

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur Et de la recherche scientifique

Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme

**epau**



**MEMOIRE**

**En vue de l'obtention de Master en architecture**

**Le thème :**

**L'évaluation numérique de la résilience d'un vieux bâti  
face aux sollicitations sismiques**

« Cas d'étude : la mosquée aux cent colonnes à Cherchell »

Réalisée par :

Ladjri Ihcene

Dirigé et encadré par :

Dr. Youcef Si Youcef

Devant un jury composé de :

Président de jury : M. BENOUNICHE.N

Examinatrice : Mme MANOUER.A

Examineur : M. BOUZID.F

Janvier, 2020

## Remerciements

Louanges à Dieu le tout puissant notre créateur et notre juge.

Comme guise de reconnaissance, j'adresse mes sincères remerciements, mon grand respect et ma noble gratitude à mon encadreur Dr.SI YOUCEF pour son aide, ses encouragements et à l'aide précieuse qu'il m'a apporté en me faisant profiter largement de ses connaissances

Ma sincère reconnaissance va au Monsieur BANOUNICHE, pour m'avoir fait l'honneur d'être le président de mon jury de soutenance

J'adresse mes remerciements à messieurs les membres du jury :

Madame MANOUER et monsieur BOUZID Pour l'intérêt bienveillant qu'ils ont accordé à ce travail. Je voudrais encore une fois leur exprimer ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont également à monsieur ATTARI, madame HADJILA

Enfin je voudrais remercier mes parents, mon frère et mes sœurs, pour leur soutien constant qu'ils m'ont apporté ainsi que tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à la réalisation de ce travail

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

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	II
<b>Table des matières</b> .....	III
<b>I. Chapitre introductif</b> .....	1
I.1 Introduction .....	1
I.2 Problématique .....	2
I.3 Hypothèses .....	3
I.4 Objectif de la recherche .....	3
I.5 La méthodologie .....	3
I.6 La structure générale du mémoire .....	4
<b>II. Les risques majeurs</b> .....	6
II.1 Introduction .....	6
II.2 Définition .....	6
II.3 Diagramme de Farmer .....	7
II.4 Types de risques majeurs .....	8
II.4.1 Risque d'inondation .....	9
II.4.2 Risque d'incendie .....	9
II.4.3 Risque du séisme .....	10
II.5 Conclusion .....	10
<b>III. Biographie sur le séisme</b> .....	11
III.1 Introduction .....	11
III.2 Définition du séisme .....	11
III.3 L'origine du séisme .....	12
III.3.1 Séisme tectonique .....	13
III.3.2 Séisme d'origine volcanique .....	13
III.3.3 Séisme d'origine polaire .....	13
III.3.4 Séisme d'origine artificiel .....	13
III.4 Mécanisme sismique et propagation des ondes .....	14
III.4.1 Failles sismique .....	14
III.4.2 Ondes sismique .....	14
III.4.2.1 Les ondes de volume .....	14
III.4.2.2 Les ondes de surface .....	16
III.5 Caractérisation des séismes .....	16

III.5.1	Echelle de Mercalli.....	16
III.5.2	Echelle MSK .....	17
III.5.3	Echelle Richter .....	17
III.6	Effets des séismes sur les constructions .....	18
III.7	Les phénomènes d'instabilité d'une construction .....	20
III.7.1	Le flambement.....	20
III.7.2	Phénomène des poteaux courtes.....	20
III.8	Pathologie d'une mosquée.....	20
III.8.1	Fissures.....	20
III.8.2	Les microfissures.....	21
III.8.3	Les fissures fines .....	21
III.8.4	Les fissures larges et les lézardes .....	21
III.9	Les mosquées et le séisme (dégâts) .....	21
III.10	Les mosquées qui ont résistés au séisme .....	22
III.11	Le séisme à Tipaza et à Cherchell .....	23
III.12	La réglementation Algérienne Parasismique .....	25
III.12.1	RPA99/2003 – Principales modifications .....	26
III.12.3	Les principes de conception .....	26
III.13	Le patrimoine à travers le cadre réglementaire .....	28
III.13.1	Loi n° 90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune.....	28
III.13.2	Loi n°90-09 du 7avril 1990relative à la wilaya :.....	28
III.13.3	Loi 90-29 du 01 décembre 1990relative à l'aménagement et à l'urbanisme : ...	28
III.13.4	Loi n°98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du cadre patrimoine culturel :.....	29
III.14	Les méthodes de Réhabilitation.....	29
III.15	Conclusion .....	34
<b>IV.</b>	<b>La résilience : un concept pour la gestion des risques .....</b>	<b>35</b>
IV.1	Introduction .....	35
IV.2	Définition de la Résilience .....	35
IV.3	« La conception résiliente » implique quand il s'agit de construire ?.....	36
IV.3.1	Résilience d'urgence et préparation aux catastrophes.....	36
IV.3.2	Considération sismique .....	36
IV.3.3	Résilience au quotidien et usure normale.....	38
IV.4	La grande mosquée d'Alger : « mosquée conçue résiliente » .....	39
IV.4.1	Système parasismique.....	39

IV.4.2	La salle de prière.....	39
IV.4.3	Le Minaret .....	40
IV.5	Conclusion.....	40
<b>V.</b>	<b>Les outils de simulation numérique .....</b>	<b>41</b>
V.1	Introduction .....	41
V.2	Quelques logiciels de Modélisation.....	41
V.3	Robot structural Analysis .....	42
V.4	Relevés tridimensionnels par scanner laser 3D .....	42
V.4.1	Objectifs .....	43
V.4.2	Application .....	43
V.4.3	Offre maquette 3D.....	44
V.5	Les fonctions du logiciel SCENE.....	45
V.6	Quelques résultats de cette technique .....	45
V.7	Objectifs d'une étude HDS.....	47
V.8	Les HDS pour des simulations numériques.....	49
V.9	Le « Scan-to-BIM ».....	50
V.10	Intégration Revit – Robot .....	50
V.11	Conclusion .....	51
<b>VI.</b>	<b>Technique de renforcement structurel .....</b>	<b>52</b>
VI.1	Introduction .....	52
VI.2	La maçonnerie .....	52
VI.2.1	Définition.....	52
VI.3	Type de maçonnerie.....	52
VI.3.1	La maçonnerie en pisé.....	52
VI.3.2	La maçonnerie de pierre de taille .....	53
VI.3.3	La maçonnerie de libage .....	53
VI.3.4	La maçonnerie en moellon .....	53
VI.3.5	La maçonnerie mixte.....	54
VI.4	Mode d'intervention sur le patrimoine bâti .....	54
VI.4.1	La restauration .....	54
VI.4.2	La conservation.....	54
VI.4.3	L'entretien .....	54
VI.4.3.1	L'entretien correctif.....	55
VI.4.3.2	L'entretien d'urgence .....	55
VI.4.3.3	L'entretien planifié .....	55

VI.4.4 La réhabilitation.....	55
VI.4.5 La rénovation.....	55
VI.5 Technique de renforcement structurel.....	56
VI.5.1 Définition.....	56
VI.5.2 Renforcement des murs en maçonnerie.....	56
VI.5.3 Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé.....	57
VI.5.4 Le chaînage.....	57
VI.5.5 Taxidermies avec des barres d'acier.....	57
VI.5.6 Les contreforts.....	58
VI.5.7 Augmentation de la résistance pour les poutres et les poutrelles.....	58
VI.5.8 Montant intermédiaires.....	58
VI.5.10 Interventions spécifiques sur les arcs, les voûtes et les coupes.....	59
VI.6 Exemples de solution de renforcement.....	59
VI.7 Conclusion.....	61
<b>VII. Choix du cas d'étude : mosquée aux cent colonnes Cherchell.....</b>	<b>62</b>
VII.1 Introduction.....	62
VII.2 Présentation de La ville de Cherchell « Caesarea ».....	63
VII.3 Présentation de la mosquée.....	64
VII.3.1 Aperçue historique.....	64
VII.3.2 Situation de la mosquée.....	64
VII.3.3 Description sur la mosquée des 100 colonnes.....	65
VII.3.4 L'appellation de la mosquée.....	66
VII.4 Investigation In-Situ.....	66
VII.5 Lecture architecturale sommaire de la mosquée aux cents colonnes.....	68
VII.5.1 Environnement.....	68
VII.5.2 Lecture architecturale.....	68
VII.5.3 Le Minaret.....	71
VII.5.4 Mihrab.....	71
VII.5.5 Matériaux de construction.....	71
VII.6 Les valeurs de la mosquée des cents colonnes.....	72
VII.6.1 Valeur archéologique.....	72
VII.6.2 Valeur architecturale.....	72
VII.6.3 Le style de la mosquée.....	72
VII.7 Etude structurelle de la mosquée des cents colonnes.....	73
VII.7.1 Mur porteur.....	73

VII.7.2	Colonnes.....	73
VII.7.3	L'origine des colonnes de la mosquée .....	74
VII.7.4	Toiture .....	75
VII.7.5	Composition globale .....	76
VII.8	De la mosquée vers l'hôpital .....	77
VII.9	Les projets de restaurations de la mosquée des cents colonnes.....	78
VII.10	Etat de conservation de la mosquée aux cents colonnes .....	79
VII.11	Conclusion .....	79
<b>VIII.</b>	<b>Etude numérique à l'aide de logiciel robot structurale Analysis 2018 et scene .....</b>	<b>80</b>
VIII.1	Introduction .....	80
VIII.2	Modélisation sur Revit.....	81
VIII.3	Envoi du modèle Revit vers Robot.....	84
VIII.4	Création du maillage.....	85
VIII.6	Conclusion .....	90
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>91</b>
	<b>Limite et perspective .....</b>	<b>92</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>93</b>
	<b>ملخص.....</b>	<b>94</b>
	<b>Abstract .....</b>	<b>95</b>
	<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>96</b>
	<b>Liste des Figures .....</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>100</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>102</b>

### I. Chapitre introductif

#### I.1 Introduction

Le risque sismique est classé parmi les risques les plus dévastateurs

L'effondrement des constructions pendant un séisme est la cause principale des pertes en vies humaines et des dommages matériels. En moyen 10,000 personnes perdent leurs vies chaque année à cause des tremblements de terre dans le monde, ajoutons à cela les pertes économiques qui se chiffrent annuellement en milliards de dollars.

Les données de l'histoire montrent que la partie nord de notre pays est une zone de forte sismicité, cette menace sismique s'est traduit en plusieurs tremblement de terre, le plus récent est celui de Boumerdess le 23mai 2003, de magnitude 6,8 a l'échelle de Richter selon USGS, qui a été particulièrement violent ; il a causé des pertes considérables en vies humaines et a touché considérablement l'économie du pays. Il est venu confirmer une autre fois après le fameux séisme de chlef de 1980 que le nord algérien est une zone de forte sismicité dont il faut absolument tenir compte.

Et malgré la présence d'un règlement R.P.A pour les constructions en zone sismique, construire parasismique en Algérie reste toujours un défi pour les citoyens mais aussi pour les architectes.

Dans la construction parasismique, il faut plutôt comprendre construire avec tolérance à un niveau de dommages réparable, sans effondrement total ou même partiel, plutôt qu'une construction fortement ou absolument résistante. Néanmoins toute anomalie de conception ou de réalisation et toute insuffisante dans la qualité de matériaux utilisés contribuent fortement à la vulnérabilité de la structure finale vis-à-vis d'un séisme de telle ampleur. La difficulté majeure dans la construction parasismique réside dans le fait que les défauts qui compromettent

sérieusement la sécurité et le bon comportement sismique n'apparaissait qu'après un tremblement de terre

Il apparaît ainsi impératif d'être très prudent avec les systèmes constructifs utilisés dans la majorité des constructions en Algérie, il faudrait améliorer sa mise en œuvre et prendre en compte dans les notes de calculs tout phénomène et toute disposition constructive pouvant le rendre vulnérable

Et pour faire face aux risques majeurs comme le séisme on a proposé d'aller vers une stratégie d'une ville résiliente et la notion de la résilience est défini comme : le mot résilience vient de resiliere, qui signifie sauter en arrière/rebondir, rejaillir. En physique des matériaux, elle renvoie effectivement à la notion de retour à l'état initial puisqu'elle s'apparente à la capacité du matériau à résister à des chocs ou à des pressions, et comme la résilience a plusieurs échelles, on va aller à l'échelle architecturale du bâtiment

### **I.2 Problématique**

Comment rendre un bâtiment résilient aux risques sismique ?

#### **Questions**

- Peut-on éviter l'effondrement des constructions ?
- Quel comportement pour un bâtiment résistant aux secousses d'un séisme futur ?
- Est-ce qu'on peut avoir l'état initiale du bâtiment après un séisme ?

### **I.3 Hypothèses**

Il est préférable

- D'avoir une structure homogène et hyperstatique
- D'avoir un système résilient et pas des dispositions constructives toute seule

### **I.4 Objectif de la recherche**

Dans cette recherche notre objectif c'est de pas trouver des solutions à respecter pour la construction parasismique mais plutôt développer une stratégie pour que le bâtiment va être résistant aux chocs et aux perturbation et plus précisément aux séisme.

### **I.5 La méthodologie**

Pour aborder notre recherche, nous proposons une démarche qui reprend sur les questions de notre problématique

Le premier chapitre on a abordé un état de fait sur les risques majeurs et la stratégie de rendre un bâtiment résilient face aux risques sismique, suivi du deuxième chapitre on a donné une biographie sur le séisme, le troisième chapitre on a cité notre cas d'étude puis pour le dernier chapitre on a fait l'étude numérique du cas d'étude et contient l'analyse des résultats obtenu.

### **Les moyens méthodologiques**

D'après les cours de sensibilisation au master dans cette axe choisi on peut utiliser des logiciels pour l'évaluation du comportement de la structure aux risque sismique comme Robot et, scène pour un relevé tridimensionnel

## I.6 La structure générale du mémoire

### Introduction Générale

Problématique, Hypothèse

Objectifs

#### Partie théorique

**Chapitre I** : les risques majeurs

**Chapitre II** : la résilience : un

Concept pour la gestion

Des risques

**Chapitre III** : Biographie Sur

le séisme

**Chapitre IV** : les outils de

Simulation numérique

**Chapitre V** : technique de

renforcement structurel

#### Partie pratique

**Chapitre VI** : choix du cas

d'étude (Mosquée des 100  
colonnes)

**Chapitre VII** : Etude

Numérique à l'aide du

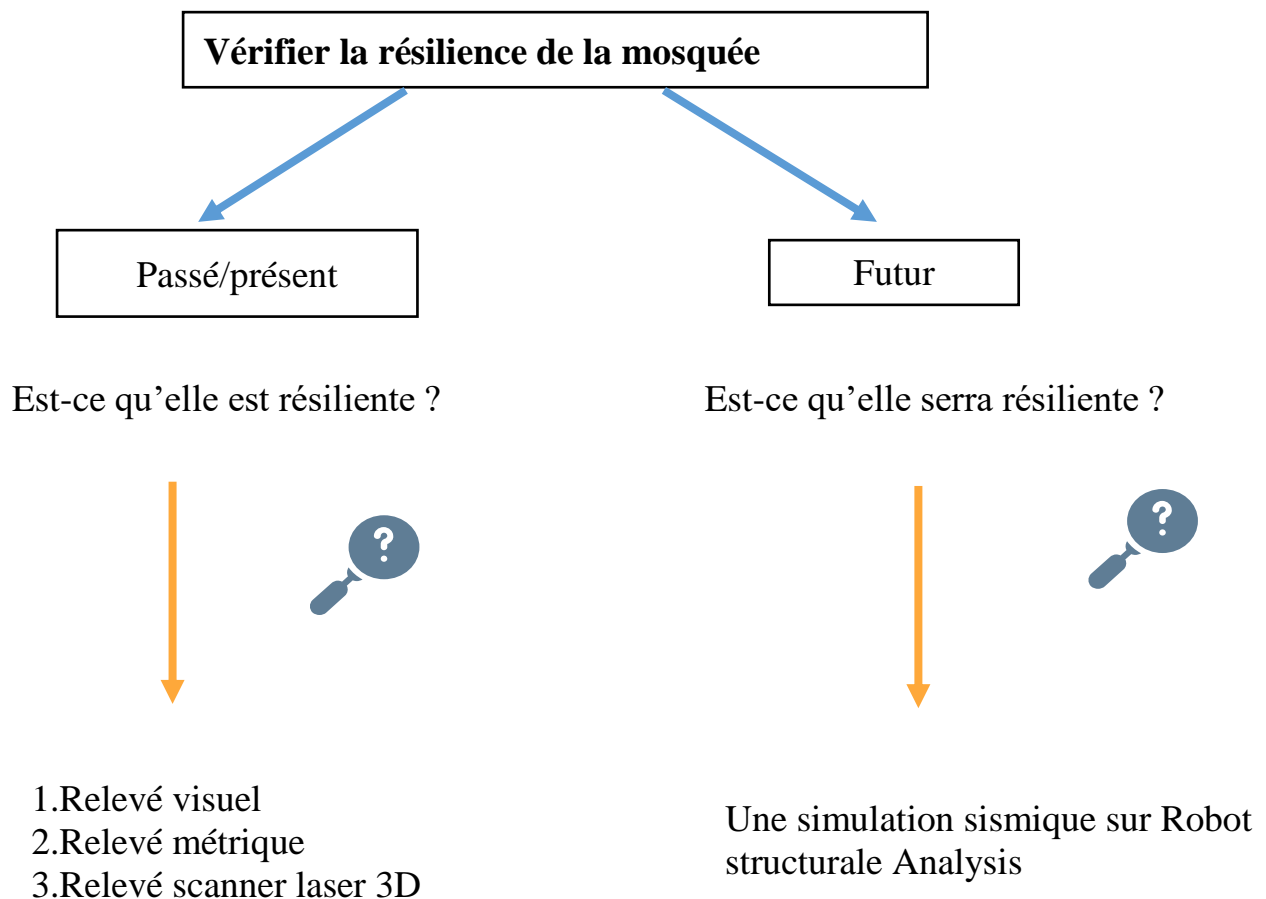
Logiciel Robot structurel  
2018

### Conclusion générale

Source : auteur

## La partie pratique

L'évaluation numérique de la résilience d'un vieux bâti face aux sollicitation sismique



## II. Chapitre II : Les risques majeurs

### II.1 Introduction

Le risque est une notion complexe, de définitions multiples car d'usage multidisciplinaire<sup>1</sup>. Néanmoins, il est un concept très usité depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, par exemple sous la forme de l'expression « courir le risque de », notamment pour qualifier, dans le sens commun, un événement, un inconvénient qu'il est raisonnable de prévenir ou de redouter l'éventualité. La notion de risque est également liée à la gravité des conséquences de l'aléa dont la survenue est probable. Prédire ou prévoir les conséquences des aléas fait partie de l'analyse et la gestion des risques.



Figure 1: photo qui montre l'aléa, l'enjeu et le risque majeur

### II.2 Définition

Un risque majeur<sup>2</sup> se définit comme la survenue soudaine et inopinée, parfois imprévisible, d'une agression d'origine naturelle ou technologique dont les conséquences pour la population sont dans tous les cas tragiques en raison du déséquilibre brutal entre besoins et moyens de secours disponibles.

#### Risque naturel prévisible

Risque susceptible de<sup>3</sup> survenir à l'échelle humaine. Certains types de risque peuvent se produire à l'échéance de quelques années ou quelques dizaines d'années (inondations, avalanches, cyclones, mouvements de terrain), d'autres ont des manifestations destructrices pouvant être espacées de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années (séismes, volcans).

Pour fixer les idées, une **échelle de gravité des dommages** a été produite par le ministère de l'Écologie et du Développement durable. Ce tableau permet de classer les événements naturels en six classes, depuis l'incident jusqu'à la catastrophe majeure.

<sup>1</sup> Céline Kermisch, Le concept du risque : De l'épistémologie à l'éthique, Lavoisier, 1<sup>er</sup> février 2011

<sup>2</sup> Institut des risques majeurs de Grenoble - Glossaire

<sup>3</sup> Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, Glossaire des risques naturels, 2008, 12 p

Classe		Dommages humains	Dommages matériels
0	Incident	Aucun blessé	Moins de 0,3 M€
1	Accident	1 ou plusieurs blessés	Entre 0,3 M€ et 3 M€
2	Accident grave	1 à 9 morts	Entre 3 M€ et 30 M€
3	Accident très grave	10 à 99 morts	Entre 30 M€ et 300 M€
4	Catastrophe	100 à 999 morts	Entre 300 M€ et 3 000 M€
5	Catastrophe majeure	1 000 morts ou plus	3 000 M€ ou plus

Tableau 1:les dommages humains et matériels après les risques majeurs

Deux critères caractérisent le risque majeur :

**Une faible fréquence** : l'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes.

**Une énorme gravité** :nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement.

Les risques liés aux conflits sont apparentés aux risques majeurs : en effet, dans notre société développée, ils sont caractérisés par ces deux critères.

Un événement potentiellement dangereux ALÉA n'est un **RISQUE MAJEUR** que s'il s'applique à une zone où des **ENJEUX** humains, économiques ou environnementaux sont en présence.

### II.3 Diagramme de Farmer

Les objectifs en termes de risques acceptables et inacceptables peuvent être visualisés sous forme de diagramme dit diagramme de Farmer où ils sont tracés sur un quart<sup>4</sup> de plan En abscisse, l'échelle des gravités des conséquences G d'un événement redouté ou plus généralement d'une activité ;

Ø En ordonnée, la probabilité de dépassement de chacune des gravités.

<sup>4</sup> Ibid.p.47

Le graphe de la courbe définie par l'expression  $Pr(G > g) = p$  s'appelle courbe d'acceptabilité du risque. Elle sépare les domaines à risque acceptable et à risque inacceptable sur la base d'une échelle de risque préalablement définie<sup>5</sup>

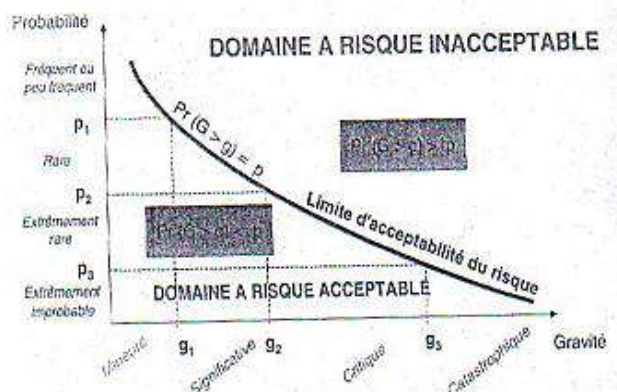


Figure 2:diagramme de Farmer

D'après la courbe on a trois domaine :

Domaine 1 : Forte probabilité et faible gravité

Domaine 2 : probabilité moyenne et gravité moyenne (de temps en temps des blessé)

Domaine 3 : probabilité faible et gravité très importante (c'est la zone de risque majeur)

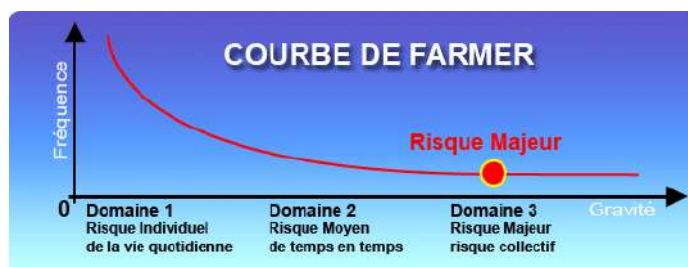


Figure 3:la courbe de Farmer

## II.4 Types de risques majeurs

On peut classer les risques majeurs suivant la nature matérielle de l'aléa :



Figure 4:schéma représente les risques majeur

- ❖ Risques naturels : inondation, avalanche, feu de forêt, cyclone, éruption volcanique, glissement de terrain, séisme, tempête, tornade, chute de météorite.
- ❖ Risques technologiques et industriels : affaissement minier, explosion, dégagement toxique, accident nucléaire de centrale, marée noire, rupture de barrage, accident de transport de matières dangereuses.
- ❖ Risque sanitaires et alimentaires.

<sup>5</sup> A. DESROCHES, A. LEROY et F.VALLEE.Op.cit, p.45

### ➤ Enjeux financière et de responsabilité

Les risques majeurs, s'ils se réalisent génèrent aussi des couts majeurs. Ils génèrent alors aussi des effets souvent en partie irréversibles aux échelles humaines de temps et d'appréciation.

Des enjeux financiers et assurantiels se posent donc de manière plus aiguë que dans le domaine général de la prévention<sup>6</sup>, de la gestion des risques et de la réparation (y compris pénale et judiciaires quand des responsabilités peuvent être établies).

#### II.4.1 Risque d'inondation

L'inondation est un des principaux risques naturels dans le monde ; c'est la catastrophe naturelle causant le plus de dégât. Pour la période 1996-2005, environ 80 % des catastrophes naturelles mondiales étaient d'origine météorologique ou hydrologique. Les inondations auraient affecté en moyenne 66 millions de personnes par an entre 1973 et 1997 et elles devraient s'aggraver dans beaucoup de ports<sup>7</sup> et communes littorales : selon une étude évaluant le coût probable de l'élévation des océans et des phénomènes météorologiques extrêmes pour les 136 principales métropoles littorales, les inondations pourraient coûter environ 1 000 milliards par an de 2010 à 2050, rien que pour ces villes.

#### II.4.2 Risque d'incendie

Les causes d'incendies sont nombreuses, mais la majeure partie des incendies a une origine humaine<sup>8</sup> (imprudence, malveillance, mauvaise préparation aux catastrophes naturelles telles que tremblements de terre, tsunamis...) : utilisations d'armes (incendiaires notamment) ; causes techniques, dont réactions chimiques très exothermiques, les contextes d'« atmosphères explosives » ; utilisation de chalumeaux ou de matériels électriques ou faisant des étincelles, qui sont fréquemment responsables d'incendies de chantiers (un tous les trois jours rien qu'à Paris).



Figure 5:L'incendie des entrepôts à Helsinki, en Finlande, le 5 mai 2006

<sup>6</sup> Michel-Kerjan E (2006) Vulnérabilité financière face aux « risques à grande échelle » : la parole est à la première industrie au monde [archive]. Annales des Mines (N°43, pp. 14-25).

<sup>7</sup> Hallegatte, S. et al. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen. Climatic Change 104, 113–137 (2011).

<sup>8</sup> TAZIEFF, H. (1988). Catastrophes naturelles. Entretien avec Roland BECHMANN et Dominique BARICHEFF

Les causes d'incendies "naturels" sont la foudre, l'éruption volcanique avec coulées de lave certaines catastrophes naturelles et bien plus rarement la fermentation (tourbières...).



Figure 6:Incendie de San Francisco en 1906.

### II.4.3 Risque du séisme

Il se produit de très nombreux séismes tous les jours mais la plupart ne sont pas ressentis par les humains. Environ cent mille séismes sont enregistrés chaque année sur <sup>9</sup>a planète. Les plus puissants d'entre eux comptent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices. Les séismes les plus importants modifient la période de rotation de la Terre et donc la durée d'une journée (de l'ordre de la microseconde)

## II.5 Conclusion

La ville connu plusieurs risques majeurs qui présentent un danger pour le patrimoine bâti, dans notre recherche on a choisi **le séisme** permis ces risques majeurs parce que notre cas d'étude se situé dans une zone sismique « Cherchell »

---

<sup>9</sup> François Michel, Roches et paysages, reflets de l'histoire de la Terre, Paris, Berlin, Orléans, BRGM éditions, 2005, (ISBN 978-2-7011-4081-0), p. 74.

### III. Chapitre III : Biographie sur le séisme

#### III.1 Introduction

Les séismes ou tremblement de terre se produisent régulièrement sur notre planète et sont à l'origine de milliers de morts et de dégâts considérables, même si le mécanisme de ces accidents est connu, leur prévision et leur localisation reste difficile<sup>10</sup>.

