est l'ensemble des actions non destructives, cycliques et de routine nécessaires au ralentissement de la détérioration d'un lieu patrimonial. Il comprend l'inspection périodique, le nettoyage non destructif, cyclique et de routine, les réparations mineures et de remise en état, le remplacement des matériaux endommagés ou détériorés qu'il est impossible de sauvegarder.⁸³ Il contient trois catégories⁸⁴ :

⁷⁹ *The Seven Lamps of Architecture*, 1849, Ch. VI.

⁸⁰ *Charte Internationale Sur La Conservation Et La Restauration Des Monuments Et Des Sites* (Charte De VENISE 1964), art 9.

⁸¹ Mathieu Tanguay, *Conserver ou restaurer ? La dialectique de l'œuvre architecturale*, Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures en vue de l'obtention du grade de PhD en Aménagement option histoire et théories, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, Avril 2012, p.99.

⁸² *Ibid.*, p 101.

⁸³ *MANUEL D'ENTRETIENDES BÂTIMENTS DU PATRIMOINE*, lieux patrimoniaux du Canada, Manitoba, Canada. p5.

⁸⁴ *Idem.*

4.2.3.1. L'entretien correctif :

Les travaux qui sont nécessaires pour que le bâtiment atteigne un niveau acceptable (souvent recommandé par un plan de conservation), par exemple le traitement contre l'humidité.

4.2.3.2. L'entretien d'urgence :

Les travaux qu'il faut entreprendre immédiatement pour des questions de santé, de sécurité et de protection, ou bien pouvant résulter d'une détérioration rapide de la structure ou de son « tissu » historique, comme la réparation d'un toit après une tempête ou la réparation d'un verre cassé.

4.2.3.3. L'entretien planifié :

Les travaux destinés à prévenir les problèmes qui se produisent obligatoirement pendant la durée de vie du bâtiment, comme le nettoyage des gouttières ou la peinture.

4.2.4. La rénovation :

La rénovation est une opération de remise à neuf, en général au moyen de l'effacement ou de la suppression de toute matière ou trace anciennes. Donc la rénovation ne peut en aucun cas être considérée comme une action de conservation.

4.2.5. La réhabilitation :

La réhabilitation consiste à rénover une construction sans la détruire, sans la raser, à la différence de la rénovation. Elle suppose le respect du caractère architectural des bâtiments et du quartier concerné. C'est « *l'action d'améliorer un édifice en conservant sa fonction principale, cela en précisant que le terme s'emploie aussi bien, pour des modifications légères, que pour des restructurations lourdes et n'excluant pas l'adjonction d'une partie neuve* »⁸⁵.

4.3. Techniques de renforcement structurel :

4.3.1. Définition :

Le renforcement d'un ouvrage structurel est une opération qui consiste à conférer une résistance supérieure pour l'ouvrage à celle qu'il avait avant les désordres subis. Le confortement nécessite souvent l'augmentation des sections des éléments porteurs de la

⁸⁵AIT HAMOUDA Ibrahim, *LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI EN ALGERIE*, mémoire de magister, Faculté d'Architecture et de Génie-civil, Oran, Algérie, 2013.

structure, et même l'introduction de nouveaux éléments⁸⁶, donc, il est une opération qui concerne les parties sous-dimensionnées, résultat de l'analyse théorique.

4.3.2. Renforcement des murs en maçonnerie :

4.3.2.1. Renforcement par des tirants :

Les tirants sont des éléments linéaires qui vont exercer des tractions. Ils ont comme objectif de freiner l'effondrement des murs ou leurs déformations progressives transversalement à leur plan, ces éléments sont constitués d'un câble d'acier fixé à deux murs opposés par des pièces spécifiques d'ancrage qui évitent l'évolution de l'écartement entre les murs⁸⁷(voir figure 40).

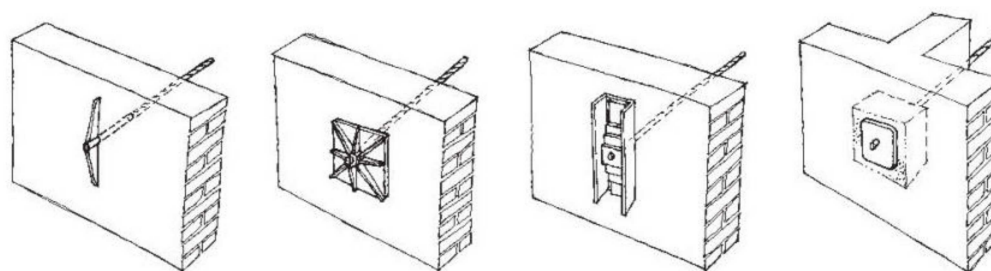


Figure 40: Renforcement d'un mur par des tirants.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8 : *Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures*, La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne.

4.3.2.2. Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé :

Cette technique consiste à augmenter l'épaisseur du mur endommagé ou sous-dimensionné, par l'ajout d'une couche de mortier ou de béton sur le parement du mur après la pose de treillis métalliques, solidarisés entre eux dans le mur.

4.3.2.3. Le chainage :

Le chainage est un système ancien de renforcement. Le fer et l'acier sont les matériaux employés depuis longtemps pour fabriquer les éléments de chainage : ceintures ou courroies. Plus récemment, les bandes en fibre de carbone remplissent la même fonction dans certaines situations (voir figure 41).

⁸⁶Hamid AZZOUZ, *Dossier : Faire face aux risques majeurs en ville*, Revue Vie de Ville, p66.

⁸⁷ César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8 : *Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures*, La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, P301.

4.3.2.4. Taxidermies avec des barres d'acier :

C'est un système de renfort intégral, il consiste à mettre en œuvre des armatures en acier à l'intérieur des murs, pour augmenter leur capacité de résistance globale ou créer des zones plus rigides, capables de distribuer de manière homogène les sollicitations descendantes⁸⁸(voir figure 42).

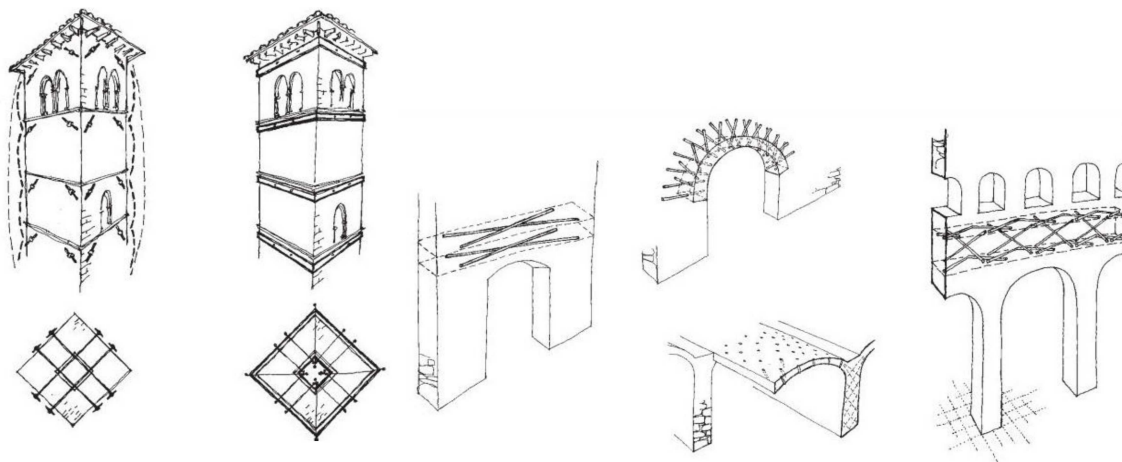


Figure 41: Renforcement par chainage.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8.

Figure 42: Taxidermies avec des barres d'acier.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8.

4.3.2.5. Les contreforts :

Leur fonction équivaut à celle des tirants, on les utilise lorsque le bâtiment ne peut pas absorber les tensions ponctuelles créées aux points d'ancrage des tirants (voir figure 43).

4.3.3. Renforcement des planchers :

4.3.3.1. Augmentation de la résistance pour les poutres et les poutrelles :

Lorsqu'on juge à travers une analyse théorique que les éléments constituent le plancher et sous-dimensionnés, on préconise d'ajouter de nouveaux éléments qui vont collaborer à l'absorption des efforts appliqués sur la poutre ou les poutrelles du plancher. Les matériaux de renfort utilisés sont généralement en bois ou ils sont constitués de profilés en acier.

⁸⁸ Ibid. p302.

4.3.3.2. Montants intermédiaires :

La technique consiste à réduire les tensions de flexion introduites par les surcharges et les déformations dues au fluage du bois, par l'ajout des poutres en bois ou en acier disposées en travers de la poutre à renforcer.

Il faut noter que la possibilité d'obtenir de bonnes conditions d'appui pour le montant est généralement décisive dans le choix de la solution (voir figure 44).

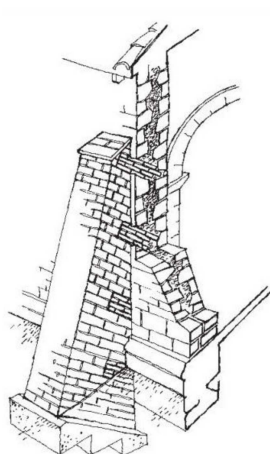


Figure 43: Renforcement d'un mur par un contrefort.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8.

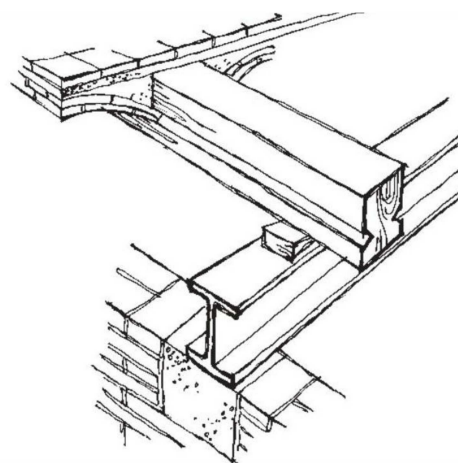
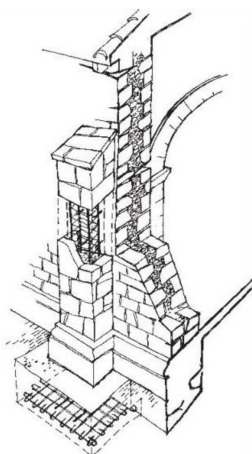


Figure 44: Renforcement d'un plancher par un montant intermédiaire.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, Outil 8.

4.4. Techniques de consolidation structurelle :

4.4.1. Définition :

La consolidation est une opération qui consiste à mettre en état et à améliorer la performance des éléments de structure dégradés. Donc elle concerne les parties ayant des désordres ou des altérations statiques sont dynamiques.

4.4.2. Consolidation des murs en maçonnerie :

4.4.2.1. Consolidation par injection de coulis à la chaux :

Vu que la majorité des constructions coloniales en Algérie avant l'ère préindustrielle ont utilisé le mortier à base de chaux comme un liant, cette technique permet d'éviter l'incompatibilité des matériaux.

4.4.2.2. Consolidation par cimentation :

La cimentation est une technique à laquelle on fait appel, lorsque l'état de dégradation intéresse la presque totalité d'un mur ou quand les fissurations sont très étendues, dans un mur d'un édifice⁸⁹.

Cette technique a deux méthodes :

- La cimentation par coulée (par poussée de la seule pression atmosphérique).
- La cimentation par injection sous pression (voir figure 45).

4.4.2.3. Consolidation par parois armées :

Lorsque le mur en maçonnerie est fortement dégradé, et qu'une simple opération de consolidation peut encore affaiblir le mur, on peut alors opter, pour la technique de consolidation par parois minces armées (voir figure 46).

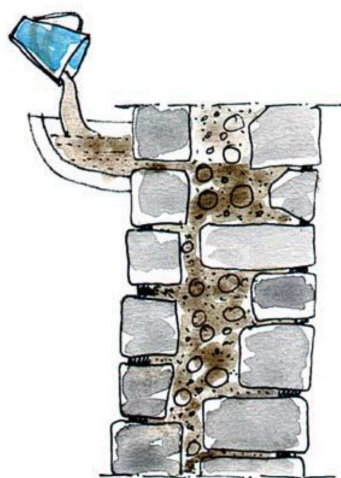


Figure 45: Cimentation par injection sous pression.

Source : Corpus Levant.

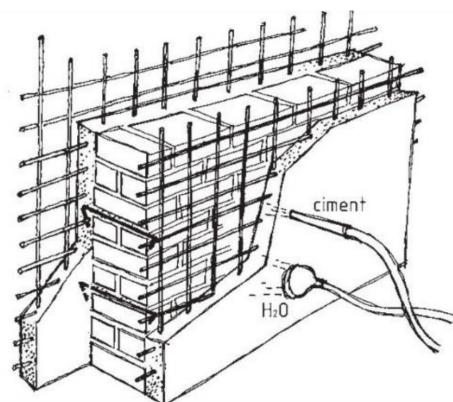


Figure 46: Consolidation d'un mur par parois armées.

Source : César DÍAZ GÓMEZ. Outil 8.

4.4.2.4. Réfection des murs endommagés (remise en l'état initiale) :

Il s'agit de remplacer le matériau de la partie endommagée par autre ou par le même matériau dont la résistance et la déformabilité seront similaires, donc l'objectif est de restaurer la capacité portante initiale de l'élément endommagé.

⁸⁹ AIT HAMOUDA Ibrahim, *LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BÂTI EN ALGERIE*, mémoire de magister, Faculté d'Architecture et de Génie-civil, Oran, Algérie, 2013.p57.

Pour remplacer le matériau, on doit préconiser les étapes suivantes (Poineau D. et Bouineau. A, 2011)⁹⁰ :

- Enlever les pierres instables et nettoyer les surfaces dégagées à l'aide d'une brosse.
- La reconstruction des murs démolés avec la même manière et la même nature des pierres.
- Préparer un mortier de chaux et ciment pour assembler les pierres.
- Procéder à la mise en place d'un enduit classique (01 volume de chaux et 02 volumes du sable).
- Conservant les techniques de finition traditionnelles, talochées et lissées en respectant l'irrégularité de la maçonnerie.

4.4.3. Techniques de réparation des fissures :

L'objectif de réparer une fissure dans un mur en maçonnerie est de retrouver la continuité perdue du mur endommagé, de sorte que les tensions puissent être de nouveau transmises et distribuées de manière homogène dans la partie lézardée.

4.4.3.1. La pose de témoin de contrôle de la fissure :

Le témoin de contrôle de la fissure a pour objectif la vérification de la stabilité de mouvement différentiel (tassement, glissement ou pivotement) préalablement diagnostiqué comme étant la cause des fissures. Permet les systèmes de témoin, on note⁹¹ :

- Le système des plaques de plâtre ou de chaux.
- La méthode des épingles.
- Le système de témoin en mortier à base de chaux ou de plâtre.

La connaissance de l'état de fissure -active ou passive- est primordiale pour que l'opération de réparation des fissures soit efficace.

4.4.3.2. Technique des agrafes pour les fissures profondes :

La mise en œuvre de cette technique est faite comme suite ⁹²:

- Décaper les enduits autour de la fissure à l'aide d'un ciseau et marteau.
- Nettoyer la surface par une brosse.

⁹⁰ MEGUENNI MUSTAPHA et BEKHALED ABDELOUAHAB, *La réhabilitation d'un ancien bâtiment industriel R+3 « AIN TEMOUCHENT »*, Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de master en génie civil, Juillet 2012, p90.

⁹¹ AIT HAMOUDA Ibrahim, *LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI EN ALGERIE*, mémoire de magister, Faculté d'Architecture et de Génie-civil, Oran, Algérie, 2013.p60.

⁹² Op .Cit. (MEGUENNI MUSTAPHA et BEKHALED ABDELOUAHAB)

- Préparation des armatures d'acier ($\phi 8$) de forme des agrafes.
- Faire des trous de diamètre ($\phi 6$) par une perceuse dans les deux côtés de la fissure.
- Introduire les agrafes dans les trous à l'aide d'une massât.
- La finition par un mortier bien dosé en ciment.

4.4.3.3. Réparation d'une fissure par fixation de grillage :

La technique consiste à fixer — sur la zone fissurée du mur — une armature de type grillage galvanisé ou grillage de fibres synthétiques de maillage et cela se faisant, après décroûtage de l'ancien enduit et injection de coulis de chaux dans la fissure (voir figure 47).

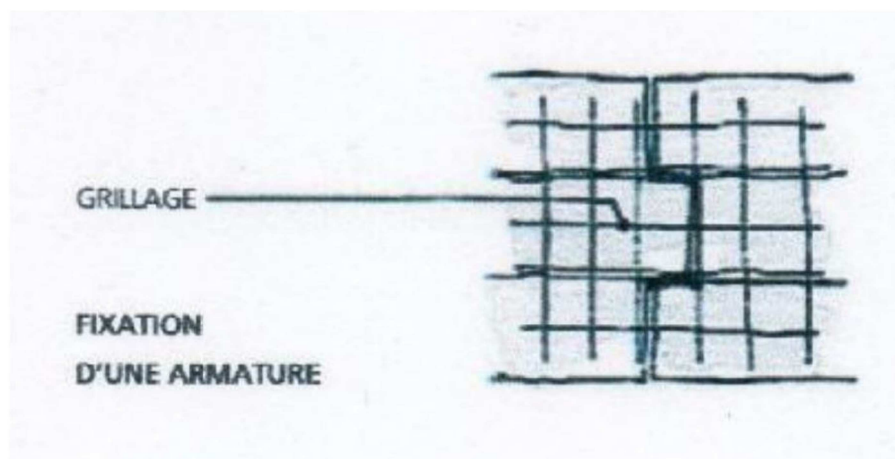


Figure 47: Traitement d'une fissure par un grillage.

Source : Ait Hamouda Ibrahim. 2012.

4.4.3.4. Traitement des fissures par injection :

Ce type de traitement concerne généralement les fissures de type lézarde (fracture), il consiste à injecter des résines ou des coulis de chaux hydraulique ou de ciment dans ces fissures, ce qui permet le renforcement de la résistance et l'étanchéité du mur.

On doit noter que ⁹³.

Pour les zones fortement humides, il est conseillé de traiter les fissures, par injection d'un mélange de latex et de bitume ou de résines acryliques, ces produits ont la qualité de permettre de redonner l'étanchéité nécessaire aux zones altérées du mur. Il n'est pas de bonne pratique, de traiter des fissures par injection de résine sous des températures élevées, car

⁹³ Op .Cit. (Ait Hamouda Ibrahim).

l'injection de la résine sous une température supérieure à 15 °C favorise une polymérisation rapide qui risque d'induire une prise trop rapide et donc incomplète.

De même, si la température est basse, en général inférieure à 10 °C au moment de l'injection de la résine dans la fissure, il est nécessaire de réchauffer la zone à traiter.

En général, une résine mise en œuvre à une température normale atteint sa résistance définitive en une semaine environ.

4.4.3.5. Traitement des fissures par colmatage

On distingue deux types de traitement de fissures par colmatage ⁹⁴:

- Un colmatage en profondeur, il s'agit d'un remplissage total de la fissure à l'aide de Mastic.
- Un colmatage superficiel, qui consiste à traiter la fissure sur quelques millimètres.

4.4.4. Consolidation des planchers :

4.4.4.1. Remplacement des appuis sur les poutres et poutrelles :

À cause des conditions spéciales d'humidité et d'obscurité, les appuis en bois des pièces du plancher peuvent subir une décomposition — gerces ou pourrissement —, ce qui nécessite le remplacement fonctionnel ou le renfort de ces derniers.

4.4.4.2. Pose additionnelle de dalles en béton armé :

Cette technique de consolidation des planchers offre la possibilité de distribuer les tensions de la flexion de manière coplanaire dans toutes les directions dans un plancher, aussi, elle permet d'améliorer la rigidité globale de structure par la liaison de la nouvelle dalle dans l'épaisseur des murs et sur tout le périmètre. À noter que cette technique est critiquée par le fait que la liaison entre le nouveau plancher et les murs dépend des caractéristiques variables et imprévisibles, telles que : la rigidité, la cohésion et le percement des murs (voir figure 48).

4.4.4.3. Consolidation des ossatures et des fermes de couverture :

Les éléments qui constituent les fermes sont le plus exposés aux effets de l'humidité, donc le risque de pourrissement des pièces en bois est élevé, selon l'état de ces éléments, il est généralement conseillé de les remplacer, il arrive aussi que l'on préfère envisager de les renforcer. C'est le cas lorsque leur état général le permet (voir figure 49).

⁹⁴ Ibid.p62

Pour les éléments qui doit être visible, tels que le renfort des paires, tirants et contre-fiches, on emploie de plus en plus la technique des armatures post-contrainte pour compenser les tractions ou créer de nouveaux équilibres de forces (voir figure 50).

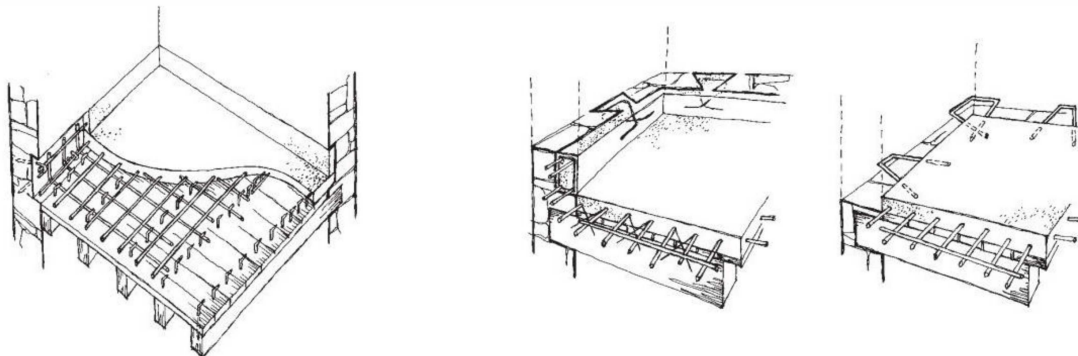


Figure 48: Consolidation d'un plancher par la pose d'une dalle en béton armé.

Source : César DÍAZ GÓMEZ. Outil 8.

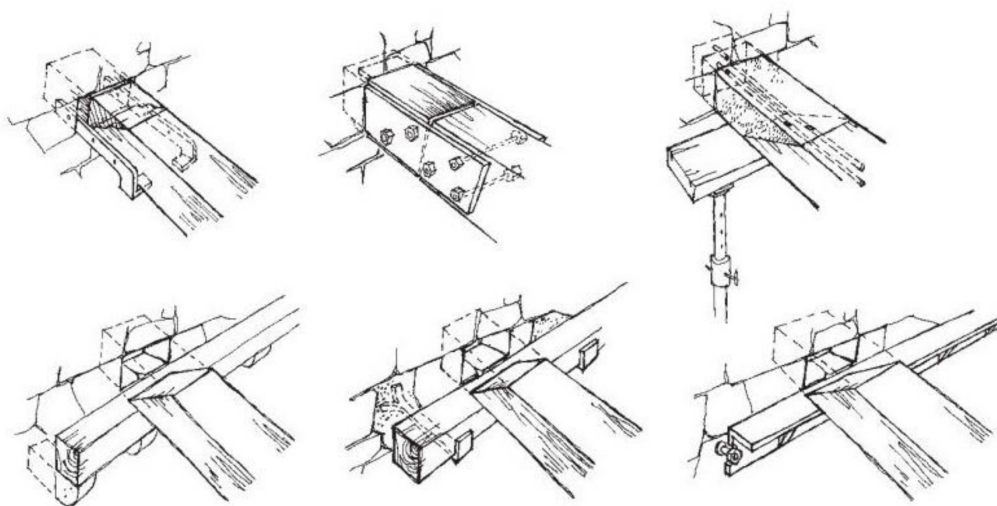


Figure 49: Consolidation des éléments d'une ferme.