#### III.2 Définition du séisme

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

**SEISME** [séisme]<sup>11</sup> n.m (gr. Seismos, tremblement de terre).



Figure 7: dégâts de séisme

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

Le séisme se traduit par des vibrations plus ou moins importantes du sol. En surface, les mouvements brusques du sol peuvent présenter des amplitudes de plusieurs centimètres, de fortes accélérations et des durées variant de quelques secondes à quelques secondes à quelques minutes. Afin de mieux montrer les effets dévastateurs des séismes sur les populations, nous avons reporté dans le tableau quelques exemples de séisme majeurs ainsi que le nombre approximatif des personnes<sup>12</sup> décédées.

Date	Lieux	Nombre de morts
1556	Chen Si ( Chine )	830000
1676	Chine	650000
1980	El Asnam ( Algérie )	2633 ( + 348 disparus)
2003	Boumerdess ( Algérie )	2300
2004	Sumatra ( Indonésie)	240000 <sup>13</sup>

Tableau 2: les victimes après le séisme

<sup>10</sup> CHERAIT, Yacine. Conception des bâtiments en zones sismique. Guelma : direction de la publication universitaire, 2012

<sup>11</sup> Dictionnaire. Le petit Larousse illustré. Presses, 1972

<sup>12</sup> Pecker, A. Dynamique des sols. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1984

La moitié de la population de la planète vit dans des zones sismique dangereuses. Le graphe illustre le nombre moyen des victimes des tremblements de terre.

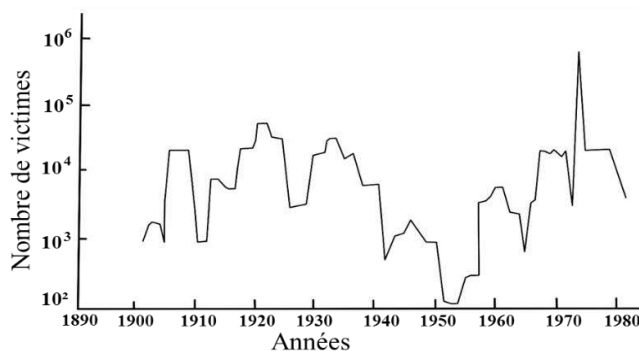


Figure 8:nombre des victimes des séismes

Certaines estimations affirment qu'en un millénaire, les séismes ont décimé plus de 5 millions d'êtres humaines, et les dégâts matériels occasionnés sont toutes aussi considérables comme l'attestent les chiffres suivants :

Date	Région ( pays )	Estimation des dégâts en millions de dollars US
1963	Skopje ( Ex Yougos la vie)	500
1972	Managua ( Nicaragua)	800
1980	El Asnam ( Algérie )	2000
2003	Boumerdess ( Algérie)	3000

Tableau 3:Estimation des dégâts matériels causés par certains séismes

### III.3 L'origine du séisme

Un tremblement de terre est une secousse plus ou moins violente du sol qui peut avoir quatre origines : rupture d'une faille ou d'un segment de faille (séismes tectoniques) ; intrusion et dégazage d'un magma (séismes volcaniques) ; « craquements » des calottes glaciaires se répercutant dans la croûte terrestre (séismes polaires) ; explosion, effondrement d'une cavité (séismes d'origine naturelle ou dus à l'activité humaine)<sup>14</sup>. En pratique on classe les séismes en quatre catégories selon les phénomènes qui les ont engendrés

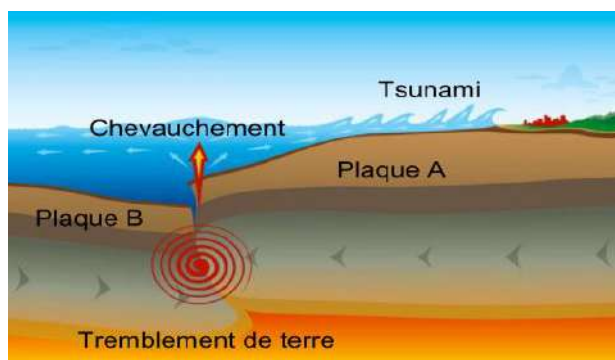


Figure 9: l'origine du tremblement de terre

<sup>14</sup> Göran Ekström, Meredith Nettles et Victor C. Tsai, Seasonality and Increasing Frequency of Greenland Glacial Earthquakes; Science 2006-03-24; pp. 1756-1758

### III.3.1 Séisme tectonique

Ce sont les plus fréquents et les plus dramatiques. Ils se situent souvent à l'intersection de deux plaques. Les causes sont la subduction (il y a glissement d'une plaque par-dessus l'autre), la collision, ainsi que l'apparition de rift (la croûte terrestre s'amincit, ce qui mène à une rupture lithosphérique)

### III.3.2 Séisme d'origine volcanique

Les séismes d'origine volcanique résultent <sup>15</sup>de l'accumulation de magma dans la chambre magmatique d'un volcan. Les sismographes enregistrent alors une multitude de microséismes (trémor) dus à des ruptures dans les roches comprimées ou au dégazage du magma. La remontée progressive des hypocentres (liée à la remontée du magma) <sup>16</sup>est un indice prouvant que le volcan est en phase de réveil et qu'une éruption est imminente.

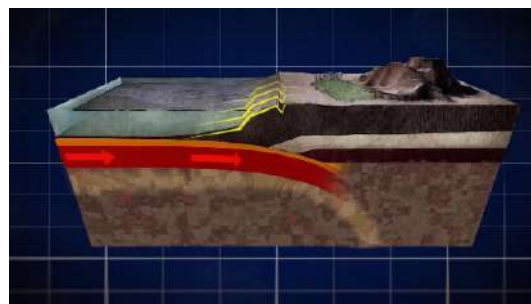


Figure 10: séisme d'origine volcanique

### III.3.3 Séisme d'origine polaire

Les glaciers et la couche de glace <sup>17</sup> présentent une certaine élasticité, mais les avancées différenciées et périodiques (rythme saisonnier marqué) de coulées de glace provoquent des cassures dont les ondes élastiques génèrent des tremblements de terre, enregistrés par des sismographes loin du pôle à travers le monde. Ces « tremblements de terre glaciaires » du Groenland sont caractérisés par une forte saisonnalité. Une étude publiée en 2006 a conclu que le nombre de ces séismes avait doublé de 2000 à 2005, tendance temporelle suggérant un lien avec une modification du cycle hydrologique et une réponse glaciaire à l'évolution des conditions climatiques. Si l'on considère qu'une part du réchauffement climatique est d'origine humaine, une part des causes de ces séismes pourrait être considérée comme induits par l'Homme

### III.3.4 Séisme d'origine artificiel

Ces séismes induits sont dus à certaines activités humaines telles que les barrages, les pompes profonds, l'extraction minière, les explosions souterraines, ou même les bombardements. Ils sont relativement fréquents et de faible amplitude

<sup>15</sup> Documents pédagogiques de l'EOST ; les catégories de séismes [Les catégories de séismes](#)

<sup>16</sup> Göran Ekström, Meredith Nettles et Victor C. Tsai, Seasonality and Increasing Frequency of Greenland Glacial Earthquakes; Science 2006-03-24; pp. 1756-1758

<sup>17</sup>

### III.4 Mécanisme sismique et propagation des ondes

#### III.4.1 Failles sismique

Un séisme génère souvent des failles, et selon la nature et l'orientation des contraintes appliquées, la rupture finale peut se traduire par la formation de :

Failles de coulissages (ou transcurrentes) : le long desquelles deux compartiments coulissent horizontalement l'un par rapport à l'autre, elles correspondent ainsi à des zones de cisaillement (c'est le cas de la célèbre faille de San Andreas en Californie, USA.

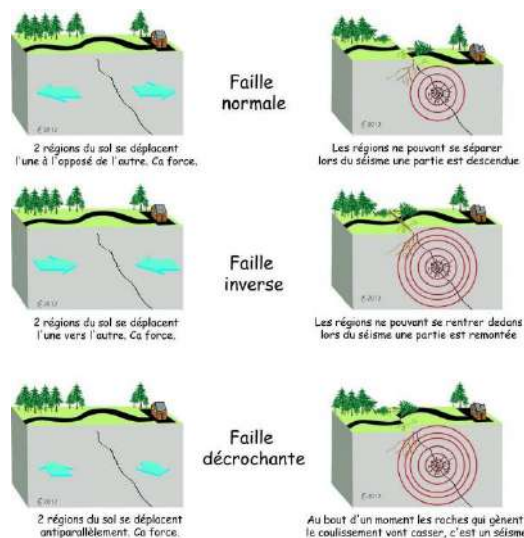


Figure 11: les failles sismiques

- Failles normales : le long desquelles un compartiment s'affaisse par rapport à l'autre, elles correspondent à des zones d'extension
- Failles inverses : elles correspondent à des zones de compression

Selon M. DJEDDI, les séismes en Algérie sont induits par un jeu de failles inverses

#### III.4.2 Ondes sismique

Les vibrations, engendrées dans le foyer sont propagées dans toutes les directions sous forme « d'ondes sismiques » qui compte tenu de l'hétérogénéité du sol, engendrent en surface des mouvements complexes et difficilement avec des fréquences variant de 0.1 à 30Hertz.

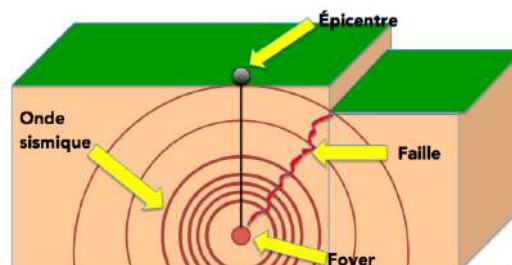


Figure 12: Les ondes sismiques

##### III.4.2.1 Les ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur <sup>18</sup>du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, elle augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus rigide. Pour un matériau donné, la masse volumique augmente généralement moins

On distingue :

<sup>18</sup> Ibid.

- ❑ Les ondes P<sup>19</sup> ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales (ondes P car ondes de Pression). Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde. Elles se propagent dans tous les milieux et sont les plus rapides ( $6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  près de la surface), parcourant le chemin le plus court, même par noyau terrestre, et sont donc les premières enregistrées sur les sismogrammes. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

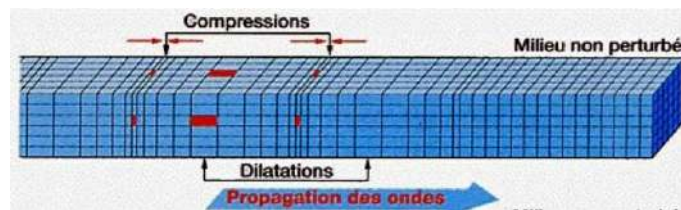


Figure 13: onde sismique primaire S

- ❑ Les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement (shear waves, d'où ondes S) ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est de  $4,06 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Elles apparaissent en second sur les sismogrammes

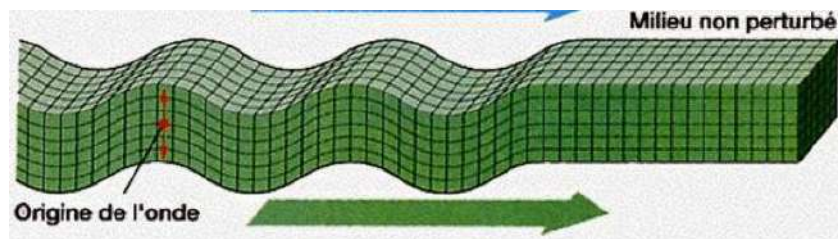


Figure 14: onde sismique secondaire S

<sup>19</sup> Ibid.

### III.4.2.2 Les ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume, leur amplitude est généralement plus forte, mais décroît rapidement avec la distance à la surface qui les guide<sup>20</sup>.

On peut distinguer :

- **L'onde de Love** : c'est un Anglais Augustus Edward Hough Love qui a découvert son existence en 1911. Son déplacement est comparable à celui des ondes S sans le mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations d'un édifice qui n'est pas une construction parasismique. Les ondes de Love se propagent à environ  $4 \text{ km} \cdot \text{S}^{-1}$

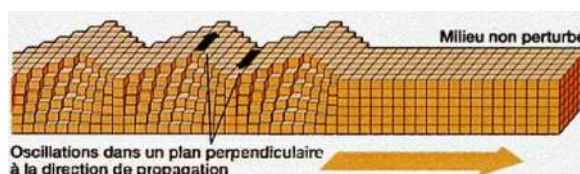


Figure 15: onde sismique de surface love

- **L'onde de Rayleigh** : elle a été découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée.

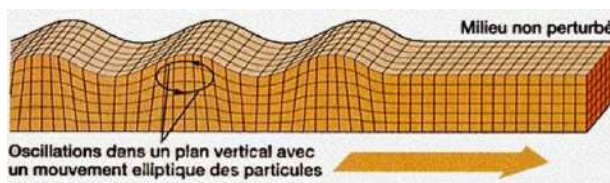


Figure 16: onde sismique Rayleigh

## III.5 Caractérisation des séismes

### III.5.1 Echelle de Mercalli

L'échelle de Mercalli est une échelle conventionnelle basée essentiellement sur les dégâts constatés lors du séisme, elle est graduée de I à XII comme le montre le tableau<sup>21</sup>



Intensité	Effets
Degré I	Imperceptible, le séisme n'est détecté que par des sismographes proches

<sup>20</sup> Ibid.

<sup>21</sup> CHERAIT, Yacine. Conception des bâtiments en zone sismique. Guelma. Direction de la publication universitaire, 2012

Degré II	Caractérisé de léger à assez fort, le séisme est de plus ressenti, jusqu'au réveil des domeurs.oscillation d'objets suspendus
Degré VI	Séisme suffisamment fort pour être ressenti par tout le monde et provoquer la panique
Degré VII-VIII	Des dégats,de légers à importants, apparaissent dans les constructions
Degré IX-X	Séisme désastreux : les constructions tombent en ruines, rupture des ponts, torsion des rails, glissements de terrain, rupture des canalisations
Degré XI	Désordres dans les constructions réputés solides :le séisme est caractérisé de catastrophique
Degré XII	Désordre dans la topographie : c'est la cataclysm

Tableau 4:les degrés de l'échelle de Mercalli

### III.5.2 Echelle MSK

La magnitude ne doit pas être confondue avec l'intensité qui est estimée à partir des effets produits en surface. Pour l'évaluer, on utilise l'échelle MSK dont le nom provient de ses inventeurs Medvedev, Sponheuer et Kamik en 1964.

### III.5.3 Echelle Richter

Afin d'estimer la puissance des séismes, le sismologue Richter introduisit la notion de magnitude. Elle correspond<sup>22</sup> à l'énergie libérée au foyer du séisme et dépend de la longueur de la faille activée et de l'importance du déplacement.

Echelle de Richter	
Magnitude	Effets du tremblement de terre
< 3,5	Le séisme est non ressenti, mais enregistré par les sismographes
3,5 - 5,4	Il est souvent ressenti, mais sans dommage
5,4 - 6	Légers dommages aux bâtiments bien construits, mais peut causer des dommages majeurs à d'autres bâtisses
6,1 - 6,9	Peut-être destructeur dans une zone de 100 km à la ronde
7 - 7,9	Tremblement de terre majeur. Il peut causer de sérieux dommages sur une large surface
> 8	C'est un très fort séisme pouvant causer de très grands dommages dans des zones de plusieurs centaines de kilomètres

Tableau 5:les degrés de l'échelle Richter

<sup>22</sup> Jean-François, GARCIA. Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Rapport final de PFE, Strasbourg : INSA, Mars-juillet 2007

### III.6 Effets des séismes sur les constructions

L'effondrement des constructions<sup>23</sup> pendant un séisme est la cause principale des victimes humaines, des dommages matériels et de la désorganisation des secteurs socio-économique de la région touchée.

L'amélioration de la réglementation technique de la construction base sur une connaissance approfondie de mouvement sismique et de l'interaction sols-structure on peut avoir trois types d'interaction. Structure –solicitation sismique le premier type d'endommagement menace les constructions solides sur des mauvais sol.la destruction est due dans ce cas au déplacement irréversible du sol.

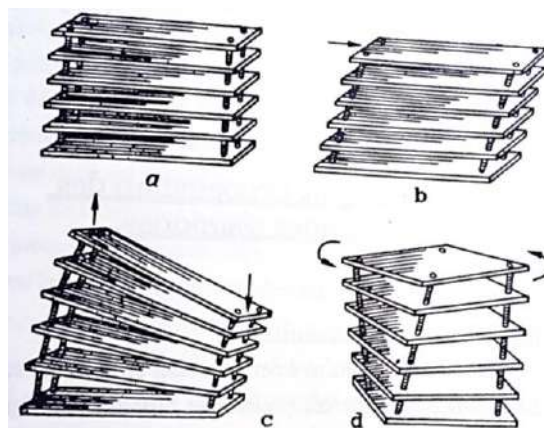


Figure 17: déplacement du bâti lors du séisme

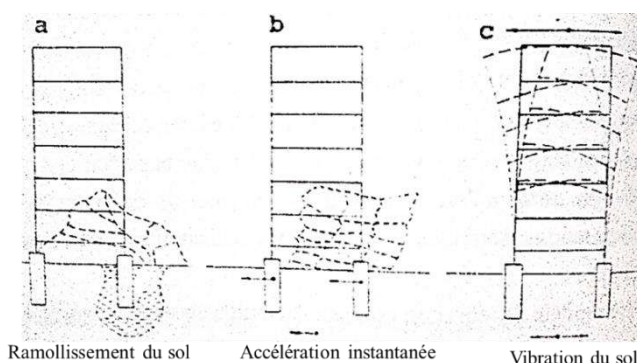


Figure 18:trois causes principales de destruction des constructions pendant les séismes

La deuxième type d'endommagement peut avoir lieu dans le cas où le sol est solide mais l'épicentre du séisme est très proche. Les premières arrivées des ondes sismiques sont de courtes périodes avec une amplitude rapidement croissante.

L'accélération sismique augmente instantanément. Le sol résiste à cette accélération et au moment où les sollicitations sismiques atteignent la construction, le sol et la construction se déplace rapidement de leur position d'équilibre ce qui provoque des forces considérables qui s'exercent surtout au rez de chaussée si ces forces sont dirigées horizontalement, les supports de de la construction seront coupés et les étages supérieurs pourront se détacher et se détruire.

<sup>23</sup> LES SEISMES ET LEUR PREVENION BADDARI KAMEL ET DJEDDI MABROUK P.58

Il faut noter qu'on peut avoir trois formes de déformation des constructions soumises à l'action des sollicitations sismiques

Le modèle de vibration est celui d'une tige élastique soumise à l'effet d'une charge lorsque le fondement de la construction commence à vibrer à cause de la sollicitation sismique, les effets de telles vibrations sont liés au rapprochement du spectre des sollicitations sismiques et du spectre des vibrations propres de la construction. S'il y a des périodes qui sont égales ou proches les unes des autres un phénomène de résonance prendra naissance. La construction commence à se balancer l'amplitude de vibration augmente. Les nœuds se détachent, les murs se fissurent et la construction se détruit. L'endommagement ne dépend pas seulement de l'amplitude mais aussi de la durée des vibrations .si cette durée est courte, la résonance pourra ne pas avoir des effets catastrophiques. Celui- ci est le troisième type d'endommagement et qui est le plus répondu

En Algérie deux <sup>24</sup>séismes. El Asnam en 1980 et Tipaza en 1989 qui ont particulièrement ébranlé le pays ont été soigneusement étudiés par leur effet sur les constructions. Les causes techniques des désordres sont classées en trois catégories (M.N FARSI1990)

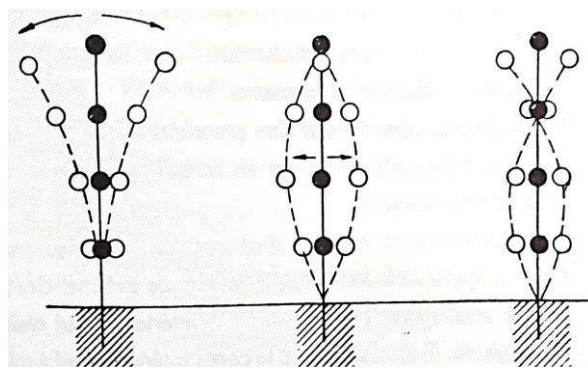


Figure 19:Vibration du bâti durant le séisme

La mauvaise conception architecturale. Tenant soit de la forme en plan des bâtiments telles les formes en L.T ou U soit de l'irrégularité en élévation à travers les changements brusques de rigidité d'un niveau à autre

La mauvaise conception structurale (non prise en compte de l'interaction maçonnerie – structure mauvaise conception des nœuds parties plus rigides que le plateau, poteaux courts mal étudié largeur insuffisante des joints entre les blocs des bâtiments

<sup>24</sup> LES SEISMES ET LEUR PREVENION BADDARI KAMEL ET DJEDDI MABROUK P.60

### III.7 Les phénomènes d'instabilité d'une construction

#### III.7.1 Le flambement

Le flambage ou<sup>25</sup> flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression (passage d'un état de compression à un état de flexion)

#### III.7.2 Phénomène des poteaux courtes

On appelle « effet de poteau court » la rupture sous l'effet de charges sismique horizontales de :

Poteau plus court que d'autre : par exemple, poteau du vide sanitaire

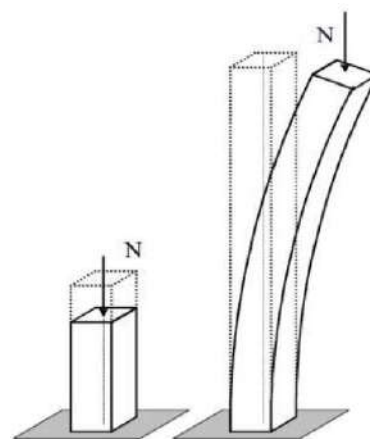


Figure 20:phénomène du flambement

Poteau dont la longueur libre est réduite par la présence d'allège rigide, palier d'escalier

En effet, les poteaux courts ou bridés sont beaucoup moins déformables que les poteaux libres sur toute la hauteur d'étage ; il se rompent lorsqu'ils ne peuvent pas supporter les déformations imposées par les oscillations des planchers. En outre, ils attirent des charges sismiques plus importantes que les autres poteaux car ils sont plus rigides

### III.8 Pathologie d'une mosquée

#### III.8.1 Fissures

Une fissure d'enduit peut être due au séchage, dans ce cas elle n'évolue pas. Si elle évolue c'est qu'elle masque un désordre structurel

Une fissure dans un mur en pierre est toujours gênante, elle révèle un mouvement de terrain ou un affaissement et doit être mise sous surveillance.

Une fissure dans un mur en terre aussi gênante, révèle un mouvement de terrain ou un affaissement et doit être mise sous surveillance.

Les mouvements du terrain, l'absence de chaînage peuvent être la cause de fissures de préfabriqués et blocs pleins ou creux tout comme le gel pendant le montage

<sup>25</sup> GORG G. et al. Rénover le bâti –Maintenance, reconversions, extension, lausane,2012

### III.8.2 Les microfissures

Les microfissures<sup>26</sup> sont fines comme des cheveux, forment un maillage sur la façade. Elles sont souvent superficielles et n'affectent que l'enduit de surface, elle ne mettent donc pas en danger le mur mais permettent cependant des entrées d'eau et donc favorisent une humidité latente

### III.8.3 Les fissures fines

La première chose à faire en présence des fissures légères (1 à 2 mm) est de vérifier si elles évoluent ou si elles sont apparues lors de la réalisation et n'ont jamais évolué. Pour ce faire, un témoin de plâtre sera posé à cheval sur 2 ou 3 d'entre elles

Si les témoins ne sont pas fissurés après plusieurs mois, les fissures sont donc stables. Il conviendra donc, en fonction de la nature du mur, de reboucher ces fissures. Si le témoin se fissure, l'évolution continue ; il faut donc rechercher les causes de cette dégradation.

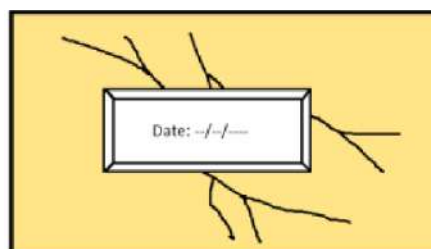


Figure 21: fissures fines

### III.8.4 Les fissures larges et les lézardes

Une fissure de plus de 2 ou 3 mm de large dans un mur est le signe de la mauvaise santé de ce mur. Plusieurs causes peuvent en être à l'origine : affaissement, faux aplomb, mouvements de terrains.

### III.9 Les mosquées et le séisme (dégâts)

En Indonésie, la terre ne se calme pas. Jeudi 9 août 2018, une réplique de magnitude 5,9 a touché l'île de Lombok, déjà ravagée par un séisme dimanche 5 août. En quatre jours, pas moins de 355 répliques à ce tremblement de terre ont été enregistrées, mais celle de jeudi est la plus forte.

Chez les habitants, cette nouvelle secousse a provoqué la panique. Certains murs déjà fragilisés se sont effondrés et les gens couraient dans la rue. « Nous étions bloqués dans le trafic au moment d'apporter de l'aide (aux sinistrés) et subitement c'est comme si notre voiture



Figure 22: ruine de la mosquée après le séisme

<sup>26</sup> GORG G. et al. Rénover le bâti –Maintenance, reconversions, extension, lausane, 2012. 280p.

avait été percutée par l'arrière, c'était fort », a raconté à l'AFP un témoin, Sri Laksmi, 319 morts selon le dernier bilan

Le monument Arkam <sup>27</sup>Babu Rahman mosquée flottante qui tombé dans la mer après le séisme et le tsunami. Un terrible tremblement de terre de magnitude 7,7 et le tsunami causé par elle a détruit la ville de Palu et une grande partie de la zone dans le centre de Sulawesi. Selon les responsables, victimes des terribles tremblement de terre et du tsunami s'élève à 1 347, près de 800 personnes dans les hôpitaux sont gravement blessés et quelque 62 000 personnes ont été déplacées dans 24 camps autour de la région.



Figure 23:le tsunami a emporté la moquée dans la mer

### III.10 Les mosquées qui ont résistés au séisme

Considérée comme la plus ancienne mosquée du pays du Soleil-Levant, la mosquée de Kobe, ville située <sup>28</sup> dans le centre de l'archipel a résisté aux bombardements dévastateurs de la Seconde Guerre Mondiale en 1945 et à l'un des pires séismes du pays en 1995.



Œuvre de l'architecte tchèque Jan Josef Švagr, la mosquée est ouverte en 1935. Parmi les grands contributeurs financiers : Aga Khan III, premier président de la Ligue Musulmane, un parti politique qui lutta pour un État musulman indépendant dans le nord-ouest de l'Empire britannique des Indes. Le terrain fut offert par l'empereur du Japon Hirohito.



Figure 24:la mosquée après le séisme

<sup>27</sup> SOPA Images Limited / Alamy Banque D'Images, le 12 octobre 2018

<sup>28</sup> Journal des Mosquées de France La Rédaction D &M, le 2 janvier 2019

### III.11 Le séisme à Tipaza et à Cherchell

#### Le séisme de Chenoua : 29/10/1989

Le nombre total de constructions<sup>29</sup> condamnées constructions classées en rouge, niveau 5) est relativement élevé (4116 unités soit 34,5%) et ceci s'explique par le fait que la plupart des constructions expertisées sont faites en maçonnerie non chaîné (telle que Ain K'siba à, Cherchell) et datent à l'époque colonial, il est signalé aussi que la région de Tipaza est une région agricole et que 60% des construction se trouvent en zone rurale. Un grand nombre de ces constructions rurales sont faites en toub (roseau plus argile).

Ce type d'habitat constitue 80% des constructions de la commune de Menacer, ce qui explique le nombre élevé de construction condamnée dans cette commune

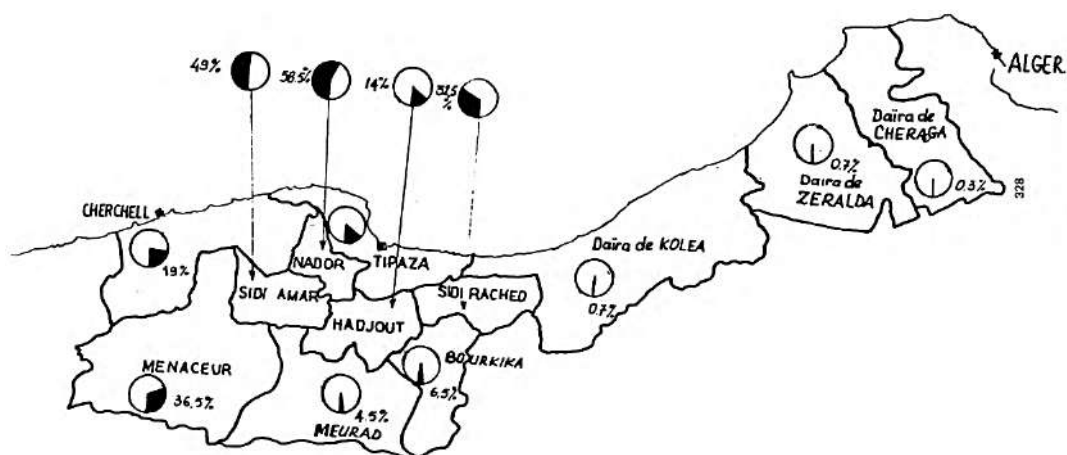


Figure 25:carte de séisme de Chenoua

Répartition des dommages relatifs (Niveau 3 à 5)

Zone	localité	Habitat endommagées			pourcentage		
		URB	RUR	TOT	URB	RUR	TOT
01	CHERCHELL	560	705	1265	43	25	31
02	MENECEUR	127	811	938	10	29	23
03	SIDI-AMAR	12	420	432	01	15	10,5
04	HADJOUT	270	108	378	21	04	9,5
5a	HADJOUTSIDI-RACHED	176	87	263	13,5	03	6,5
03	NADOR	12	240	252	01	8,5	6,5
05	TIPAZA	13	208	221	01	7,5	5,5

Tableau 6:Classement des localités par importance des dommages (Niveau 05)

<sup>29</sup> Actes du 4eme séminaire maghrébin sur le génie parasismique ,1990, groupe maghrébin du génie parasismique G.M.G.S



Ce séisme considéré comme le plus violent jamais<sup>31</sup> enregistré en Afrique du Nord, a fait plus de 3500 victimes et a provoqué des destructions d'habitations en grand nombre et des dommages importants à des édifices publics. Les effets produits sur le terrain ont été de différentes natures et caractéristiques de ce qu'on appelle « séisme désastreux ». D'importants dégâts sont signalés sur les ouvrages : déformation des rails de chemin de fer, ponts très endommagés, l'aqueduc traversant la ville de chlef effondré en plusieurs endroits, les routes coupées par d'énormes crevasses en plusieurs endroits

### Séisme de 09 octobre 1970 Djebel du Zaccar

- Magnitude :04
- Rayon moyen de perception

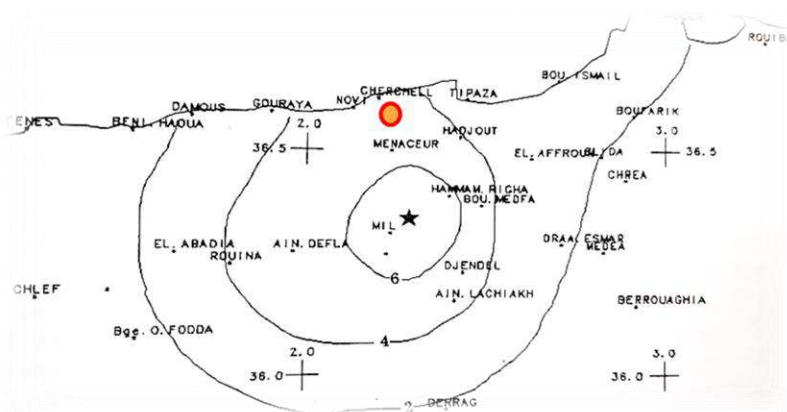


Figure 29: séisme de djebel Zaccar 1970

### III.12 La réglementation Algérienne Parasismique

Un code sismique de la construction, est «de mettre à la disposition des intervenants dans l'acte de bâtir des règles minimales pour protéger la vie en particulier et celle sociale qui taxe sévèrement l'économie non seulement de la zone touchée par le séisme mais nationale. Le code sismique seulement n'est pas suffisant pour garantir une bonne construction

Parasismique mais il faut aussi :

- La conception architecturale par l'architecte
- La conception parasismique et le calcul sismique par l'ingénieur
- Le respect de ces règles de construction parasismique par l'entrepreneur
- La foi technique d'application de ces règles par toute entité de contrôle et public et privé.
- Et la conviction de protéger son investissement, sa propre vie et celle de ses proches et des autres par le propriétaire ou maître de l'ouvrage.

<sup>31</sup> Les séismes en Algérie de 1365 à 1992 sous la direction de Mourad Bezzeghoud et Hadj Benhallou, 1994 par Mokrane

D'après le tableau suivant, il est à constater qu'un règlement est souvent, pour ne pas dire toujours, un enfant de la douleur

### **III.12.1 RPA99/2003 – Principales modifications**

Reconnaissance et Etudes de Sol, Etudes de sol sont obligatoires :

Sauf pour R+2 au maximum ou 11m de hauteur moyenne (Surface totale des planchers : 400m<sup>2</sup>).

\* Classification des Zones Sismiques. Passage à 5 zones :

La zone II éclatée en 2 sous zones

3.4 : Classification des systèmes de contreventement.

\* cartes de zonage sismique

### **III.12.2 Le règlement parasismique après 2003**

Le séisme du 21 Mai 2003 d'Alger et Boumerdès a fait preuve de la fragilité des structures et de la négligence totale des règlements parasismiques dans la réalisation des bâtiments.

Les dommages importants et la ruine des constructions causés par ce séisme sont dus non pas au choix du type de matériau ou au type de structure, mais à la conception et l'étude non conforme aux exigences parasismiques et à la mauvaise qualité des matériaux

### **III.12.3 Les principes de conception**

Le respect des principes de conception des structures construites en zones sismiques a pour résultat de minimiser le supplément de prix nécessaire pour passer de la structure normale à la structure parasismique ils peuvent se résumer en :

#### **A. Forme en plan :**

Lorsque la forme en plan des bâtiments est dissymétrique (forme en L.T.U) cela entraîne des efforts de torsion dont les conséquences sont :

L'effondrement de la partie commune des deux corps.

L'effondrement d'une aile. <sup>32</sup>

#### **B. Irrégularité en élévation :**

---

<sup>32</sup> Victor David vici, Learning from earth quakes – Genie parasismique.

Les variations brusques des rigidités en altitude présentent des risques (coup de fouet) ainsi que les grands portés à faux (Balcons) provoquent des conséquences aggravantes pour la stabilité d'une construction.

### **C. Système de contreventement :**

Le respect des règles parasismiques et les dispositions constructives assure un bon comportement de constructions en béton armé :

#### **➤ Portique en béton armé :**

Dans ce type de structure les poteaux sont les éléments les plus vulnérables, leur dégradation se produise aux extrémités en fonction de l'effort suivant le processus suivant :

- Fissures horizontales dues à l'allongement des armatures.
- Fissures des armatures longitudinales (insuffisance des armatures transversales<sup>33</sup>).

Dans le cas des poteaux courts la dégradation est due à l'importance de l'effort tranchant et l'insuffisance des armatures transversales (même cas est observé aux nœuds).

#### **➤ Voiles :**

Le contreventement par les voiles apparaisse comme bien adapté à la construction parasismique parce qu'ils limitent les déformations relatives et protègent l'intégrité des éléments non structuraux.

### **D. Joints de dilatation**

Sous l'action des secousses, tous les joints doivent permettre aux blocs adjacents le libre déplacement (les structures ne vibrent pas à la même fréquence).

### **E. Matériaux de construction :**

Il y a de manière générale, dans notre pays un réel besoin de mise en place de procédures de normalisation et l'homologation des matériaux ainsi que le contrôle des points de leur production. (La qualité physique et mécanique des fers à béton importés a été incriminée dans les bâtisses détruites de Boumerdes).

Le choix du matériau de construction dépend de plusieurs facteurs : résistance – coût – destination de l'ouvrage.

La qualité du matériau de construction est estimée selon quelques critères déterminés à partir des contrôles effectués dans les laboratoires.

---

<sup>33</sup> James Mitchell, la Terre, 1978.

L'utilisation des matériaux fragiles (béton non armé, maçonnerie non chaînée en briques où en pierres est interdite dans les éléments contreventement<sup>34</sup>.

### **III.13 Le patrimoine à travers le cadre réglementaire**

#### **III.13.1 Loi n° 90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune**

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

La préservation et la protection des sites et monuments en raison de leur vocation et de leur valeur historique et esthétique.

La sauvegarde du caractère esthétique et architectural et l'adoption de type habitat homogène des agglomérations.

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

A cet effet, elle :

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

#### **III.13.2 Loi n°90-09 du 7 avril 1990 relative à la wilaya :**

Art. 82- l'assemblée populaire de la wilaya apporte son soutien aux communes dans la mise en œuvre de leur programme d'habitat

A ce titre elle :

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

#### **III.13.3 Loi 90-29 du 01 décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme :**

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

Art. 31- dans le secret des dispositions des plans d'aménagement et d'urbanisme (PDAU), le plan d'occupation des sols fixe de façon détaillée les droits d'usage des sols et de construction

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

---

<sup>34</sup> Règles parasismiques Algériennes (RPA 99/v2003).

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

### III.13.4 Loi n°98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du cadre patrimonial culturel :

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

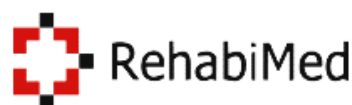
Décret exécutif n°03-227 du 22 juin 2003 fixant les conditions et les modalités d’octroi des aides pour la réhabilitation des habitations endommagés par le séisme du 21 mai 2003 : Art2

Tout immeuble collectif à usage d’habitation, occupé ou en voie de l’être par un ou plusieurs locataires ou copropriétaires ;

Toute construction individuelle à usage d’habitation occupé ou en voie de l’être

### III.14 Les méthodes de Réhabilitation La Méthode RehabiMed

RehabiMed est le plus grand réseau interdisciplinaire



Méditerranéen visant à la réhabilitation durable, la restauration du patrimoine et de la régénération urbaine.

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

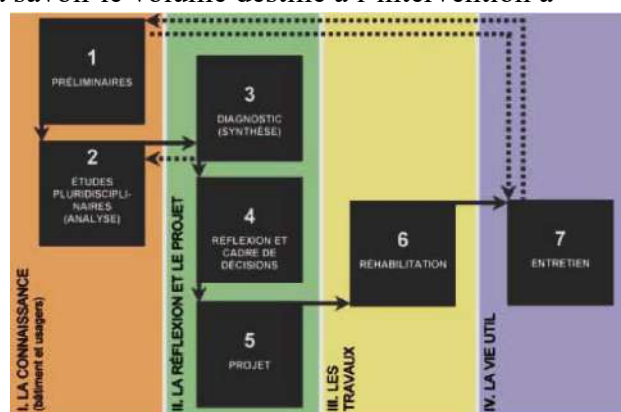


Figure 30: les étapes de la méthode RehabiMed, 2007

En réhabilitant, il est nécessaire d'avoir une vision globale de territoire dans laquelle celui-ci est situé ainsi que de comprendre ses rapports avec l'environnement territorial et urbain<sup>35</sup>

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

Voici les étapes en détail :

### Etape1 : Préliminaires :

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

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

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

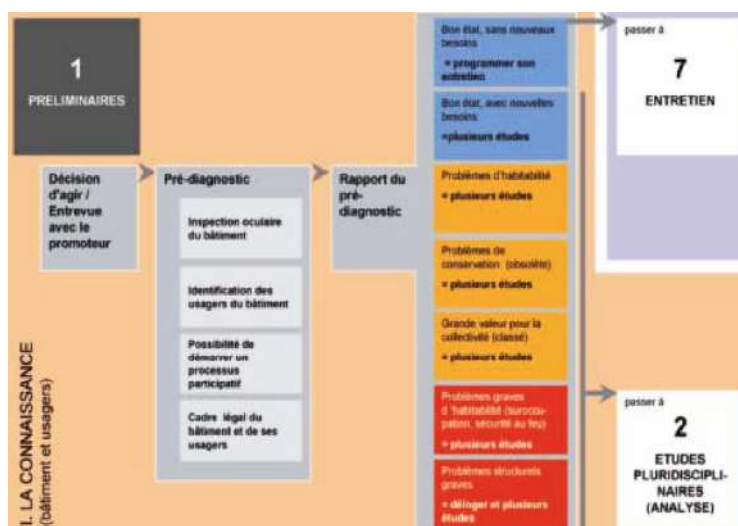


Figure 31: Etape1 : préliminaires de la Méthode RehabiMed, 2007

### Etape2 : Etude pluridisciplinaires (Analyse) :

Cette étape<sup>36</sup> du processus en un recueil systématique d'information dans tous les domaines que l'on considère nécessaire d'investiguer pour parvenir à une profonde connaissance de l'objet d'étude

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

on trouve également le domaine historique, qui se résume en une enquête dans les sources documentaires (archives notariale, archives familiales, photographie anciennes, anciens projets

<sup>35</sup> Xavier CASANOVAQ et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Batiments. Barcelone, 2007

<sup>36</sup> Ibid.

du bâtiment) pour compiler des données qui aideront à comprendre le bâtiment et ses transformations, de l'autre, le bâtiment lui-même est un magnifique document historique qui peut être soigneusement étudié comme culture matérielle par la méthode archéologique qui est habituellement utilisée parallèlement au relevé graphique du bâtiment (sondage dans les murs, analyse des matériaux de construction, analyse stratigraphique du bâtiment, etc...)

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

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

-En fin on a le domaine constructif, ce dernier comprend la reconnaissance physico-constructive de tous les éléments du bâtiment ainsi que l'observation de ses lésions, gérer par un architecte /ingénieur habitué aux modes de construction traditionnels de la région, disposant d'une solide formation scientifico-technique de la pathologie des bâtiments traditionnels



Figure 32: Etape 02 : étude pluridisciplinaire de la méthode RehabiMed, 2007

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

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

### **Etape 3 : Diagnostic(synthèse) :**

Comme<sup>37</sup> son nom l'indique, il s'agit d'une étape de synthèse, ou on va traiter l'ensemble des données pluridisciplinaire ayant été réalisée auparavant

Pour définir cette Etape le travail va être clôturé sous un rapport d'expertise, on détaillera la composition du bâtiment on décrira et on justifiera ses valeurs, on détaillera les déficits et leur cause, et on fera des recommandations.

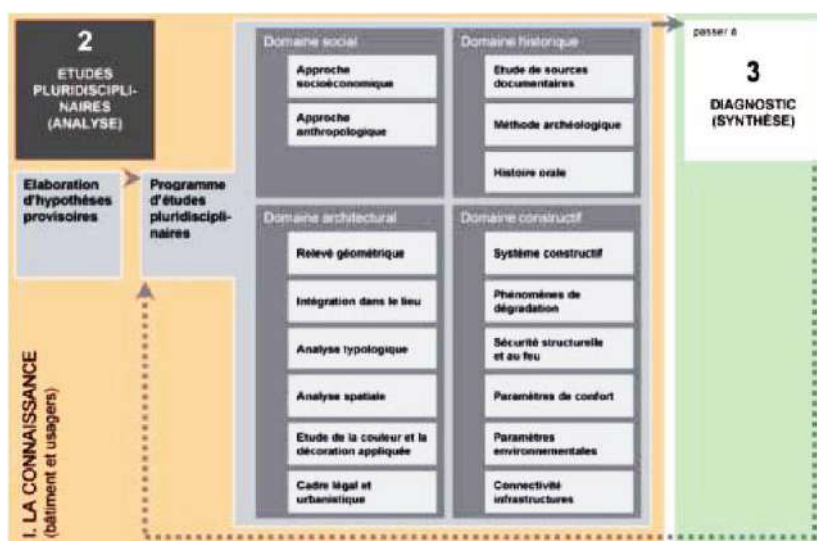


Figure 33:Etape 03 : Diagnostic de la méthode RehabiMed,2007

### Etape 4 : Réflexion et cadre de décisions

A travers cette <sup>38</sup>Etape, la réflexion va commencer par une étude de faisabilité des différents changements qui vont être apporté par la suite, pour en fin choisir un cadre de décision d=selon l'état de projet

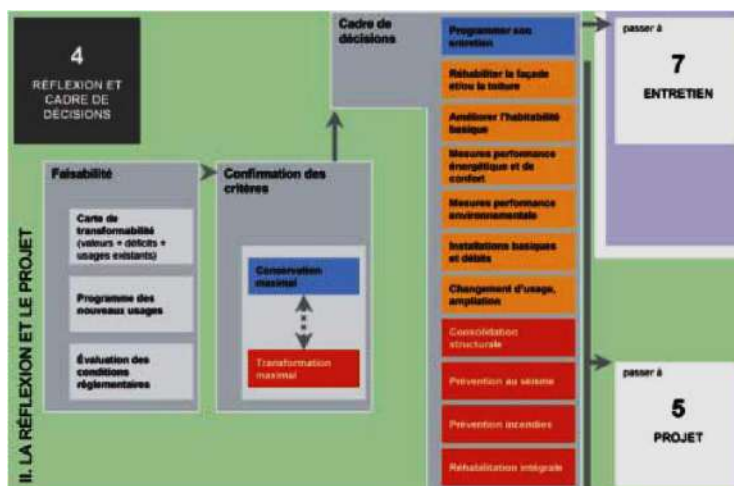


Figure 34::Etape4 : Réflexion et cadre de décisions de la méthode RéhabiMED,2007

### Etape 5 : Projet

<sup>37</sup> Ibid.

<sup>38</sup> Ibid.

Divisée en deux parties , l'avant-projet et le projet , et c'est là où on va fixer l'ensemble des démarches administratives et le choix des techniques de construction , il doit intégrer aussi les paramètres de durabilité qui seront raisonnables à l'échelle de l'intervention (mesure d'économie de l'eau, mesure d'économie énergétique , introduction des énergies renouvelables, introduction de facilités pour la gestion correcte des résidus domestique ,etc...) le projet doit prendre la documentation suivante : définition géométrique de la proposition avec cotes(étage, section , et élévation), plan de structure, plan des finitions, plans des installations , cahier technique , mesures, devis , cahier des charges et mesures d'hygiène et de sécurité.

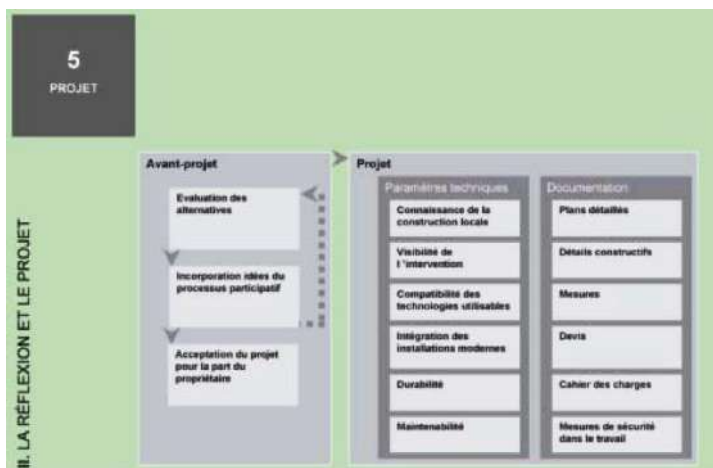


Figure 35:Etape5 : projet de la méthode RehabiMed,2007

### Etape 6 : Réhabilitation (les travaux)

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

D'autre part, on pourra difficilement parler d'opération <sup>39</sup>de démolition dans une réhabilitation mais plutôt de déconstruction ou de démontage car on doit repérer dès le début des travaux les éléments qui devront être démontés pour qu'ils soit réutilisés si les conditions permettent de faire (nécessités d'approvisionnement en tuiles, en poutres de bois, etc...)

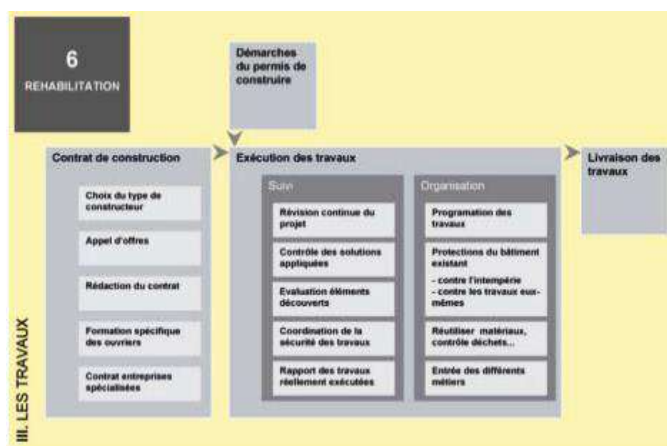


Figure 36:Etape6 : Réhabilitation (les travaux) de la méthode RehabiMed,2007

<sup>39</sup> Xavier CASANOVAQ et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Batiments.Barcelone,2007

## Etape7 : Entretien

Il est<sup>40</sup> important de fixer en avant une stratégie d'entretien pour un bâti ancien, pour lutter en permanence contre sa vulnérabilité importante .et si l'on fait l'effort de réhabiliter cette architecture, il faut profiter de l'occasion de promouvoir son entretien parce qu'à partir du jour même de la fin de la réhabilitation le bâtiment recommence à vieillir

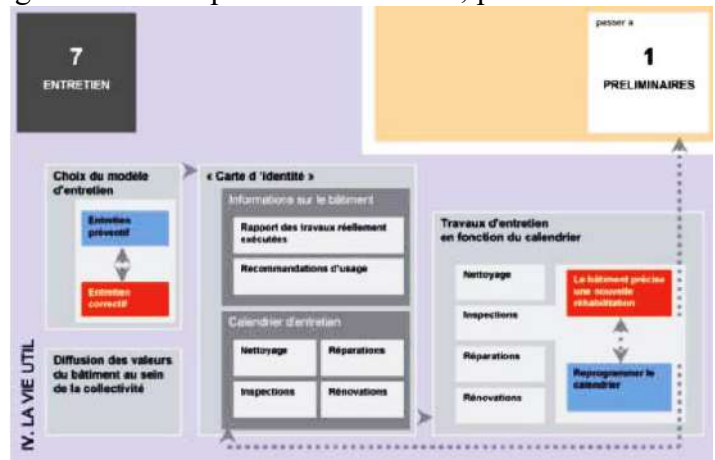


Figure 37:Etape7 : entretien de la méthode RehabiMed,2007

## III.15 Conclusion

D'après notre recherche dans la réglementation algérienne des constructions et les méthodes de réhabilitation des constructions existantes, on remarque l'absence de réglementation qui protège le patrimoine bâti vis-à-vis le risque sismique

<sup>40</sup> Xavier CASANOVAQ et al. Method RehabiMed Architecture Traditionnelle Méditerranéenne. Vol. II. Réhabilitation Batiments.Barcelone,2007

## **IV. La résilience : un concept pour la gestion des risques**

### **IV.1 Introduction**

Pour réduire les dommages des catastrophes, les ingénieurs <sup>41</sup>proposent depuis plusieurs siècles une stratégie qui vise à améliorer la résistance des sociétés face à un aléa. Ils calculent les magnitudes prévisibles de plus en plus précises de l'aléa, puis ils persuadent les responsables d'édifier un équipement de défense pour protéger la société. En suivant cette stratégie, ils ont fait construire des digues le long des fleuves, puis des barrages en amont, pour s'opposer aux inondations. Les mesures antisismiques relèvent aussi de cette approche, efficace quand il est possible de prédire l'impact de l'aléa. Mais, cette situation est exceptionnelle. de multiples raisons anéantissent souvent l'espoir de disposer de résultats précis, et donc de bien calibrer les ouvrages. il est alors envisageable d'adopter une autre stratégie fondée sur le concept de résilience. Cette seconde stratégie vise, non pas à s'opposer à l'aléa, mais à en réduire au maximum les impacts. Avant de détailler cette nouvelle forme de gestion de risque, il faut définir la résilience

### **IV.2 Définition de la Résilience**

Aptitude d'une organisation ou d'une société à se rétablir, voire à se renforcer après une crise. La résilience est consolidée par la prévention et la culture du risque.

La résilience désigne originellement la résistance d'un matériau aux <sup>42</sup>chocs ; (le « fait de rebondir », du latin *resilientia*, de *resiliens*), définition ensuite étendue à la capacité d'un corps, d'un organisme, d'une espèce, d'un système, d'une structure à surmonter une altération de son environnement.

Ce concept est utilisé dans plusieurs contextes :

- ❖ en écologie et en biologie, la résilience écologique est la capacité d'un écosystème, d'une espèce ou d'un individu à retrouver un fonctionnement ou un développement normal après avoir subi une perturbation écologique
- ❖ en physique des matériaux, la résilience est une propriété qui caractérise l'énergie absorbée par un corps lors d'une déformation (élasticité) et donc de résistance aux chocs, tractions, torsion, etc. architecture réseau à continuer de fonctionner en cas de panne .

---

<sup>41</sup> André Dauphiné et Damien Provitolo Dans *Annales de géographie* 2007/2 (n° 654), pages 115 à 125

<sup>42</sup> trésor de la langue française , à l'article Résilience.

### IV.3 « La conception résiliente » implique quand il s'agit de construire ?

Pour **concevoir un bâtiment avec résilience**<sup>43</sup> signifie lancer le processus de conception en pensant soigneusement les scénarios d'utilisation typiques du bâtiment, des points communs de stress dus à une utilisation normale, ainsi que les situations de catastrophes les plus probables dans l'environnement qui pourraient remettre en question l'intégrité de le bâtiment et / ou mettre en danger ses occupants. L'environnement local joue toujours un rôle essentiel dans la détermination des facteurs qui rendent un bâtiment résilient ou non. La conception résiliente est donc toujours spécifique à la localité.

#### IV.3.1 Résilience d'urgence et préparation aux catastrophes

Alors, comment pouvons-nous renforcer la résilience dans les bâtiments commerciaux ? La première étape consiste à examiner tous les scénarios de catastrophe possibles et probables, ainsi que toutes les sources de stress quotidien, puis à démarrer le processus de conception en tenant compte de toutes ces considérations.



Figure 38:dégâts Séisme de 2010 au Chili

#### IV.3.2 Considération sismique

En ce qui concerne les catastrophes naturelles dévastatrices, les tremblements de terre figurent en haut de la liste, mais beaucoup de gens ne se rendent pas compte que les dégâts sont en grande partie dus à des bâtiments mal construits et à des infrastructures défailtantes . Heureusement, il existe de nombreuses technologies et méthodes de construction nouvelles qui permettent aux bâtiments d'être de plus en plus ductiles et capables de résister à une activité sismique intense . Contrairement à ce que pourraient penser les profanes, la capacité d'une structure à fléchir et à absorber les vibrations est tout aussi importante que sa force en matière de conception antisismique

L'une des méthodes de construction sismiques les plus populaires est l' isolation de la base, ce qui est exactement ce que cela ressemble - découpler la base d'une structure du reste de l'immeuble afin que seule la base tremble lors d'un tremblement de terre, tandis que la superstructure reste intacte. Comme pour toute construction sismique, des joints de dilatation sont déployés à l'intérieur, entre et autour des structures pour permettre au bâtiment

<sup>43</sup> Resilient Building Design Is Resilience the New sustainability? Par Fehrenbacher,2013

de se déplacer sans dommage pendant l'activité sismique. Il y a des chances que vous n'ayez jamais vu de joint de dilatation auparavant, mais des centaines de milliers de personnes marchent dessus tous les jours sans s'en rendre compte en raison des couvre-joints de dilatation. Les couvre-joints de dilatation sont conçus pour donner un aspect homogène tout en dissimulant les interstices sous la surface du sol. Ces couvercles permettent le mouvement quotidien de la dilatation et de la contraction thermiques d'une structure, mais permettent également un mouvement beaucoup plus important lors d'événements sismiques. Les couvre-joints de dilatation sont conçus pour rester intacts pendant un événement sismique, pour permettre l'évacuation des occupants des bâtiments et, après un événement sismique, pour permettre un retour dans le bâtiment. Avant tout, une bonne conception parasismique aide non seulement un bâtiment à être résilient, mais protège également la vie de ses occupants.