Source : César DÍAZ GÓMEZ. Outil 8.

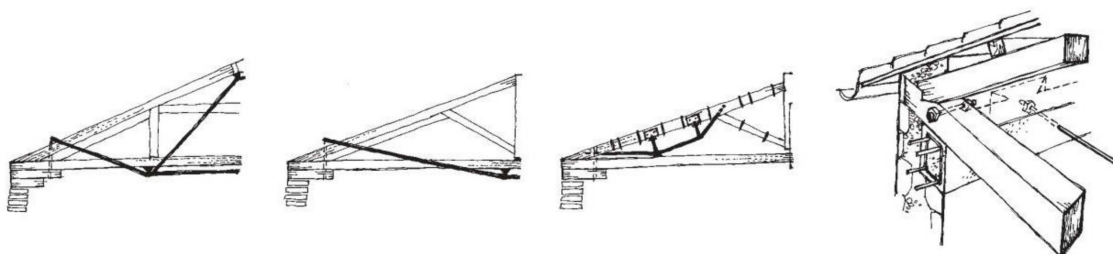


Figure 50: Consolidations des éléments d'une ferme par des armatures post-contraintes.

Source : César DÍAZ GÓMEZ. Outil 8.

4.5. Consolidation et renforcement des fondations :

Plusieurs raisons pour lesquelles une opération de consolidation doit être menée, on note :

- l'insuffisance de la surface d'appui par rapport aux charges appliquées et à la résistance du terrain.
- Tassements, glissement et pivotement du terrain sous-jacent à la fondation, pour des raisons tout à fait indépendantes de l'édifice construit au-dessus.

4.5.1. Consolidation et renforcement par injection de sol :

Elle consiste à combler les vides et fissures du sol par injection sous pression, afin d'augmenter sa résistance à la compression. Les produits d'injection sont selon les cas constitués⁹⁵:

- De coulis de ciment éventuellement additionnés de pouzzolanes de cendres volantes, de plastifiants et d'accélérateurs.
- De coulis d'argile colloïdale ou de bentonite.
- De coulis à base de produits chimiques liquides ou de résines organiques.

4.5.2. Elargissement des fondations en sous œuvre par semelle en béton armé :

La technique consiste à réaliser — en sous-œuvre de la fondation existante — une semelle élargie en béton armé, et cela pour assurer la stabilité du mur existant et aussi, afin

⁹⁵ Ibid. p54.

d'augmenter la surface de la répartition des charges sur le sol⁹⁶, c'est une augmentation de la largeur de la base des fondations (voir figure 51).

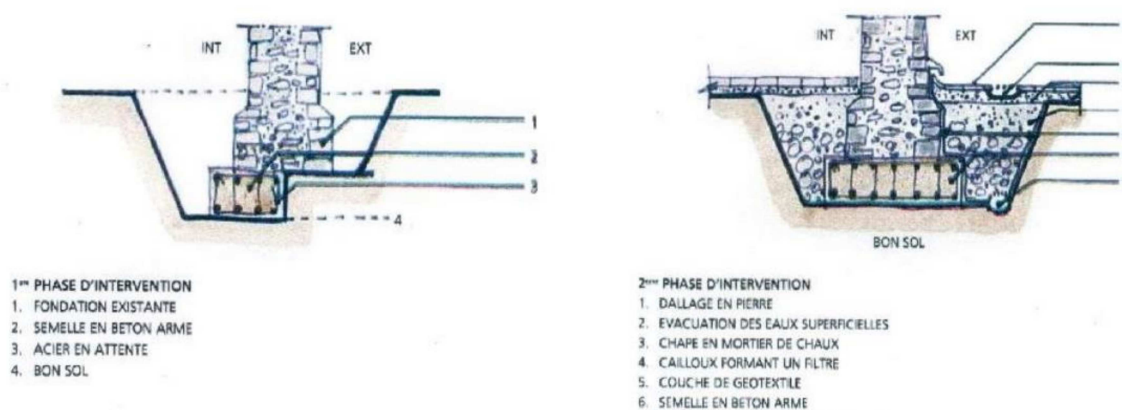


Figure 51: Consolidation d'une fondation par semelle en béton armé.

Source : Ait Hamouda Ibrahim 2012.

4.5.3. La consolidation des fondations par des micropieux :

Cette technique est utilisée généralement pour « stabiliser une construction ancienne en cas de sinistres (tassements en cours d'une construction, désordres survenus après affouillements limitrophes... etc.)⁹⁷.

4.5. Conclusion :

Dans une opération de consolidation ou de renforcement, nous pouvons avoir plusieurs solutions, mais la chose la plus importante est l'adéquation de la solution avec le contexte de réhabilitation (valeur patrimoniale de l'ouvrage structurel, objet de réhabilitation, contexte économique, contexte environnemental, etc.).

⁹⁶ Ibid. p55.

⁹⁷ Ibid. p56

Partie 2 (partie pratique) : Une mise à jour du diagnostic structurel du Haouch El Bey, avec une proposition d'une stratégie pour la réhabilitation de ce bâtiment.

Chapitre 5. Mise à jour du diagnostic structurel du Haouch El Bey

5.1. Lecture architecturale du Haouch El Bey :

Haouch El Bey est un ensemble constitué de deux parties, comprenant chacune une cour délimitée par des corps de ferme. La première cour est datée de l'époque ottomane, et la deuxième cour date de l'époque française (voir figure 52).

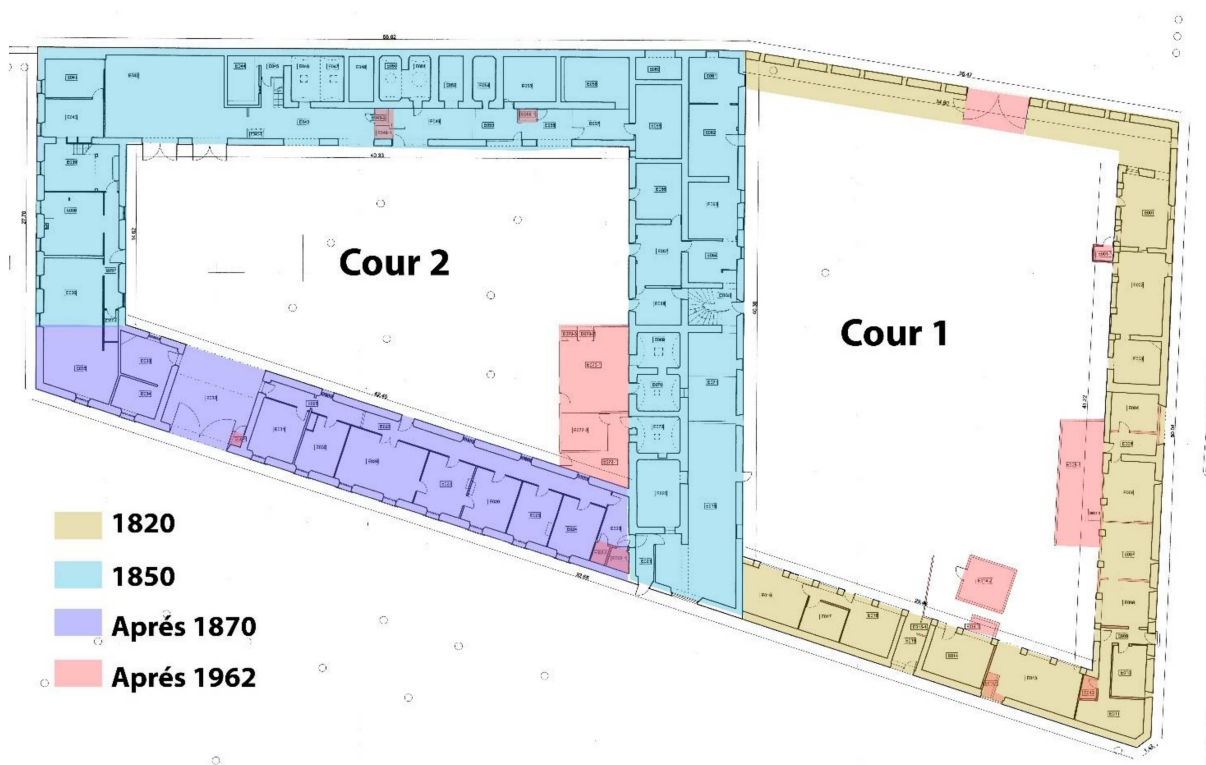


Figure 52: Stratification historique du Haouch El Bey.

Source : Etude de restauration et de mise en valeur du Haouch El Bey, 2000, modifier et compléter par auteur 2018.

5.1.1. Description architecturale des éléments de la cour 1 :

5.1.1.1. La partie est et sud :

Par observation du plan actuel, on peut remarquer que ces parties avaient une configuration spatiale ouverte vers la cour (étable)⁹⁸.

⁹⁸ دراسة ترميم وتهيئة حوش الباي، الجزء الأول، الحالة الراهنة، وصف الوضع الحالي، مكتب الدراسات ورشة الأبعاد الثلاثة، 2000

5.1.1.2. La partie nord :

Cette partie a été démolir, et seul le mur de la façade nord est présent (voir figure 53). Elle avait la même configuration que la partie sud et la partie est, vu la présence des vestiges dans la partie est qui donne sur la cour 1⁹⁹ (voir figure 54).



Figure 53: Le mur de la façade nord (vue de l'intérieur de cour 1).

Source : Auteur.



Figure 54: Le coin nord-est de la cour 1.

Source : Auteur.

NB : Les parties nord, est et sud sont les plus anciennes, elles datent de l'époque ottomane. Le langage architectural a un caractère défensif d'où la présence des meurtriers (20 cm* 12cm*45). La toiture de cette partie est constituée par des rondins du bois avec des tuiles semi-circulaires. L'ensemble de ces parties a un seul niveau.

5.1.1.3. La partie ouest :

Cette partie en réalité, donne aux deux cours, son langage architectural est colonial avec la présence des grandes baies. Elle a deux niveaux, le deuxième niveau est un étage de comble avec une toiture en charpente du bois de type ferme à entrant retroussé¹⁰⁰ (voir figure 55).

5.1.2. Description architecturale des éléments de la cour 2 :

Les parties qui entourent la cour 2 ont une architecture coloniale, avec de grandes baies et portes (voir figure 56). Les parties est, nord et ouest étaient construites dans la même période, alors que la partie sud était construite plus tard.¹⁰¹

⁹⁹ Idem.

¹⁰⁰ Idem.

¹⁰¹ Idem.



Figure 55: La ferme du comble.

Source : Auteur.



Figure 56: Langage architecturale de la partie coloniale.

Source : Auteur.

La partie nord était utilisée pour le stockage de raisins (voir figure 57) tandis que le premier niveau de la partie est était utilisée pour sa fermentation. Les parties ouest et sud étaient des espaces d'habitation et des bureaux ¹⁰²(voir figure 58).

L'étage de comble de la partie est était utilisé pour le stockage du vin¹⁰³

Juste après l'indépendance, Haouch El Bey était utilisé par une coopérative agricole, ensuite, il était utilisé comme des logements, et à cause de ça, Haouch El Bey nécessite une nouvelle configuration spatiale pour répondre aux nouveaux besoins, tels que la fermeture de certaines fenêtres et portes (voir figure 59), l'ouverture d'autres, la construction de nouveaux murs en brique et en parpaing, et de nouvelle pièce à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment (voir figure 60).



Figure 57: Vue sur les espaces de stockage.

Source : Auteur.

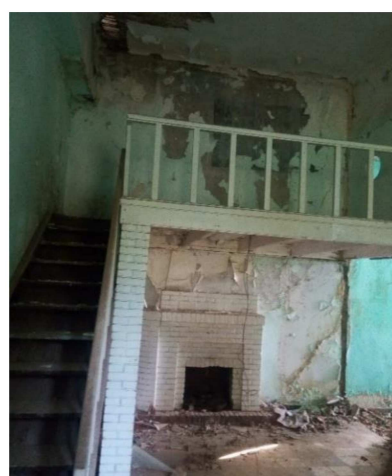


Figure 58: Un espace de la partie ouest de la cour 2.

Source : Auteur.

¹⁰² Idem.

¹⁰³ Idem.



Figure 59: La fermeture de l'une des entrées principales de la cour 1 (façade est).

Source : Auteur.



Figure 60: La construction d'une nouvelle pièce (la cour 1).

Source : Auteur.

5.2. Les techniques de construction du Haouch El Bey :

5.2.1. Les parties nord, est et sud de la cour 1 (Période ottomane) :

5.2.1.1. Les fondations :

Fondation sur libage à empattement successifs pour les murs (hypothèse).

Fondation à empattement successifs sous pile pour les piliers (hypothèse).

5.2.1.2. Les murs :

Les murs extérieurs sont en maçonnerie de moellons (voir figure 61), à l'intérieur, l'utilisation des piliers en pierre de taille pour supporter la charpente de la toiture, avec un remplissage en maçonnerie de moellons (voir figure 62).



Figure 61: Murs extérieur (façade est, cour1).

Source : Auteur.

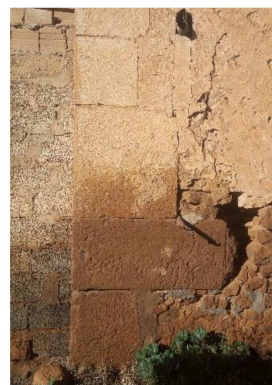


Figure 62: Pilier en pierre de taille.

Source : Auteur.

5.2.1.3. La charpente de toiture :

Les planchers sont constitués de rondins du bois recouvert de tuile demi-circulaire de la période ottomane (voir figure 63).

5.2.2. Les parties de la cour 2 (période coloniale) :

5.2.2.1. Les fondations :

Fondation sur libage à empattement successifs (hypothèse).

5.2.2.2. Les murs :

Les murs de face sont en maçonnerie de moellon du type dite traitable ou demi-dur ou de banc franc (voir figure 64). La même chose pour les murs du refend dans la partie est de la cour 2.



Figure 63: Tuiles demi circulaire.

Source : Auteur.

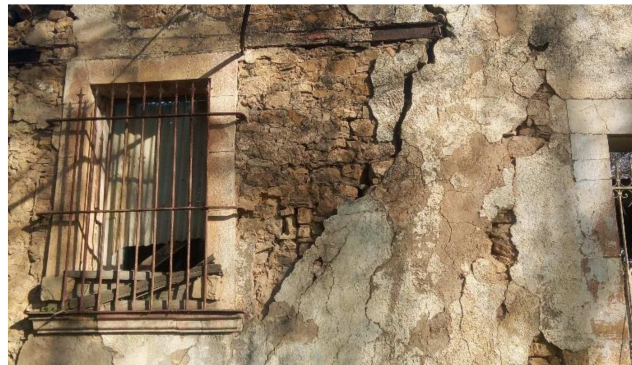


Figure 64: Mur en maçonnerie de moellon (partie coloniale).

Source : Auteur.

5.2.2.3. Les planchers :

Il existe un seul plancher (au niveau de l'étage du comble, partie est de la cour 2), cette dernière est un plancher à la française avec poutre formant une retombée (voir figure 65).

Les plafonds des parties sud et ouest sont faits par une nappe de roseau avec une couche de plâtre (voir figure 66).



Figure 65: Plancher à la française.

Source : Auteur.



Figure 66: Plafonds de la partie ouest de la cour 2.

Source : Auteur.

5.2.2.4. La charpente de toiture :

La charpente des parties qui entourent la cour 2 est en bois, elle constitue une ferme.

Pour la charpente du comble (partie est de la cour 2), une ferme à entrain retourné (voir figure 67).

Pour la charpente des parties nord, ouest et sud, une ferme triangulaire (voir figure 78).



Figure 67: La ferme du comble.

Source : Auteur.

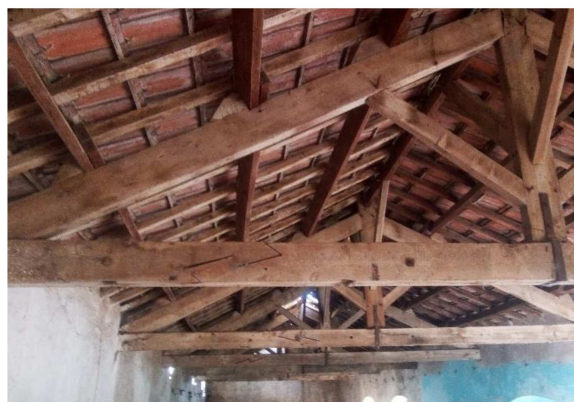


Figure 68: La ferme de la partie nord de la cour 2.

Source : Auteur.

5.3. Diagnostic structurel du Haouch El Bey :

5.3.1. Le relevé constructif :

Le principal objectif du relevé constructif est la détermination des ouvrages structuraux portés et porteurs, c'est une préparation de la prochaine étape du diagnostic qui est l'analyse théorique, cette dernière nécessite — en plus de la détermination des ouvrages structuraux

portés et porteurs — la détermination des matériaux constructifs et les dimensions géométriques des ouvrages de structure.

5.3.1.1. Les parties nord, est et sud de la cour1 :

Les ouvrages structuraux porteurs sont les piliers en pierre de taille, la section de ces piliers est carrée (50 cm * 50 cm), les murs extérieurs (de face) sont en maçonnerie de moellons de 60 cm d'épaisseur, les piliers et les murs extérieurs supportent la charpente en rondin du bois (voir figure 69).

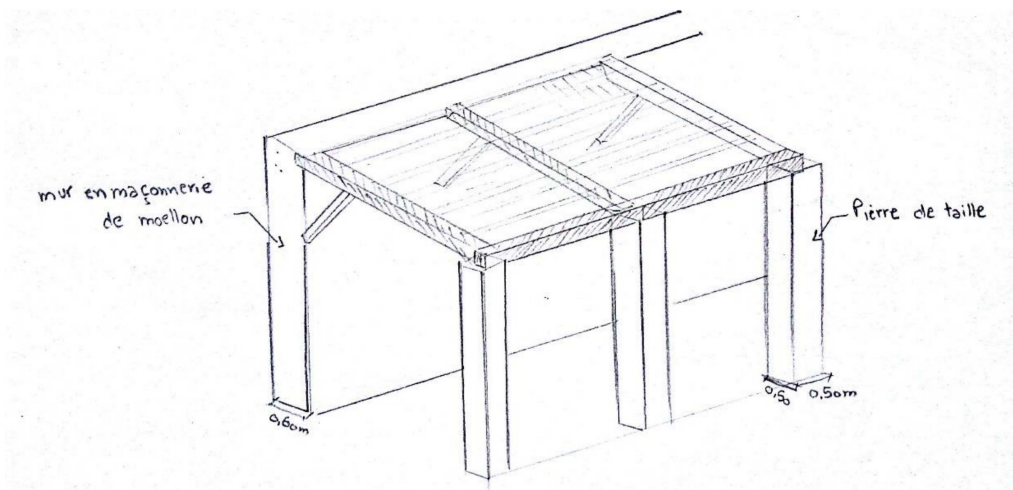


Figure 69: Ouvrages de structure, partie est et sud de la cour 1.

Source : Auteur.

5.3.1.2. La partie est de la cour2 :

Les ouvrages structuraux porteurs sont les murs extérieurs (de face), ces murs sont en maçonnerie de moellons de 60 cm d'épaisseur, ils supportent la ferme à entrait retroussé (voir figure 70).

Le plancher à la française est supporté par les murs extérieurs et les murs intérieurs (de refend) de 60 cm d'épaisseur.

Pour les murs porteurs et les ouvertures au niveau de ces derniers, ses positions, ses formes et ses dimensions sont communiquées en détail au niveau des annexes.

NB : vu la complexité sur le plan structural des fermes en bois, ces dernières seront considérées comme plancher souple pour l'analyse théorique.

5.3.1.4. Synthèse :

Après la détermination de différents ouvrages structuraux porteurs, ainsi que leurs matériaux constructifs et leurs dimensions, on peut développer le squelette structurel de l'édifice, objet de l'analyse théorique (voir figure 72) :

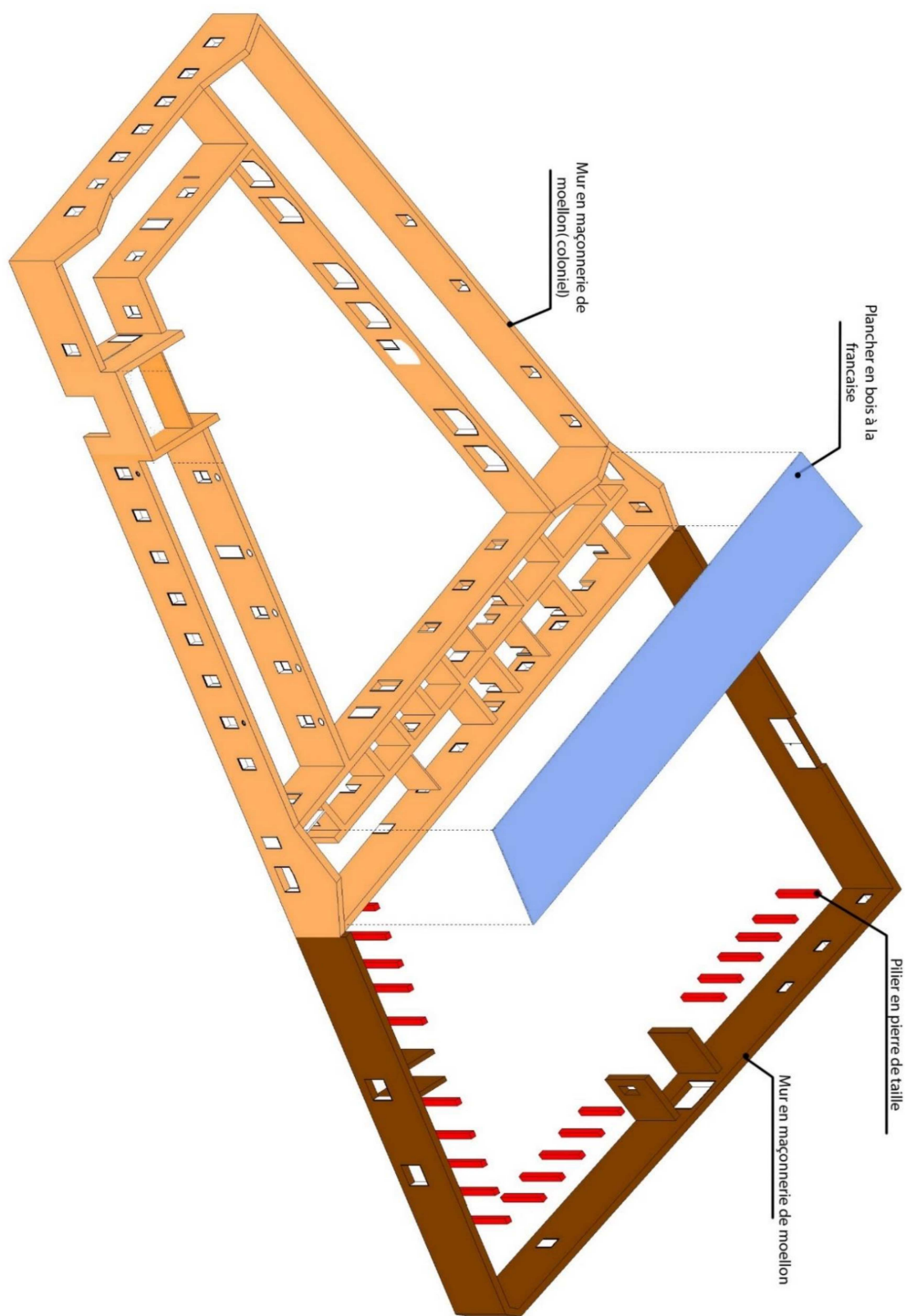


Figure 72: Le squelette structurel de l'édifice.