Les tests sismiques peuvent <sup>44</sup>être utilisés sur des composants de bâtiments, des représentations de modèles et même des bâtiments entiers à l'échelle réelle pour déterminer leur résistance aux séismes. Une méthode courante pour tester la résilience sismique d'une conception consiste à utiliser une « table à secousses ». Il s'agit d'une plate-forme rectangulaire couplée à des actionneurs hydrauliques pour secouer la plate-forme de différentes manières et, par conséquent, tester des modèles structurels ou des composants de construction avec une vaste gamme de mouvements du sol simulés, y compris des reproductions de l'historique temporel des séismes.

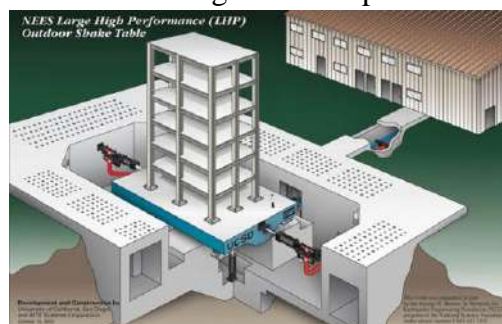


Figure 39: teste la résilience d'une maison en bois de 7 étages lors d'un tremblement de terre

<sup>44</sup> Resilient Building Design Is Resilience the New sustainability? Par Fehrenbacher

### IV.3.3 Résilience au quotidien et usure normale

En moyenne, un bâtiment commercial a une durée de vie de <sup>45</sup>73 ans, ce qui signifie que, pendant presque un siècle, de nombreuses structures commerciales verront des millions de pieds humains marcher à travers ses espaces. Les bâtiments véritablement résilients ne doivent pas seulement résister aux catastrophes naturelles, ils doivent également traverser des années d'utilisation constante et incessante. Alors, comment faire durer un bâtiment plus longtemps ? Les concepteurs doivent intégrer la durabilité au quotidien avec des enveloppes de bâtiment étroites et des finitions intérieures durables et nécessitant peu d'entretien.



Figure 40:enveloppe de construction durable

Comme nous l'avons vu, la conception résiliente est un paradigme complexe et multiforme qui implique une réflexion à long terme sur les pires scénarios de catastrophe, ainsi que sur une usure quotidienne plus courante. Bien que les variables qui contribuent à la résilience soient nombreuses et souvent complexes, la leçon à tirer est simple : les bâtiments doivent être résilients pour être véritablement durables. La photovoltaïque et les toilettes à faible débit ne sont pas suffisantes pour la « durabilité » : un bâtiment doit pouvoir résister à l'épreuve du temps. Comme l'architecte Carl Elefante a déclaré un jour: «Le bâtiment le plus vert est celui qui a déjà été construit». Notre objectif devrait donc être, en tant qu'architectes, de concevoir des bâtiments qui durent plus longtemps

---

<sup>45</sup> Base de données sur l'énergie des bâtiments, 2010, US DOE

## IV.4 La grande mosquée d'Alger : « mosquée conçue résiliente »

### IV.4.1 Système parasismique

Djamaa El Djazaïr a<sup>46</sup> été construit en respectant les paramètres modernes parasismiques pour sécuriser ce complexe islamique d'envergure grâce au génie parasismique. Puisque le site algérois où est implantée cette mosquée est le siège d'une activité sismique à cause de failles actives mises en évidence par les campagnes marines effectuées entre 2003 et 2005, le système parasismique de l'édifice religieux est conçu pour la zone III au vu de son aléa sismique élevé



Figure 41 :vue 3d de la mosquée d'Alger

Les groupements d'étude et de réalisation retenus pour Djamaâ El Djazaïr ont ainsi tous réalisé des grands projets dotés d'un système parasismique très développé

### IV.4.2 La salle de prière

Pour que l'ouvrage <sup>47</sup>résiste à un séisme majeur, c'est dans le sous-sol de l'imposante salle de prières qu'a été réalisé le dispositif clé de la résistance au tremblement de terre au travers d'un système d'isolation sismique composé de 250 isolateurs. Une technique « sans faille », conçue et testée « dans les grands » laboratoires du monde.

La Grande mosquée est en mesure de résister à un séisme majeur de 7,3 degrés sur l'échelle ouverte de Richter en utilisant une combinaison d'isolateurs et d'amortisseurs visqueux, en plus de toute une série de voiles en béton armé dans les deux directions nord, sud et est, ouest.

La salle de prières est reliée à la fondation par l'appareil appelé isolateur sismique qui transmet, quand le mouvement sismique se produit, la contrainte d'abord à la fondation avant d'atteindre la structure, tout en réduisant la force sismique deux à cinq fois

---

<sup>46</sup> <http://www.djazairess.com/fr/lesoirdalgerie/80061>

<sup>47</sup> <http://www.tsa-algerie.com/20160323/sur-le-chantier-de-la-grande-mosquee-dalger-entre-demesure-et-dernieres-technologies-parasismiques/>

### IV.4.3 Le Minaret

La conception du minaret a été faite sur la base d'une étude de micro zonage menée par le Centre national algérien de recherche appliquée en génie sismique (CGS)<sup>48</sup>.

Les études de sol ont permis de classer le site de Mohammadia en S2, c'est-à-dire un site bon, qui est ferme et vient juste après le site rocheux. Les études ont permis aussi de prouver qu'il n'y a pas de risque de liquéfaction ou de glissement de terrain, en cas de tremblement de terre, comme l'a confirmé le Laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC)<sup>49</sup>

Pour le minaret, une stratégie de défense différente contre les séismes a été choisie par les concepteurs du projet, qui ont « opté pour des fondations profondes avec barrettes profondes. Les fondations du minaret, il y a à partir du niveau zéro trois sous-sols sous forme de cage plus un radier solide et armé de trois mètres et des barrettes en forme de pieux rectangulaires qui sont au nombre de 60 qui descendent jusqu'à 47 m de profondeur, en plus du système de contreventement



Figure 42:le Minaret de la grande mosquée

### IV.5 Conclusion

Pour la lutte contre le risque sismique et la bonne protection du patrimoine bâti, on propose le concept de la résilience et ce concept c'est tout une stratégie de prévention vis-à-vis les séismes

<sup>48</sup> <http://www.cgs-dz.org/> archive

<sup>49</sup> <http://www.lnhc.dz/> [archive]

## V. Les outils de simulation numérique

### V.1 Introduction

Afin d'éviter tout dommage irréparable du patrimoine ancien lors du risque sismique, il faut se donner les moyens d'intervenir en amont

Notre vision doit donc répondre à deux objectifs principaux : offrir dans un premier lieu une analyse pertinente du comportement sous séisme d'une structure historique maçonnée même en premier approche, et donner des perspectives pour trouver des méthodes pour gérer le nombre important d'incertitude qui caractérise le diagnostic des édifices anciens. Pour ce faire, nous devons mettre la tache sur le domaine de modélisation numérique afin d'avoir une idée générale sur ce domaine pour comprendre le sens de la modélisation numérique, son principe de calcul et aussi son application dans le domaine du patrimoine et du bâti ancien.

La simulation numérique est utilisée pour :

- Prévoir l'état final d'un système connaissant son état initial (problème direct) ;
- déterminer les paramètres d'un système connaissant un ou plusieurs couples (état initial - état final) (problème inverse) ;
- Préparer des opérateurs à des conditions plus ou moins rares dans leur interaction avec un système complexe (simulation d'entraînement

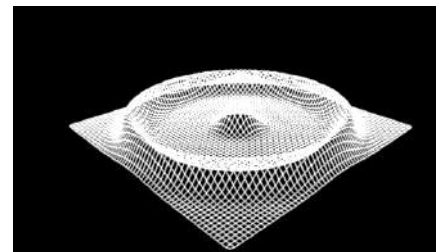


Figure 43: Imitation par ordinateur

### V.2 Quelques logiciels de Modélisation

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

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

50

- ANSYS
- Abaqus
- Robot Structure Analysis
- SAO2000

---

<sup>50</sup> Ibid.

### V.3 Robot structural Analysis

Robot Structural <sup>51</sup>Analysis, est le premier logiciel d'analyse de structure bâtiment labellisé Autodesk depuis son acquisition de l'éditeur Robobat l'année dernière. Un outil qui s'inscrit dans la démarche BIM chère à l'éditeur de Revit

Le logiciel Auto desk Robot Structural Analysis (nommé Robot dans le fichier d'aide entier) est un progiciel CAO/DAO destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.



Il utilise la méthode d'analyse par éléments finis pour étudier les structures planes et spatiales de type :

- Treillis.
- Portiques.
- Structures mixtes.
- Grillages de poutres.
- Plaques.
- Coques.
- Contraintes planes.
- Déformations planes.
- Éléments axisymétriques.
- Éléments Volumiques

Le système Robot regroupe plusieurs parties (modules) spécialisées dans chacun des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calculs de la structure, dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement.

### V.4 Relevés tridimensionnels par scanner laser 3D



Figure 44:photo du scanner laser 3d

<sup>51</sup> Robot structural Analysis Professional. AUTODESK.  
[www.autodesk.com/products/robot-structural-Analysis/overview](http://www.autodesk.com/products/robot-structural-Analysis/overview).

La collecte de données 3D à l'aide d'un scanner laser et la technologie de numérisation offre de nombreux avantages économiques et techniques pour la conception, la construction et l'exploitation d'installations industrielles. Elles réduisent les risques d'erreur, augmentent de manière considérable la qualité des mesures et données d'entrée, limitent les temps nécessaires aux relevés par les méthodes traditionnelles

Cette solution est idéale pour la conception, la construction, la restructuration et l'agrandissement d'installations techniques et industrielles complexes.

Le relevé laser 3D permet un relevé :

- D'un bâtiment
- De façades
- De rue
- D'une usine ou d'un site industriel

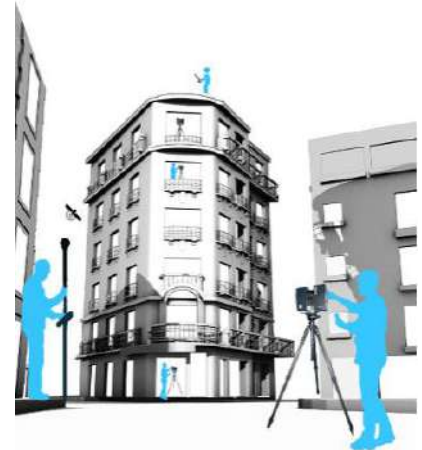


Figure 45:scanner laser de l'extérieur

### V.4.1 Objectifs

- Modéliser les installations tel que construit
- Intégrer le futur dans l'existant
- Naviguer virtuellement dans les installations

### V.4.2 Application <sup>52</sup>

Milieux industriel



Figure 46:scanner laser de l'intérieur

- Insertion de nouvelles unités
- Modification d'installation
- Maquette virtuelle pour formation

### Pièce mécanique

- Contrôle de pièce de précision (déformations, usures)

<sup>52</sup> Scanner laser 3D : reconnaissance de forme et modélisation de déformation, Matthieu Dujardin

### Génie civil

- Recalage de la maquette BIM par rapport au réel et mise à jour des plans en cours de construction
- Calcul de volume et de quantités (terrassement, béton)

### Architecture

- Intégration de projets dans le réel
- Sauvegarde le patrimoine
- Il peut demeurer nécessaire d'effectuer ce type de relevé dans le but de préserver des objets ou constructions faisant partie intégrante de notre patrimoine

#### **V.4.3 Offre maquette 3D<sup>53</sup>**

Laser scanning 3D : fourniture d'un nuage de point

- Naviguer dans le nuage
- Visualiser l'environnement
- Mesurer des distance

Création d'un viewer panoramique : fourniture d'une adresse serveur pour accéder aux nuages de points

- Naviguer de vues bulle en vues bulle
- Mesurer des distances
- Annoter avec des « tag »
- Lier les « tag » à une base documentaire

Le relevé laser<sup>54</sup> possède des atouts évidents pour le relevé d'objets architecturaux. En quelques minutes, il est en effet possible de relever des millions de points 3D avec précision. L'inconvénient majeur de cette méthode reste cependant le temps nécessaire à la modélisation à partir des nuages de points Les résultats du scanner laser 3d se traite avec le logiciel Scene



<sup>53</sup> Scanner laser 3D : reconnaissance de forme et modélisation de déformation, Matthieu Dujardin

<sup>54</sup> Relevé du patrimoine architectural par relevé laser, vision par ordinateur, et exploitation des règles architecturales, Fabien Dekyser, François Gaspard, Livio de Luca, Michel Florenzano, Pascal Leray

### V.5 Les fonctions du logiciel SCENE

**Numérisation haute résolution de cibles lointaines :** SCENE est compatible avec la nouvelle fonctionnalité de numérisation à distance d'une zone spécifique, nécessitant une numérisation laser en plus haute résolution, soit pour permettre la reconnaissance de cibles lointaines soit pour numériser de plus petites zones en plus haute définition

**Export d'images panoramiques haute résolution :** SCENE permet dorénavant d'exporter des images panoramiques en haute résolution, même à partir de données numérisées à faible résolution. En plus d'un gain de temps, les utilisateurs n'ont pas besoin d'équipements supplémentaires sur site, tels qu'un appareil photo numérique

**Une visualisation en mode Réalité Virtuelle qui fait son effet :** La fonction Réalité Virtuelle permet de visualiser les projets de nuages de points en détails. Les utilisateurs peuvent choisir entre les casques de réalité virtuelle Oculus Rift et HTC Vive pour une vue et une exploration immersive du site, comme s'ils y étaient, depuis leur bureau.

**Recalage sur site en temps réel :** Le logiciel SCENE dispose d'une fonctionnalité de recalage sur site qui permet de transmettre sans fil les données 3D numérisées vers un appareil mobile ou une station de travail sur place, de les traiter, de les aligner et de les recalibrer en temps réel

### V.6 Quelques résultats de cette technique<sup>55</sup>

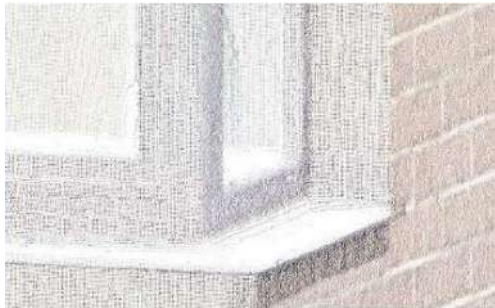


Figure 47: Résultats de la modélisation présentant le nuage de points, le modelé texturé et le modèle filaire

<sup>55</sup> Relevé du patrimoine architectural par relevé laser, vision par ordinateur, et exploitation des règles architecturales, Fabien Dekyser, François Gaspard, Livio de Luca, Michel Florenzano, Pascal Leray

La documentation fiable est une condition <sup>56</sup>nécessaire pour une planification efficace autour des bâtiments existants. Pour la rénovation, le relevé géométrique est une étape essentielle au cours des phases de pré projet, pour l'élaboration des objectifs détaillés, pour la conception des interventions, pour le suivi du chantier ou encore pour la mise en service. Quand il s'agit de gestion, il est parfois utile de suivre l'évolution de données géométriques d'un composant, bâtiment, ou quartier au cours du temps ou simplement de pouvoir le situer spatialement dans un ensemble plus grand. La technique de relevé traditionnelle est basée sur l'évaluation de points discrets à la surface d'un objet.

Cette méthode fournit des informations très fidèles à la réalité mais sa mise en œuvre peut s'avérer fastidieuse si l'on veut accroître le niveau de détail sur la façade. Face à cette



c

technologie aujourd'hui mature, des méthodes de mesure tridimensionnelle avancées sont apparues et peuvent répondre à des besoins plus spécifiques. La numérisation à haute définition permet en effet de

b



relever des millions de points sur la surface d'un objet, de manière très précise.

a



<sup>56</sup> Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellefont.

Figure 48: Nuage de points obtenu à l'aide d'un relevé au scanner laser : (a) vue générale du site; (b) zoom partiel sur une partie du bâtiment; (c) zoom partiel sur un élément architectural.

### V.7 Objectifs d'une étude HDS

La numérisation <sup>57</sup>haute définition du bâtiment offre des opportunités gigantesques pour le secteur de la construction. Les architectes, entrepreneurs et bureaux d'étude sont concernés en première ligne mais aussi les gestionnaires à différents niveaux, depuis ceux en charge de la gestion d'un bâtiment unique jusqu'à ceux traitant des politiques d'aménagement du territoire. Le secteur du patrimoine n'est bien sûr pas en reste, avec les multiples applications en termes de diagnostic ou simplement d'inventaire

Au niveau de l'information délivrée, le grand avantage de l'HDS se trouve d'abord dans le niveau de détail géométrique inédit qui y est associé. Interconnectée à cela, une information texturale précieuse peut être générée, qui serait impossible à obtenir avec le relevé à la station totale. Bien que de simples photos permettent déjà un relevé de texture au niveau des couleurs, on parle bien ici d'un relevé textural complet, où des niveaux RGB sont associés à une micro géométrie – une sorte de « toucher virtuel » du bâtiment.

#### V.7.1 Numériser pour comprendre un bâtiment ou une partie de celui-ci

Un modèle à haute résolution contient énormément d'information qui est capturée en une seule fois et est consultable à souhait par la suite. L'exhaustivité des données géométrique et la possibilité de combiner des scans intérieurs et extérieurs peuvent permettre de mieux cerner un édifice ou un site existant : agencement des structures, des volumes, etc.



Figure 49: Modéliser une maquette topographique BIM à partir d'un relevé au scanner laser.

<sup>57</sup> Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellefont,

La mesure HDS permet de prendre de la distance et donc aussi d'accéder à des informations qui ne sont peut-être pas immédiatement visibles pour l'observateur sur place. Le relevé par drone est par exemple de plus en plus utilisé pour le relevé de sites archéologique.

### V.7.2 Numériser pour mesurer, diagnostiquer et évaluer

C'est l'utilisation la plus<sup>58</sup> fréquente des relevés haute définition. D'abord, la précision et l'exhaustivité des données géométriques permettent d'effectuer un grand nombre de mesures dimensionnelles, sans nécessité de multiplier les allers-retours sur site. L'expert pourrait également effectuer différents diagnostics à partir du relevé HDS : évaluation des déformations, mise en évidence de pathologies, et. L'évaluation rapide de l'avancement d'un chantier ou des dégâts matériels sur un site sinistré sont d'autres exemples types.

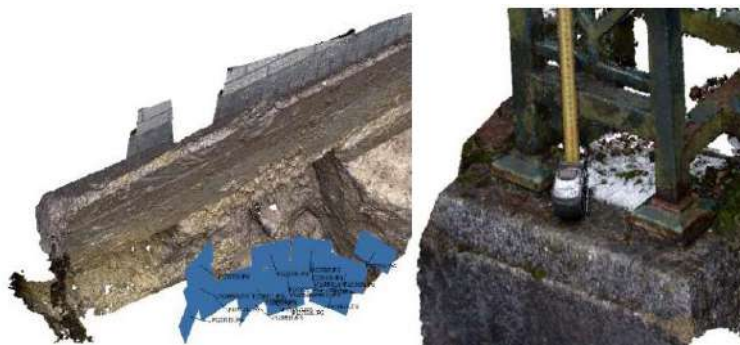


Figure 50: Numérisation 3D d'éléments architecturaux au moyen d'une étude photogrammétrique : (a) photo à droite : fondation après une excavation ; (b) photo à gauche : ancrage d'un portail métallique.



Figure 51: Étude pour l'évaluation rapide de dégâts.

### V.7.3 Numériser pour contrôler

<sup>58</sup> Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellefont,

Obtenir une<sup>59</sup> représentation précise de l'existant permet également de contrôler certains aspects Géométriques. Il peut s'agir par exemple d'un contrôle sur chantier en cours de rénovation. De cette manière d'éventuels défauts d'exécution peuvent être facilement identifiés et leurs conséquences peuvent être anticipées. Pour des projets importants, où de telles requêtes viendront à être répétées, on peut également prévoir un processus systématique et régulier de contrôle, via une maquette BIM par exemple. Toujours dans l'idée de contrôle, les scans HDS offrent également la possibilité de vérifier si la documentation disponible sur l'existant est fiable (Figure 28). Pour les industriels, les possibilités de contrôle qualité sur les lignes d'assemblage constituent un dernier exemple évident

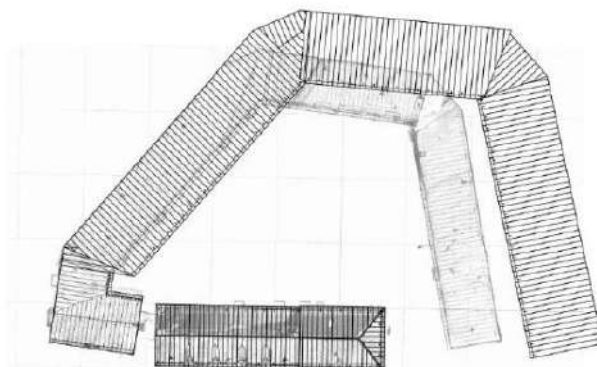
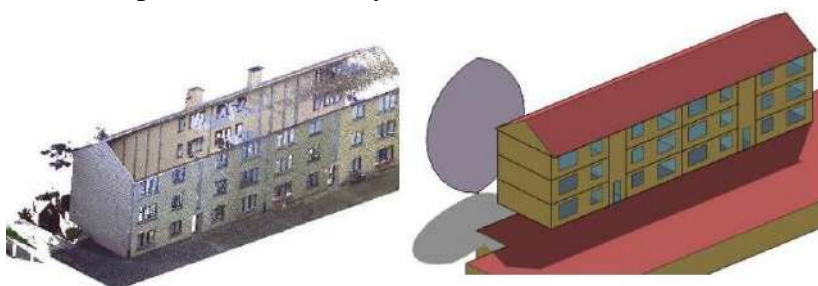


Figure 52: Comparaison entre un tracé de toiture sur base du relevé HDS et la documentation

### V.8 Les HDS pour des simulations numériques

Les scans à haute définition peuvent servir à mettre en place de nombreux types de simulations numériques. De manière simple, il est possible par exemple de créer un modèle BES (Building Energy Simulation, Figure 38) qui permet la simulation dynamique d'échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement. Il s'agira alors typiquement d'une modélisation géométrique simple réalisée sur base du nuage de points. Une modélisation plus précise, sous la forme d'un maillage, ouvre la voie aux simulations à éléments finis qui peuvent servir à transcrire toute une série de phénomènes physiques (analyse structurelle, analyse HAM (Heat, Air and Moisture), analyse CFD (Computational Fluid Dynamics), etc.).

Figure 53: Utilisation du fichier HDS pour générer facilement un modèle BES



<sup>59</sup> Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellefont,

### V.9 Le « Scan-to-BIM »

Intégrer des informations<sup>60</sup> géométriques précises sur l'existant dans un modèle BIM est rapidement devenu une réalité, grâce au développement de technologies HDS plus accessibles et de meilleures fonctionnalités d'importation dans les logiciels de modélisation BIM. Un grand nombre d'applications est possible à partir de ces nuages de points au sein d'un processus BIM.

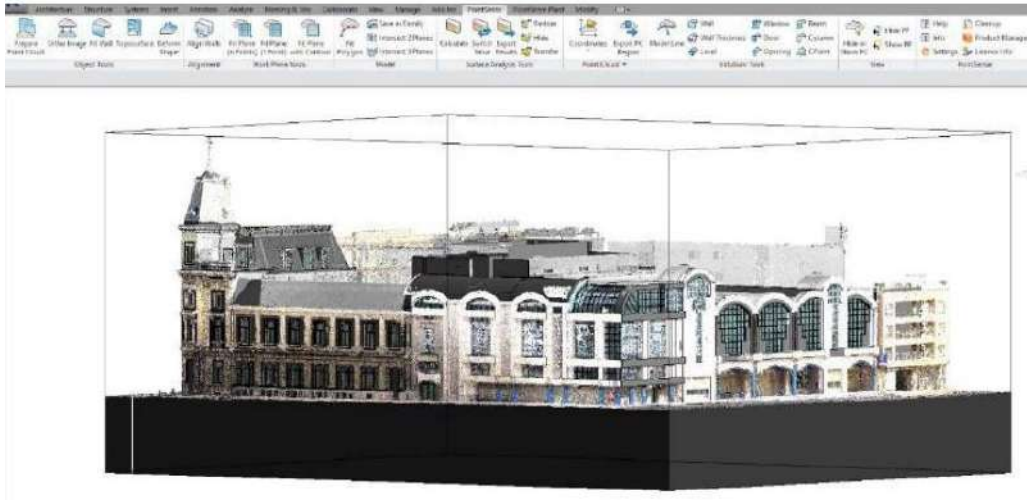
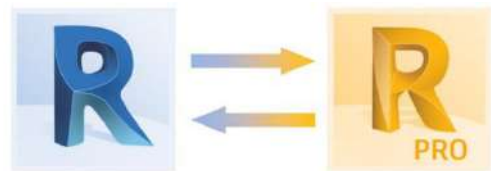


Figure 54: Modèle d'une maquette BIM à partir d'un relevé au scanner laser. Les deux informations coexistent dans le logiciel BIM

### V.10 Intégration Revit – Robot

L'outil **Intégration avec Robot Structural**

**Analysis et Intégration avec Revit** permet l'échange de données bidirectionnelles entre Autodesk® Robot™



Structural Analysis Professional (Robot) et Autodesk® Revit® (Revit)

Vous pouvez l'utiliser pour :

Transférer un <sup>61</sup>modèle de structure de Revit vers Robot ou de Robot vers Revit

Mettre à jour un modèle de la structure dans un programme après effectué des modifications dans le modèle dans un autre programme

Transférer les résultats de l'analyse statique et du ferrailage théorique générés dans Robot vers le modèle Revit

<sup>60</sup> Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellemont,

<sup>61</sup> Integrating Autodesk Revit and Autodesk Robot Structural Analysis Professional par Tomas Fudala

Cet outil vous permet<sup>62</sup> de travailler sur une partie de modèles de structure volumineux. Vous pouvez charger une structure entière dans un programme, en sélectionner une partie et transférer cette partie vers un autre programme.

Vous pouvez également enregistrer votre modèle au format de fichier intermédiaire (SMXX) dans Robot ou Revit. Vous pouvez utiliser le fichier SMXX pour échanger des données entre des programmes sur différents ordinateurs.

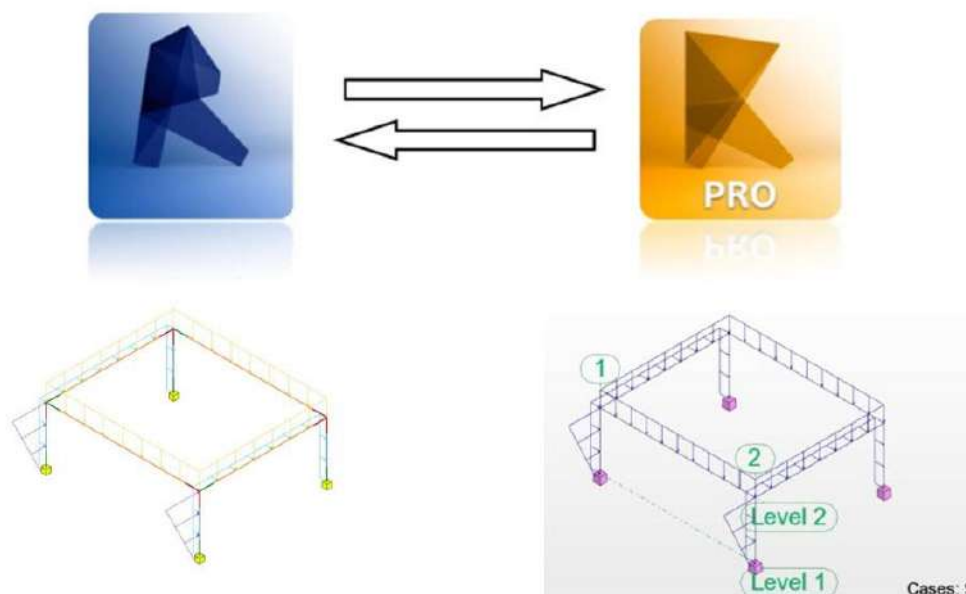


Figure 55: importer de revit vers robot et l'inverse

### V.11 Conclusion

Pour l'étude de la résilience d'un patrimoine bâti, on propose le logiciel robot structurel Analysis pour l'étude du comportement de la structure du bâti, et le scanner laser 3d pour un relevé tridimensionnel de ce dernier soumis à plusieurs risques sismiques.

---

<sup>62</sup> Integrating Autodesk Revit and Autodesk Robot Structural Analysis Professional par Tomas Fudala

### **VI. Technique de renforcement structurel**

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

La connaissance des ouvrages structure d'un bâtiment est une phase primordiale avant d'entamer un diagnostic structurel de ce dernier, elle permet de donner une première aide sur le type de comportement structurel qui présenter le bâtiment

#### **VI.2 La maçonnerie**

##### **VI.2.1 Définition**

Le terme maçonnerie désigne un assemblage de plusieurs matériaux de même genre ou de genre déferents, naturel ou artificiel, de taille plus ou moins importante, lié par du mortier, ou encore simplement posé à sec sans liant. « Ces assemblages forment les parois verticales des ouvrages appelés murs ou réalisent des surfaces courbes ou gauche appelées voutes »<sup>63</sup>

#### **VI.3 Type de maçonnerie**

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

##### **VI.3.1 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 ». Un mur en pisé doit être protégé <sup>64</sup>face aux remontée capillaires par un soubassement en maçonnerie en pierre, aussi.il doit être protégé de l'action de la pluie par un enduit de mortier ou par le débord du toit du bâti



Figure 56: maison traditionnelle en pisé

<sup>63</sup> Jacques Fredet et Jean-Christophe Laurent, Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens, groupe Moniteur paris 2013, p290

<sup>64</sup> Ibid.

### VI.3.2 La maçonnerie de pierre de taille

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

### VI.3.3 La maçonnerie de libage

Le libage est un moellon de fort échantillon dont les lits ont été taillé, 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 comme chaînage ou sommier dans des maçonneries très ordinaires, entièrement en moellon

### VI.3.4 La maçonnerie en moellon

La maçonnerie en moellon<sup>65</sup> ou limousinage est réalisée avec des pierres appelées moellons, dont les dimensions sont telles qu'un homme peut les soulever et les transporter facilement, elle est classée suivant la dureté et la résistance de la roche d'origine, on distingue :



Figure 57: mur en moellon

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 facile à tailler, qui sont employés pour la partie haute des ouvrages et pour réaliser des parements parfaitement dressés à peu des frais

Le principal défaut des maçonneries de moellon provient de cette hétérogénéité entre les parements et la maçonnerie de blocage que constitue le remplissage central. Du fait de la grande plasticité des mortiers utilisés, le noyau central se tasse plus que les parements, ce que peut entraîner 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 appelé « bouclage », ce qui est très préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage

---

<sup>65</sup> Joseph Mathieu Sganzin. Programmes ou résumés des leçons d'un cours de construction : avec des applications tirées principalement de l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées, conformément au système d'enseignement adopté par le Conseil de perfectionnement de l'an 1806. Courcier, 1821

### **VI.3.5 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

## **VI.4 Mode d'intervention sur le patrimoine bâti**

### **VI.4.1 La restauration**

Selon<sup>66</sup> Viollet-le-Duc « restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir ou le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné ». 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 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 »

### **VI.4.2 La conservation**

La conservation du patrimoine architectural traite des questions de la prolongation de la vie et de l'intégrité architecturale, c'est-à-dire la forme<sup>67</sup> et le style, et/ou ses matériaux constitutifs tels que la pierre, la brique, le verre, le métal et le bois. En ce sens, le terme se réfère à « l'utilisation professionnelle d'une combinaison de la science, de l'art, de l'artisanat, et de la technologie comme un outil de conservation »<sup>1</sup> et est allié avec ses champs apparentés de la conservation de l'environnement historique et la conservation de l'art.

### **VI.4.3 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, les réparations mineures et de remise en état, le remplacement des matériaux endommagés ou détériorés qu'il est possible de sauvegarder. Il contient trois catégories :

---

<sup>66</sup> Viollet-le-Duc, Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11<sup>ème</sup> au 16<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup> tome, A ; Morel, Paris

<sup>67</sup> Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments historiques et des sites (Charte de Venise 1964), art 9

### **VI.4.3.1 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

### **VI.4.3.2 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

### **VI.4.3.3 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

## **VI.4.4 La réhabilitation**

La réhabilitation <sup>68</sup>du bâti ancien s'inscrit dans un double dynamique. Il s'agit à la fois d'améliorer le bâti ancien, de le transformer pour l'adapter aux exigences contemporaines et de revaloriser son image, pour faire de ce qui était autrefois un bâti rural ordinaire un élément digne d'être conservé et valorisé

Ce bâti, qu'il soit rural ou urbain, à vocation agricole ou résidentielle, ouvrier ou bourgeois, public ou privé, est en effet avant tout un bâti en usage, perpétuellement soumis à des modifications, adaptations et reconstructions. De plus, à mesure que la catégorie de « patrimoine » s'impose à ce bâti et qu'un intérêt croissant lui est porté du fait du caractère soutenable de l'architecture vernaculaire et des matériaux qui la composent, il est appelé à être mis en valeur, rénové ou réhabilité. Il apparaît cependant complexe de le « conserver » ou de le « restaurer » comme on le ferait d'un patrimoine monumental classé, encore moins d'y appliquer des mesures de protection strictes.

## **VI.4.5 La rénovation**

La rénovation désigne les opérations <sup>69</sup>par lesquelles un bâtiment ou l'un de ses éléments voit sa condition améliorée, par l'utilisation de matériaux neufs, modernes en remplacement des parties endommagées ou obsolètes. Le plus souvent il s'agit d'une construction neuve après démolition totale. Cette démolition fait différer la rénovation de la restauration, remise en l'état initial, et de la réhabilitation, qui a pour but de rouvrir un lieu fermé, ou ouvert mais pas aux

---

<sup>68</sup> AIT HAMOUDA Ibrahim, LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI EN ALGERIE. Mémoire de magister, Facultés d'architecture et de Génie civil, Oran, Algérie, 2013

<sup>69</sup> Un nouveau label pour la rénovation responsable ; Environnement magazine, 18/07/2017

normes les plus récentes. Une rénovation fait parfois partie d'un plan de reconversion ou de restructuration.

Une rénovation bien pensée et bien conduite peut considérablement améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment (voire le rendre positif en énergie, et éventuellement intégrer une dimension biodiversité/puits de carbone et adaptation au changement climatique. Mais elle est aussi source de flux de matériaux, d'énergie, d'eau et de déchets pouvant être plus ou moins bien gérés. Mi-2017 Promotelec a lancé un nouveau « Label rénovation responsable » pour valoriser l'impact carbone de l'exploitation du bâtiment ; complétant le label « Label énergie positive et réduction carbone E+C » qui prend en compte l'impact carbone dans la construction neuve

### **VI.5 Technique de renforcement structurel**

#### **VI.5.1 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

structure, et même l'introduction de<sup>70</sup> nouveaux éléments, donc, il est une opération qui concerne les parties sous-dimensionnées, résultat de l'analyse théorique

#### **VI.5.2 Renforcement des murs en maçonnerie**

Renforcement par des tirants

Les tirants<sup>71</sup> 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'écartement entre les murs

---

<sup>70</sup> Hamid AZZOUZ, dossier : faire face aux risques majeurs en ville, Revue vie de ville, p66

<sup>71</sup> César DIAZGOMAZ, outil8 : les techniques de réhabilitation : renforcer les structures, la réhabilitation des éléments structurels de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, p301

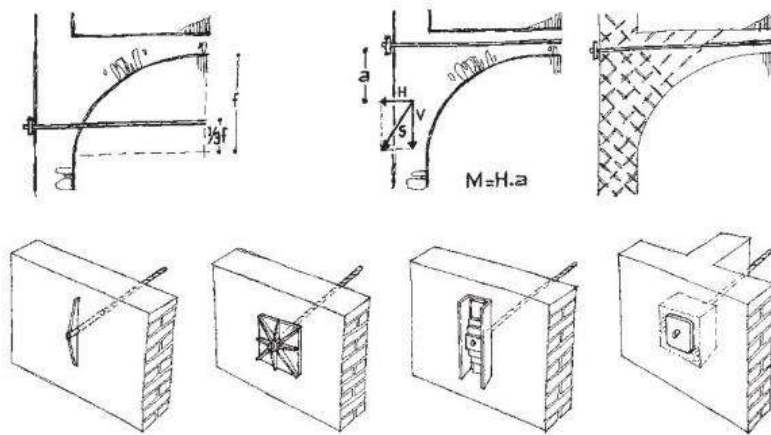


Figure 58:renforcement par des tirants

### VI.5.3 Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé

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

### VI.5.4 Le chaînage

Le chaînage est un système ancien de renforcement. Le fer et l'acier sont les matériaux employés depuis longtemps pour fabriquer les éléments de chaînage : ceinture ou courroies

Plus récemment, les bandes en fibre en carbones remplissent la même fonction dans certaine situation

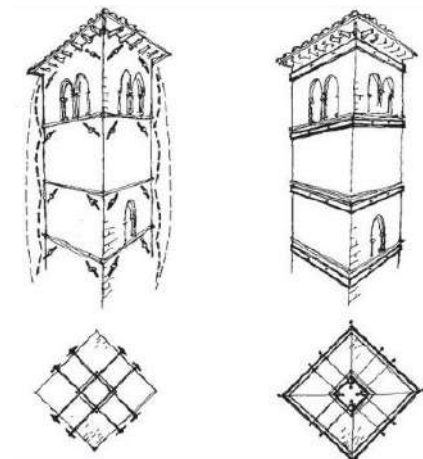


Figure 59:chaînage

### VI.5.5 Taxidermies avec des barres d'acier

C'est un système <sup>72</sup>de renfort intégral, il consiste à mettre en œuvre des armatures en aciers à l'intérieur des murs, pour augmenter leur capacité de résistance globale ou créer des zones plus rigide, capable de distribuer de manière homogène les sollicitations descendantes

<sup>72</sup> Ibid.

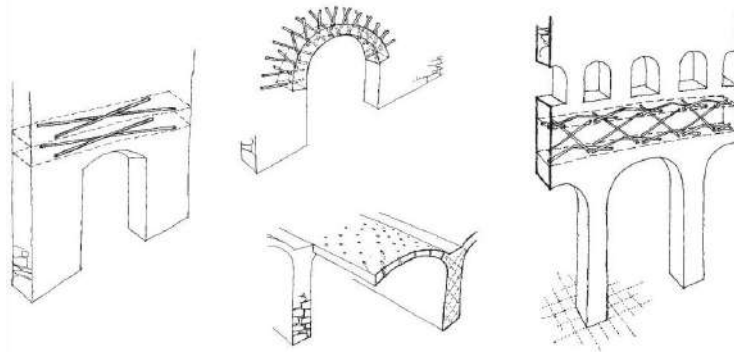


Figure 60:taxidermies avec des barres d'acier

### VI.5.6 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

Renforcement des <sup>73</sup>planchers

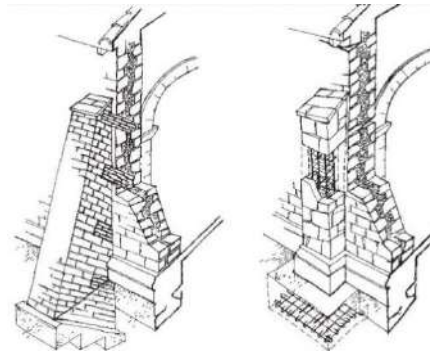


Figure 61:contreforts

### VI.5.7 Augmentation de la résistance pour les poutres et les poutrelles

Lorsqu'on juge à travers une analyse théorique que les éléments qui vont collaborer à l'absorption des efforts appliqués sur la poutre ou les poutrelles. Les matériaux de renfort utilisés sont généralement en bois où ils sont constitués en profilé en acier

### VI.5.8 Montant intermédiaires

La technique consiste à réduire les tensions de flexion introduite par des 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

La possibilité d'obtenir de bonnes conditions d'appui pour le montant est généralement décisive dans le choix de la solution

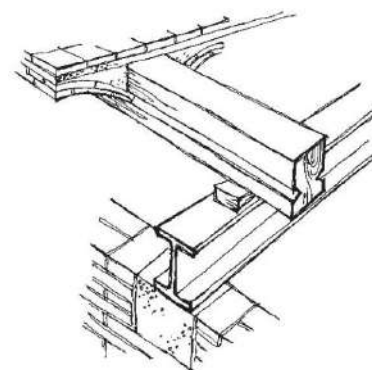


Figure 62:Montant intermédiaires

<sup>73</sup> Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (A.N.A.H.). Les planchers anciens, éditions du Moniteur, 1979, Paris

### VI.5.9 Interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes des couvertures

Alors que, selon l'état de ces éléments, il est généralement conseillé de les remplacer, dans la mesure où ils sont les<sup>74</sup> plus exposés aux effets de l'humidité, il arrive aussi que l'on préfère envisager de les renforcer. C'est le cas lorsque leur état général le permet, selon leur importance ou leur intérêt fonctionnel. Bien entendu, le remplacement fonctionnel des appuis et leur régularisation par une disposition, si possible, sur un linteau de décharge rigide pour distribuer au mieux les charges transmises aux murs sont des opérations souvent nécessaires et recommandables. Pour le renfort des paires, tirants et contre-fiches, que l'on ne veut pas masquer, on emploie de plus en plus des armatures post contraintes pour compenser les tractions ou créer de nouveaux équilibres de forces.

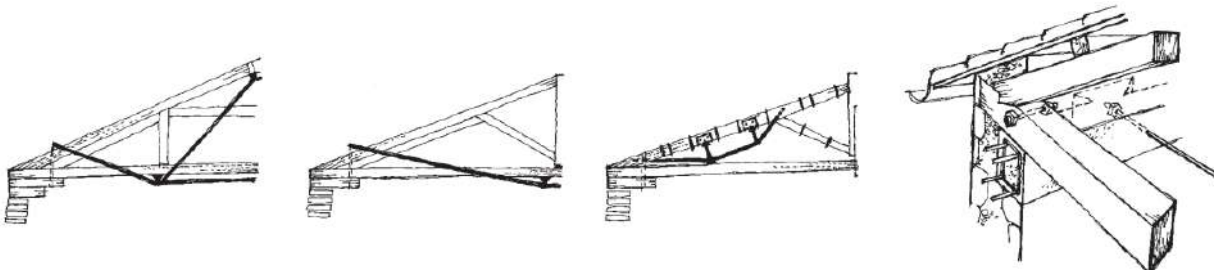


Figure 63: interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes

### VI.5.10 Interventions spécifiques sur les arcs, les voûtes et les coupoles

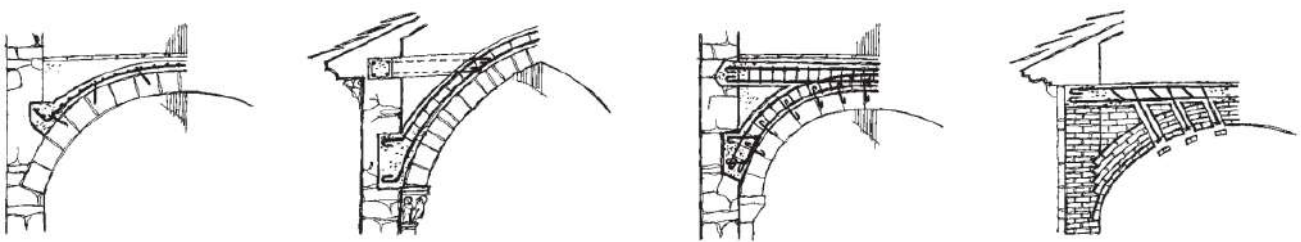


Figure 64 : intervention spécifique sur les arcs, les voutes et les coupoles

## VI.6 Exemples de solution de renforcement

Mise à niveau sismique de bâtiments à Berkeley<sup>75</sup> (USA)

<sup>74</sup> César DIAZGOMAZ, outil8 : les techniques de réhabilitation : renforcer les structures, la réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, p306

<sup>75</sup> Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme, par le groupe AFPS-CSTB, mars 2013

A la fin des années 1990, un projet de mise en niveau sismique de plusieurs bâtiments de l'université de Berkeley et de certains bâtiments de la ville de Berkeley a été effectué. Il a conduit à la mise en œuvre de différentes solutions de renforcements adaptés à la typologie des bâtiments concernés.

Quelques-unes sont présentées ci-après et illustrées par des photographies.

### ➤ **Bibliothèque de Berkeley**

Ce bâtiment en pierre taillée date du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'objectif est de conserver l'architecture de cet ouvrage.



Figure 65 : bibliothèque de Berkeley

En conséquence, la solution retenue a été de mettre en place sous le bâtiment des appuis parasismiques associés à des amortisseurs. Ce choix a nécessité de réaliser de gros travaux en sous-œuvre. Par ailleurs, des tirants ont permis d'assurer un monolithisme à la structure.



Figure 66: puis sismique

Bâtiment de l'université (rez de chaussée ouvert et deux niveaux supérieurs avec encorbellement)

### ➤ **Renforcements à la suite du séisme d'Epagny (France)**

A la suite du séisme d'Epagny, plusieurs réhabilitations de bâtiments ayant subi des dommages ont été entreprises.

Quelques exemples

sont présentés ci-après :

Bâtiment crèche de Metz-Tessy.

Extérieurement,

ce bâtiment en maçonnerie avait quelques dommages dont la chute d'un fronton en pierre situé à la hauteur du comble en toiture. Par ailleurs, plusieurs désordres intérieurs (chute d'enduits et fissuration de cloisons) ont été constatés.

La réhabilitation a consisté en la réalisation de chaînages horizontaux (au niveau du plancher et de la toiture) et verticaux, la mise en place de tirants suivant deux directions horizontales et un renforcement des planchers (1<sup>er</sup> étage).

### ➤ Lycée Berthollet (R+2)<sup>76</sup>

Ce bâtiment comporte des murs en maçonnerie(pierre), des planchers à ossatures bois et une charpente de toiture en bois.il n'est pas chaîné et sous l'action du séisme les murs se sont déplacés (écartement des murs de façade par rapport aux mur de refends) conduisant à une fissuration des cloisons et à des chutes de zones de plafond de plâtre sur un lattis en bois. Une première réhabilitation conservatoire a été réalisée par la mise en place de tirants en tête des murs sous planchers et une injection des fissures

### **VI.7 Conclusion**

Dans le cas d'un bâtiment non résilient face aux risques séismiques , le renforcement structurel est permis les étapes de la stratégie de rendre un bâtiment résilient , et pas une solutions toutes seul

---

<sup>76</sup> Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme, par le groupe AFPS-CSTB, mars 2013

## VII. Choix du cas d'étude : mosquée aux cent colonnes Cherchell

### VII.1 Introduction

A la fin du 15<sup>e</sup> siècle et au début du 16<sup>e</sup>, la ville de Cherchell connut deux événements qui allaient faire date dans son histoire millénaire : l'arrivée, étalée sur plusieurs années après la chute de Grenade, en 1492, d'un grand nombre de familles et sa prise par les turcs en 1514.

Couplés l'un à l'autre, ces deux événements allaient être à l'origine de sa renaissance après plusieurs siècles de léthargie. Cherchell connut alors un développement de ses activités économiques, grâce notamment, au savoir-faire des 1200 familles andalouses qui s'y étaient installées, et une notable extension de son périmètre urbain. C'est de cette époque que date, en effet, Ain K'siba, un ensemble d'habitations (généralement à deux niveaux) de style mauresque, situé au centre-ville actuel. Une époque qui a vu également la construction de plusieurs édifices, les uns à caractère militaire, telle la forteresse (le fort turc), complètement détruit à la veille de la seconde guerre mondiale par les autorités coloniales.

Ce sont les frères Arouj et Khair-Eddine Barberousse, qui en prenant le pouvoir à Alger et après en avoir éliminé le maître d'alors, le cheikh Salim Ettoumi, érigèrent<sup>77</sup> cette forteresse, en 1518.

L'endroit choisi fut encore-haut du Cherchell pour protéger la ville et ce dernier contre les velléités agressives des états chrétiens d'Europe.

Et les autres, à caractère religieux. Le plus célèbre de ces derniers édifices est : Djamaa El Kebir.

---

<sup>77</sup> Cherchell : la mosquée aux 100 colonnes une merveille architecturale par Mohamed-Amine Hourri ,2012. EPAU

## VII.2 Présentation de La ville de Cherchell « Caesarea »

Sur le littoral, à environ cent kilomètres à l'ouest D'Alger se situe la ville de Cherchell

Un plateau peu élevé, dont la bordure a été déchirée par les flots, s'allonge Parallèlement au rivage

La ville est dominée au sud par une suite de<sup>78</sup> colline verdoyante et plus loin par des montagnes confuses habitées par la tribu des Beni –Menasser. Au Nord, la mer bleue s'étend jusqu'aux limites de l'horizon, car sur une vingtaine de lieux, la cote est presque rectiligne, flanquée d'énormes piliers, qui sont, au levant le CHENOUA



Figure 67:vue aérienne de Cherchell

Le sol y est fertile, le climat doux, salubre et rafraichi en été par la brise marine



Figure 68: l'aqueduc romaine de Cherchell



Figure 69: la place romaine de Cherchell

C'est qu'ici se cachent de grands souvenirs ; l'humble Cherchell d'aujourd'hui s'est appelée pendant toute l'antiquité Césarée ; elle a été la capitale d'un royaume, l'alliée de Rome, puis le chef-lieu d'une de ses provinces africaines, la Maurétanie, et son rayonnement n'est pas encore tellement éteint qu'il ne lui en reste une auréole...

Il n'est pour s'en convaincre que de pénétrer dans le musée où elle conserve les plus belles des œuvres d'art qui firent jadis sa parure ; petit bâtiment aux toits rouges, d'allure officielle, il ouvre à droite de l'Esplanade ses quatre galeries peuplées de statues sur une cour intérieure également pleine de sculptures

<sup>78</sup> Thèse de magister, Alger, epau, juin 1993 la stratification comme valeur de la ville. Youcef Chennaoui

### VII.3 Présentation de la mosquée

#### VII.3.1 Aperçue historique

Située au plein cœur de la ville<sup>79</sup> de Cherchell, la grande mosquée est un édifice remarquable par sa taille et son architecture, elle a été construite au début du 16eme siècle, au temps des turcs, suivant le modelé maghrébin

Et c'est un musulman-andalou installé à Cherchell-fils de sidi-Aïd, cadî de grenade et juri-consulte-qui l'a construit en 1573-



Figure 70:plan de la Kasbah de Cherchell



Figure 71:photo panoramique de la mosquée, auteur

#### VII.3.2 Situation de la mosquée

Implantation et <sup>80</sup>orientation de la grande mosquée de Cherchell

L'obligation d'asseoir la mosquée en fonction de la qibla fit qu'elle ne concorde pas avec la trame du réseau urbain, laquelle semble très ancienne et correspond peut-être au tracé romain selon le cardo et le decumanus, de ce fait,

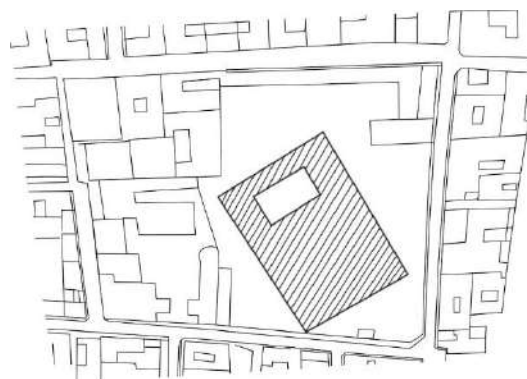
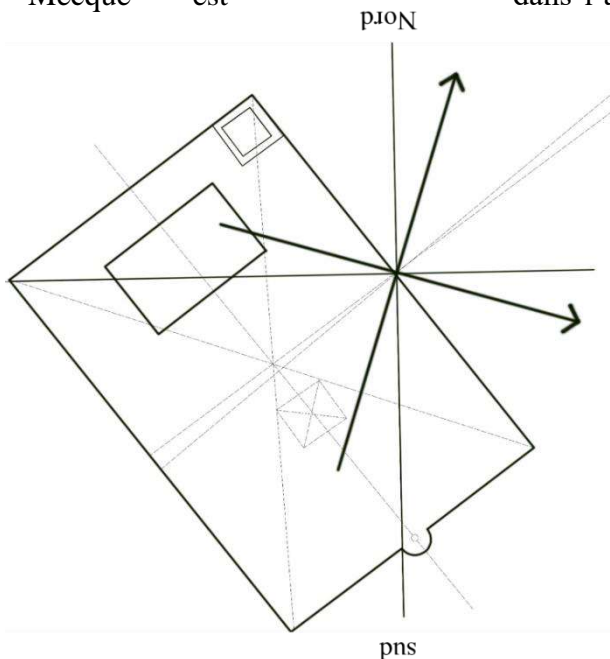


Figure 72:situation de la mosquée

<sup>79</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996, P53

<sup>80</sup> Gsell(St) : Atlas archéologique de l'Algérie, 2eme Ed, T. II ; feuille N°04, Alger 1997, P04

Il y a des surfaces délaissées utilisées depuis les temps modernes pour édifier des bâtiments pour les services annexes de l'hôpital ; nous devons noter ici que la direction de la qibla (Azimut  $128^\circ$  environ), n'a pas été établie avec exactitude puisque pour Cherchell, la direction de <sup>81</sup>la Mecque est dans l'azimut  $104^\circ$  soit une différence de  $24^\circ$ , elle est



dirigée trop au sud, comme de nombreuses mosquées maghrébines

Figure 73:: implantation et orientation de la mosquée de Cherchell

### VII.3.3 Description sur la mosquée des 100 colonnes

Classé monument national <sup>82</sup>en 1988, la mosquée « ENNOUR / 100 Colonnes », dont la construction avait été selon une précision portée au bas de l'inscription précitée, « terminée en l'an 981 de l'hégire » soit en l'année 1573 de l'ère chrétienne, possède une autre particularité.