Source : Auteur.

5.3.2. Analyse théorique (par ETABS) :

5.3.2.1. Le logiciel Etabs :

ETABS est un logiciel pour l'analyse structurelle et la conception de bâtiments. C'est le résultat de 40 années de recherche et de développement continu, ce dernier ETABS offre des outils de visualisation et de modélisation 3D, la possibilité de faire des analyses linéaire et non linéaire extrêmement rapides, des capacités de conception sophistiquées et complètes pour une large gamme de matériaux, ainsi que des affichages graphiques perspicaces, des rapports, et des schémas permettant aux utilisateurs de déchiffrer et de comprendre rapidement et facilement les résultats d'analyse et de conception.¹⁰⁴

5.3.2.2. Etapes de modélisation du Haouch El Bey sur Etabs 2016 :

La modélisation du Haouch El Bey sur Etabs 2016 a été faite à l'aide des documents graphiques faits par BET A3D, au sein de l'étude de restauration et de mise en valeur du Haouch El Bey (voir les annexes).

Dans un premier temps, le modèle du Haouch El Bey a été fait sur le logiciel Revit Architectural 2017 (voir figure 73), cette étape nous a permis d'avoir un modèle architectural de l'édifice.

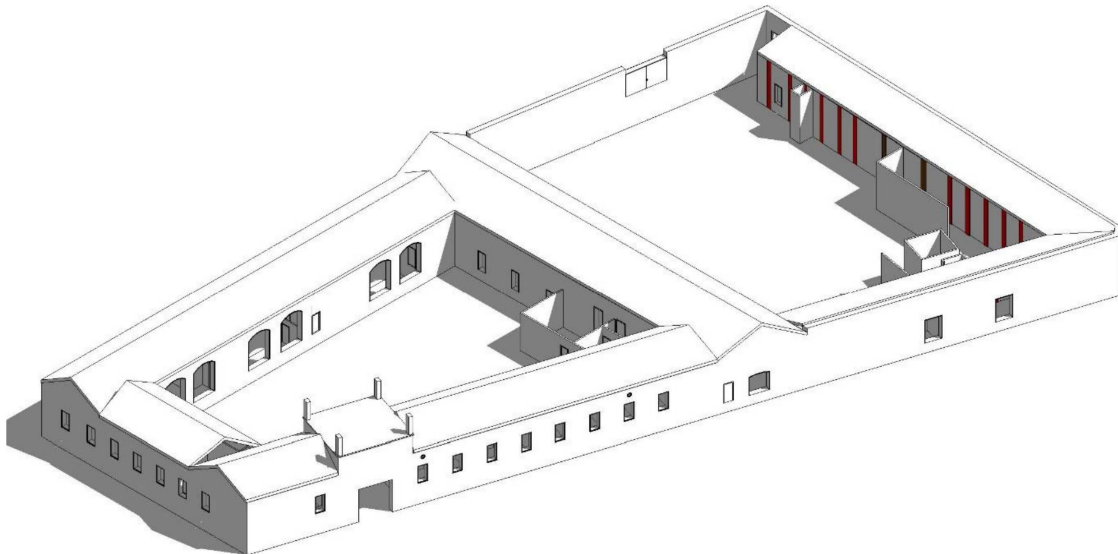


Figure 73: Model architectural du Haouch El Bey, Revit 2017.

Source : Auteur.

¹⁰⁴ csiamerica.com

Ensuite, le plan du rez-de-chaussée sur Revit a été converti en format Dwg (format Autocad). Sur Autocad, une grille des ouvrages de structure a été tracée, elle porte le nom du calque « Grid » (voir figure 74).

Après, le format Dwg a été converti en format Dxf (fichier d'échange).

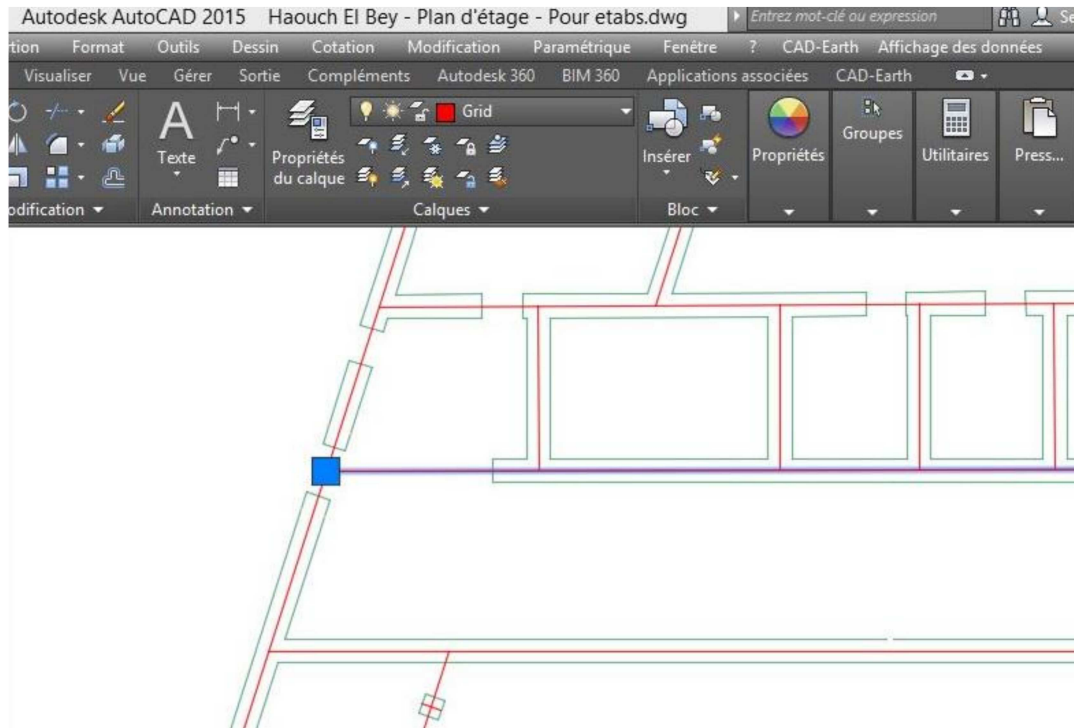


Figure 74: La grille des ouvrages de structure sur Autocad 2015.

Source : Auteur.

L'étape suivante est la modélisation du bâtiment sur Etabs 2016, la première chose à faire est la définition d'une grille sur Etabs pour le traçage des ouvrages de structure, cette dernière a été faite à l'aide de format Dxf (voir figure 75).

Ensuite, c'est la définition des propriétés mécaniques de la maçonnerie (voir figure 76).

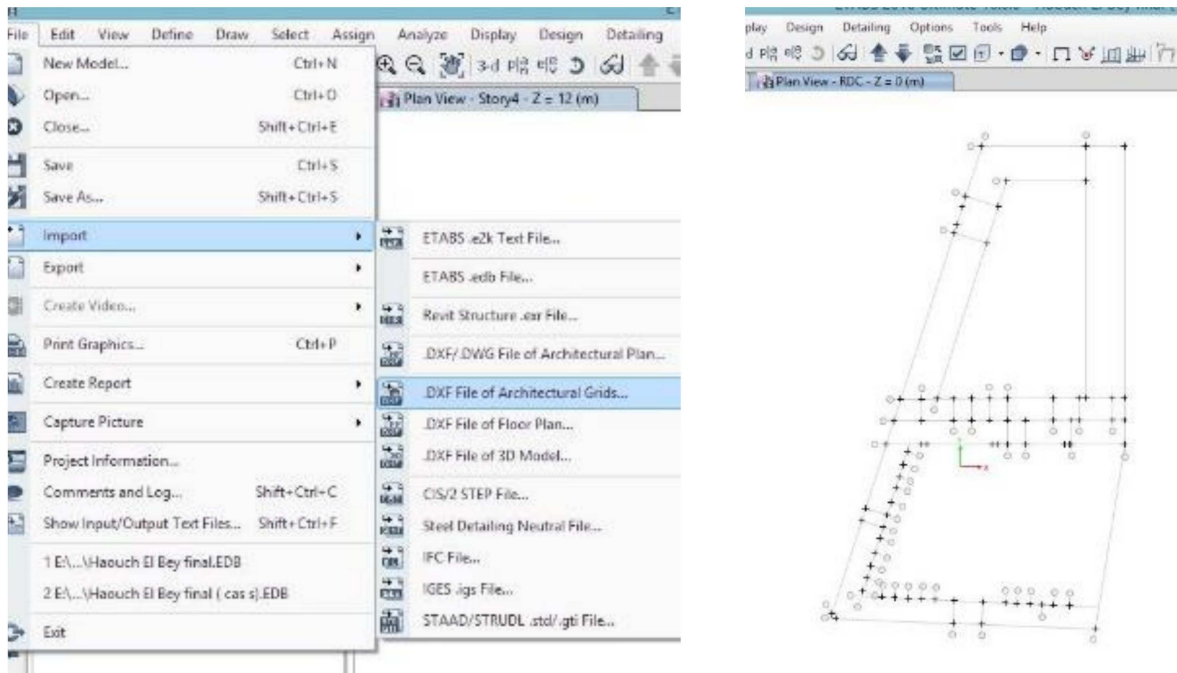


Figure 75: Introduction du format Dxf sur Etabs.

Source : Auteur.

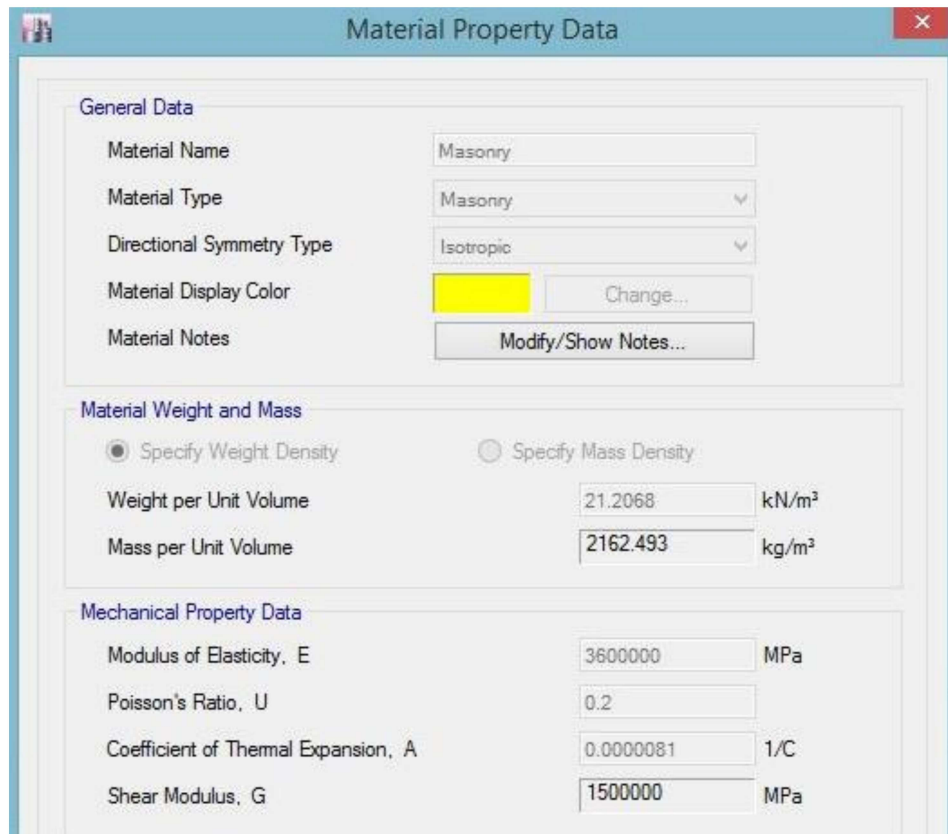


Figure 76: Propriété mécanique de la maçonnerie.

Source : Auteur.

La définition des propriétés des sections : mur (voir figure 77), plancher en bois (voir figure 78) et pilier en pierre de taille (voir figure 79).

Nb : Le poids et l'épaisseur du plancher sont négligeables dans cette étape. Ils seront pris en considération sous forme des charges permanentes dans la prochaine étape.

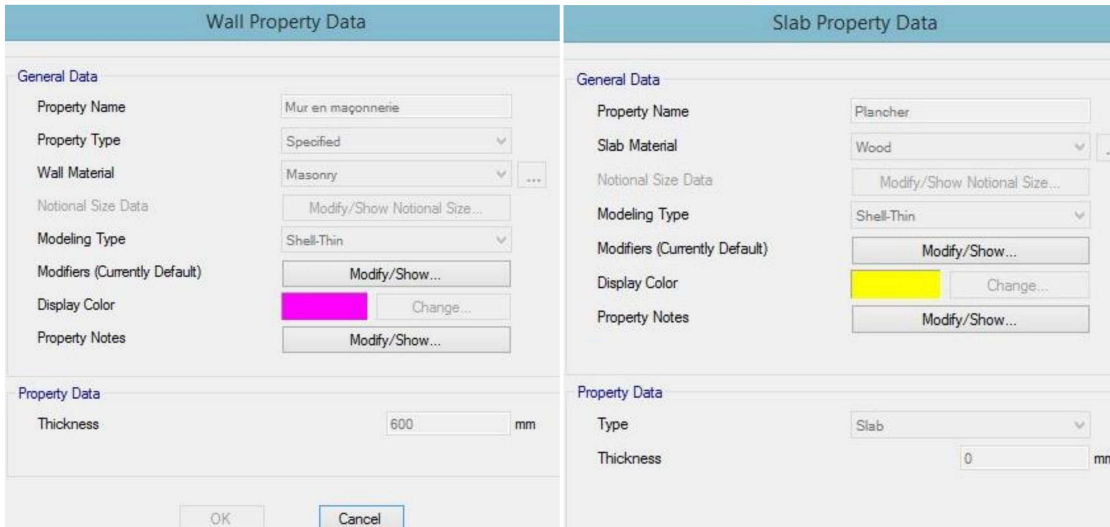


Figure 77: Propriété de la section des murs en maçonnerie.

Figure 78: Propriété de la section du plancher en bois.

Source : Auteur.

Source : Auteur.

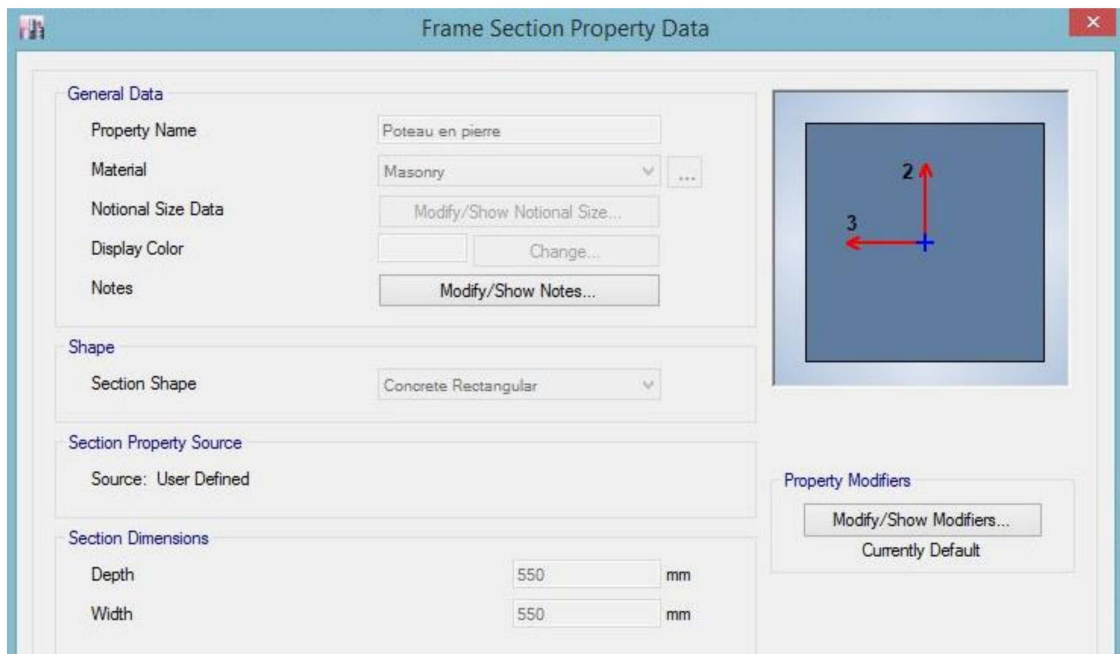


Figure 79: Propriété des piliers en pierre de taille.

Source : Auteur.

l'étape suivante est la modélisation des différents ouvrages de structure (voir figure 80).

Nb : Vu que le plancher de l'étage du comble est rigide, donc il a été considéré comme diaphragme.

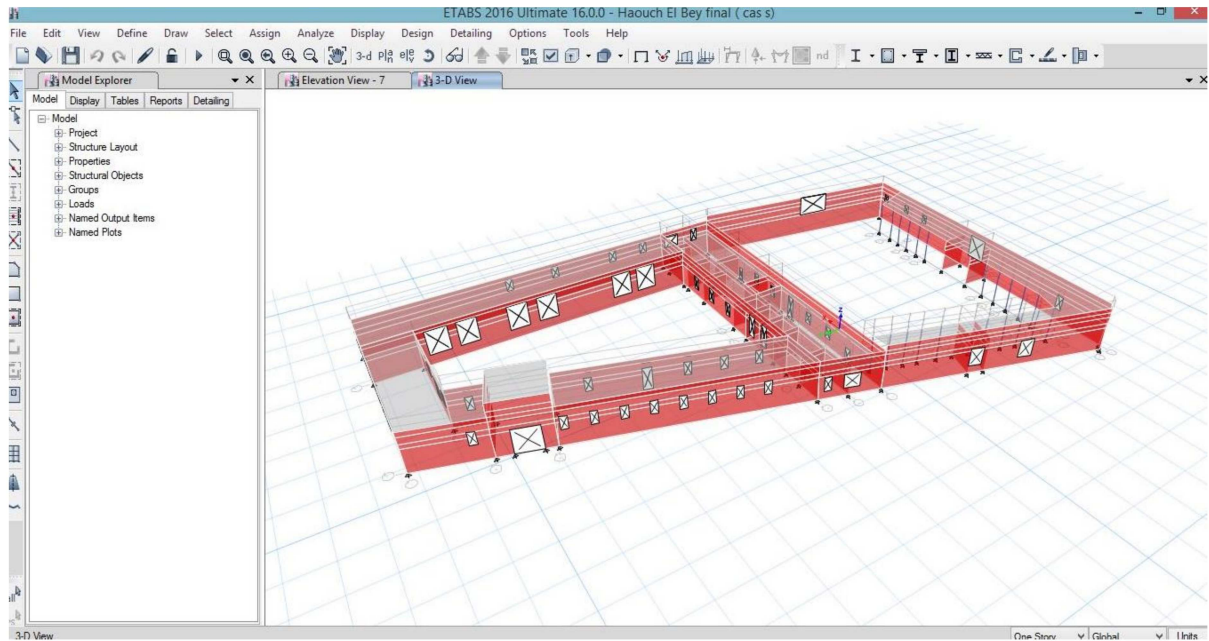


Figure 80: Le model en 3d du bâtiment sur Etabs 2016.

Source : Auteur.

Ensuite, c'est la définition des charges statiques : permanentes et exploitations, pour le plancher rigide en bois et les toitures en charpente qui ont été considérées comme plancher souple (tableau 10).

Plancher	Nature de plancher	Charge permanente	Charge d'exploitation
Plancher du comble	Rigide	176kg/m ²	200kg/m ²
Toiture du comble	souple	135kg/m ²	100kg/m ²
Toiture de la partie coloniale	souple	175kg/m ²	100kg/m ²
Toiture de la partie ottomane	souple	150kg/m ²	100kg/m ²

Tableau 6: Charges statiques sur les planchers,Auteur.

Nb : La note de calcul pour les charges permanentes des planchers est au niveau des annexes.

Après, c'est la définition des charges dynamiques (sismique). La définition a été faite à l'aide du Spectre de réponse, pour introduire ce spectre dans Etabs, nous avons besoin des données de l'accélération sismique par rapport à la période de la région de Médéa, nous pouvons avoir ces données à l'aide de logiciel RPA 99, la version de 2003 (voir figure 81).

Ces données ont été introduire à Etabs pour définir la fonction spectre de réponse sismique (voir figure 82).

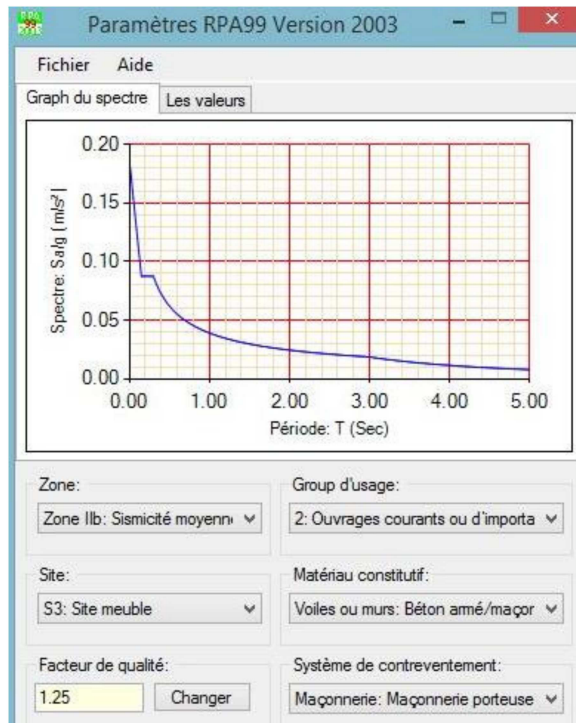


Figure 81: Paramètres du spectre de réponse sismique.