Statut juridique : propriété publique

Propriétaire : Ministère de la santé

Typologie : Monument de culte (Mosquée)

Usage : Prière

Date de classement : 19/10/1982 N°J 48 du 30/11/1



Figure 74:le jardin de la mosquée

<sup>81</sup> Gsell(St) : Atlas archéologique de l'Algérie, 2eme Ed, T. II ; feuille N°04, Alger 1997, P04

<sup>82</sup> Archive bastion 23

Cadre Physique : elle est située au centre de la ville de Cherchell

Grandeur site : superficie : 1734m<sup>2</sup>

Dimension de la structure :

Mosquée : Longueur : 51m Largeur : 34m

Cour : Longueur : 16m Largeur : 10m



Figure 75:plaque de la mosquée à côté du mur de clôture

### VII.3.4 L'appellation de la mosquée

Cette couverture repose sur près de <sup>83</sup>cent colonnes, remarquables par leur nombre et leur histoire

Cette forêt de colonnes a fait surnommé ce temple sans doute par les français : « la mosquée des cents colonnes »

De la ville ne désignait nullement cet édifice par son nom en période pré-coloniale, mais plutôt par le nom : la grande mosquée –djamaa El Kebir ou mosquée de vendredi puisque telle fut sa destination à l'origine

Pour revenir à l'appellation officielle de mosquée Ennour, tout porte à croire que celle –ci est liée, non pas à une des caractéristiques architecturales de l'édifices, comme c'était le cas pour celle de « mosquée des 100 colonnes »

Mais à une inscription gravée sur une petite plaque de marbre. Selon les témoignages du maire français d'alors de la ville, le commandant Dupotet et deux membres de la société historique algérienne

Cette inscription « se trouvait sur l'un des côtés du minbar de la mosquée », d'après la traduction de cette inscription, puis mise à jour lors des travaux de restauration de la mosquée pour concrétiser la décision du défunt président Boumediene, il s'agit bien des versets 36 et 37 de la sourate Ennour

### VII.4 Investigation In-Situ

Afin d'acquérir un taux important de connaissances sur la mosquée, un travail de relevés et d'analyses a été établie à plusieurs reprises, pour avoir d'une part une étude préliminaire sur

<sup>83</sup> Cherchell :la mosquée aux 100colonnes une merveille architecturale par Mohamed-Amine Hourri ,2012. EPAU

l'état de conservation de la mosquée et reprendre d'autre part l'ensemble des mesures nécessaires pour la modélisation, ceci dans le but d'établir un relevé détaillé du plan et des élévations de la mosquée

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

### 1. Le relevé de la mosquée par le scanner laser 3d<sup>84</sup>



Figure 76:photo du scanner laser 3d

### Résultat du scanner 3d (les scans)



Figure 77:scan de l'intérieur de la mosquée



Figure 78:scan de la cour de la mosquée

### 2. Le relevé métrique avec :

- un décamètre
- un distance mètre à ultrason « Atlas ATLMUM Ultrasonic



Figure 79:outil d'investigation

<sup>84</sup> Scanner laser 3D : reconnaissance de forme et modélisation de déformation, Matthieu Dujardin

## VII.5 Lecture architecturale sommaire de la mosquée aux cents colonnes

### VII.5.1 Environnement

Située à quelques<sup>85</sup> encablures du marché couvert du centre-ville de l'actuel Cherchell



Figure 80: situation de la mosquée actuelle

### VII.5.2 Lecture architecturale

Cette vaste construction couvre une <sup>86</sup>superficie de 1734m<sup>2</sup> (34\*51m). Après une première travée de façade, se voit une cour intérieure de 16\*10m, où se trouvait certainement la vasque aux ablutions traditionnelle, puis il a une suite de huit travées aboutissant au mur de qibla



Figure 81: entrée secondaire de la mosquée

Les nefs formées de voûtes en berceau reposant sur des colonnes ne pas diriger vers la qibla, mais selon la ligne



Figure 82: l'intérieur de la mosquée

<sup>85</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996, P53

<sup>86</sup> Colin; Op.cit. p.284, n°2

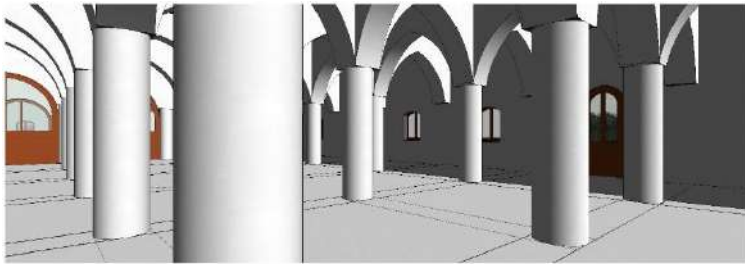


Figure 83:la 3d de l'intérieur de la mosquée

Cette vaste construction est beaucoup plus longue que large et a pour dimensions : 34m\*51m ; couvrant ainsi une superficie de 1734m<sup>2</sup>. Elle est dotée d'une cour intérieur (sahn)<sup>87</sup> de 16m\*10m, après une première travée de la façade principale ; puis il y a une suite de neuf travées aboutissant au mur de la qibla.



Figure 84:la cour de la mosquée



Figure 85:3d de la cour de la mosquée

<sup>87</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996.

Au début, ce qui apparaît <sup>88</sup>en premier en pénétrant dans la mosquée, sont les nefs formées par des arcs, correspond aux faites ne sont pas perpendiculaires au mur de la comme dans la grande mosquée de Kairouan, d'Alger, de Mancoura et d'El-Eubad près de Tlemcen, ou de la Koutoubiya de Marrakech ; mais plutôt selon la ligne parallèle, comme cela se voit à la mosquée du vieux Ténès, à la Qarawin de Fès, à la mosquée Lalla Aouda à Meknès et à la mosquée Ibn Touloun au Caire

mosquée, sont des toits. Ils qibla

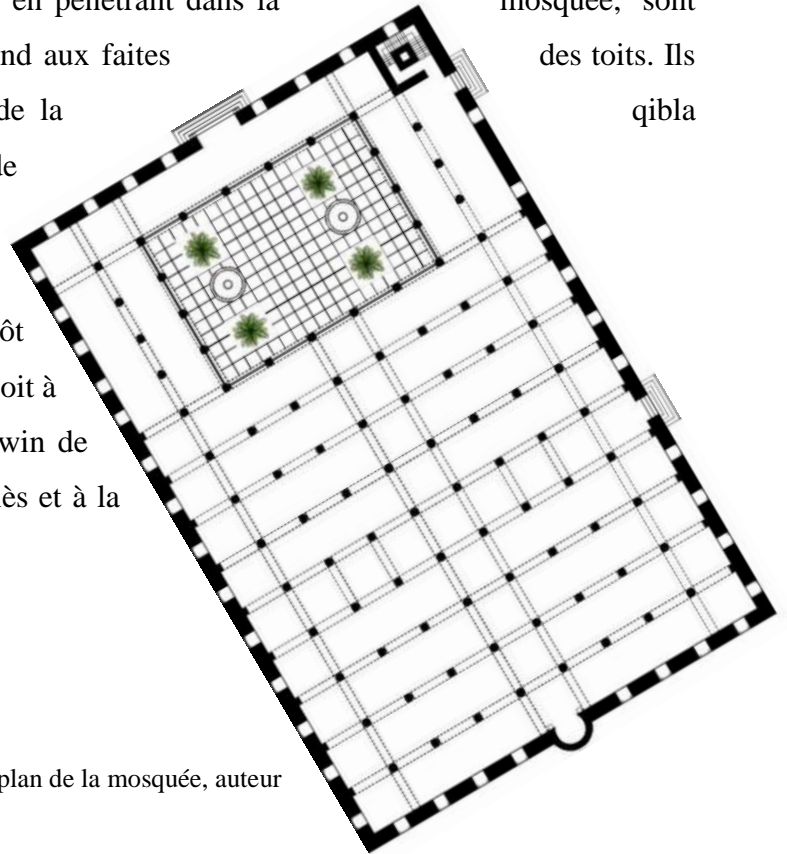


Figure 86: plan de la mosquée, auteur



Figure 87:: la volumétrie de la mosquée avec l'environnement ,auteur

<sup>88</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996.

### VII.5.3 Le Minaret

A l'angle nord<sup>89</sup> de l'édifice, on voit les vestiges d'un minaret à plan carré, qui fut très élevé, d'après les iconographies anciennes, il fut doté de trois étages de plans différents d'une base de 3.6m\*3.6m. Ainsi les tours furent couronnées sur leur partie supérieure par des Merlons à dents. A l'intérieur, le noyau central forme un carré autour duquel évolue la rampe



Figure 88:l'ancien minaret et le minaret actuel de la mosquée

### VII.5.4 Mihrab

La niche du Mihrab est actuellement<sup>90</sup> curviligne, mais on rapporte grâce aux fouilles archéologiques qui ont été effectuées en cet endroit a location de la restauration de la grande mosquée que se base présentait une forme polygonale.la niche de l'ancien mihrab fut hexagonale comme celle de la grande mosquée de Tlemcen, de Sayyidi l'halwi et de Sayyidi Ibrahim



Figure 89:le Mihrab de la mosquée

### VII.5.5 Matériaux de construction

L'édifice est construit en moellons liés par un ciment pauvre formant des murs de près d'un mètre d'épaisseur. Le mur de façade, celui qui est opposé au mur de la qibla, est encore plus épais, il semble qu'il ait été rechargé pour une question d'aspect, les colonnes engagées y sont masquées, ayant été incorporées dans le mur, qui ainsi à une épaisseur de 1,20m, comme on peut le vérifier à l'un des fenestrons du minaret

<sup>89</sup> Golvin(L) :la mosquée ses origines, sa morphologie, ses diverses fonctions, son rôle dans la musulmane, plus spécialement en Afrique du Nord, imprimeries la Typo-litho et Jules Carbonel, Alger 1960,54

<sup>90</sup> Bourouiba(R) : l'art religieux musulmans en Algérie, société nationale d'édition et de diffusion, 2eme Ed, Alger 1981, p113

## VII.6 Les valeurs de la mosquée des cents colonnes

### VII.6.1 Valeur archéologique

- La construction des différents rapports de fouilles archéologiques, rapporte qu'en 1861, on fit des travaux dans la cour de notre mosquée pour un égout et que l'on découvrit à 3 ou 4m <sup>91</sup>de profondeur une grande quantité de colonnes et de chapiteaux en marbre blanc ; ce qui prouve que la mosquée fut bâtie sur l'emplacement d'un ancien édifice romain, et cela d'après la coutume des villes à survivance gréco-romaine
- Les quatre colonnes d'angle qui supportent le lanterneau sont ornée de coquilles Saint-Jacques, grands pectens, ajout postérieur bien entendu



Figure 90:photo panoramique montre les colonnes de la mosquée

### VII.6.2 Valeur architecturale

Les colonnes support<sup>92</sup> ce petit pavillon, selon M. Philibert, furent du type ionien coiffées de chapiteaux ornés de coquilles St-Jacques, dites peltes



Figure 91:colonne de type ionien

### VII.6.3 Le style de la mosquée

Cette mosquée <sup>93</sup>est bâtie selon le type maghrébin ou hispano-mauresque et non pas turc, c'est-à-dire qu'elle est couverte en toits, on voit à l'angle nord, les vestiges d'un minaret sur plan carré, qui était très élevé et avait été doté, à une certaine époque, d'une horloge, il est malheureusement très réduit en hauteur, peut être à la suite d'un tremblement de terrée

<sup>91</sup> Les archives, bastion 23

<sup>92</sup> Marcel Philibert : « cherchell-Miscellanée ». L'ancien grande mosquée. Comité du vieil Alger, Alger,1973

<sup>93</sup> H. KLEIN : Feuilles d'El-Djazaïr, n°XI, Alger, Fontana 1929, gravure n°53

Cette architecture produisait une architecture maghrébine dite péjorativement Architecture Mauresque



Figure 92: croquis de la façade principale de la mosquée

### VII.7 Etude structurelle de la mosquée des cents colonnes

#### VII.7.1 Mur porteur

Les murs de l'édifice sont construits en moellons liés par un ciment pauvre formant des murs d'un mètre d'épaisseur

Le mur de la façade principale est encore plus épais, ou se trouvent des colonnes engagées dans le mur, octroyant à ce dernier 1.20m d'épaisseur. On peut le vérifier grâce aux finestrans du minaret



Figure 93: photo montre le mur porteur de la mosquée

#### VII.7.2 Colonnes

Ces colonnes ne sont d'ailleurs<sup>94</sup> pas identiques, on y voit de différence de diamètre, de hauteur et de forme, elles sont toutefois presque cylindriques, leurs diamètres et **de 60cm** et leur de **2,30m** environ, elles sont en pierre granitique de la carrière d'Arou –Djaoud, qui domine l'agglomération d'Hadjret Enous ex Fontaine du génie



<sup>94</sup> Cherchell :la mosquée aux 100colonnes une merveille architecturale par Mohamed-Amine Hourri ,2012. EPAU

Ou se trouve au bord de la route nationale une colonne monolithique remarquable par sa taille, qui été extraite de ladite carrière ou elle avait été taillé à l'époque romaine et abandonné in situ jusqu'en 1883, date de son érection sur la place de village

Figure 94:les colonnes de la mosquée

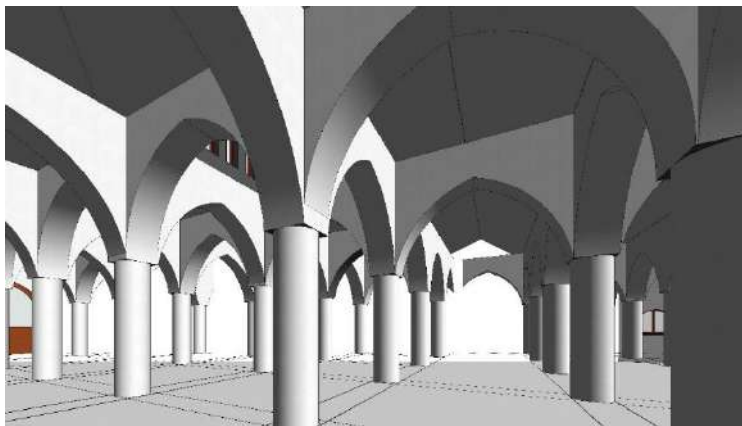


Figure 95:3d de la mosquée des cents colonnes

### VII.7.3 L'origine des colonnes de la mosquée

Il semble toutefois<sup>95</sup> que la nouvelle mosquée allait, au fil du temps, acquérir une autre dénomination, dur à l'évidence, à l'un de ses traits architecturaux les plus caractéristiques : la présence dans sa salle de prière comme élément de support de sa toiture faite de petite s tuiles rouges, de 91 colonnes en diorite

La Diorite est selon le dictionnaire informatique Encarta, 2008, « une roche éruptive utilisée en construction » ramenée selon toutes les sources que nous avons consultées, des sites antiques environnants, le plus cité de ces sites étant, du fait de sa proximité, celui des thermes de l'ouest qui se trouve, dans la ville actuelle

---

<sup>95</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996, P55

### VII.7.4 Toiture



Figure 96: photo montre la toiture de la mosquée

La couverture du bâtiment, composée<sup>96</sup> de treize toits longs repose sur près de cent colonnes qui ne sont pas identiques

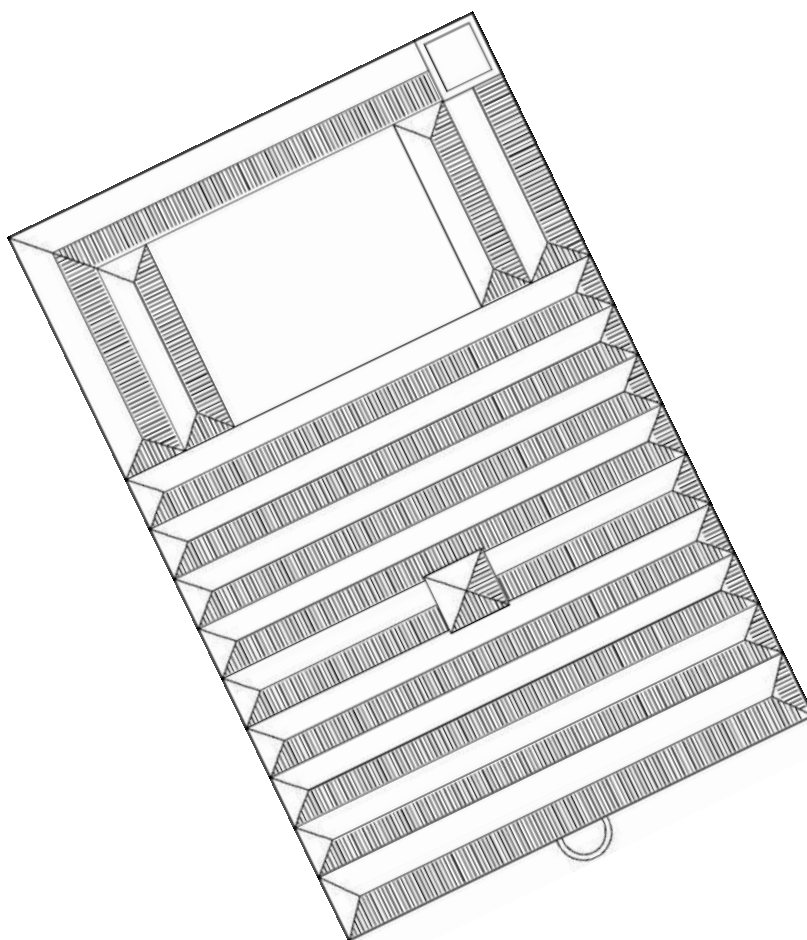


Figure 97: plan de toiture de la mosquée



Figure 98: le lanterneau au centre de la mosquée

A la croisée<sup>97</sup> des deux nefs au centre de la mosquée se présente un lanterneau à charpente surélevé. Celui-ci est percé à sa base par des petites fenêtres en arcade

<sup>96</sup> Bourouiba(R) : l'art religieux musulmans en Algérie, société nationale d'édition et de diffusion, 2eme Ed, Alger 1981

<sup>97</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6,

### VII.7.5 Composition globale

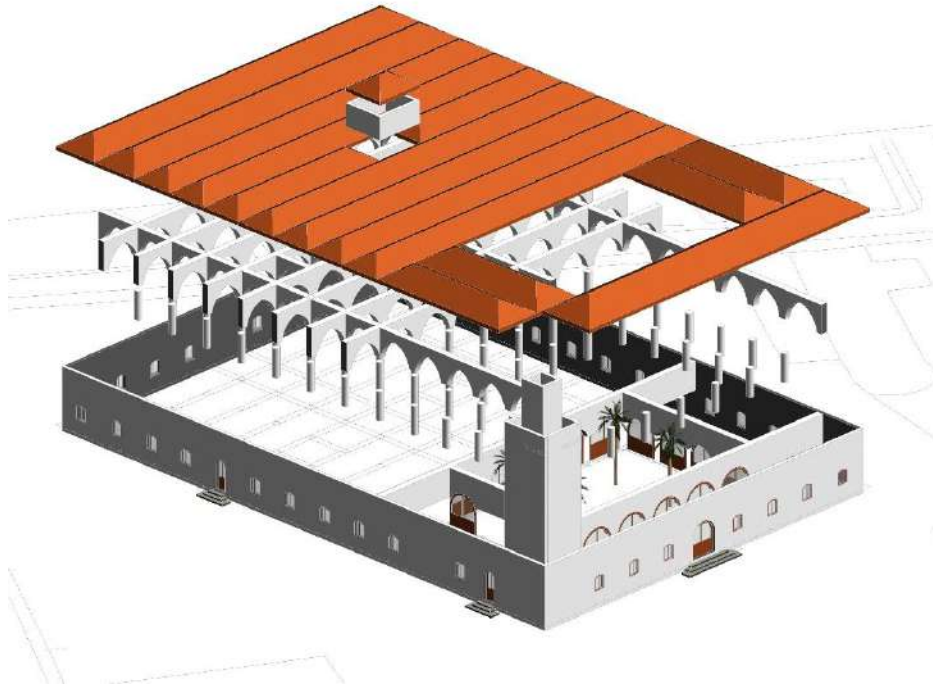


Figure 99: axonométrie éclaté de la mosquée aux cent colonnes, auteur

### VII.8 De la mosquée vers l'hôpital

Cette vocation, cette édifice<sup>98</sup> l'avait perdue peu de temps après la prise, en mai 1840, de Cherchell par les français, pour être transformé, par ces derniers dans un premier temps en hôpital militaire puis en hôpital civil, et c'est en tant que tel qu'il fonctionnera durant les quinze premières années de l'indépendance

La grande mosquée retrouvera sa <sup>99</sup>vocation première en 1985

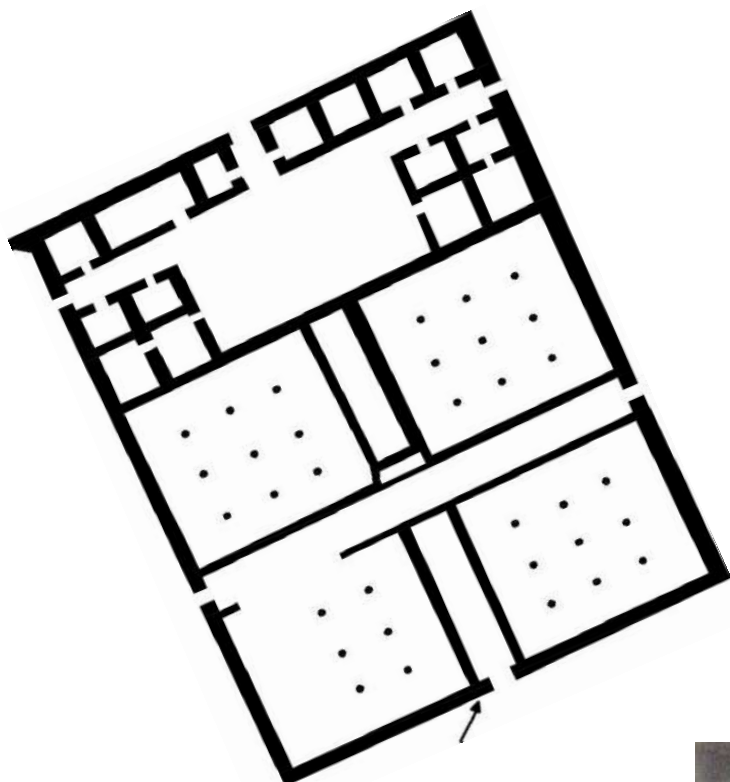


Figure 100: plan de la mosquée pendant la période coloniale



Figure 101: photo de l'intérieur de la mosquée pendant la période coloniale



<sup>98</sup> Marcel (ph) : Cherchell Miscellanées, l'ancienne grande mosquée, Alger1973, P01

<sup>99</sup> Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996, P53

## VII.9 Les projets de restaurations de la mosquée des cents colonnes Rapport de la mission effectuée le -13-12-1986

Le but de cette mission était le contrôle des travaux de réparation effectués sur la mosquée aux cents colonnes afin qu'elle retrouve sa fonction originale : le culte

Les travaux ne rentrent pas dans le cadre d'une restauration mais d'une "remise en état"

Cette mosquée est un monument classé datant du 15<sup>e</sup> siècle, utilisé pendant la période française comme hôpital militaire puis hospice, il en a résulté des transformations consistant essentiellement au rajout de cloisons, ce qui morcelé l'espace intérieur

Les cloisons qui découpaient l'espace de la grande salle ont été totalement démolies, ce qui constitue un point positif

La toiture autant déjà entièrement française (charpente en bois+ tuiles) n'a aucune trace d'authenticité

La mosquée a subi déjà une restauration à l'époque française :

Présence de tirants en acier à l'intérieur de la mosquée ainsi qu'à l'extérieur soutenant les murs



Figure 102:la toiture de la mosquée

L'ancien mihrab ayant été détruit (à sa place on trouve une porte fenêtre) il faudra procéder à des fouilles et le reconstruire

Les colonnes en " pierre granitique" se trouvant d'un ancien édifice<sup>100</sup> romain, doivent être soigneusement décapées, il ne faut pas les peindre, il est essentiel qu'elles gardent leur aspect ancien

La menuiserie, entièrement neuve, est d'une bonne exécution, la forme des ouvertures a été respectée



Figure 103:les ouvertures de la mosquée

<sup>100</sup> Archive bastion 23 Rapport de la mission effectuée le 13-12-1986, Cherchell, l'architecte : Baiod Dalila,

En ce qui concerne le minaret, aujourd'hui en grande partie détruit il était, à une certaine époque, très haut et date d'une horloge ; l'association religieuse voudrait construire un nouveau en reprenant les façades d'un minaret d'une mosquée voisine

Le revêtement du sol original, carreaux de terre cuite, ayant été remplacé, pendant la colonisation, par du "GERFLEXY", il est nécessaire de recourir à un revêtement en terre cuite plus proche de l'original

### VII.10 Etat de conservation de la mosquée aux cents colonnes

La mosquée en temps présent est en bon état d'après les constats visuels



Figure 112 : l'entrée de la mosquée

### VII.11 Conclusion

Ce sont toutes ces caractéristiques qui font de la mosquée des 100 colonnes de Cherchell un joyau architectural qu'il est impératif de préserver. En tant que tel, mais également en tant que site historique de première importance parce que témoin de deux importantes périodes de l'histoire de notre pays : les périodes ottomanes et coloniale

En conclusion, nous déduisons que les éléments du vocabulaire architectural de la grande mosquée de Cherchell se compose d'une transcription d'éléments de plusieurs cultures architecturales. Il s'inscrit dans un milieu à composante archéologique, historique et culturelle spécifiques, par des jeux d'analogie, de rappels et de références

## **VIII. Etude numérique à l'aide de logiciel robot structurale Analysis 2018 et scene**

### **VIII.1 Introduction**

La Grande mosquée, dite « aux cents colonnes », se situe au cœur de la vieille ville ; elle aurait été bâtie au début du XVI<sup>e</sup> siècle par les Andalous sur l'emplacement d'un temple romain. la centaine de colonnes qui la supportent, et dont elle tient son nom, provenait certainement des thermes de l'Ouest.

L'époque coloniale, les Français firent de la mosquée un hôpital civil et militaire

Nous devons simuler le comportement structurel de la mosquée en question face à un éventuel séisme pour évaluer la résilience de ce patrimoine bâti toutes ces périodes historiques

### Modélisation de la mosquée aux cents colonnes (sur revit 2018)



Figure 104: Simulation numérique de la mosquée sur Revit 2018

### Simulation numérique de la structure sur Robot 2017

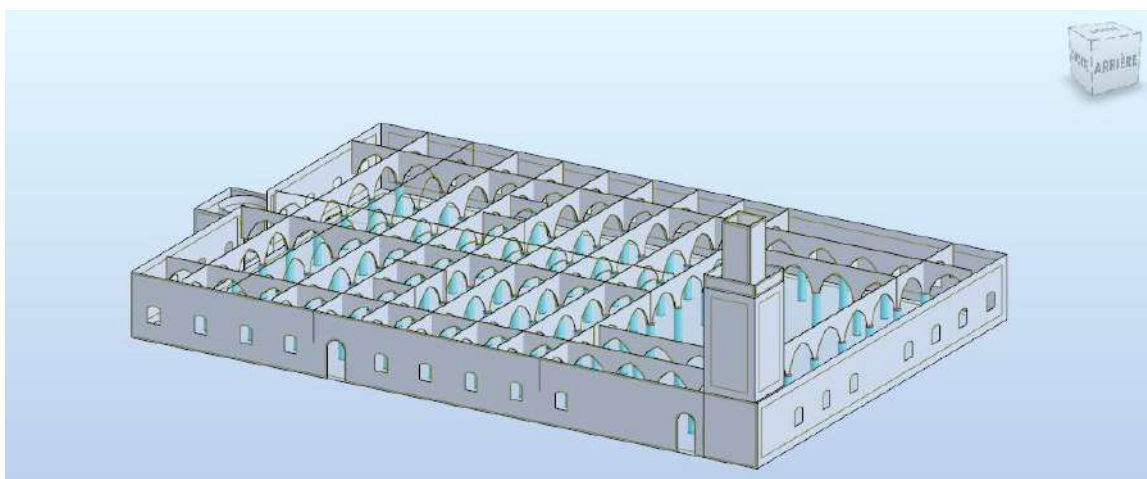


Figure 105: simulation de la mosquée sur Robot structurel Analysis 2018

## VIII.2 Modélisation sur Revit

### Considération générales

La modélisation de la mosquée aux cents colonnes a été effectuée à la base d'un relevé réalisée par l'auteur : un relevé métrique et un relevé laser 3d, en prenant appui aussi sur différents documents et en tenant compte les différents mesures et détails qu'on a trouvés.

Afin de simplifier la modélisation toutes les colonnes introduites dans le model revit ont la même section  $Q=60\text{cm}$

## Etapes de modélisation de la mosquée aux cent colonnes

### Modélisation des colonnes

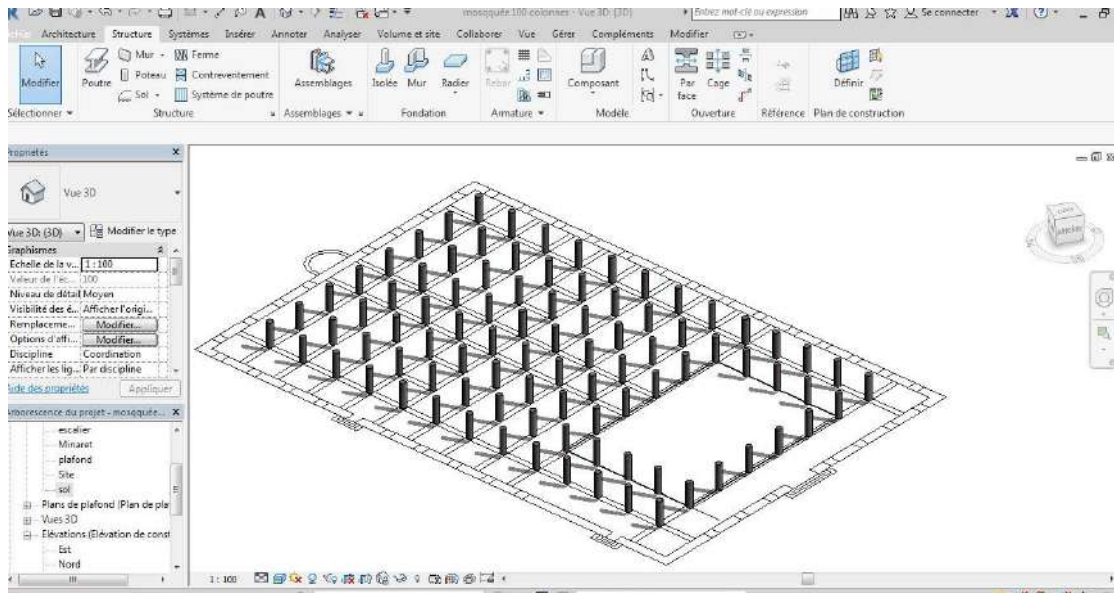


Figure 106: Modélisation des colonnes, auteur

### Modélisation des murs porteurs extérieurs

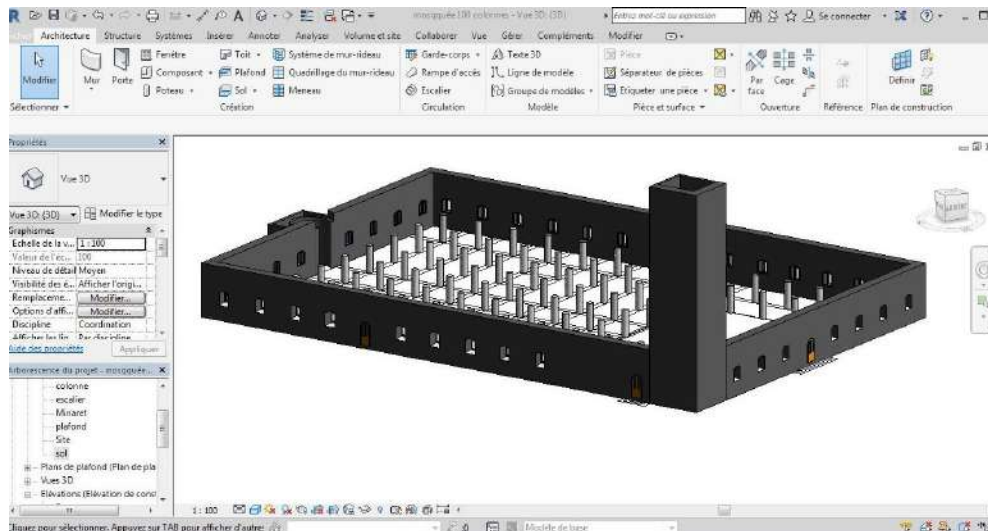


Figure 107: Modélisation des murs porteurs extérieurs, auteur

### Modélisation des arcs et couple

On a commencé par les traces géométriques des arcs

On trouve un seul type d'arc : l'arc outrepassée

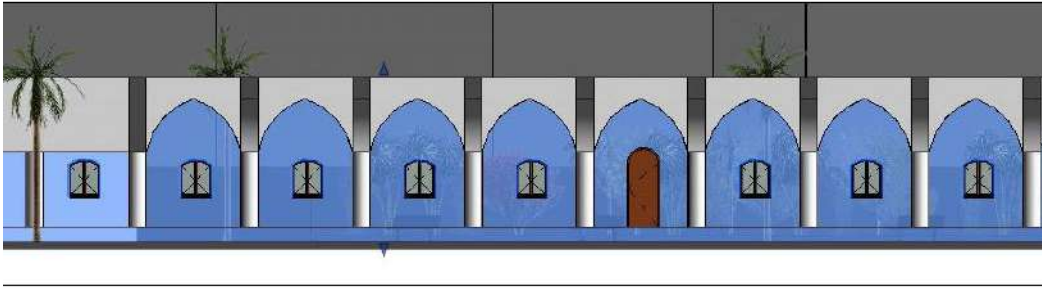


Figure 108: création des arcs

### Modélisation de la toiture en Bois



Figure 109:Modélisation de la toiture en charpente en bois

### Résultat :



Figure 110:résultat de la simulation, auteur

### VIII.3 Envoi du modèle Revit vers Robot



Figure 111:envoi du modèle de Revit vers Robot

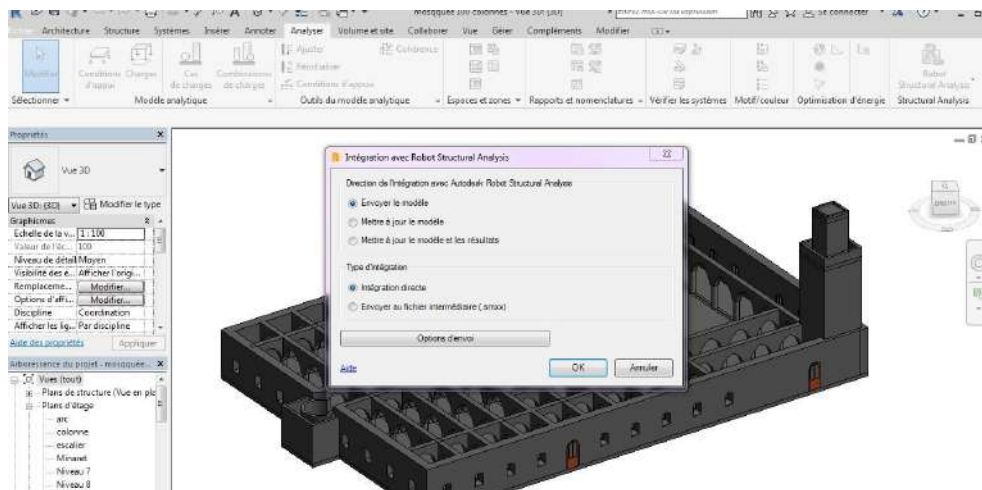


Figure 112:importation de la structure de revit vers robot 2018,auteur

6.La boîte de dialogue **Envoyer le modèle vers Robot Structural Analysis** affiche des informations concernant la progression du transfert : lecture des données à partir de Revit, création d'un modèle Robot, exportation des éléments et création des éléments appropriés dans Robot.

7.La boîte de dialogue **Affectation des éléments** ne s'affiche que si, pendant le transfert, les noms des profilés (définis dans Revit) ne sont pas reconnus dans la base de profilés active du logiciel Robot.

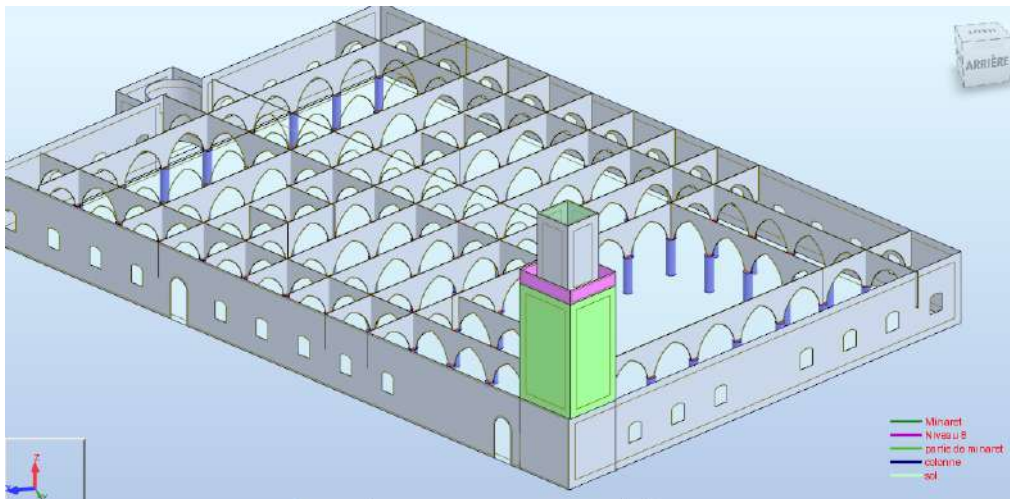
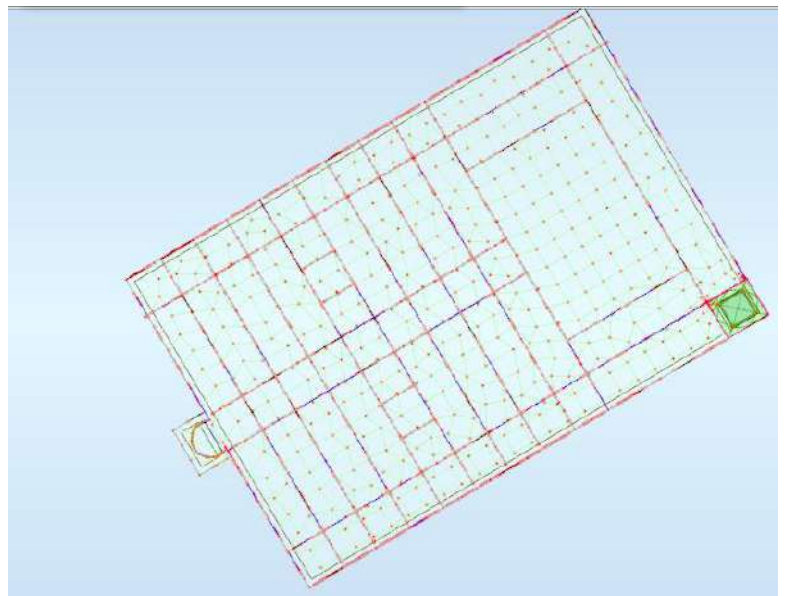


Figure 113: la structure de la mosquée importé sur Robot 2018

On a obtenu la 3d dans le logiciel Robot structurel Analysis après le respect de plusieurs paramètres de Autodesk

#### VIII.4 Création du maillage



Création du maillage de la mosquée sur Robot structurel Analysis sur plan

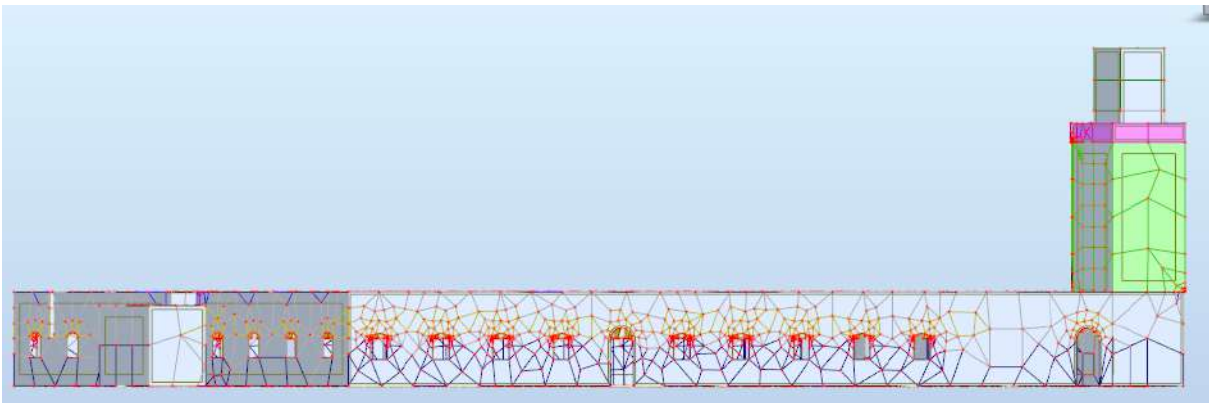
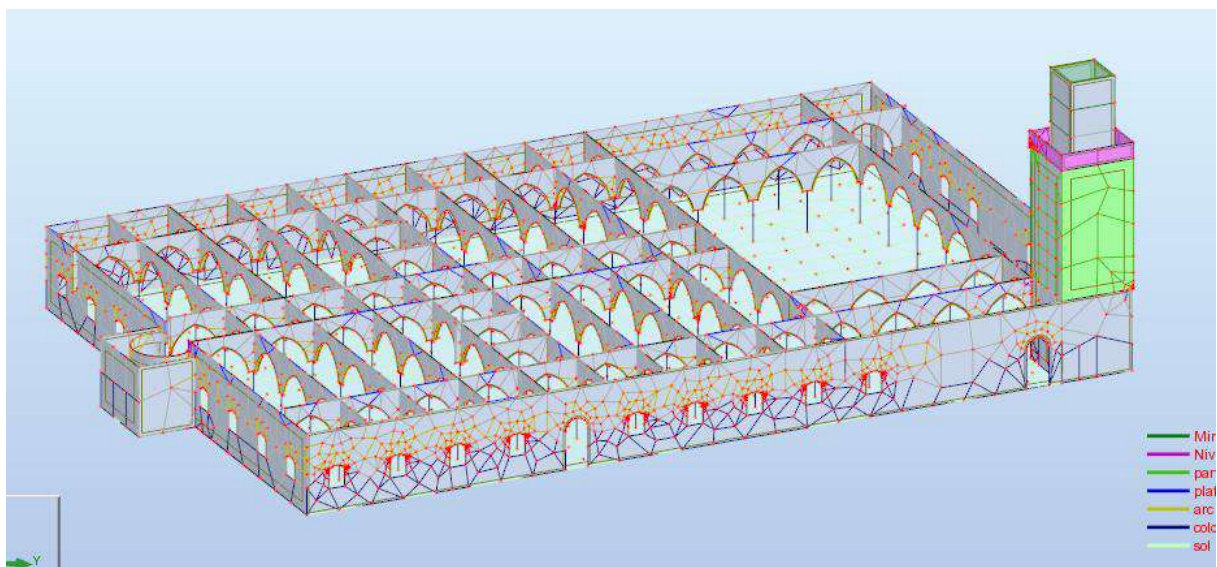


Figure 114:création du maillage de la mosquée aux cents colonnes



## VIII.5 Traitement des scannes avec logiciel scene

Une fois qu'on a les scannes (les résultats du relevé scanners lasers), il faut les traiter afin de rassembler ces scans et créer un nuage de point

Les Étapes de cette simulation sur scene :

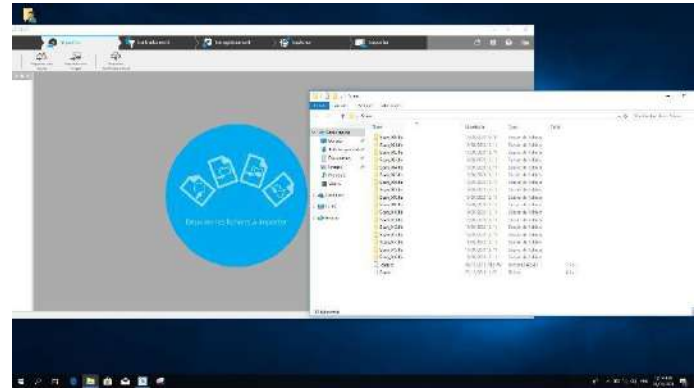
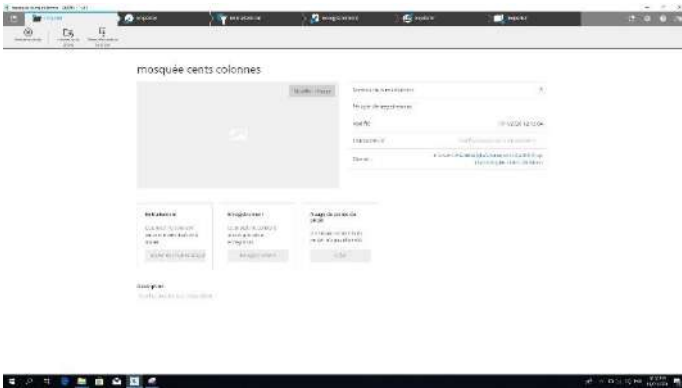


Figure 115:étape 1 :importation des scans

Après l'importation des scans, il faut les traiter, Les images au début seront noir et blanc

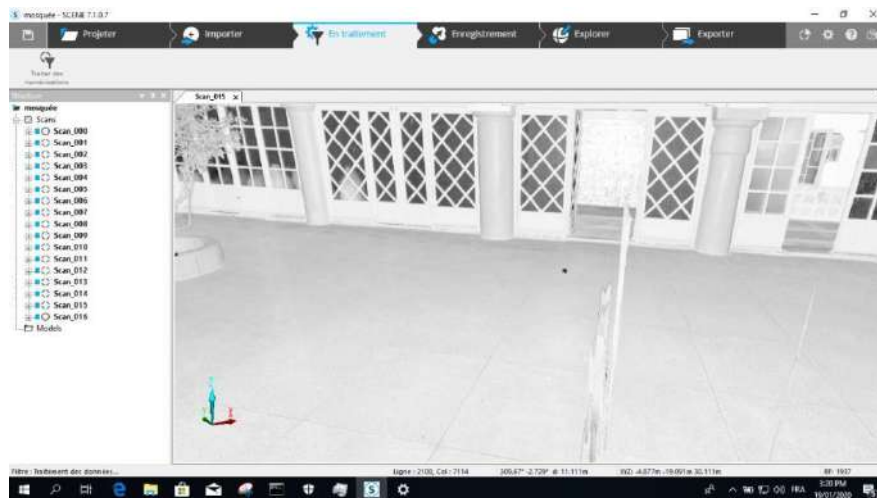


Figure 116:etape2:traitement des scans

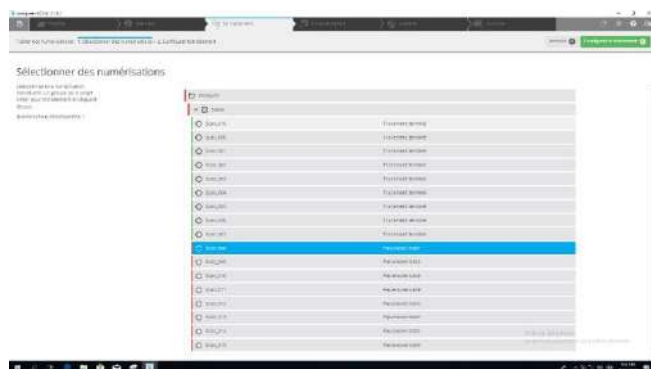


Figure 117:le traitement des scans

## Chapitre VIII : Etude numérique à l'aide de logiciel robot structurel Analysis 2018 et Scene

Après la fin de l'opération de traitement des scans, on passe à l'enregistrement, les photos devenues en couleur, dans cette étape il faut assembler les scans jusqu'ils seront un seul nuage de points

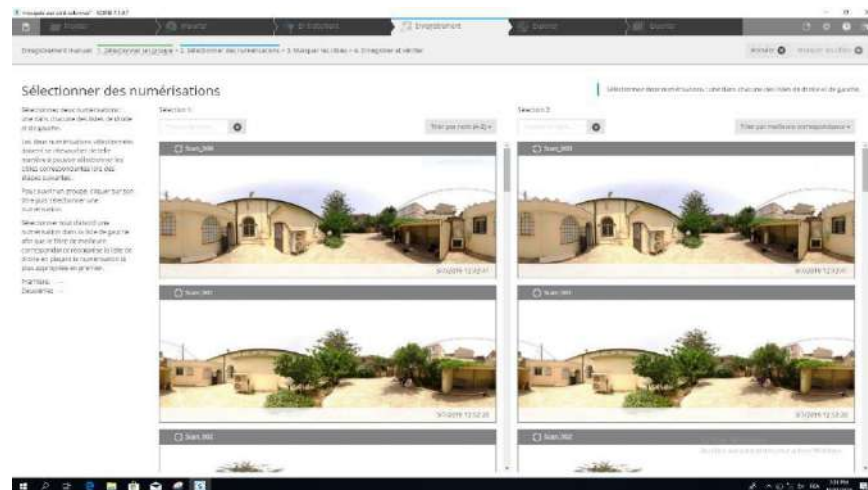
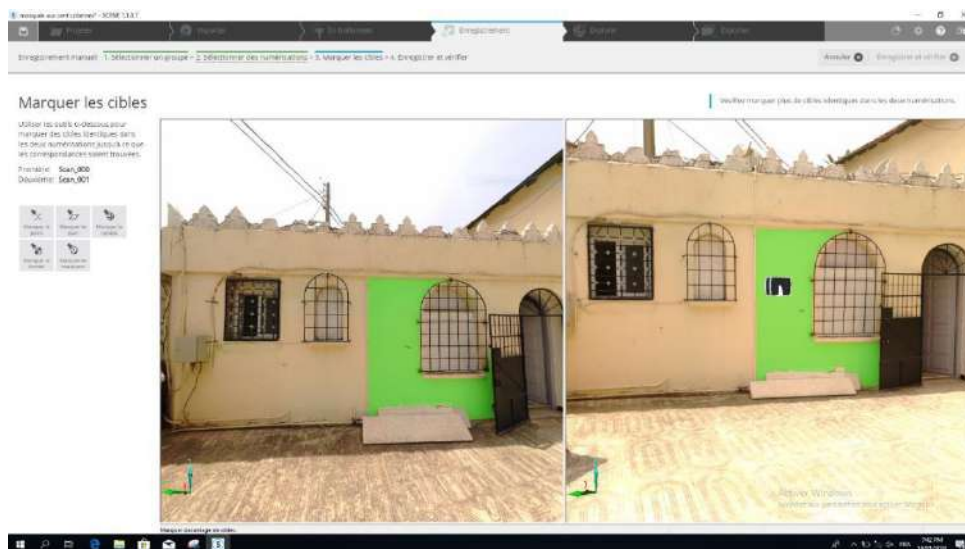


Figure 118:étape 03:renregistrement



Figure

119:étape 4:marquer les cibles

C'est dans cette étape qu'on va assembler deux scans, et il faut trouver des points en commun, on a choisi un plan et un point en commun

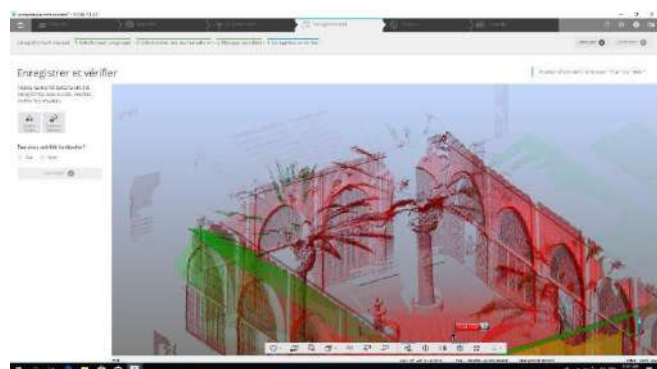


Figure 120:étape 5:enregistrer et vérifier

## Chapitre VIII : Etude numérique à l'aide de logiciel robot structurel Analysis 2018 et Scene

Une fois on est vérifié le travail, on enregistre, et on continue jusqu'à dernier scan

A la fin de tous les scans, on crée un nuage de point pour avoir une simulation de la mosquée aux cents colonnes afin de créer des ortho photos et des coupes pour vérifier d'une manière fiable la structure de la mosquée aux cents colonnes

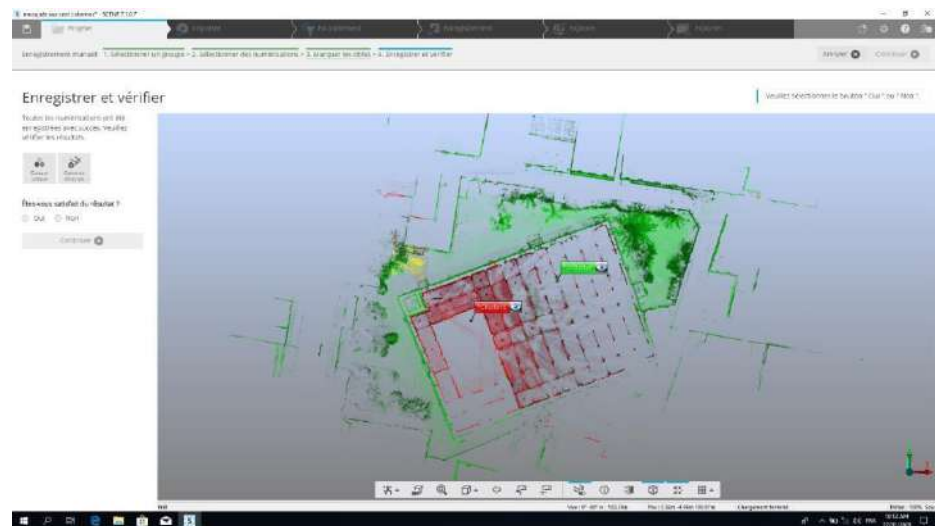


Figure 121: la fin de vérification et enregistrement

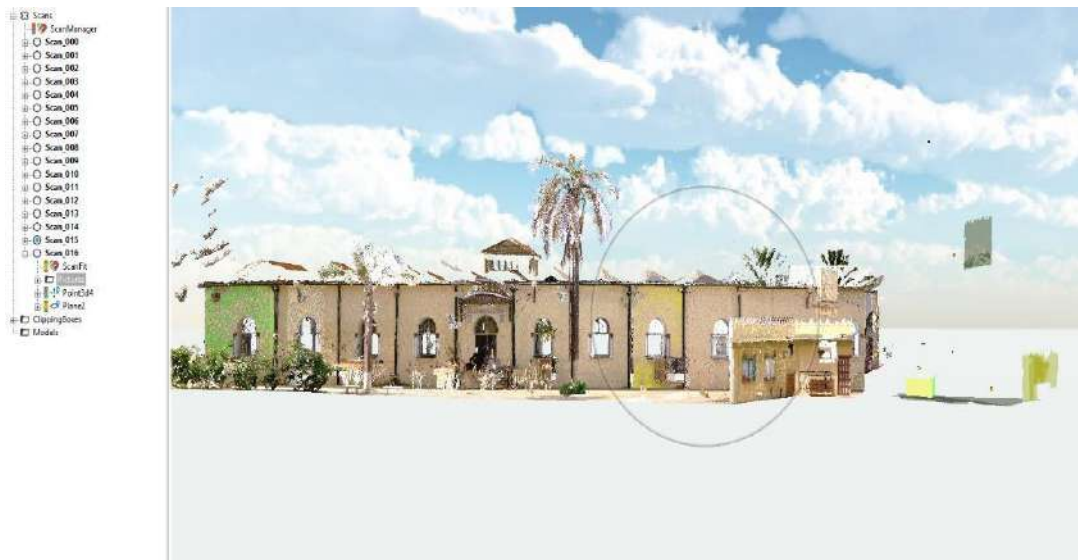
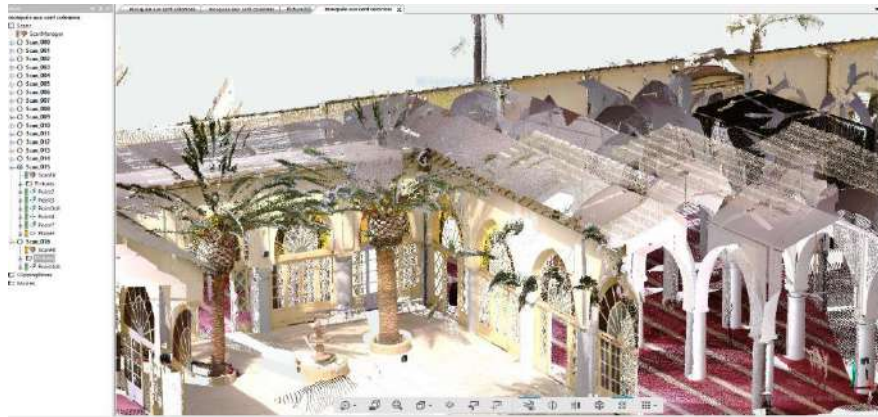


Figure 122: le nuage de point de scène d'après le relevé scanner laser



### VIII.6 Conclusion

D'après les simulations numériques qu'on a réalisées avec différents outils d'informatique : le relevé scanner laser, et Robot structurel Analysis afin d'évaluer la résilience de notre patrimoine bâti "mosquée aux cent colonnes", les résultats sont les suivantes :

Le logiciel Robot structurel Analysis : logiciel d'analyse structurel et qui nous aide à faire une analyse sismique du bâti et son comportement vis-à-vis un séisme et qui nous donne par la suite si ce dernier va dépasser les normes de réglementation ou pas par exemple les normes de RPA, et c'est dommage pour notre travail, qu'on n'a pas pu atteindre jusqu'à la fin mais reste une approche proposée pour l'évaluation de la résilience.