Source : Auteur.

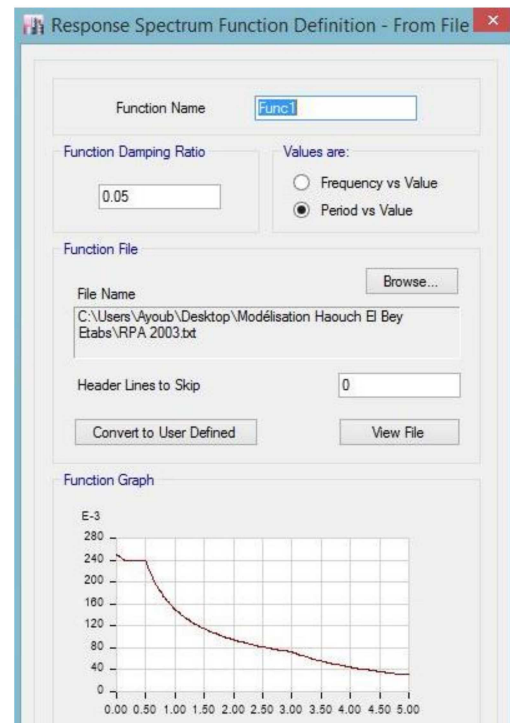


Figure 82: Spectre de réponse sismique sur Etabs.

Source : Auteur.

Ensuite, c'est la définition des combinaisons (voir tableau 11) :

Type de combinaison	combinaison	Nature de combinaison
ELS	G + Q	Statique
ELU	1,35G + 1,5Q	Statique
Accidentelle	G + Q + Ex	Dynamique
Accidentelle	G + Q + Ey	Dynamique
Accidentelle	0,8G ± Ex	Dynamique
Accidentelle	0,8G ± Ey	Dynamique

Tableau 7: Les différentes combinaisons, (Auteur).

La dernière étape de modélisation avant de passer à l'analyse est la création du maillage (voir figure 83).

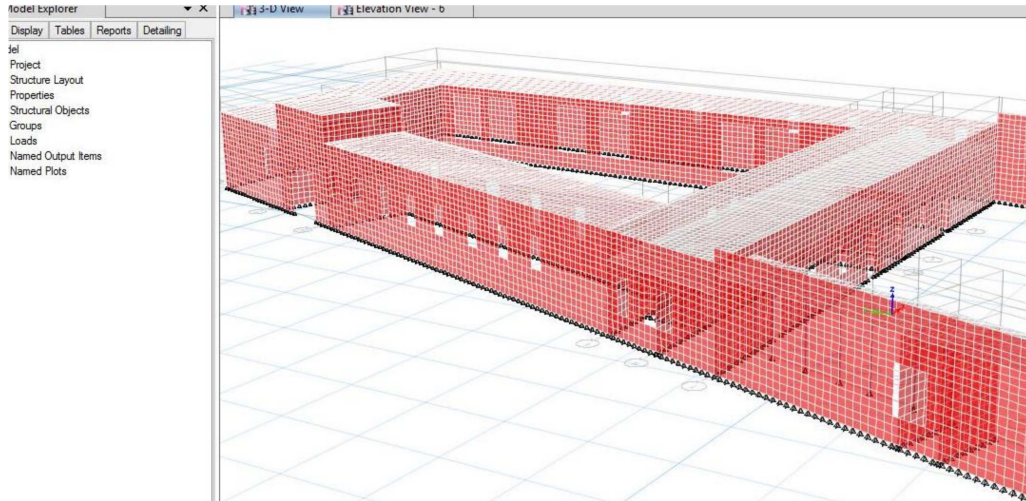


Figure 83: Création du maillage au niveau du model.

Source : Auteur.

5.3.2.3. Analyse théorique statique :

L'analyse théorique statique a été faite à l'état limite ultime (ELU) et à l'état limite de service (ELS). L'objectif est de ressortir les zones critiques où les contraintes internes ou les forces internes sont maximums (voir figure 84), ensuite, de comparer ces contraintes ou ces forces à la résistance théorique de la maçonnerie de moellons, cette étape d'analyse permet de ressortir les endroits objet d'un renforcement.

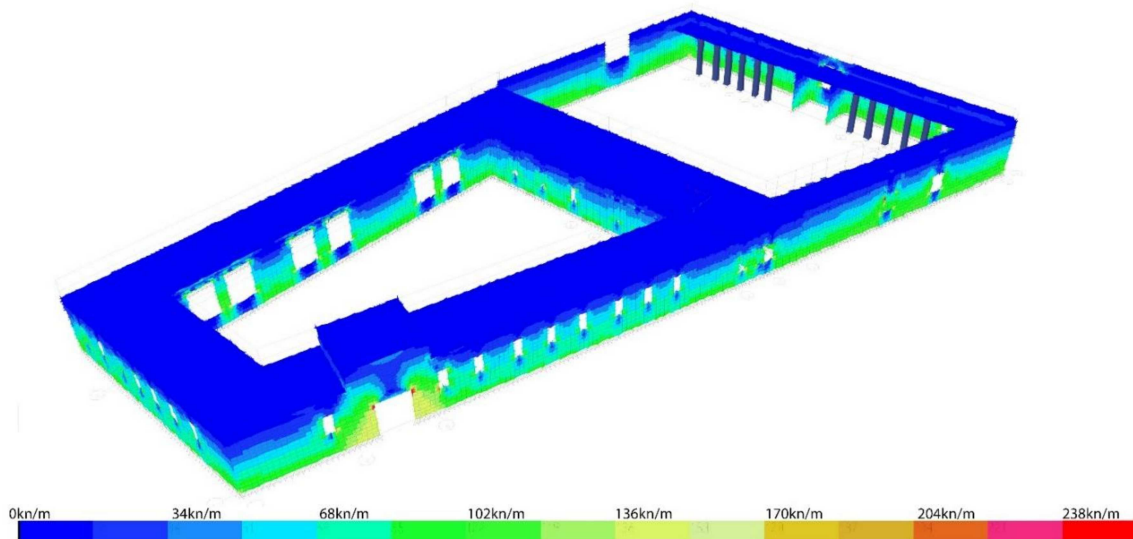


Figure 84: Les forces internes à ELU, sous FVM. Etabs 2016.

Source : Auteur.

Entre ELU (voir figure 85) et ELS (voir figure 86), nous avons constaté que les contraintes internes sont maximums à l'ELU.

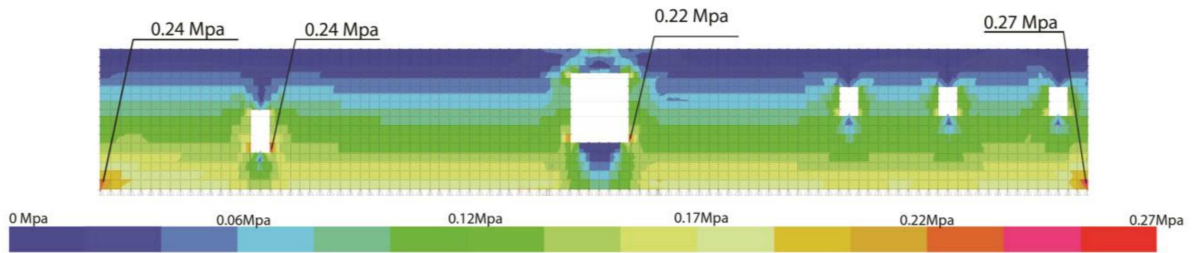


Figure 85: Contraintes internes à ELU, sous SVM, façade est, Etabs 2016.

Source : Auteur.

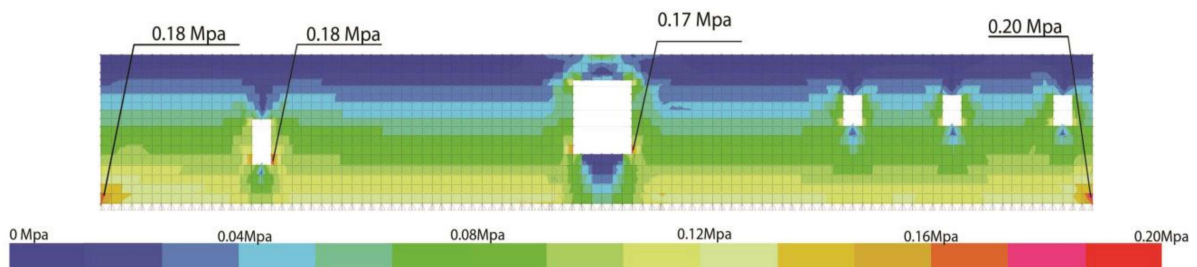


Figure 86: Contraintes internes à ELS, sous SVM, façade est, Etabs 2016.

Source : Auteur.

Tableau récapitulatif des contraintes de compression maximale à ELU, avec comparaison aux résistances théoriques de compression (les valeurs sont en Méga Pascal) :

Mur	Contrainte de Cmax Etabs	EN1052-3 ¹⁰⁵	Benne tt ¹⁰⁶	Ohler ¹⁰⁷	Khoo et Hendry ¹⁰⁸	MSJC, 2002 ¹⁰⁹
Façade extérieur sud	0.41	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur ouest	0.24	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur nord	0.24	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur est	0.27	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur ouest cour 1	0.24	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur est cour 2	0.21	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur sud cour 2	0.27	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur ouest cour 2	0.23	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur nord cour 2	0.25	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Mur de refend	0.25	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76

Tableau 8: Résultat de l'analyse théorique à ELU avec une comparaison (Auteur).

¹⁰⁵ Turath Gharib, *Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : application aux murs en pierres calcaires*, Université Claude Bernard - Lyon I, 2015.

¹⁰⁶ Bennett R.M., Boyd K.A. Id.

¹⁰⁷ Ohler A, Id.

¹⁰⁸ Khoo C., Hendry A, Id.

¹⁰⁹ Idem.

Nb : les résultats en détail du tableau précédent sont au niveau des annexes.

5.3.2.4. Analyse théorique dynamique :

Le déplacement maximal du bâtiment est d'environ 0.616 mm au niveau des piliers en pierre de taille (cour 1) (voir figure 87).

Tableau de déplacement de quelques points critiques au niveau des murs en maçonnerie (voir figure 88) : les valeurs sont en millimètre.

Combinaison		0.8GEx Max	0.8GEy Max	GQEx Max	GQEy Max
Point		Déplacement	Déplacement	Déplacement	Déplacement
A	Ux	-4.362E-05	-4.362E-05	-5.461E-05	-5.461E-05
	Uy	-1.597E-05	-1.597E-05	-1.998E-05	-1.998E-05
	Uz	0.0001791	0.0001791	0.0002243	0.0002243
B	Ux	9.472E-06	9.475E-06	1.201E-05	1.202E-05
	Uy	-3.332E-07	-3.34E-07	-4.365E-07	-4.366E-07
	Uz	0.0000900	0.0000900	0.0001131	0.0001131
C	Ux	6.617E-07	6.57E-07	8.556E-07	8.51E-07
	Uy	-1.378E-06	-1.363E-06	-1.869E-06	-1.854E-06
	Uz	-9.358E-05	-9.358E-05	-0.0001171	-0.0001171
D	Ux	-1.56E-05	-1.578E-05	-1.974E-05	-1.992E-05
	Uy	-9.357E-06	-9.383E-06	-1.164E-05	-1.167E-05
	Uz	-0.0001157	-0.0001157	-0.0001448	-0.0001449
E	Ux	1.447E-05	1.447E-05	1.809E-05	1.809E-05
	Uy	-2.199E-05	-2.199E-05	-2.753E-05	-2.753E-05
	Uz	-0.0001179	-0.0001179	-0.0001474	-0.0001474

Tableau 9: Le déplacement de quelque point critique (Auteur).

Le tableau montre que les déplacements sont négligeables au niveau des murs.

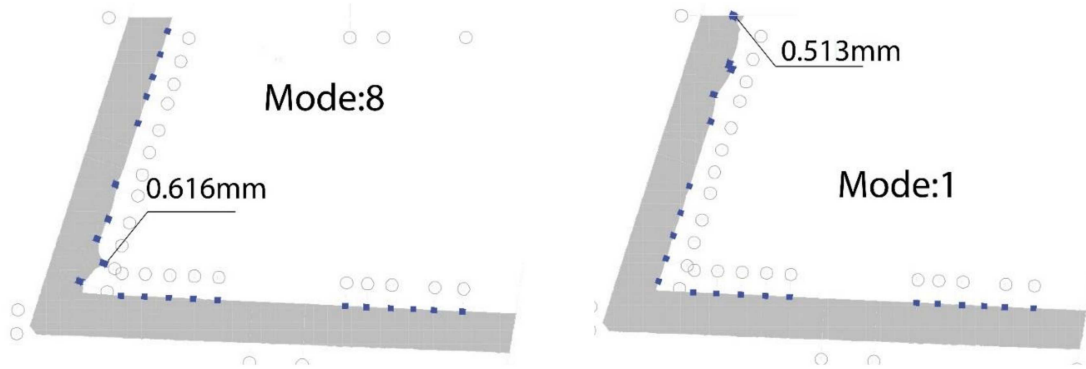


Figure 87: Déplacement maximum du bâtiment.

Source : Auteur.

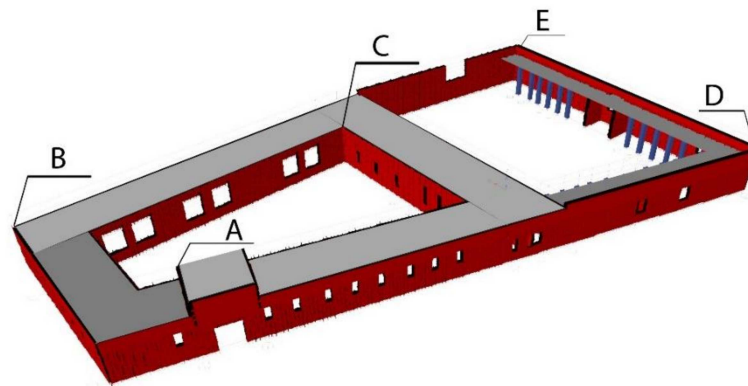


Figure 88: Les points critiques de déplacement (murs).

Source : Auteur.

L'analyse théorique dynamique a été faite selon deux combinaisons : 0.8 GEx et GQEx. L'objectif – comme l'analyse statique – est de ressortir les zones critiques où les contraintes internes ou les forces internes sont maximums (voir figure 89), ensuite, de comparer ces contraintes ou ces forces à la résistance théorique de la maçonnerie de moellons, cette étape d'analyse permet de ressortir les endroits objet de renforcement.

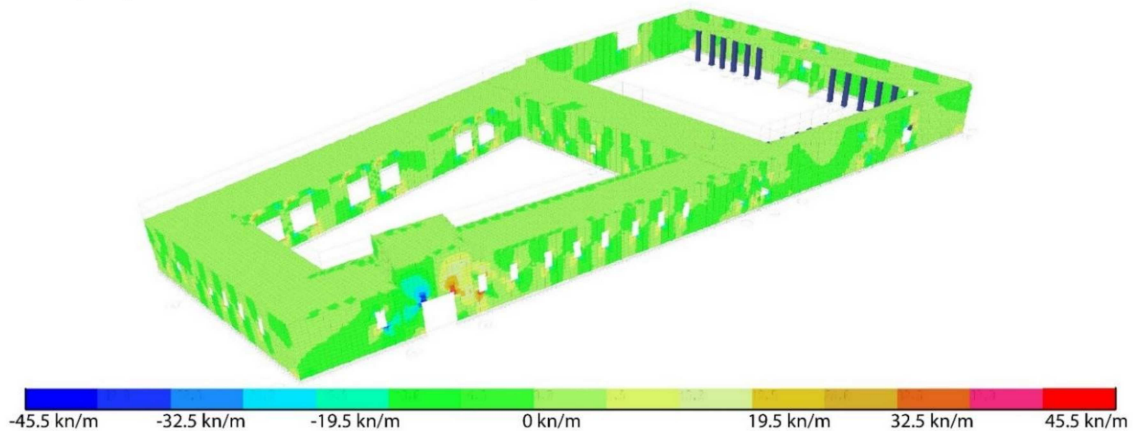


Figure 89: Les forces internes à GQEx, sous F12, Etabs 2016.

Source : Auteur.

Entre 0.8GEx (voir figure 90) et GQEx (voir figure 91), nous avons constaté que les contraintes internes sont maximums à GQEx.

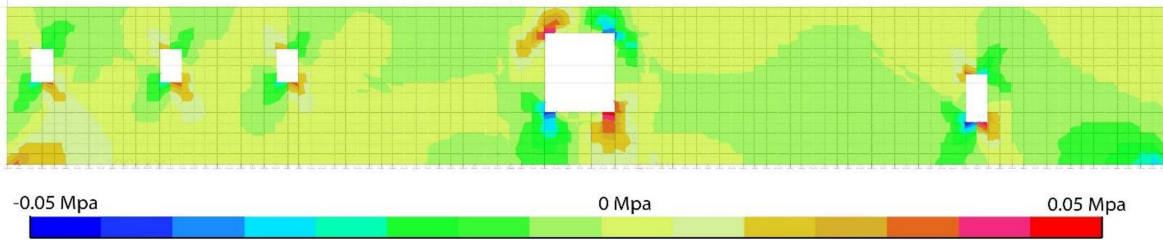


Figure 90: Contraintes internes à GQEx, sous S12, Etabs 2016.

Source : Auteur.

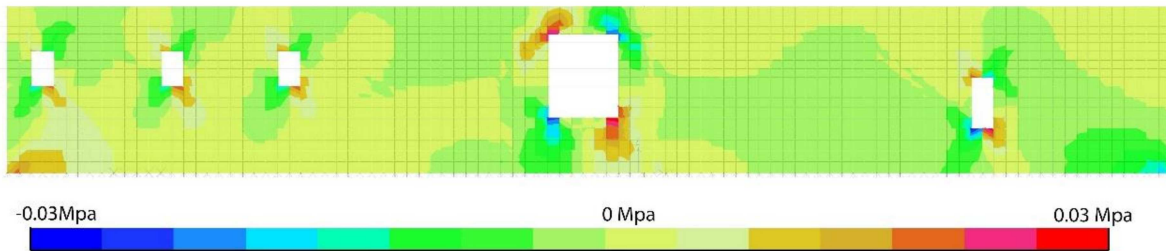


Figure 91: Contraintes internes à 0.8GEx, sous S12, Etabs 2016.

Source : Auteur.

Tableau récapitulatif des contraintes maximales à GQEx, avec une comparaison à la résistance théorique de compression (les valeurs sont en Méga Pascal) :

Nb : les résultats en détail du tableau suivant sont au niveau des annexes.

Mur	Contrainte de Cmax Etabs	EN105 2-3 ¹¹⁰	Bennet t^{111}	Ohler ¹¹²	Khoo et Hendry ¹¹³	MSJC, 2002 ¹¹⁴
Façade extérieur sud	0.09	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur ouest	0.04	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur nord	0.03	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade extérieur est	0.05	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur ouest cour 1	0.05	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur est cour 2	0.04	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur sud cour 2	0.04	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur ouest cour 2	0.04	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Façade intérieur nord cour 2	0.05	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76
Mur de refend	0.07	<17.69	<28.5	<39.85	<43.52	<21.76

Tableau 10: Résultat de l'analyse théorique à GQEx, avec une comparaison (Auteur).

¹¹⁰ Turath Gharib, *Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : application aux murs en pierres calcaires*, Université Claude Bernard - Lyon I, 2015.

¹¹¹ Bennett R.M., Boyd K.A. Id.

¹¹² Ohler A, Id.

¹¹³ Khoo C., Hendry A, Id.

¹¹⁴ Idem.

5.3.2.5. Synthèse de l'analyse théorique :

À travers les différents résultats obtenus de l'analyse théorique statique et dynamique, nous avons constaté que les murs porteurs n'ont pas des endroits critiques qui doivent être objet d'un renforcement (les murs sont largement surdimensionnés).

Aussi, l'analyse théorique nous a permis de détecter les zones qui doivent être objet d'un examen visuel pour la prochaine étape, qui est le diagnostic structurel sur terrain. Les zones sont surtout les contours des ouvertures et les coins inférieurs des murs (voir figure 92).

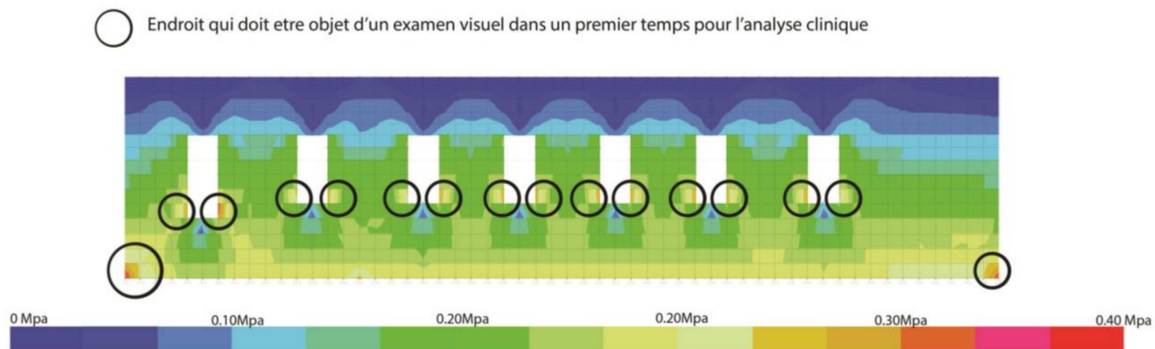


Figure 92: Endroit à examiner visuellement, façade ouest

Source : Auteur.

5.3.3. Diagnostic structurel sur terrain :

La différence entre cette étape et l'étape précédente est que, au niveau de l'analyse théorique, nous avons fait une abstraction des désordres et des altérations, cette étape consiste à ressortir, par examen visuel, ces altérations et désordres au niveau des ouvrages de structure. Pour atteindre cet objectif, nous avons basé sur l'étude de restauration et de mise en valeur du Haouch El Bey faite par BET A3D à l'an 2000, et on ajoute les nouveaux désordres et altérations observés en décembre 2018.

5.3.3.1. Les murs de face extérieurs :

Le mur	Altérations et désordres l'an 2000	Altérations et désordres décembre 2018
Est	la présence des fissures superficielles verticales sur le parement extérieur du mur (le coin sud).	Fissures témoins d'ordres superficiels (entrée principale est).
Nord	/	Fissures superficielles (dus au joint de construction et mouvement hygrothermique).

Tableau 11: Altérations et désordres, mur de face nord et est (Auteur).

Mur	Altérations et désordres l'an 2000	Altérations et désordres décembre 2018
ouest	Tassement (translation verticale) du sol. Fissures verticales de type lézardes (voir figure 93). Fissures superficielles.	Effondrement total du coin sud-ouest (voir figure 94) Fissures à 45° de type lézardes (voir figure 95). Fissures verticales de type lézardes au niveau des baies Fissures superficielles (dus au joint de construction).
Sud	Tassement (translation verticale) (partie ottomane) Tassement (translation verticale) et fissures verticales de type lézardes (partie coloniale)	Effondrement partiel d'une partie du mur au-dessus de l'entrée principale sud de la cour 1(voir figure 96). Effondrement total du coin sud-ouest. Fissures à 45° de type lézardes au-dessus de l'entrée principale de la cour 2 (voir figure 97), avec une inclinaison vers l'extérieur du mur.