Notre deuxième outils qu'on a choisi pour la vérification de la résilience de notre cas d'étude c'est le relevé scanner laser 3D , le choix de cette nouvelle technologie s'est basé sur l'état du bâti qui est en bon état et on peut pas vérifier sa résilience à travers un relevé visuelle ou un relevé métrique, pour cette raison nous avons opté pour utiliser le scanner laser qui va nous donner à travers des orthophotographies ou images métriques , les détails de la structure et l'existence des fissures ou pas , encore une fois pour des raisons de contrainte de temps et de difficulté du logiciels , on a pas pu atteindre les résultats finals , mais aussi reste une approche proposée pour l'évaluation de la résilience.

## Conclusion générale

Le travail élaboré dans ce master s'est intéressé à la simulation numérique du vieux bâti « mosquée aux cent colonnes a Cherchell » à l'aide de l'outil informatique et la nouvelle technologie laser scanner 3D , dans le but de mettre en évidence les zones critiques de ce bien patrimonial et l'évaluation de sa résilience vis-à-vis un risque sismique, un sujet d'actualité qui nous a incité tout d'abord à construire une base de pré requis afin de pouvoir comprendre le sujet et forger par la suite notre analyse structurelle sous effet sismique sur la mosquée aux cents colonnes

D'abord, nous avons commencé dans un premier temps par la définition des risques majeurs, et choisi le risque sismique, et le choix de ce risque était basé sur la présence de ce dernier dans la ville de Cherchell depuis l'antiquité, par la suite on a parlé sur l'impact du séisme sur le patrimoine bâti et l'absence de réglementation qui protège d'une manière efficace les bâtiments après un séisme et que les méthode de réhabilitation n'assure pas le bon comportement du bâti lors d'un risque sismique, une recherche sur laquelle on a pris conscience du danger de ce phénomène naturel, et on a proposé la résilience comme une stratégie pour que cette mosquée faire face aux séismes

Mais avant de parler sur cette stratégie de résilience, on a voulu d'abord évaluer si la mosquée est résiliente ou pas ? et comment on va réaliser cette évaluation ? après plusieurs recherches dans le sujet, on a proposé deux méthodes numériques pour cette évaluation : la première c'est une analyse de comportement sismique de la mosquée lors et après le séisme avec le logiciel Robot structurel Analysis 2018 et la deuxième c'est un relevé tridimensionnel avec le scanner laser 3d traité par le logiciel Scene, deux méthodes numérique ou informatique et aussi technique qui donne des résultats viable par rapport à la vérification de l'état actuel de la mosquée et répondre à la question est-ce que la mosquée est résiliente après toute les séismes qu'il a subi ? (Le passé et le présent), et le logiciel Robot structurel Analysis pour le comportement de la mosquée lors et après un séisme et donc répondre à la question est-ce que la mosquée va être résiliente aux futur ? (Le futur)

Malheureusement, on n'a pas pu atteindre les résultats finals de cette recherche mais les deux méthodes c'est des approches proposées pour évaluation de la résilience de la grande mosquée aux cent colonnes de Cherchell vis-à-vis un risque sismique

## Limite et perspective

Notre recherche d'évaluer la résilience de la mosquée aux cent colonnes à l'aide des outils informatique, avait comme objectifs de détecter les différentes zones vulnérable face au risque sismique et établir par la suite une stratégie pour rendre ce patrimoine bâti résilient ; cependant, nous jugeons qu'on n'a pas atteint tous nos objectifs principaux, et nous qualifions notre recherche en tant qu'évaluation structurelle de la première approche, ceci est dû à plusieurs contraintes, tels que :

La difficulté d'accès au formation (CTC par exemple)

- La difficulté du relevé laser (les cibles, le traitement avec Scene, le matériel ... etc.)
- La difficulté d'analyse des propriétés mécanique de la maçonnerie vue son hétérogénéité ;

Pour toutes ces raisons les évaluations ont été faites par des méthodes linéaire

Pour cela, nous pensons que le travail qu'a été fait dans cette recherche, ce n'est qu'un début pour d'autres recherches très vaste

Et qui nous ouvre la porte de recherche vers différentes pistes à savoir :

- ❖ Démarrer l'évaluation numérique à partir des résultats du scanner laser 3D (nuage de point) avec le BIM ou d'autre logiciel d'analyse de comportement structurel
- ❖ Poursuivre la recherche, avec comme appuis l'essai sur table vibrante, tel qu'a été utilisé dans l'étude de confortement structurel de la grande mosquée d'Alger, un mécanisme disponible en Algérie et qui mérité d'être exploité au service du patrimoine national

En conclusion, cette recherche peut nous donner la possibilité de s'interroger encore une fois sur la structure de la mosquée et proposé une stratégie pour la rendre résiliente :

- Isoler les fondations de la mosquée du sol en intégrant a la structure un système d'amortisseurs
- Renforcement de la structure de la mosquée
- Sensibilisation citoyenne pour mieux agir lors d'un risque sismique

## Résumé

Pour l'originalité du travail, on a choisi Cherchell, une ville de la wilaya de Tipaza (ma ville natale) comme une ville d'étude, et qui a connu plusieurs séismes à travers l'histoire, notre cas d'étude c'est la mosquée des 100 colonnes dite mosquée el nour : un patrimoine bâti de la période andalouse.

Cette recherche en master s'articule sur l'étude de la résistance et la capacité de la mosquée via les risques sismiques, mais aussi le plus important c'est l'évaluation de sa résilience en cas de séisme, en utilisant les outils informatiques pour la modélisation numérique et c'est à l'aide du programme Robot structural Analysis 2018 ; par la suite les résultats obtenus, ont été interprétés afin de détecter les différentes zones vulnérables.

Notre but à travers cette résilience architecturale est de protéger ce patrimoine bâti (la mosquée), les bâtiments à côté lors d'un risque majeur d'une part, mais aussi de sauver la vie des personnes.

Mot clé : séisme – résilience – risque – patrimoine bâti

## ملخص

حتى يكون لبحثنا قيمة وإبداع ارتأينا لاختيار مدينة شرشال التاريخية التابعة لولاية تيبازة مسقط رأسي لتكون كمدينة للدراسة كونها عرفت العديد من الزلازل عبر التاريخ كما قمنا باختيار مسجد المئة عمود الذي يسمى أيضا مسجد النور كنموذج للدراسة وهو تراث معماري تم تشييده في الحقبة الأندلسية يتمثل موضوع بحثنا في دراسة مقاومة المسجد وصموده في حالة وقوع زلازل بالأخص تقييم قدرته على تحمل الهزات وذلك باستخدام برامج اعلام آلي لصياغتها رقميا باستعمال برنامج الروبوت 2018 وبعدها قمنا بتفسير النتائج المحصل عليها لتعقب المناطق الهشة هدفنا من هذه الدراسة هو حماية هذا التراث التاريخي المتمثل في المسجد وكل المباني المحيطة به في حالة وقوع زلازل بالإضافة الى حماية الأشخاص

الكلمات المفتاحية : زلزال، صمود، خطر، التراث العمراني

## **Abstract**

For the originality of the work, I have chosen Cherchell, a town in the wilaya of Tipaza (my hometown) as a city of study, and which has experienced several earthquakes throughout history, our case study is the mosque of the 100 columns called mosque el nour: a heritage built during the Andalusian period.

This master's research is based on the study of the resistance and the capacity of the mosque through seismic risks, but also the most important is the evaluation of its resiliency case of an earthquake, by using the computer tools for numerical modeling, using the Structural Analysis 2018 Robot program; there after the results obtained, were interpreted in order to detect the different vulnerable areas.

Our goal through this architectural resilience is to protect this built heritage (the mosque), intoxicating buildings at a major risk on the one hand, but also to save the lives of people.

Key words: earthquake, risk, resilience, built herit

## Liste des tableaux

Tableau 1:les dommages humains et matériels après les risques majeurs .....	7
Tableau 2:les victimes après le séisme.....	11
Tableau 3:Estimation des dégâts matériels causés par certains séismes .....	12
Tableau 4:les degrés de l'échelle de Mercalli .....	17
Tableau 5:les degrés de l'échelle Richter .....	17
Tableau 6:Classement des localités par importance des dommages (Niveau 05).....	23

## Liste des Figures

Figure 1:photo qui montre l'aléa, l'enjeu et le risque majeur .....	6
Figure 2:diagramme de Farmer .....	8
Figure 3:la courbe de Farmer .....	8
Figure 4:schéma représente les risques majeur .....	8
Figure 5:L'incendie des entrepôts à Helsinki, Finlande, le 5 mai 2006 .....	9
Figure 6:Incendie de San Francisco en 1906. ....	10
Figure 7:dégâts de séisme .....	11
Figure 8:nombre des victimes des séismes .....	12
Figure 9: l'origine du tremblement de terre .....	12
Figure 10:séisme d'origine volcanique .....	13
Figure 11:les failles sismiques .....	14
Figure 12: Les ondes sismiques .....	14
Figure 13:onde sismique primaire S.....	15
Figure 14:onde sismique secondaire S .....	15
Figure 15:onde sismique de surface love .....	16
Figure 16:onde sismique Rayleigh .....	16
Figure 17:déplacement du bâti lors du séisme .....	18
Figure 18:trois causes principales de destruction des constructions pendant les séismes .....	18
Figure 19:Vibration du bâti durant le séisme .....	19
Figure 20:phénomène du flambement.....	20
Figure 21:fissures fines .....	21
Figure 22:ruine de la mosquée après le séisme .....	21
Figure 23:le tsunami a emporté la mosquée dans la mer .....	22
Figure 24:la mosquée après le séisme .....	22
Figure 25:carte de séisme de Chenoua .....	23
Figure 26: séisme de oued Djer 1988.....	24
Figure 27:siésme de Mitidja1960.....	24
Figure 28:carte de séisme de chlef 1980 .....	24
Figure 29:séisme de djebel Zaccar 1970 .....	25
Figure 30:les étapes de la méthode RehabiMed,2007 .....	29
Figure 31:Etape1 : préliminaires de la Méthode RehabiMed,2007 .....	30
Figure 32:Etape 02 : étude pluridisciplinaire de la méthode RehabiMed,2007 .....	31
Figure 33:Etape 03 : Diagnostic de la méthode RehabiMed,2007.....	32
Figure 34:Etape4 : Réflexion et cadre de décisions de la méthode RéhabiMED,2007 .....	32
Figure 35:Etape5 : projet de la méthode RehabiMed,2007.....	33
Figure 36:Etape6 : Réhabilitation (les travaux) de la méthode RehabiMed,2007 .....	33
Figure 37:Etape7 : entretien de la méthode RehabiMed,2007 .....	34
Figure 38:dégâts Séisme de 2010 au Chili .....	36
Figure 39:teste la résilience d'une maison en bois de sept étages lors d'un tremblement de terre.....	37
Figure 40:enveloppe de construction durable .....	38
Figure 41:vue 3d de la mosquée d'Alger .....	39
Figure 42:le Minaret de la grande mosquée .....	40
Figure 43:Imitation par ordinateur .....	41

Figure 44:photo du scanner laser 3d .....	42
Figure 45:scanner laser de l'extérieur.....	43
Figure 46:scanner laser de l'intérieur .....	43
Figure 47:Résultats de la modélisation présentant le nuage de points, le modelé texturé et le modèle filaire.....	45
Figure 48:: Nuage de points obtenu à l'aide d'un relevé au scanner laser : (a) vue générale du site; (b) zoom partiel sur une partie du bâtiment; (c) zoom partiel sur un élément architectural. Source : CSTC, De Ceuster.....	47
Figure 49:Modéliser une maquette topographique à partir d'un relevé au scanner laser. ....	47
Figure 50:Numérisation 3D d'éléments architecturaux au moyen d'une étude photogrammétrique : (a) fondation après une excavation ; (b) ancrage d'un portail métallique. ....	48
Figure 51:Étude pour l'évaluation rapide de dégâts.....	48
Figure 52:Comparaison entre un tracé de toiture sur base du relevé HDS .....	49
Figure 53:Utilisation du fichier HDS pour générer facilement un modèle BES.....	49
Figure 54:Modèle d'une maquette BIM à partir d'un relevé au scanner laser. Les deux informations coexistent dans le logiciel BIM .....	50
Figure 55:importer de revit vers robot et l'inverse .....	51
Figure 56:maison traditionnelle en pisé .....	52
Figure 57:mur en moellon .....	53
Figure 58:renforcement par des tirants.....	57
Figure 59:chainage .....	57
Figure 60:taxidermies avec des barres d'acier .....	58
Figure 61:contreforts .....	58
Figure 62:Montant intermédiaires .....	58
Figure 63:interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes .....	59
Figure 64 : intervention spécifique sur les arcs, les voutes et les coupoles .....	59
Figure 66:puis sismique .....	60
Figure 67:vue aérienne de Cherchell.....	63
Figure 68: l'aqueduc romaine de Cherchell.....	64
Figure 69: la place romaine de Cherchell.....	63
Figure 70:plan de la Kasbah de Cherchell .....	64
Figure 71:photo panoramique de la mosquée, auteur .....	64
Figure 72:situation de la mosquée.....	64
Figure 73:: implantation et orientation de la mosquée de Cherchell.....	65
Figure 74:le jardin de la mosquée .....	65
Figure 75:plaque de la mosquée à côté du mur de clôture .....	66
Figure 76:photo du scanner laser 3d .....	67
Figure 77:scan de l'intérieur de la mosquée.....	68
Figure 78:scan de la cour de la mosquée.....	67
Figure 79:outil d'investigation .....	67
Figure 80:situation de la mosquée actuelle .....	68
Figure 81:entré secondaire de la mosquée .....	68
Figure 82:l'intérieur de la mosquée .....	68
Figure 83:la 3d de l'intérieur de la mosquée .....	69
Figure 84:la cour de la mosquée .....	69
Figure 85:3d de la cour de la mosquée.....	69

Figure 86:plan de la mosquée, auteur.....	70
Figure 87: la volumétrie de la mosquée avec l'environnement ,auteur .....	70
Figure 88:l'ancien minaret et le minaret actuel de la mosquée .....	71
Figure 89:le Mihrab de la mosquée.....	71
Figure 90:photo panoramique montre les colonnes de la mosquée .....	72
Figure 91:colonne de type ionien .....	72
Figure 92:croquis de la façade principale de la mosquée.....	73
Figure 93:photo montre le mur porteur de la mosquée .....	73
Figure 94:les colonnes de la mosquée.....	74
Figure 95:3d de la mosquée des cents colonnes.....	74
Figure 96:photo montre la toiture de la mosquée.....	75
Figure 97:plan de toiture de la mosquée .....	75
Figure 98: le lanterneau au centre de la mosquée .....	75
Figure 99:axonométrie éclaté de la mosquée aux cent colonnes, auteur .....	76
Figure 100: plan de la mosquée pendant la période coloniale .....	77
Figure 101: photo de l'intérieur de la mosquée pendant la période coloniale .....	77
Figure 102:la toiture de la mosquée .....	78
Figure 103:les ouvertures de la mosquée .....	78
Figure 104:Simulation numérique de la mosquée sur Revit 2018 .....	81
Figure 105:simulation de la mosquée sur Robot structurel Analysis 2018.....	81
Figure 106: Modélisation des colonnes, auteur.....	82
Figure 107: Modélisation des murs porteurs extérieurs, auteur .....	82
Figure 108: création des arcs.....	83
Figure 109:Modélisation de la toiture en charpente en bois .....	83
Figure 110:résultat de la simulation, auteur .....	83
Figure 111:envoi du modèle de Revit vers Robot.....	84
Figure 112:importation de la structure de revit vers robot 2018,auteur.....	84
Figure 113: la structure de la mosquée importé sur Robot 2018 .....	85
Figure 114:création du maillage de la mosquée aux cents colonnes.....	86
Figure 115:etape 1 :importation des scans .....	87
Figure 116:etape2:traitement des scans.....	87
Figure 117:le traitement des scans .....	87
Figure 118:étape 03:renregistrement.....	88
Figure 119:étape 4:marquer les cibles.....	88
Figure 120:étape 5:enregister et vérifier .....	88
Figure 121:la fin de vérification et enregistrement .....	89
Figure 122:le nuage de point de scene d'après le relevé scanner laser.....	89

## Bibliographie

Actes du 4eme séminaire maghrébin sur le génie parasismique ,1990, groupe maghrébin du génie parasismique  
G.M.G.S

Les séismes et leur prévention. Baddari Kamel et Djeddi Mabrouk

John Brockman et Steven Pinker (introduction) (préf. Richard Dawkins), *What is your dangerous idea? today's leading thinkers on the unthinkable*, New York, Harper Perennial, 2007.

Relevé du patrimoine architectural par relevé laser, vision par ordinateur, et exploitation des règles architecturales,  
Fabien Dekyser, François Gaspard, Livio de Luca, Michel Florenzano, Pascal Leray

Archive bastion 23 Rapport de la mission effectuée le 13-12-1986, Cherchell, l'architecte : Baiod Dalila.

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

Les séismes en Algérie de 1365 à 1992 sous la direction de Mourad Bezzeghoud et Hadj Benhallou,1994 par Mokrane A ; A. Ait Messaoud, A. sebai. Menai, A. Ayadi et M. Bezzeghoud

Les risques naturels en méditerranée situation et perspective par Adelin villevielle et al, France ,1997

Absi E.,1995, précis de génie parasismique, ATI/UNESCO, paris

Belazougui,1997, Rapport sur les risques sismiques en Algérie. Séminaire SIDIMED, UATI, paris

RothéJ.P,1996, la sismicité du globe 1953-1965, série science de la terre, n°1, UNESCO, paris

Michel-Kerjan E (2006) Vulnérabilité financière face aux « risques à grande échelle » la parole est la première industrie au monde [archive]. Annales des Mines (N°43, pp. 14-25).

François Michel, Roches et paysages, reflets de l'histoire de la Terre, Paris, Berlin, Orléans, BRGM éditions, 2005, (ISBN 978-2-7011-4081-0), p. 74.

TAZIEFF, H. (1988). Catastrophes naturelles. Entretien avec Roland BECHMANN et Dominique BARICHEFF

John Brockman et Steven Pinker (introduction) (préf. Richard Dawkins), *What is your dangerous idea? today's leading thinkers on the unhinkable*, New York, Harper Perennial, 2007, 300 p.

Renforcement parasismique du bâti existant. Groupe de travail RGCV (PX-Dynamique concept, Vinci, séchaud et Metz, CSTB),2004

Cahier technique SIA 2018 « vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants ». SIA société suisse des Ingénieurs et Architect

Céline Kermisch, *Le concept du risque : De l'épistémologie à l'éthique*, Lavoisier, 1<sup>er</sup> février 2011

Institut des risques majeurs de Grenoble - Glossaire ;2010

Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, Glossaire des risques naturels, 2008, 12

Marcel Philibert : « cherchell-Miscellanée ». L'ancien grande mosquée. Comité du vieil Alger, Alger,1973

H. KLEIN : Feuilles d'El-Djazaïr, n°XI, Alger, Fontana 1929, gravure n°53

Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellemont,2017

Les séismes en Algérie de 1365 à 1992 sous la direction de Mourad Bezzeghoud et Hadj Benhallou,1994 par Mokrane

F. Petzold and D. Donath, Digital building surveying and planning in existing building, E-Des. Archit., p. 73, 2004.

Le relevé géométrique à haute définition. La numérisation 3D à l'heure du BIM par Samuel Dubois, Yves Vanhellemont, Michael de Bouw, mars 2017

Marcel (ph) : Cherchell Miscellanées, l'ancienne grande mosquée, Alger1973, P01

Chennaoui (Y) : la grande mosquée de Cherchell dit : la mosquée de cents colonnes : les cahiers de L'EPAU ; N°5/6, Octobre 1996, P53

AIT HAMOUDA Ibrahim, LA CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI EN ALGERIE. Mémoire de magister, Facultés d'architecture et de Génie civil, Oran, Algérie,2013

Un nouveau label pour la rénovation responsable ; Environnement magazine, 18/07/2017

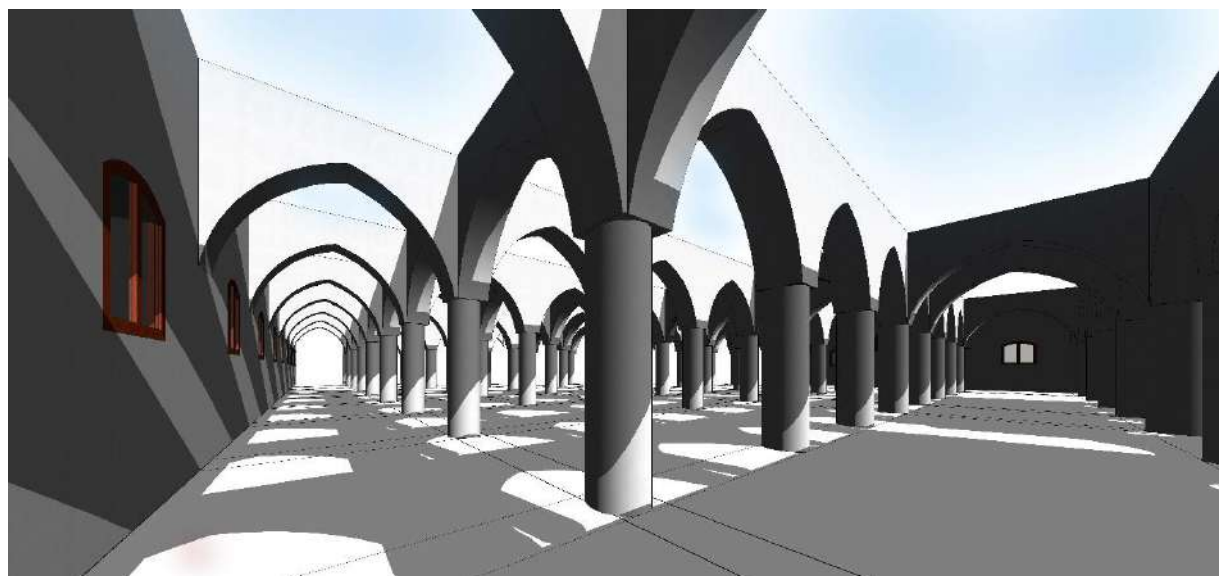
Resilient Building Design Is Resilience the New sustainability? Par Fehrenbacher2016,

## Annexes

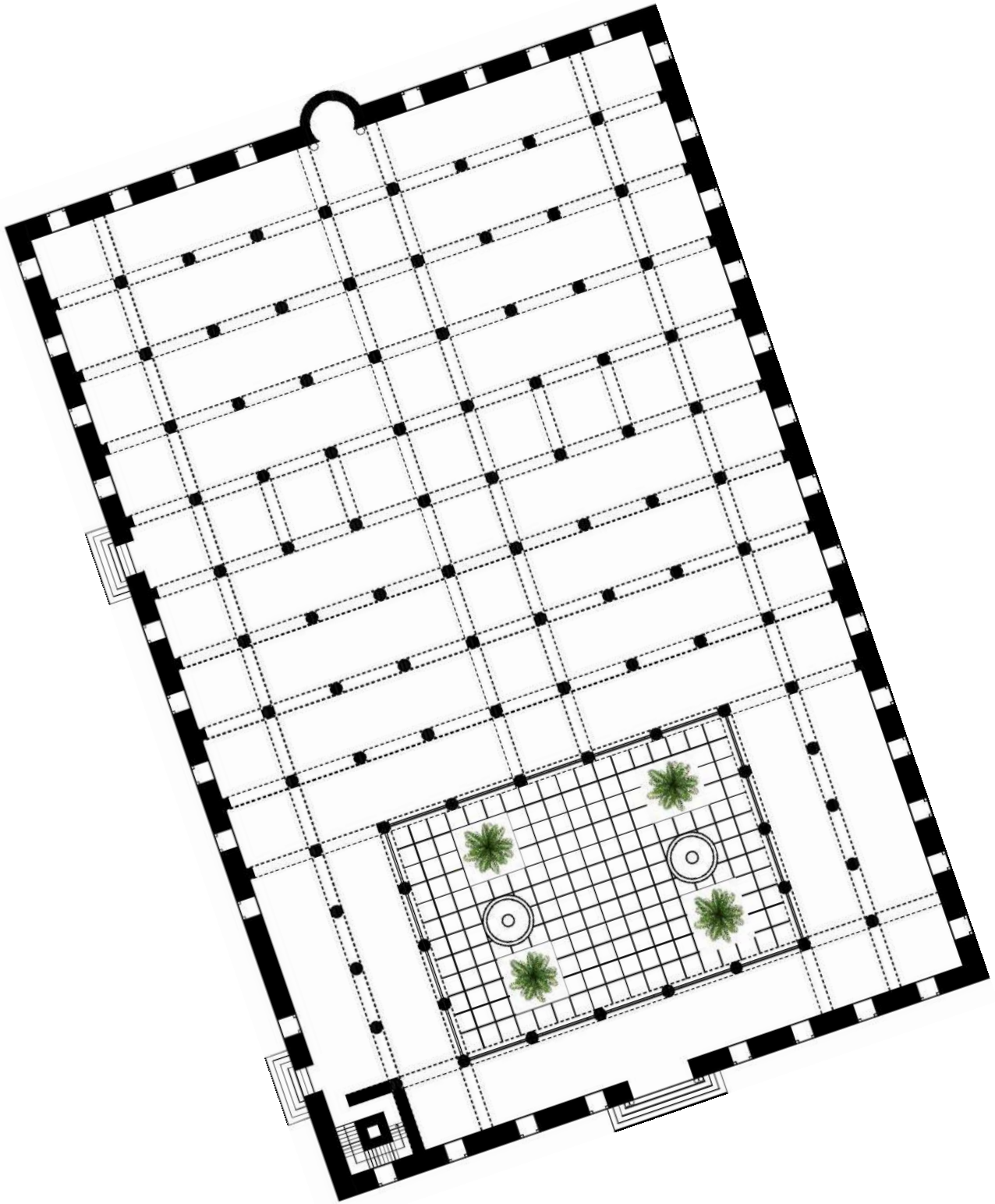


Coupe longitudinale de la mosquée aux cents colonnes

Vue de l'intérieur de la cour de la mosquée



Vue de l'intérieur de la mosquée, série des colonnes



Plan de la mosquée des cents colonnes –Cherchell

Source : auteur