Tableau 12 :Altérations et désordres, murs de face ouest et sud (Auteur).



Figure 93: Fissure vertical de type lézarde, mur de face extérieur ouest.

Source : Etude de restauration du Haouch El Bey.2000.



Figure 94: Effondrement total d'une partie du mur de face extérieur ouest.

Source : Auteur.



Figure 95: Fissures lézardes verticales et à 45°, mur de face extérieur ouest

Source : Auteur.

Les causes de l'effondrement du coin sud-ouest :

La capacité portante du sol d'assise est diminuée à cause de la présence du bassin d'eaux usées et le passage d'une nouvelle canalisation des eaux usées sous le coin sud-ouest¹¹⁵, cette diminution de la capacité portante du sol, avec le percement des baies de grandes surfaces pour les climatiseurs ont engendré une translation verticale des parois de type : tassement d'extrémité long de la paroi, donc un problème d'équilibre statique des murs.

A l'an 2000, au niveau du mur sud et ouest, les fissures lézardes sont de type α (voir chapitre 2) : inclinaison de la fissure à l'opposé du tassement ; amorce d'allure verticale en partie haute avec grand écartement des lèvres à cet endroit. Leur allure est celle d'une courbe très tendue de forme de « S ».

Après l'an 2000, le tassement d'extrémité au niveau du coin sud-ouest continu, les fissures de type lézardes devient plus graves (voir figure 98), ces derniers ont engendré un effondrement total du coin sud-ouest du bâtiment.



Figure 96: Effondrement partiel de mur au-dessus de l'entrée principale sud de la cour 1.

Source : Auteur.

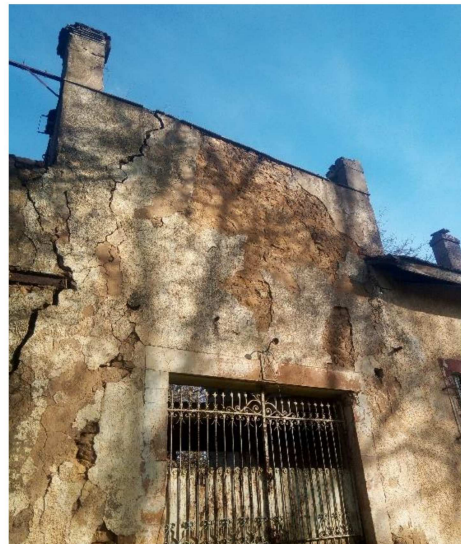


Figure 97: Fissures lézardes à 45° au-dessus de l'entrée principale de la cour 2.

Source : Auteur.

Aujourd'hui, au niveau du mur sud de l'entrée de la cour 2, nous avons remarqué une fissure avec une allure d'une courbe très tendue de forme de « S » (voir figure 99), c'est un signe d'un tassement d'extrémité de cette paroi (voir figure 100). Ce tassement a engendré une inclinaison de ce mur vers l'extérieur (voir figure 101), et à cause de cette inclinaison, la cohésion entre ce mur et le mur de refend ouest de l'entrée sud a été perdue (voir figure 102).

¹¹⁵ دراسة ترميم وتقييم حوش الباي، الجزء الأول، تقييم ومعاينة أسباب تدهور المعلم، مكتب الدراسات ورشة الأبعاد الثلاثة، 2000

La gravité de cette inclinaison devient avec le temps plus importante, elle a engendré l'effondrement d'une partie du plancher (voir figure 103).

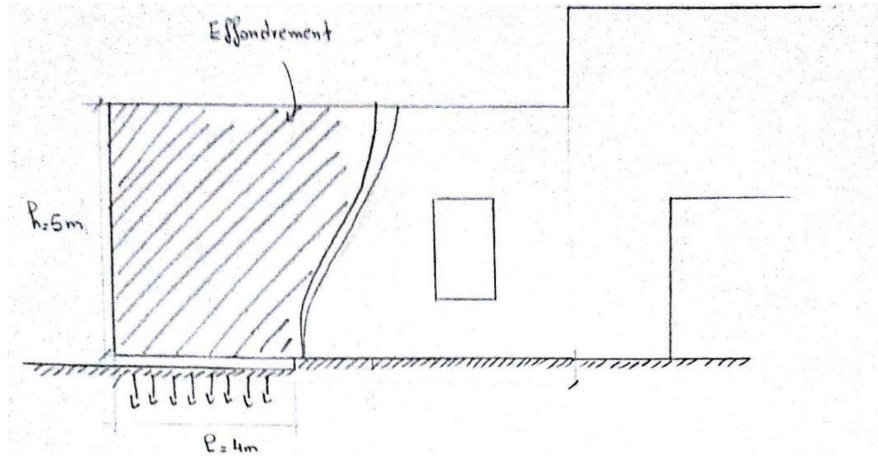


Figure 98 : Tassement d'extrémité long, extrémité gauche de la paroi extérieure sud. L'an 2000.

Source : Auteur..

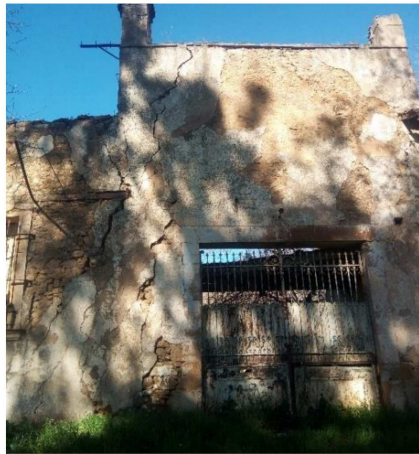


Figure 99 : Fissures lézardes, entrée de la cour 2.

Source : Auteur.

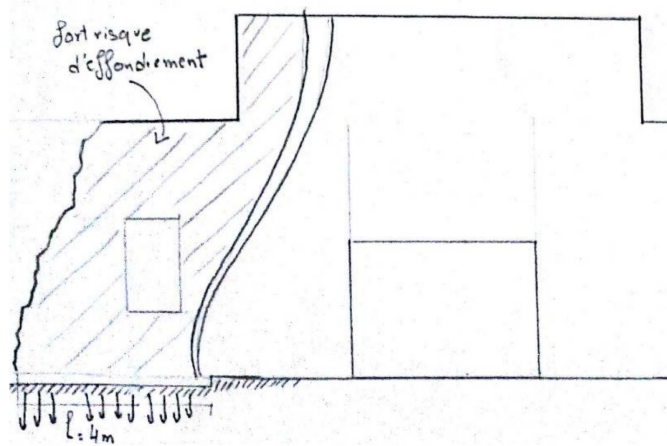


Figure 100 Tassement d'extrémité long, extrémité gauche de la paroi extérieure sud. L'an 2019

Source : Auteur.

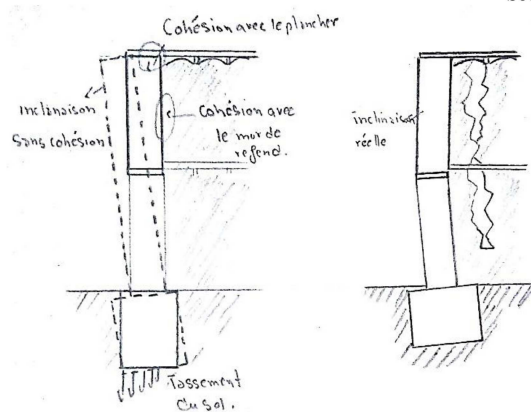


Figure 101: Inclinaison de la paroi sud, entrée cour 2.

Source : Auteur.

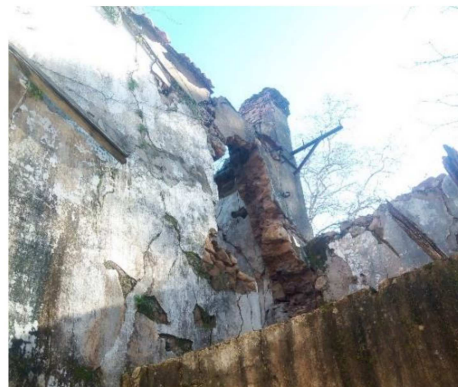


Figure 102 Effondrement partiel, mur de refend ouest, entrée de la cour 2

Source : Auteur.



Figure 103: Effondrement partiel du plancher au-dessus de l'entrée de la cour 2.

Source : Auteur.

Aujourd'hui (février 2019), le mur a perdu sa liaison avec le mur de refend ouest de l'entrée de la cour 2, et sa liaison avec le plancher de l'entrée, donc il est exposé à un fort risque d'effondrement.

Pour l'effondrement partiel d'une partie du mur au-dessus de l'entrée principale sud de la cour 1, c'est dû probablement à l'infiltration des eaux pluviales à l'intérieur du mur.

5.3.3.2. Les murs de face intérieurs :

	Mur	Altérations et désordres l'an 2000	Altérations et désordres décembre 2018
Cour 1	Ouest	/	Fissures de type lézardes verticales au-dessus de l'escalier (étage de comble) et dans l'extrémité gauche du mur (voir figure 104).
Cour 2	Sud	/	Fissures verticales de type lézardes le long de mur ouest de l'entrée (voir figure 105).

Tableau 13 : Altérations et désordres, murs de face intérieur (auteur).

Les fissures de type lézardes au niveau de l'étage de comble sont dues probablement à cause de poussée de la ferme à entrain retroussé.

Pour les fissures verticales de type lézardes le long du mur ouest de l'entrée sud de la cour 2, elles sont dues probablement à cause de l'effondrement du coin sud – ouest du bâtiment (y compris la charpente de la toiture), donc le mur est devenu dans un état d'instabilité statique (le mur fait 8 m de hauteur).



Figure 104: Fissure lézarde verticale, mur de face intérieur ouest, cour 1.

Source : Auteur.

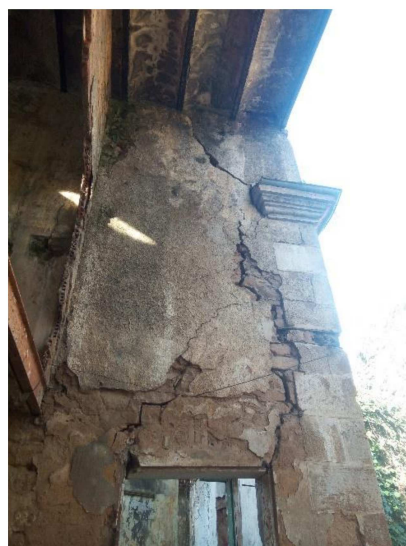


Figure 105: Fissures lézardes verticales le long de mur ouest de l'entrée sud, cour 2.

Source : Auteur.

5.3.3.3. Le plancher de l'étage du comble :

L'altération principale du plancher de l'étage du comble est le pourrissement des pièces porteuses du plancher (les travures), suivant la pénétration de l'eau pluviale et de l'humidité à travers les gerces (voir §2.2.1.2). Aussi nous avons remarqué la disparition de quelques travures et lames, surtout dans la partie sud (voir figure 106).

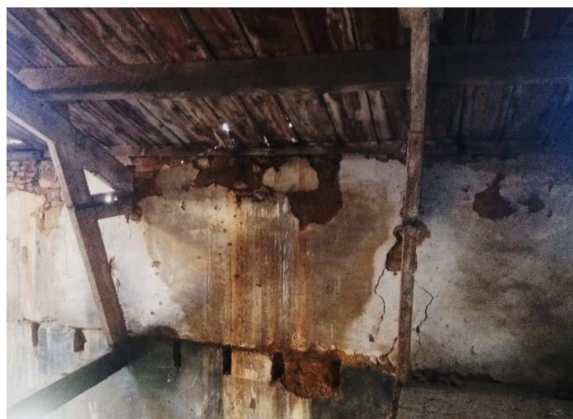


Figure 106: La disparition de quelques poutrelles et lames en bois.

Source : Auteur.

5.3.3.4. Les toitures :

Cour	Partie	Altérations et désordres l'an 2000	Altérations et désordres décembre 2018
Cour 1	Est	La disparition de quelques rondins du bois du plancher. Le pourrissement des rondins du bois. Disparition totale des tuiles (le coin nord) (voir figure 107).	Effondrement total de la charpente au-dessus de l'entrée principale. Effondrement total de la charpente au-dessus du coin nord (voir figure 108).
	Sud	Le pourrissement des rondins du bois. Une flèche et une inclinaison des rondins du bois	/
Cour 2	est	/	Pourrissement au niveau des pièces de la charpente (voir figure 109).
	Sud	Disparition totale des tuiles (côté ouest).	Effondrement total de la charpente au-dessus du coin sud-ouest.
	Ouest	La flèche et l'inclinaison des pièces portantes de la charpente (le coin sud-ouest).	Effondrement total de la charpente au-dessus du coin sud-ouest.
	Nord	/	Flèche et inclinaison de quelque entrain de la charpente (voir figure 110).

Tableau 14: Désordres et altérations des toitures (Auteur).



Figure 107: Disparition des tuiles, le coin nord-est, cour 1.

Source : Etude de restauration du Haouch El Bey.



Figure 108: Effondrement de la charpente du coin nord-est, cour 1.

Source : Auteur.



Figure 109: Pourrissement, charpente du comble.

Source : Auteur.



Figure 110: Une flèche au niveau d'un entrain de la charpente.

Source : Auteur.

Vu la présence d'un faux plafond en plâtre dans la partie sud et ouest de la cour 2, nous n'avons pas pu examiner visuellement l'état de la charpente.

La disparition partielle ou totale des tuiles a permis l'infiltration des eaux pluviales vers les pièces en bois de la charpente, ce qui est la cause primordiale du phénomène du pourrissement, ce dernier, dans un premier temps, il n'a pas un effet direct sur la stabilité de la charpente, mais avec le temps, il peut provoquer la disparition totale d'une pièce, ce qui, selon l'importance de la pièce, peut aller jusqu'à l'effondrement de la charpente. Exemple : le cas du coin nord-est de la cour 1.

5.3.4. Synthèse :

Après l'élaboration de l'analyse théorique (statique et dynamique) et le diagnostic visuel des ouvrages de structure du bâtiment, nous pouvons ressortir les endroits qui doivent être objet de renforcement ou consolidation :

5.3.4.1. Les murs de face :

Les murs de face (intérieur ou extérieur) qui doivent être objet de consolidation sont ceux qui présentent des fissures lézardes (fractures) (voir figure 111).

Nb : A travers l'analyse théorique, nous avons constaté que les murs sont suffisamment dimensionnés, donc ils ne nécessitent pas une opération de renforcement.

5.3.4.2. Le plancher de l'étage du comble :

Le plancher doit être objet de consolidation à cause du pourrissement de ces pièces porteuses (les travures).

5.3.4.3. La toiture :

Après l'élaboration d'un examen visuel, nous avons constaté que les pièces de charpente ne nécessitent pas une opération de consolidation, mais une opération de renforcement est probablement nécessaire. Exemple : la flèche et l'inclinaison de l'entrait de la charpente triangulaire au niveau de la partie nord de la cour 2.

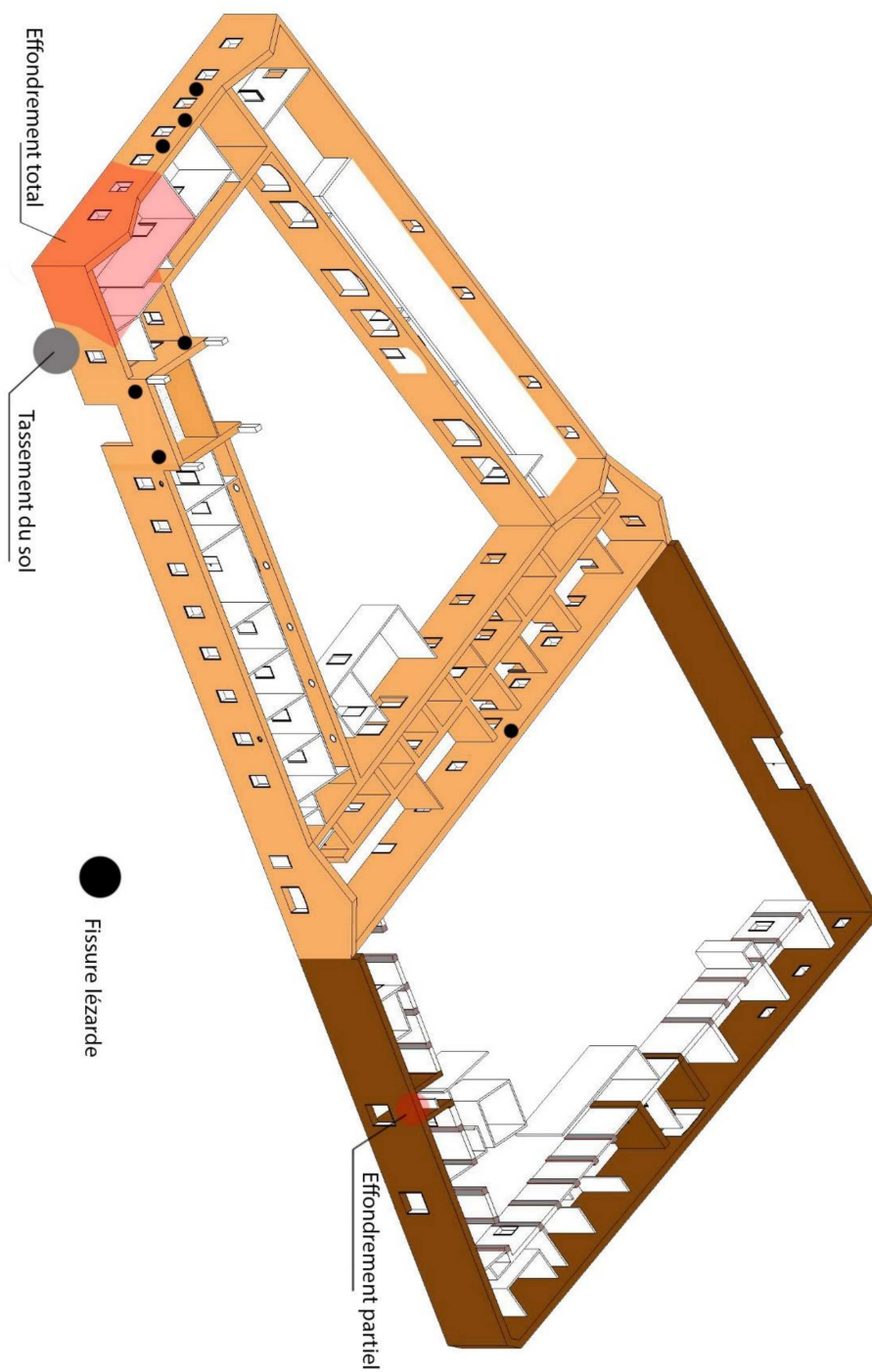


Figure 111: Synthèse des désordres au niveau des murs.

Source : Auteur.

Chapitre 6. Stratégie et actions pour la réhabilitation du Haouch El Bey

6.1. Stratégie de réhabilitation :

Le chapitre précédent avait comme objectif de ressortir les désordres et les altérations au niveau des ouvrages de structure, ces désordres et altérations doivent être objet de renforcement ou de consolidation.

Mais dans la réalité, la réhabilitation structurelle est une phase dans le processus de réhabilitation d'un bâtiment, elle doit être inscrite dans une vision globale de réhabilitation donc, une stratégie.

Une stratégie de réhabilitation efficace doit être commencée par assurer la stabilité des ouvrages de structure, commençant d'abord par les travaux d'urgence (les travaux qui concernent les ouvrages ayant un risque d'effondrement), ensuite par les travaux de réhabilitation structurelle des désordres qui ont un effet direct sur la stabilité des ouvrages, tels que les fissures de type lézardes.

Une fois, on a assuré la stabilité structurelle du bâtiment, nous pouvons commencer la réhabilitation architecturale de l'ouvrage ; décapage des murs pour refaire les enduits, travailler les éléments architectoniques et architecturaux, des diapositives pour arrêter les remontées capillaires sur les murs, etc.

6.2. Actions pour la réhabilitation structurelle :

6.2.1. Travaux d'urgence :

Les travaux d'urgence concernent les ouvrages de structure ayant un risque d'effondrement, dans notre cas, c'est les murs dans le coin sud-ouest.

6.2.1.1. Vérifier la stabilité du sol :

L'effondrement du coin sud-ouest du bâtiment est dû au tassement du sol. Les causes de tassement n'ont pas été naturelles (bassin d'eaux usées, le passage d'une nouvelle canalisation des eaux usées).

Aujourd'hui, nous avons remarqué que le bassin des eaux usées n'existe plus, mais les fissures à côté de l'entrée sud de la cour 2 ayant des allures des fissures dues au tassement d'extrémité long, donc, une opération de vérification de la stabilité du sol est nécessaire.

Si le tassement continue à exister, une opération de consolidation des fondations est primordiale, plusieurs techniques existent, mais vu que le mur présente un fort risque d'effondrement, nous avons recommandé la consolidation par injection de sol, et éviter la consolidation par élargissement des fondations.

6.2.1.2. Stabilisation des murs du porche d'entrée :

Différents systèmes existent pour assurer la stabilité des murs en risque d'effondrement, nous citons notamment ¹¹⁶ :

- le système mixte d'échafaudage-éaiement, formé d'éléments en charpente métallique avec des sections tubulaires en acier.
- le système employant uniquement l'éaiement en ossature de charpente métallique à base de profilés du commerce qui semble le plus utilisé.

Pour le mur de face extérieure de l'entrée sud de la cour 2, il est obligatoirement de le soutenir immédiatement par des éaiements temporels (voir figure 112), le temps d'entamer les opérations de consolidation de ce mur. La même chose pour le mur ouest de l'entrée sud de la cour 2 (voir figure 113) : suivant à l'effondrement des murs au niveau du coin sud-ouest, le mur ouest de l'entrée sud de la cour 2 a perdu ces contreforts, donc, nous recommandons de mettre en place des éaiements temporels, jusqu'à la reconstruction et la consolidation des murs du coin sud-ouest.

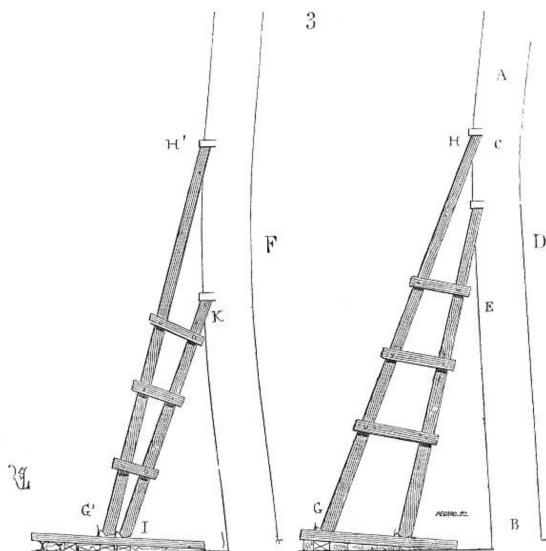


Figure 112: Stabilisation des murs par des éaiements.

Source : João Manuel D'Almeida, 2012.

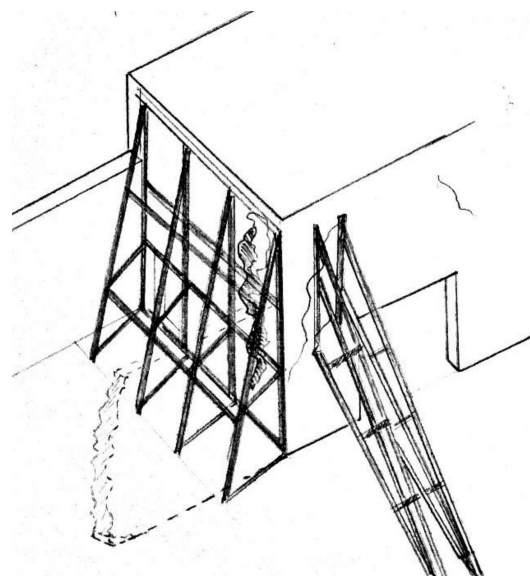


Figure 113: Stabilisation des murs de porche d'entrée de la cour 2.

Source : Auteur.

116 João Manuel De Almeida, *Stabilisation de murs en réhabilitation*, mémoire en vue de l'obtention « Diplôme d'ingénieur CNAM » Spécialité « Construction-Aménagement-Génie civil », Metz.2012. p5.

6.2.2. Murs de renforts pour le porche d'entrée sud :

Pour le mur de face sud du porche d'entrée, nous proposons pour sa consolidation la solution suivante : mettre en place deux contreforts en maçonnerie de pierre de taille ou en béton sur les deux côtés de l'entrée, et relier entre eux par des profilés métalliques pour stabiliser définitivement le mur qui présente une forte inclinaison (voir figure 114).

6.2.3. Le clouage des murs du porche d'entrée sud :

Le clouage est une technique qui consiste à appliquer des tiges d'acier dans des trous préalablement ouverts de petit diamètre, et qui seront ensuite scellés. Le scellement peut être réalisé avec des produits chimiques ou avec un coulis approprié, ce qui permettra un ancrage mécanique, soit à l'extérieur, soit à l'intérieur soit dans les deux cas.¹¹⁷

Le clouage est une solution mécanique conçue pour produire ou renforcer le lien entre deux ou plusieurs parties pour qu'elles commencent à fonctionner comme une seule. Pour notre bâtiment, le clouage a pour objectif de retrouver la continuité entre le mur de face sud de l'entrée de la cour 2, et le mur de refend ouest de la même entrée. Nous recommandons l'utilisation du clouage de couture, qui va améliorer la connexion entre ces murs orthogonaux (voir figure 115).

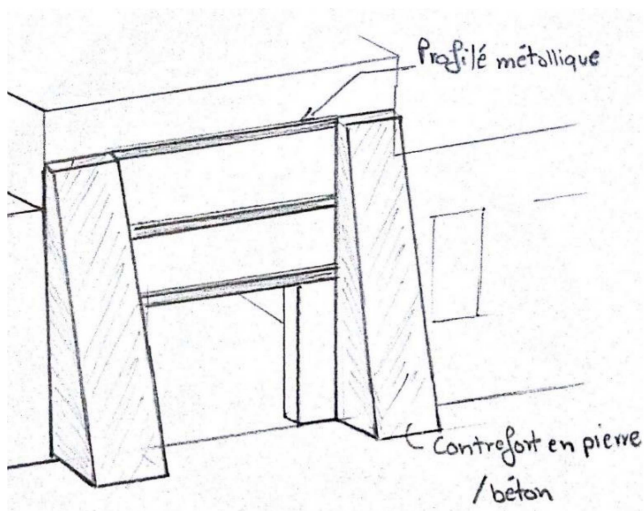


Figure 114: Murs de contreforts, face extérieure, porche d'entrée cour2.

Source : Auteur.

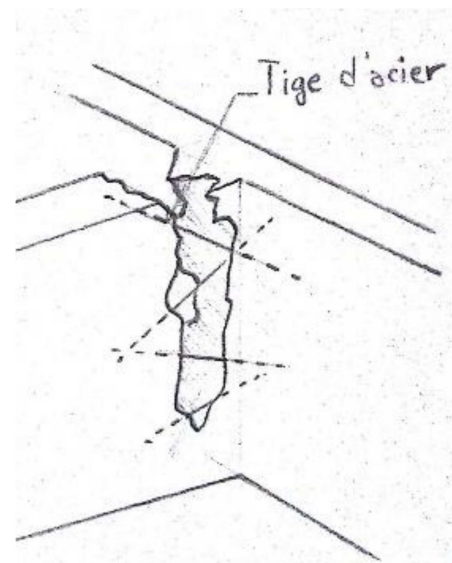


Figure 115 : Consolidation par clouage de couture.

Source : Auteur.

¹¹⁷ Ibid.p11.

6.2.4. Retrouver la continuité des murs de l'angle sud-ouest :

Une reconstruction partielle du mur au-dessus de l'entrée sud de la cour 1, et remise en l'état initiale de la charpente (au-dessus de l'entrée principale est de la cour 1 et le coin nord-est de la même cour, ainsi le coin sud-ouest de la cour 2).

La reconstruction des murs endommagés doit être faite d'une manière distincte de la structure originale, mais le tout doit être soigneusement imité, de la taille des pierres utilisées à la couleur du mortier à base de chaux et même la façon dont les pierres de taille seront posées.

Commençant par la cémentation des murs (voir figure 116) objets de reconstruction, par un mortier à base de chaux, et par couches successives jusqu'à ce que tous les joints soient remplis.

Nb : La reconstruction des murs devrait être faite par l'utilisation d'une maçonnerie de pierres brutes, en continuité des matériaux et des joints existants.



Figure 116: La cimentation par coulée, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.

Source: S. Messikh, 2012.

6.2.5. Consolidation par des tirants métalliques des murs du porche d'entrée sud :

Cette opération concerne les deux murs opposés : ouest et est de l'entrée sud de la cour 2. Le tirant est une tige métallique dont chaque bout est lié à une ancre (voir figure 117).

6.2.3.1. Objectifs :

Dans une construction, un tirant a comme objectif :

- ✓ Reprendre les poussées des couvertures, que ces derniers soient en pierre (voûtes) ou en bois (voûtes lambrissées ou en plâtre, charpentes).
- ✓ Stabiliser les murs qui déversent.
- ✓ Maintenir les parements extérieurs des murs à double parements avec fourrure des tours, car ces parements extérieurs tendent à se séparer de la fourrure (Heymann 1992)¹¹⁸.
- ✓ Reprendre les efforts de vent sur les cheminées, alors les tirants ont une fonction de tirant-bouton, généralement rendue possible par leur faible longueur.

Donc, le tirant sert en maçonnerie à éviter l'éloignement des façades opposées ayant subi des dégradations de ces liaisons, à la suite d'un tassement ou une désolidarisation de ses éléments structuraux, dans notre cas c'est la combinaison de ces deux causes.

Les ancrés (on les appelle aussi : croix, croix de chaînage, ou encore clé de tirant) ont plusieurs formes : de X, de S ou double S, d'Y, de T, de croix de Saint-André ou simplement droite. Ces ferrures ou ancrés sont apparentes sur les murs ou noyées dans la maçonnerie. Ils peuvent jouer un rôle esthétique dans un bâtiment (voir figure 118).



Figure 117: Tirant métallique.

Source : Société ETOILE, disponible sur www.etoile-venteenligne.fr. Consulté le 9 février 2019.



Figure 118: Différentes formes d'ancres.

Source : Société ETOILE, disponible sur www.etoile-venteenligne.fr. Consulté le 9 février 2019.

6.2.3.2. Processus d'exécution :

On perce des trous de passage dans les murs et on met sous tension les tirants par serrage des écrous au niveau des ancrés et des assemblages (voir figure 119). Cette tension doit être

¹¹⁸ J. HEYMAN: *Leaning towers. Meccanica*, 27(3) : 153-159, 1992. Disponible sur : <http://combiencaporte.blogspot.com>. Consulté le 6 février 2019.

mesurée, car, si elle est trop excessive, elle engendre des désordres localisés à cause de contraintes trop fortes.

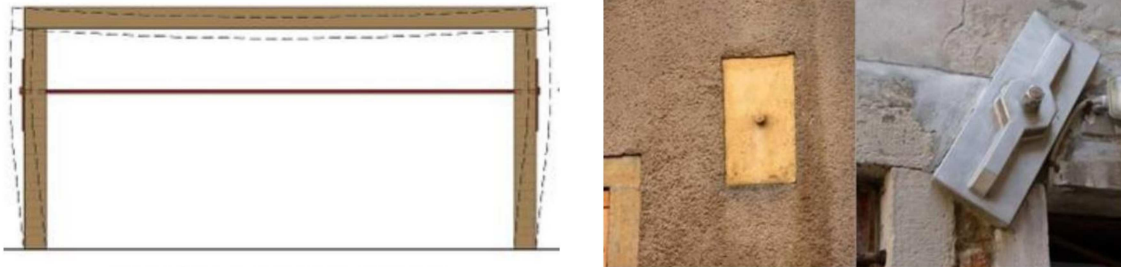


Figure 119: principe de mise en place de tirants de stabilisation au moyen de plaques d'about

Source : Attari N.

Principe de mise en place des tirants au-dessus de l'entrée de sud de la cour 2 :

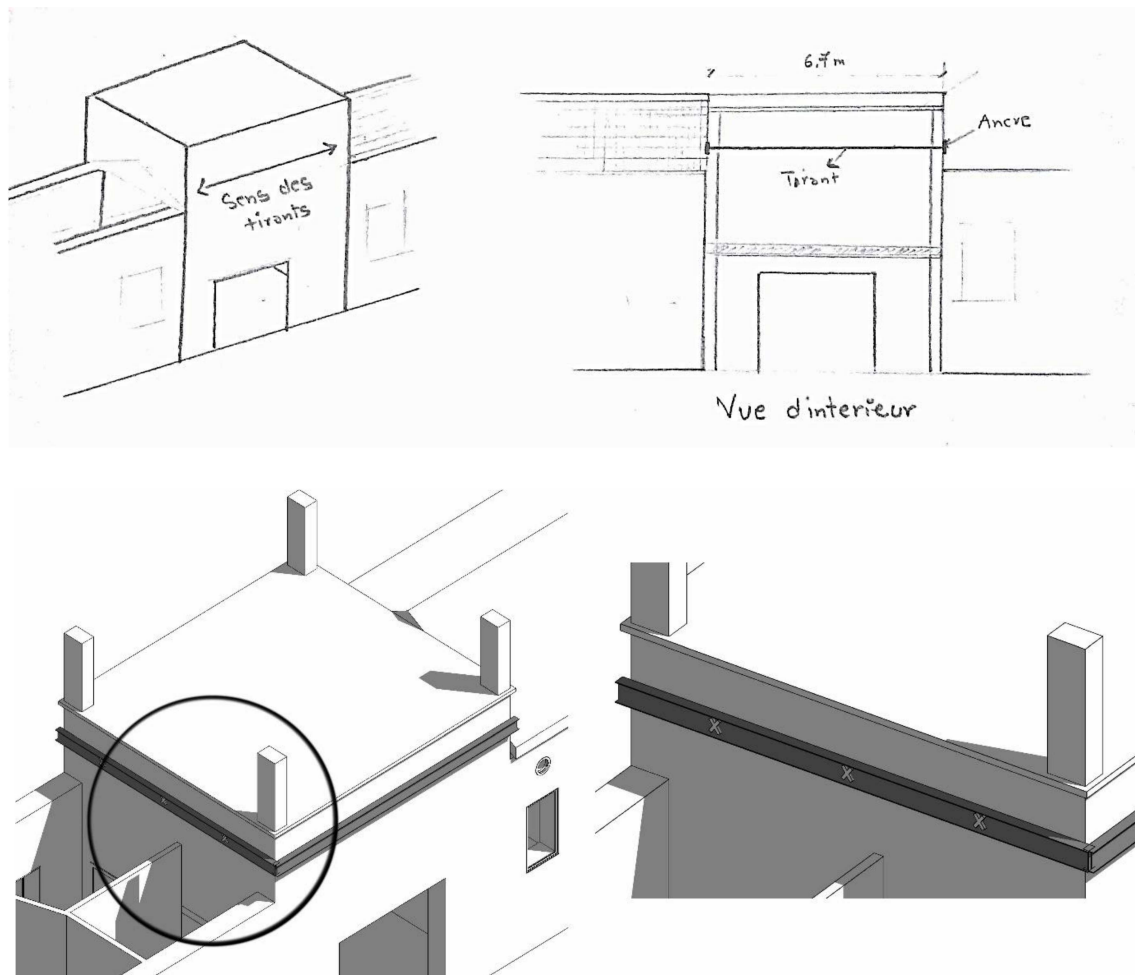


Figure 120: Principe de mise en place des tirants au-dessus de l'entrée sud, cour 2.

Source : Auteur.

La mairie d'El Harrach est un exemple d'un bâtiment qui a subi cette opération de mise en place des tirants de traction (voir figure 121).



Figure 121: Consolidation par des tirants métalliques, la mairie d'El Harrach.

Source : Attari N.

La partie haute de l'entrée sera ceinturée par la fibre de carbone (voir figure 122), elle permet de retrouver la continuité dans cette partie des murs qui présentent un fort désordre statique.



Figure 122: Consolidation par des fibres de carbone

Source : Attari N.

6.2.6. Réparation des fissures lézardes :

Pour la réparation des fissures de type lézarde, nous recommandons la méthode dite « reprise des fissures » (voir figure 123), cette dernière consiste à intercaler les lèvres de la fissure de par des éléments plus résistants et plus rigides, tels que les agrafes métalliques. Il s'agit de retrouver la continuité perdue du mur endommagé de sorte que les tensions puissent être de nouveau transmises et distribuées de manière homogène dans la partie lézardée.

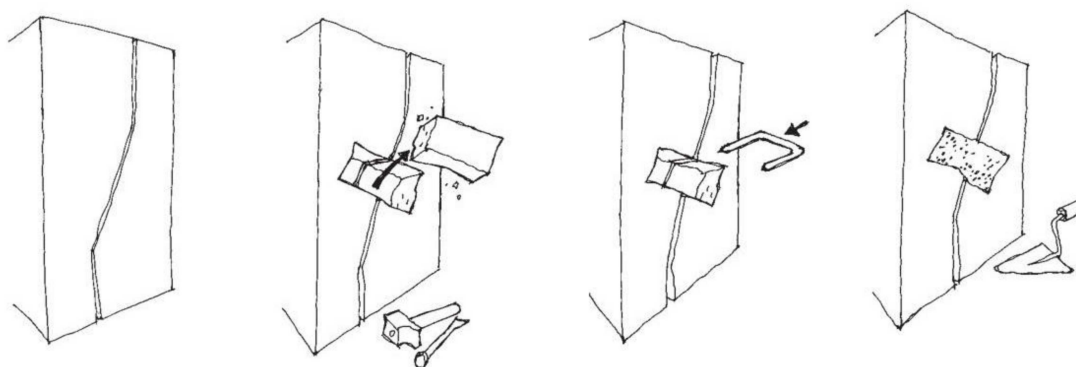


Figure 123: Technique de reprise des fissures.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, *Outil 8, Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures.*

6.2.7 Consolidation du plancher de l'étage du comble :

Pour les éléments porteurs du plancher (les travures) qui ont subi un pourrissement, et qui peuvent être objet de consolidation, nous recommandons d'ajouter des suppléments de résistance (voir figure 124).

Les matériaux de renfort utilisés seront en bois ou en acier sous forme de profilés, leur position sera latérale. La position latérale est plus répandue, car les poutres (travures) en bois à renforcer supportent des pans entiers de planchers.

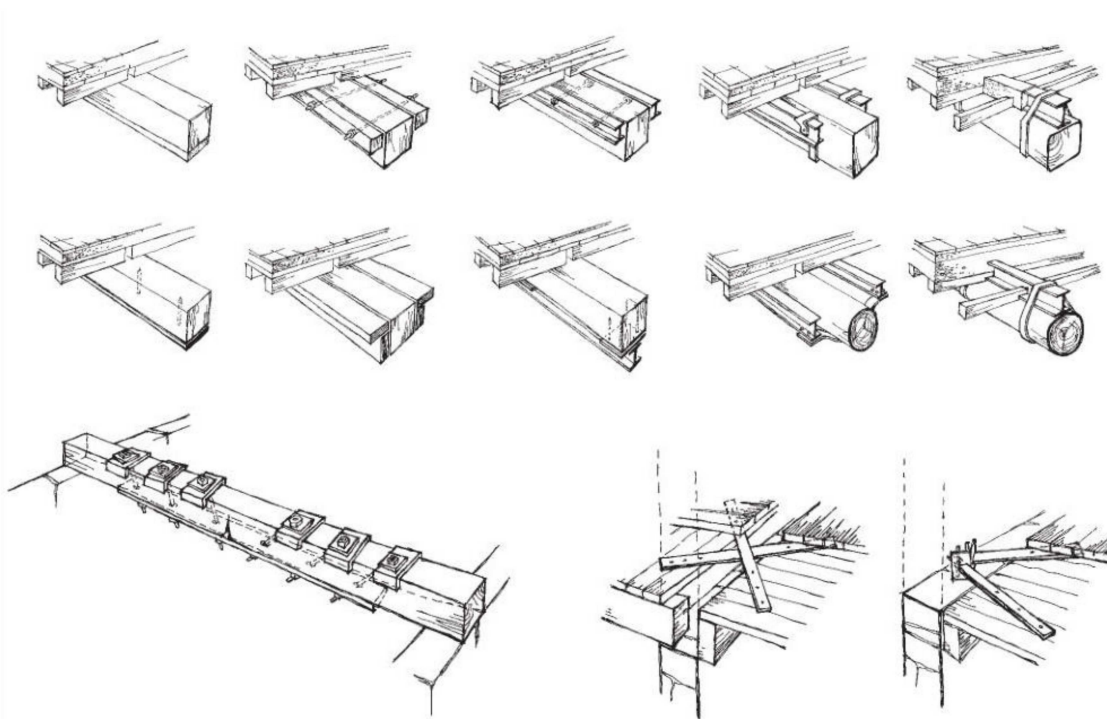


Figure 124: Technique des suppléments de résistance pour les planchers.

Source : César DÍAZ GÓMEZ, *Outil 8, Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures.*

6.2.8. La flèche et l'inclinaison des pièces de charpente :

Pour la consolidation des pièces de la charpente ayant une flèche ou une inclinaison, telles que les entrants des fermes triangulaires (la partie nord, sud et est de la cour 2), nous recommandons une consolidation par des armatures post-contraintes pour compenser les tractions et créer de nouveaux équilibres de forces (voir §4.4.4.3).

6.2.9. Consolidation des baies (façade ouest) :

À travers l'examen visuel et l'analyse théorique (voir figure 125), nous avons constaté l'existence d'une grande concentration de contraintes dans les zones périphériques des fenêtres, ces contraintes ont engendré des fissures de type fracture, donc pour éviter l'apparition de nouvelles fissures et augmenter la rigidité de la façade, on peut utiliser l'un des procédés suivants pour consolider les fenêtres (voir figure 126) :

- Renfort avec des profilés métalliques.
- Bastaings en bois.

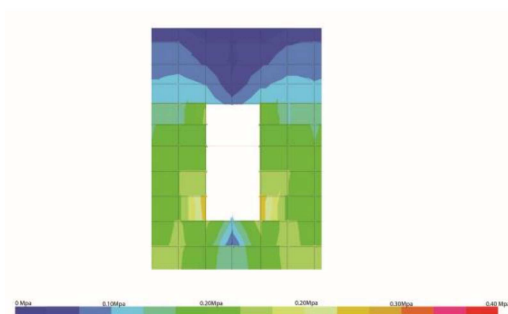


Figure 125: Les Contraintes à ELU, cas d'une fenêtre de la façade extérieur ouest.

Source : Auteur.

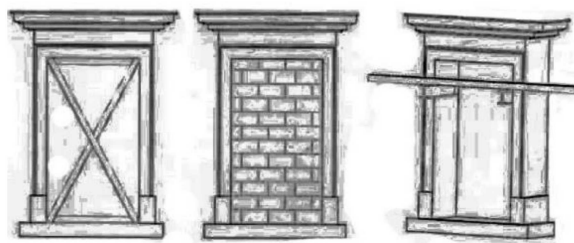


Figure 126 : Différentes méthodes de consolidation des fenêtres.

Source : João Manuel De Almeida, 2012, modifier et compléter par auteur.

6.3. Actions pour la réhabilitation architecturale :

6.3.1. Murs :

6.3.1.1. Enduits :

Décapage de tous les enduits à base du ciment (voir figure 127), ou autre matériau qui ne permettent pas la respiration du mur, en générale, tous les enduits industriels, qui sont fortement hydrofugés.



Figure 127: Utilisation du mortier à base du ciment, façade ouest, cour1

Source : Auteur.

Il est recommandé que la mise en œuvre du nouvel enduit à base de la chaux se fasse selon trois opérations¹¹⁹ :

- ✓ *La couche d'accroche*, ou « gobetis », est un enduit liquide qui a pour objectif de créer une accroche sur la pierre et les joints, donnant une cohésion à l'ensemble du mur en

¹¹⁹ Ooreka.fr, disponible sur « <https://peinture.ooreka.fr/fiche/voir/690347/endoire-un-mur-en-pierre> », consulté le 6/2/2019.

pénétrant dans tous les creux. Elle se compose de 5 volumes de chaux pour 10 volumes de sable, cette opération à trois étapes d'exécution :

- Humidification du mur.
- Le choix entre deux modes d'application possible : par projection où à la main.
- Le séchage de l'enduit : 1 à 2 jours ou plus. Le séchage se vérifie à la teinte de l'enduit qui blanchit.
- ✓ Le corps d'enduit est la couche principale du revêtement. Le sable est grossier de façon à donner une structure solide au revêtement. Le mélange avec l'eau doit amener à une consistance en pâte plutôt épaisse. Elle se compose de 4 volumes de chaux pour 10 volumes de sable.
- Vu que les murs sont en maçonnerie de moellons, les joints doit être remplir pour trouver une surface plane, ce travail est réalisé avec la langue de chat qui permet de déposer l'enduit dans les creux.
- ✓ L'enduit de finition est réalisé avec du sable fin et dans les proportions de 1 volume de chaux pour 3 volumes de sable. Le choix du sable détermine la couleur de l'enduit, cette opération à trois étapes d'exécution :
 - Humidification du mur.
 - Application de l'enduit au plantoir en fine couche.
 - Lissage à la lisseuse sans trop écraser l'enduit pour ne pas empêcher le mur de respirer.

6.3.1.2. Drain périphérique des murs :

Pour les murs qui ont subi une remontée capillaire (voir figure 128), avec une perte des mortiers du joint dans ses parties inférieures, ces joints doivent être frottés à la main sur 3 cm (voir figure 129), puis un mortier à base de chaux doit être étendu le long de l'épaisseur des joints et lissé de manière à éviter la saillie du mortier (voir figure 130).

Ensuite, la pose d'un drain périphérique (voir figure 131), ce dernier a comme fonction de recueillir les eaux souterraines et de les évacuer avant que celles-ci n'atteignent les murs (voir figure 132), dans notre cas, l'installation d'un système de drain périphérique concerne tous les murs de face.



Figure 128: Remontées capillaires, façade extérieur est.

Source : Auteur.



Figure 129: Frottage à la main des joints, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.

Source : S. Messikh, 2012



Figure 130: Application d'un mortier à base de chaux sur un mur en maçonnerie de moellon, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.

Source : S. Messikh, 2012.

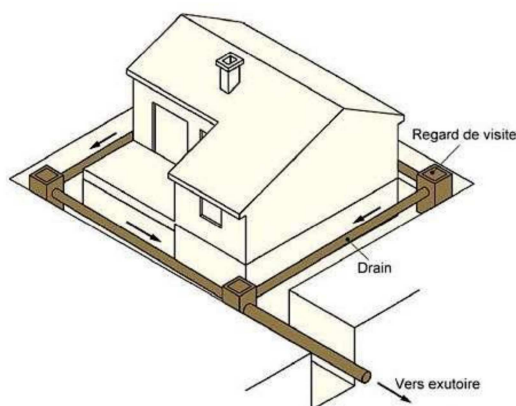


Figure 131: Principe de drain périphérique.

Source : futura-sciences.com. Le 12 février 2019.

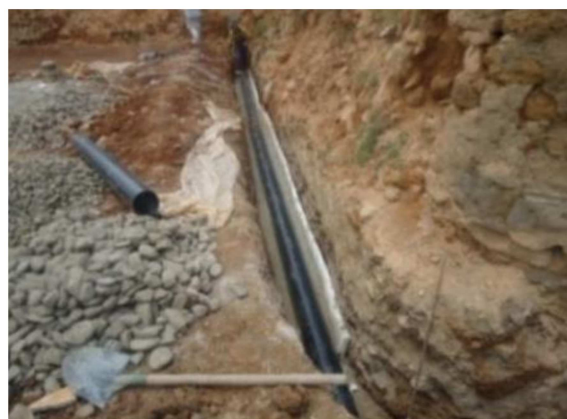


Figure 132: La pose d'un drain périphérique, Bordj Hamza, Bouira, Algérie.

Source : S. Messikh, 2012.

6.3.2. Toiture :

Au niveau du chapitre précédent, nous avons constaté que permet les causes principales de la détérioration des ouvrages du structure, c'est l'infiltration des eaux pluviales vers ces ouvrages, donc il est primordial de fermer toutes sources d'infiltration, on note notamment : le remplacement des tuiles cassées et le repérage des endroits partiellement démolir des toitures « les coins au-dessus de l'entrée principale est de la cour 1 et le coin nord-est de la même cour, ainsi le coin sud-ouest de la cour 2 ».

La mise en place des gouttières, exemple : des gouttières pendantes (voir figure 133).

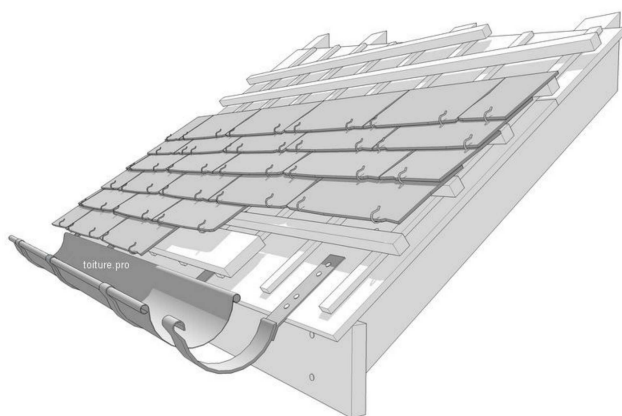


Figure 133: Gouttières pendantes.

Source : toiture.pro

Conclusion générale :

À travers notre travail, nous avons voulu de manière générale amener la réflexion sur la notion du diagnostic structurel des bâtiments construits en maçonnerie, entre la dernière époque de la présence ottomane en l'Algérie, et la période post colonial jusqu'à l'ère préindustrielle, Haouch El Bey à Médéa a été la cause pour laquelle nous avons posé cette problématique de recherche.

Quant à ses objectifs, le travail a visé d'abord dans sa partie théorique : la connaissance des ouvrages de structures des bâtiments construits en maçonnerie avant l'ère préindustrielle, donc avant l'introduction du fer comme matériau de construction pour les ouvrages structuraux, ces ouvrages sont les fondations, qui -selon la nature du sol et la nature des éléments qui les portent- peuvent être sous plusieurs formes, les murs en maçonnerie de différent type, les planchers qui sont principalement en bois, et les charpentes en bois, qui peuvent être avec une ferme ou sans ferme.

Ensuite, c'est la compréhension des désordres et des altérations statiques qui peuvent être présenté au niveau de ces ouvrages de structure, à travers notre recherche bibliographique, nous avons constaté que les causes de désordres au niveau de ces ouvrages sont soit dues aux déformations statiques dues principalement aux mouvements du sol, soit aux mouvements hygrothermiques de matériaux de construction, et soit à l'action de l'eau, surtout pour les ouvrages de structure qui présentent des pièces en bois telles que les charpentes du comble.

Après, pour pouvoir lire le comportement structurel des ouvrages de structure d'un bâtiment, nous devons regroupés les informations concernant les ouvrages de structure et ses désordres selon une certaine logique, c'est la notion de la méthode de diagnostic structurel, qui peut être pour une réhabilitation structurelle non sismique, ou pour une réhabilitation sismique, tel que la méthode proposée par AFPS, et la méthode ATC 40, la finalité d'un diagnostic structurel est ressortir les endroits à renforcer ou à consolider, c'est l'objet de recherche du dernier chapitre de la partie théorique, il vise les techniques de renforcement et de consolidation des ouvrages de structure.

La deuxième partie de la recherche concerne l'objet de la problématique de recherche, Haouch El Bey. L'objectif est la mise à jour de son diagnostic structurel, pour répondre à cet objectif, nous avons opté pour la démarche développée dans la partie théorique.

Premièrement, nous avons présenté le monument dans son aspect architectural, commençant par sa stratification historique, ensuite, son langage architectural de sa partie ottomane et sa partie coloniale, enfin, les techniques de construction de ces deux parties. Après nous avons passé au diagnostic structurel du bâtiment, pour cela, nous avons opté pour une méthode de diagnostic développé par les architectes Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent dans leur livre « guide de diagnostic des structures des bâtiments d'habitation anciens », mais, nous avons personnalisé la méthode : cette méthode est pour une réhabilitation structurelle non sismique, alors nous avons divisé l'étape analyse théorique en deux sous partie ; analyse théorique statique et analyse théorique dynamique.

La première étape de la méthode consiste à ressortir les ouvrages de structure du Haouch El Bey, qui sont : les fondations sur libage à empattement successif, c'est une hypothèse (vu le nombre de niveaux et la nature du sol), les murs en maçonnerie de moellons, les piliers en pierre de taille, un plancher en bois à la française, et trois types de charpentes : charpente en rondin du bois, charpente en bois avec ferme triangulaire, et charpente en bois avec une ferme à entrain retroussée.

Pour la deuxième étape, qui est l'analyse théorique, nous avons fait appel à l'outil informatique, nous avons utilisé le logiciel de modélisation et simulation structurelle ETABS 2016, ce dernier, nous a permis de ressortir le résultat suivant : les ouvrages de structure du Haouch El Bey ne doit pas être un objet de renforcement, pour les charpentes la question reste ouvert, nous n'avons pas pu modéliser sur ETABS vu la complexité de ces derniers.

La dernière étape consiste à faire un examen visuel des ouvrages de structure sur terrain, c'est l'étape où nous avons fait appel au diagnostic structurel de l'an 2000 fait par BET A3D, nous avons constaté qu'il y a de nouveaux désordres et altérations des ouvrages de structure surtout au niveau du coin sud-ouest et le porche d'entrée sud de la cour 2, et donc le diagnostic structurel qui a été fait en 2000 n'est pas valable aujourd'hui.

La finalité de la deuxième partie de recherche est la proposition d'une stratégie et des actions pour la réhabilitation du Haouch El Bey, où nous avons pris l'aspect structurel et architectural du monument, commençant par les ouvrages de structure qui présentent des désordres graves (travaux d'urgence).

Limites et perspectives :

Vu les contraintes qui ont été imposées au travail (temps, moyens, etc.), certains aspects du diagnostic structurel n'ont pas été développés, on note :

- L'analyse théorique dynamique et statique des charpentes, à cause de la complexité de ces modélisations sur ETABS.
- Les sondages dites destructifs, pour vérifier la capacité portante réelle des ouvrages de structurels, surtout pour les charpentes, où nous avons constaté un certain signe tels que la flèche et l'inclinaison des entrails.

Comme perspective de recherche, nous pouvons donner l'orientation suivante :

Etude du comportement structurel des charpentes en bois avec ferme ou sans ferme, construit avant l'ère préindustrielle, cette étude doit être inclura : le diagnostic structurel des éléments du charpente (entrait, poinçon, jambe de force, etc.), une analyse théorique statique et dynamique de ces charpentes, et enfin, des actions pour la réhabilitation de chaque élément de charpente qui présente des désordres et des altérations.

Bibliographié :

Abbé Rozier 1793 : t. VII et p. 659. Disponible sur <<https://journals.openedition.org>>.

Consulté le 12 décembre 2018.

AFPS, (2000), *Vulnérabilité aux séismes du bâti existant*, document de travail non-publié, Association française du génie parasismique, Paris, France.

afps-seisme.org >, consulté le 29 novembre 2018.

AIT HAMOUDA Ibrahim, *LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI EN ALGERIE*, mémoire de magister, Faculté d'Architecture et de Génie-civil, Oran, Algérie, 2013.

Amar KASSOUL, *Cours : Ossatures Bâtiment–MASTER Génie Civil–Option : Structures civiles et industrielles*, année universitaire 2015/2016, UHB Chlef.

Association ouvrière des Compagnons du devoir France : *La charpente et la construction en bois*, vol. 6bis d'Encyclopédie des métiers. Librairie du Compagnonnage, Paris, 1990.

Disponible sur <<http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens>> consulté le 24 décembre 2018.

ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats-Unis, 1996.

BILP. Disponible sur <<https://www.bilp.fr/>> consulté le 24 décembre 2018.

Blondel et Patte. Disponible sur <<http://bestrema.fr/>>. Consulté le 26 décembre 2018.

BSSC, *Handbook for Seismic Evaluation of Buildings*. A Prestandard, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, (FEMA 310), Washington D.C, Etats-Unis, 1998.

Centre National De Recherche Appliqué En Génie-Parasismique, *Règles Parasismiques Algériennes RPA 99*, Version 2003.

César DÍAZ GÓMEZ, *Outil 8 : Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures*, La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne.

charpenteberleau.com>, consulté le 26 décembre 2018.

Charte Internationale Sur La Conservation Et La Restauration Des Monuments Et Des Sites (Charte De VENISE 1964), art 9.

csiamerica.com

Dictionnaire BTP. Disponible dans <<https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=6156>> consulté le 09 octobre 2018.

Diderot et d'Alembert. Disponible sur <http://bestrema.fr>>. Consulté le 26 décembre 2018.

ETOILE, disponible sur www.lettoile-venteenligne.fr, consulté le 9 février 2019.

forumconstruire.com>, consulté le 15 novembre 2018.

Groupe de travail AFPS-CSTB, *Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme*, Guide construction parasismique, Mars 2013.

Hamid AZZOUC, *Dossier : Faire face aux risques majeurs en ville*, Revue Vie de Ville.

icab.fr/guide/ps92/>, consulté le 02 décembre 2018.

Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens*, groupe Moniteur, Paris 2013.

Jean-François GARDÈRE, *Les 8 Conseils d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de Midi-Pyrénées*, CAUE du Gers, juillet 2014.

J. HEYMAN, *Leaning towers. Meccanica*, 27(3): 153-159, 1992. Disponible sur : <http://combienaporte.blogspot.com>. consulté le 6 février 2019.

J.-M. Pérouse de Montclos : *Architecture : méthode et vocabulaire*. Impr. nationale : Ed. Du patrimoine, Paris, 6e éd., 2007. Disponible sur <<http://bestrema.fr>>.

João Manuel De Almeida, *Stabilisation de murs en réhabilitation*, mémoire en vue de l'obtention « Diplôme d'ingénieur CNAM » Spécialité « Construction-Aménagement-Génie civil », Metz.2012.

larousse.fr>, consulté le 15/11/18.

Laurent Busseau, Disponible sur <<http://www.historien-sans-frontiere.com>>. Consulté le 12 décembre 2018.

Maha, Messaouden. «*Cour de méthodologie de recherche.*», Ecole Polytechnique d'Architecture et D'Urbanisme (EPAU), Alger, 2017.

MANUEL D'ENTRETIENDES BÂTIMENTS DU PATRIMOINE, lieux patrimoniaux du Canada, Manitoba, Canada

Mathieu Tanguay, *Conserver ou restaurer ? La dialectique de l'œuvre architecturale*, Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures en vue de l'obtention du grade de PhD en Aménagement option histoire et théories, Faculté de l'Aménagement, Université de Montréal, Avril 2012.

MEGUENNI MUSTAPHA et BEKHALED ABDELOUAHAB, *La réhabilitation d'un ancien bâtiment industriel R+3 « AIN TEMOUCHENT »*, Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de master en génie civil, Juillet 2012.

meubliz.com

Milan Zacek, *Vulnérabilité et renforcement*, cahier 2, collection CONCEPTION PARASISMIQUE, 2004, p14.

Milan Zacek, disponible sur <<http://www.planseisme.fr/Interview-de-Milan-Zacek.html>>, consulté le 29 novembre 2018.

Ooreka.fr, Disponible dans <<https://construction.maison.ooreka.fr/astuce/voir/727323/chainage-horizontal>> consulté le 08 octobre 2018.

Rondelet 1810 [20, p.138] – Pl. LXXXV de l'édition de 1828. Disponible sur <<http://bestrema.fr/planchers-bois-anciens/>> consulté le 24 décembre 2018.

Rouibah Omar, *Plan cadastral du génie militaire français*, 2019

S. Messikh, *Bordj Hamza, description, pathology and restoration*, Department of Architecture, University Saad Dahleb Blida, Algeria, 2012.

striкто.fr>, consulté le 26 décembre 2018.

The Seven Lamps of Architecture, 1849, Ch. VI.

Turath Gharib, *Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : application aux murs en pierres calcaires*, Université Claude Bernard - Lyon I, 2015.

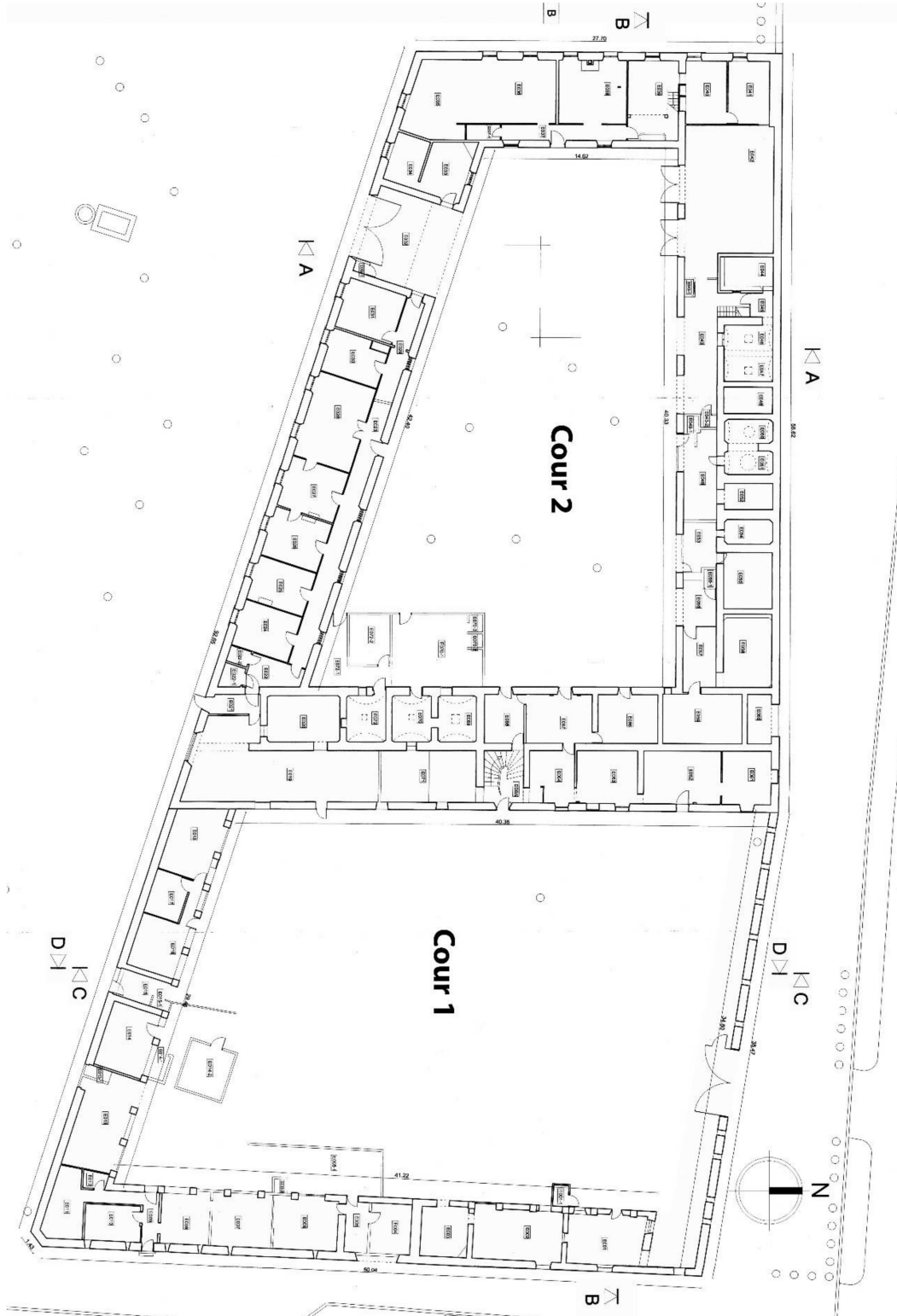
Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11^{ème} au 16^{ème} siècle*, 8^{ème} tome, A. Morel, Paris

Yoann GLASSON, *Fissures : mieux comprendre les fissures*, LAMY SA Expertise, France.

دراسة ترميم وتهيئة حوش، مكتب الدراسات ورشة الأبعاد الثلاثة. 2000

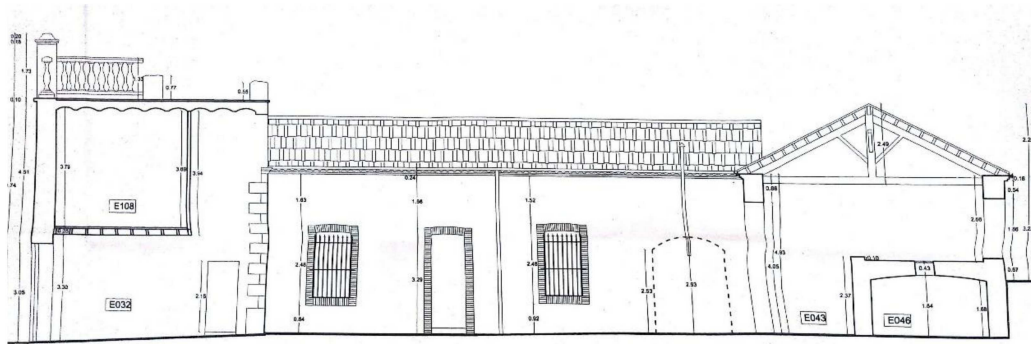
Annexes :

Dossier graphique :

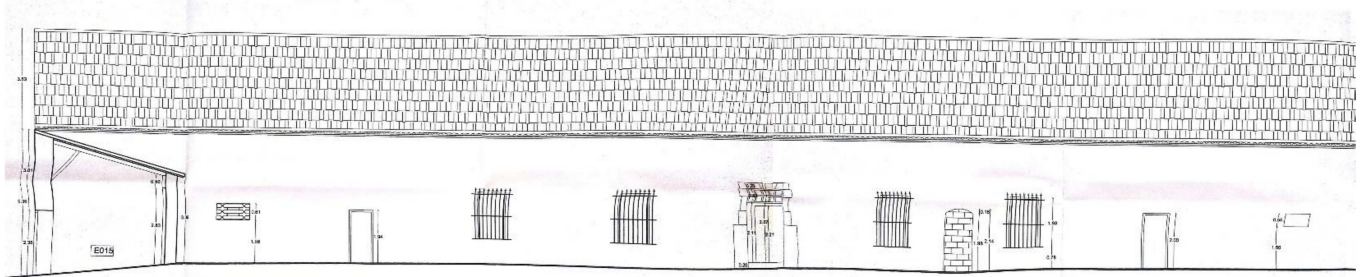


Plan de rez-de-chaussée :

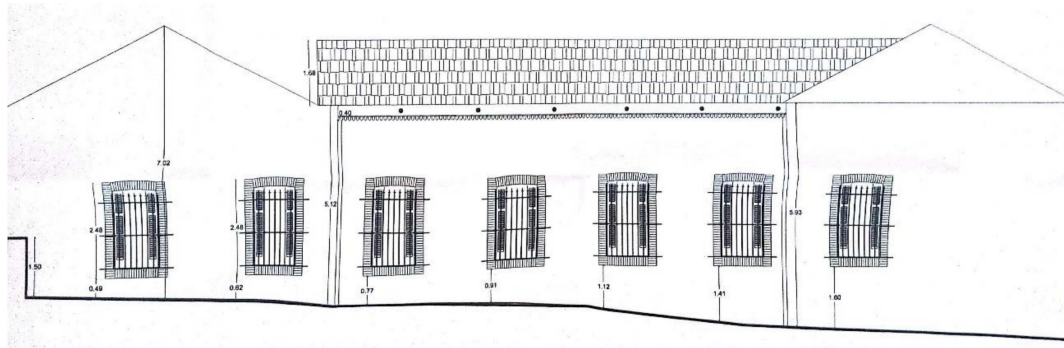
Coupe AA :



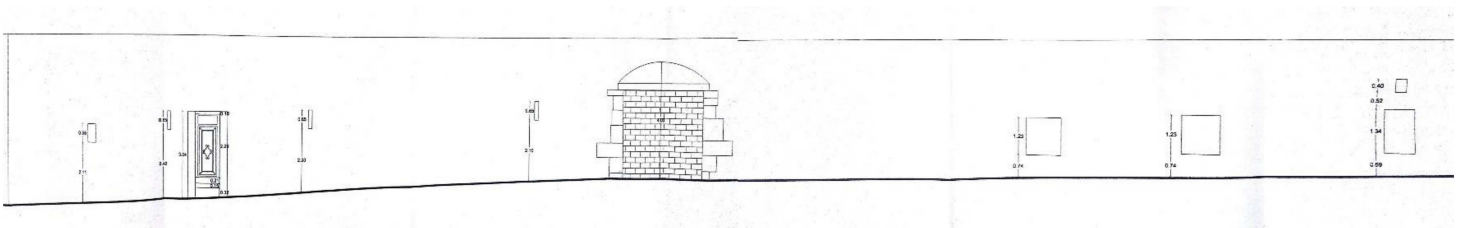
Coupe CC :



Façade ouest :



Façade est :



Note de calcul pour la descente des charges :

La Ferme à entrain retroussée :

Volume des pièces de charpente :

Arbalétrier : $4.25\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.1275\text{m}^3$.

Poinçon : $1.25\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.03750\text{m}^3$.

Entrain retroussé : $2.25\text{m} \times 0.25\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0843\text{m}^3$.

Jambe de force : $2.25\text{m} \times 0.35\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.1012\text{m}^3$.

Blochets : $1.25\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0375\text{m}^3$.

Chevrans et liteaux (surface de $2\text{m} \times 2\text{m}$) : $0.2 \times 0.10 \times 2 + 0.05 \times 2 \times 2 = 0.24\text{m}^3$.

La masse des pièces de charpente :

La masse volumique du chêne est entre 600 à 800 kg/m^3 à 12% d'humidité.

Arbalétrier : 102kg .

Poinçon : 30kg .

Entrain retroussé : 67.5kg .

Jambe de force : 81kg .

Blochets : 30kg .

La masse des pièces de charpente en 1m^2 égale à : $((102+30+67.5+81+30) \times 2 \times 20) / 384.45\text{m}^2 = 32.30\text{kg/m}^2$.

Chevrans et liteaux : 48kg/m^2 .

Tuile plat en terre cuite : 55kg/m^2 .

La masse de 1m^2 de la charpente est de : 135kg/m^2 .

La ferme triangulaire :

Volume des pièces de charpente :

Entrait : $6.35\text{m} \times 0.22\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.2095\text{m}^3$

Arbalétrée : $4.00\text{m} \times 0.22\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.1320\text{m}^3$

Poinçon : $2.20\text{m} \times 0.22\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0726\text{m}^3$

Contre fiche : $1.20\text{m} \times 0.10\text{m} \times 0.07\text{m} = 0.0084\text{m}^3$

Chevrans et liteaux (surface de $1\text{m} \times 1\text{m}$) : $3 \times 0.2\text{m} \times 0.1\text{m} \times 1\text{m} + 0.05\text{m}^3 = 0.11\text{m}^3$

La masse des pièces de charpente :

Entrait : 167.64 Kg

Arbalétrée : 2(105.6 kg)

Poinçon : 58.08 Kg

Contre fiche : 2(6.72kg)

La masse des pièces de charpente en 1m^2 égale à : $32.16\text{kg}/\text{m}^2$.

Chevrans et liteaux : $88\text{kg}/\text{m}^2$

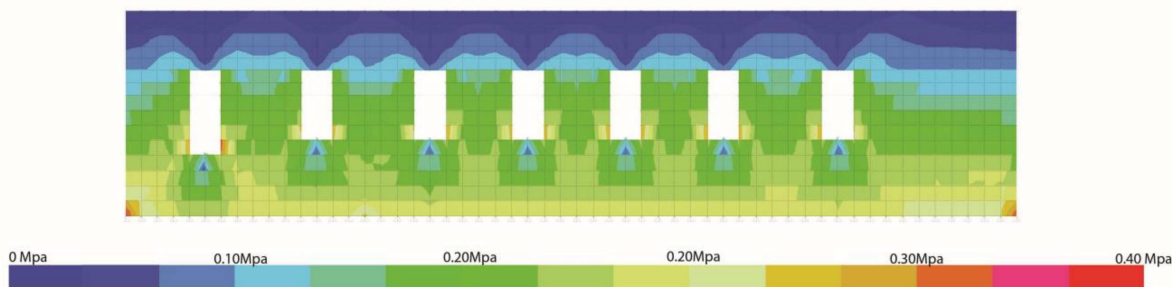
Tuile plate en terre cuite : $55\text{kg}/\text{m}^2$

La masse de 1m^2 de la charpente est de : $175\text{kg}/\text{m}^2$.

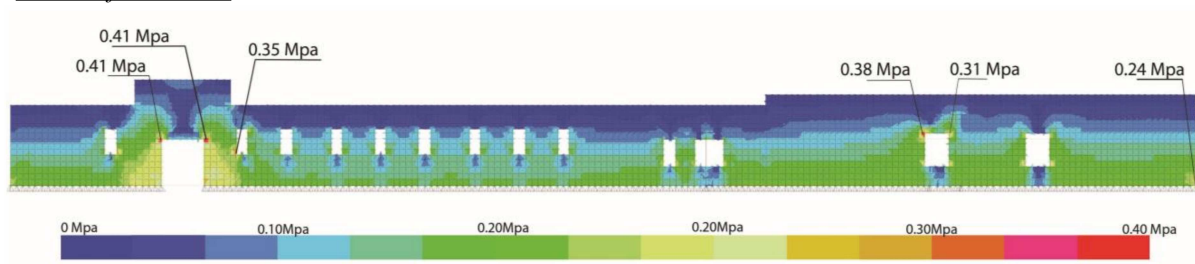
Résultat de l'analyse théorique à l'état statique sous ELU :

Murs de face extérieur :

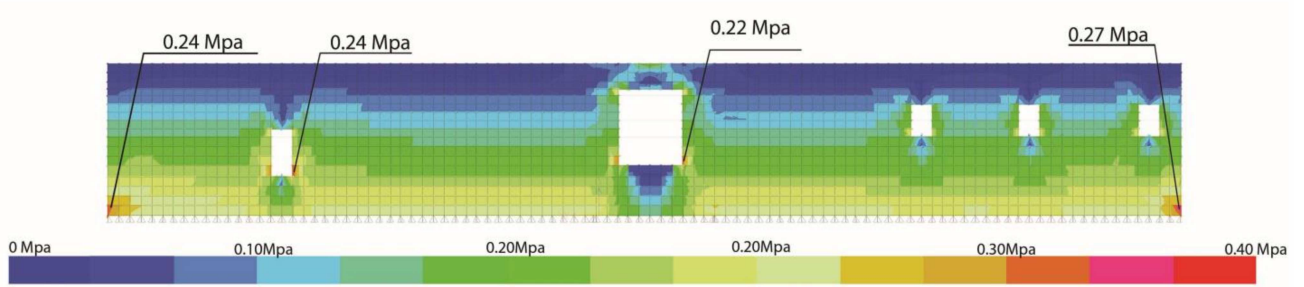
Mur de face ouest :



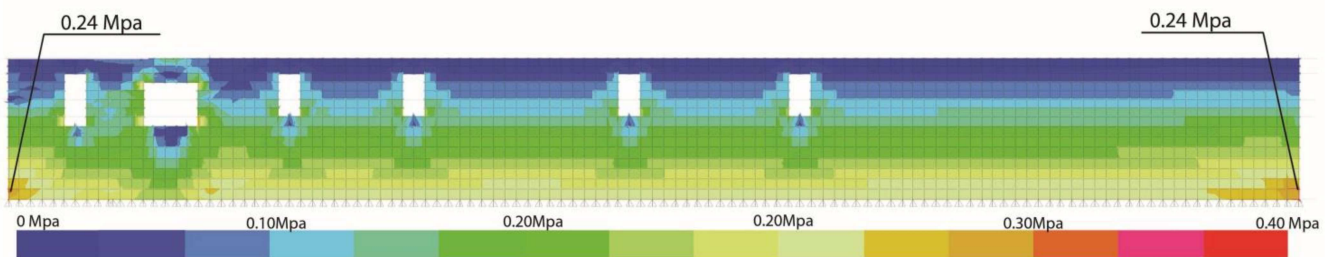
Mur de face Sud :



Mur de face est :



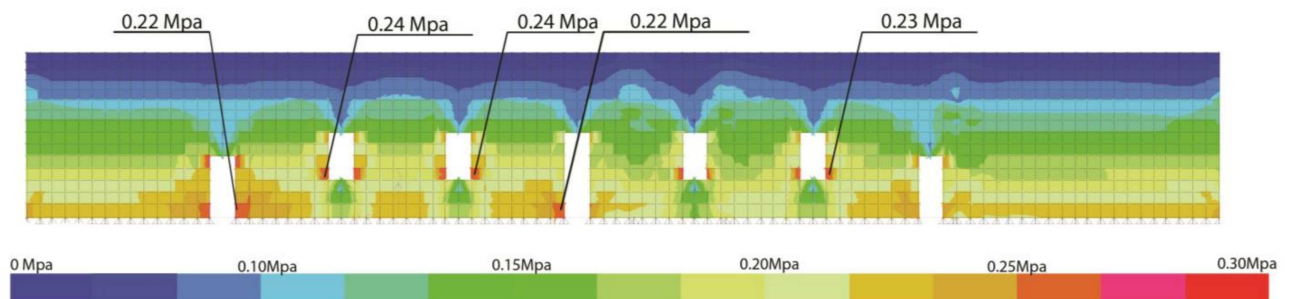
Mur de face nord :



Murs de face intérieur :

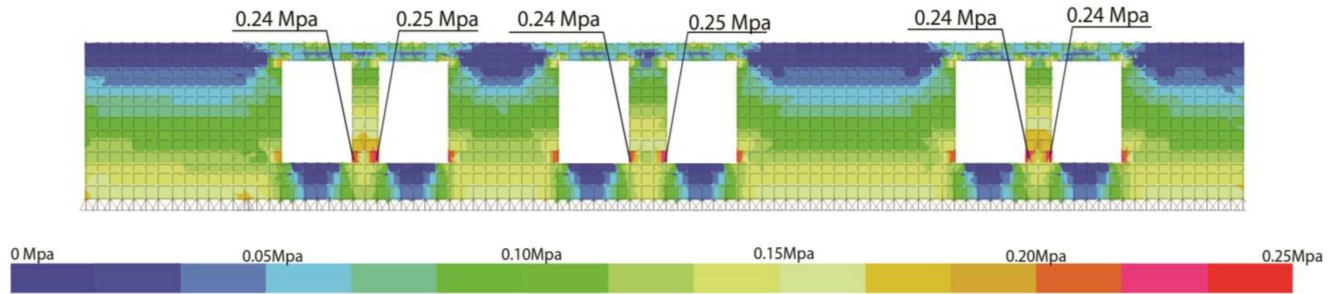
Cour 1 :

Mur de face ouest :

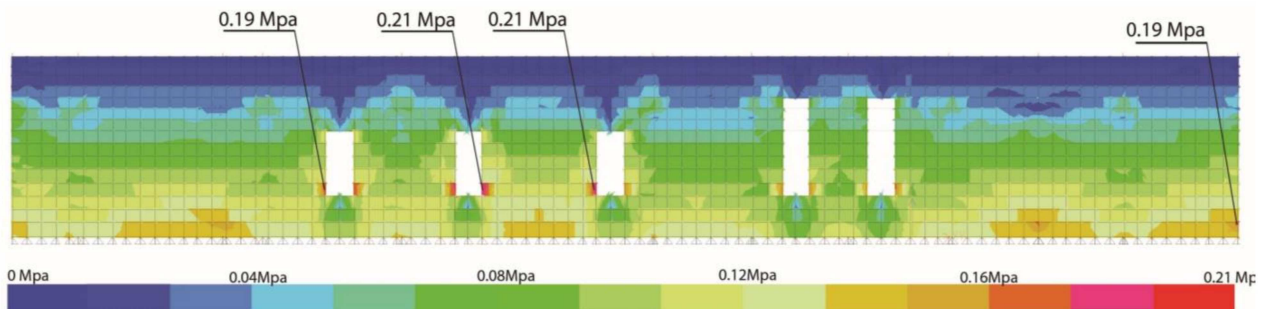


Cour 2 :

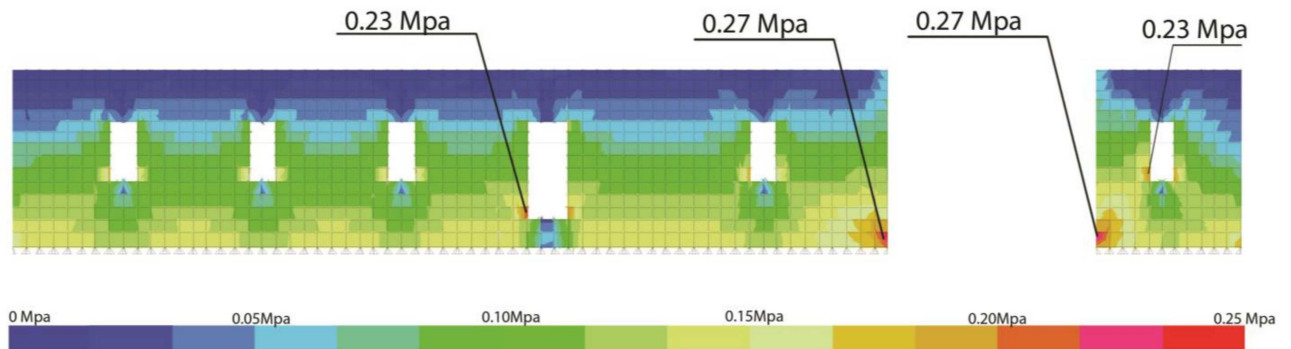
Mur de face nord :



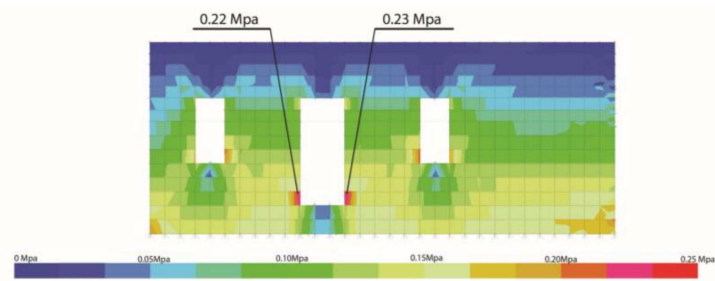
Mur de face est :



Mur de face sud :



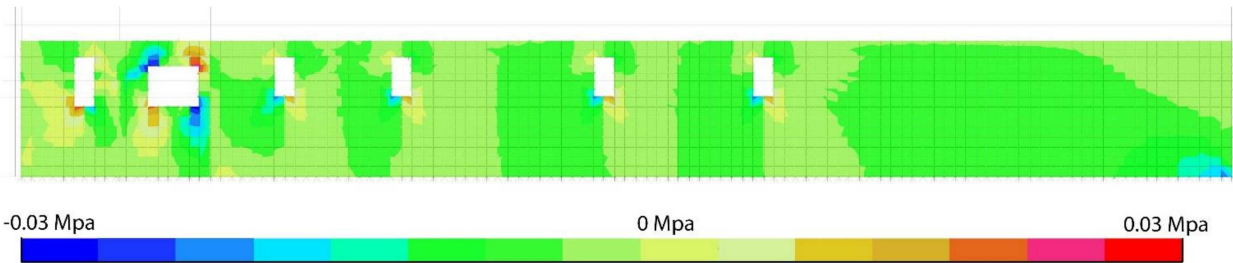
Mur de face ouest :



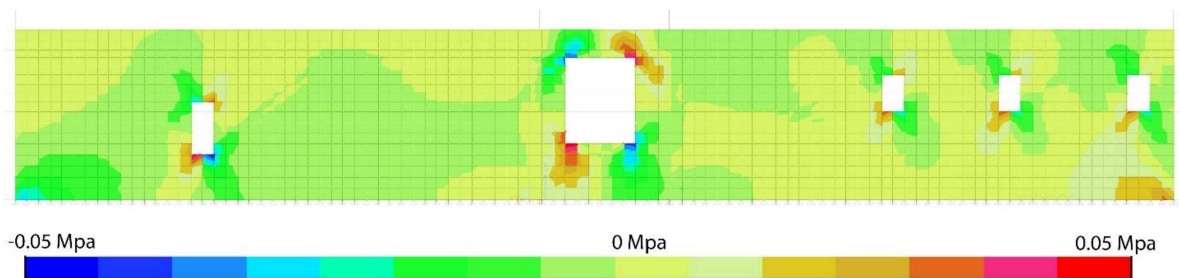
Résultat de l'analyse théorique à l'état dynamique sous GQEx :

Murs de face extérieur :

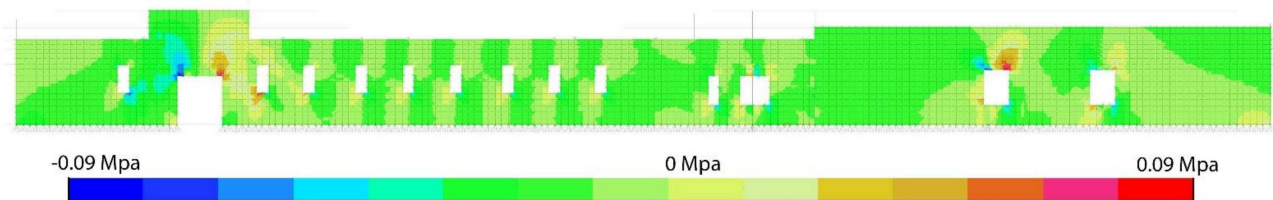
Mur de face Nord :



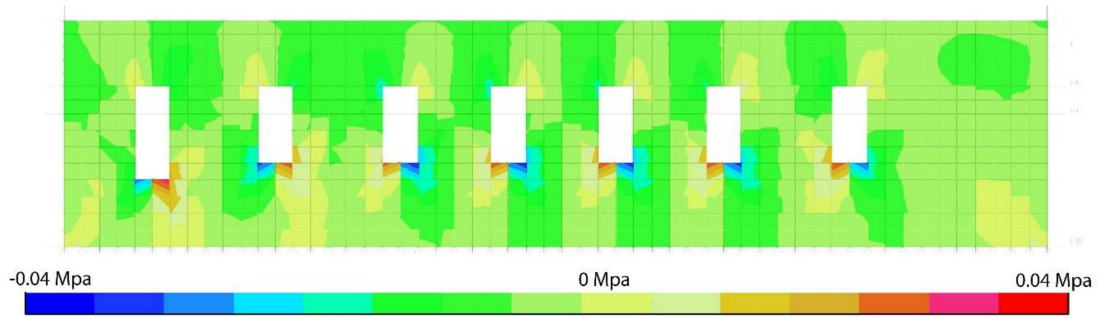
Mur de face est :



Mur de face sud :



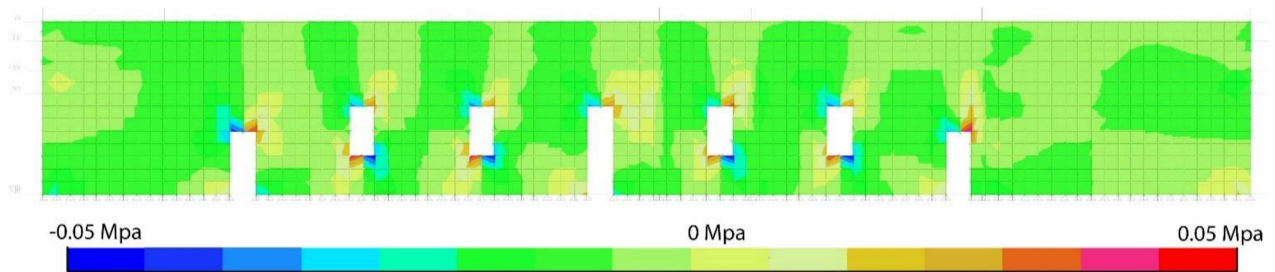
Mur de face ouest :



Murs de face intérieur

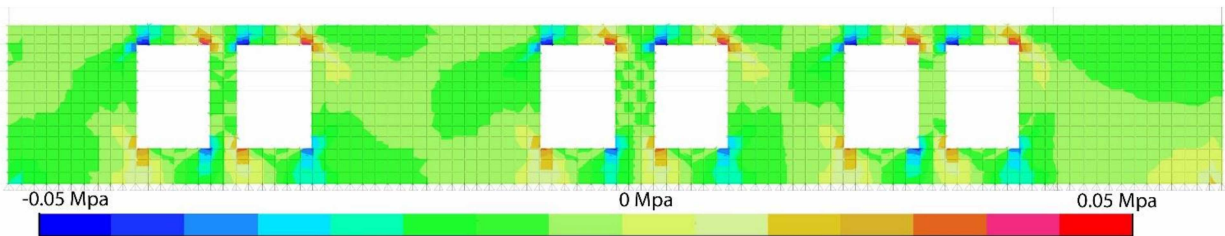
Cour 1 :

Mur de face ouest :

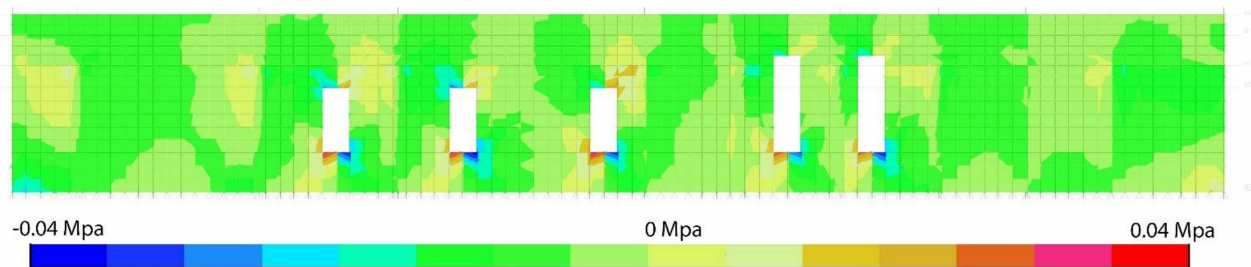


Cour2 :

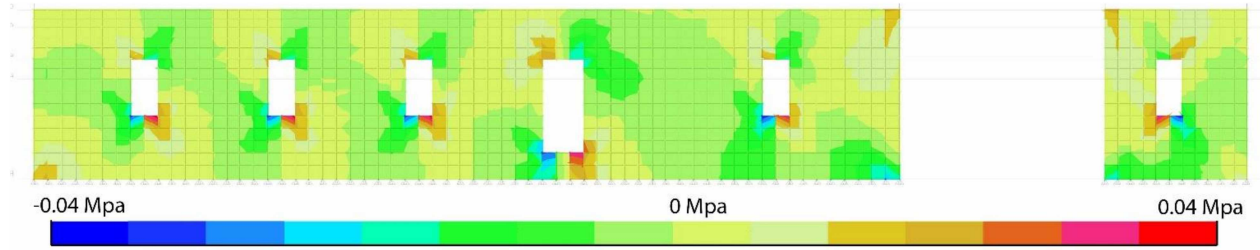
Mur de face nord :



Mur de face est :



Mur de face sud :



Mur de face ouest :

