

République Algérienne Démocratique  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Saad Dahleb Blida I

INSTITUTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME (I.A.U)  
Département de Patrimoine Architectural et Urbain (D.P.A.U)



MASTER 2

ARCHITECTURE ET PATRIMOINE

## **Les approches de renforcement du bâti ancien vis -à -vis des risques naturels**

Cas d'étude : Le Fort turc de Fort de l'eau

---

**Présenté par : Melle BOUAIDAT Radia**

**Encadré par : Dr Djebri Boualem, MCA, EPAU**

**Co-encadré par : Dr Abdessamed Foufa Aicha Amina, MCA, Blida**

**Devant le jury :**

**Président : Dr Siamer Aziza Nesrine , MCA, Blida**

**Examineur : Kouri Yassine , MAA, Blida**

Année universitaire : 2017-2018

سورة التوبة

١٤١٨



**Je remercie d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné la force d'accomplir ce modeste travail.**

Je tiens à présenter mes sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon encadreur **Dr Djebri Boualem**, pour toute son aide et ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie aussi mon co-encadreur **Dr Abdessamed Foufa Aicha Amina** pour son aide et sa compréhension.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail.

J'exprime ma gratitude à ma famille pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Mes remerciements sont également destinés à mes amis, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.



*Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A ma mère qui m'a soutenue durant toute ma vie et ne m'a jamais privée de son amour, de son attention et de ses encouragements.*

*A mon père qui a sacrifié sa vie pour que la mienne réussisse*

*A ma sœur Meriem pour tout ce qu'elle fait pour m'aider et m'encourager et m'accompagne dans mes bêtises et mes joies.*

*A notre ange Amira qui nous donne la joie de vivre et le sourire.*

*A mon frère Youcef que je l'aime beaucoup*

*A ma meilleure copine Nesrine que je lui souhaite beaucoup de réussite et de bonheur,*

*A mes amis et à tous mes proches.*





## **Approche des techniques de renforcement du bat ancien vis-à-vis des risques naturels**

### **Résumé**

L'Algérie jouit d'une richesse patrimoniale inestimable, qu'elle doit prendre en charge et mettre en valeur, et ce, par sa protection contre les différents risques. Néanmoins, il présente des signes de vieillissement inquiétants et de dégradation qui nécessite une intervention urgente.

Jusqu'à présent, les différentes opérations de réhabilitation déjà menées demeurent très limitées en raison de l'absence de spécialistes dans le domaine et faute d'outils permettant de bien mener ces opérations comme le plan d'action efficace.

C'est pourquoi, dans le cadre de préservation du vieux bâti notamment des édifices patrimoniaux, des opérations de réparation, de confortement et de renforcement sont indispensables. Et cela, afin de leur assurer une résistance équivalente à ce que leur a été estimé au départ.

Les techniques du renforcement sont multiples et varient en fonction des structures, des systèmes constructifs, des matériaux et afin de choisir l'approche de renforcement adéquate, il faut avoir en effet la bonne connaissance des techniques et cultures constructives du bâti ancien ainsi le degré de résistance de leur matériaux vis-à-vis du risque naturel qui constitue un des vecteurs de la sauvegarde du patrimoine architectural bâti.

Dans notre étude, l'application porte sur le fort turc de Fort -de -l'eau dont nous allons nous intéresser à la préservation contre les risques naturels. Ainsi nous allons proposer des approches pour le renforcement des différentes parties endommagées.

### **Les mots clés :**

**Bâti ancien, renforcement, risque naturel, matériau, le fort, patrimoine architectural.**



## **Approach of the techniques of enhancement of the old building**

### **ABSTRACT :**

Algeria has an invaluable patrimonial wealth which must be taken on and developed by protecting them from different risks. But it has some worrying signs of old age which needs an emergency intervention.

Until now, the different operations of rehabilitation which have been done are still very limited because of the lack of specialists in this field and also the absence of tools to well do these operations (the efficient action plan)

That's why, within the framework of safeguarding of the old built notably patrimonial, some operations of repairing buildings are essential.

The technical reinforcements are many and vary according to the structures, and construction materials.

In order to choose an available approach to building, the good knowledge of technical and constructive cultures of old buildings and their reactions face to the natural risks is one of the important factors to safeguard the architectural heritage.

So, our study concerns safeguarding of the Turkish Fort of Fort-de-l'eau. We will suggest some approaches for its enhancement from damaged parts.

### **Technical key words :**

**Old building , natural risk, enhancement , material, architectural heritage .**



## نهج لتقوية المباني القديمة فيما يتعلق بالمخاطر الطبيعية

ملخص:

تتمتع الجزائر بغنى تراثي لا يقدر بثمن وجب عليها التكفل به و إعطائه القيمة التي يستحقها فعلا و هذا عن طريق الحفاظ عليه من مختلف المخاطر، بيد أن هذا الأخير يظهر علامات مقلقة للترهل و القدم، الأمر الذي يتطلب تدخلا عاجلا.

إلى حد الساعة تبقى مختلف عمليات إعادة التأهيل جد محدودة لغياب الأخصائيين في الميدان و لغياب الوسائل التي تمكن من الأداء الجيد لهذه العمليات مثلما يمليه مخطط الأعمال الفعال.

لأجل هذا ، و في إطار حماية المباني القديمة لاسيما تلك التراثية تصبح عمليات الإصلاح، الدعم و التقوية ضرورية بغية توفير الصلابة الموافقة لما تم تصوره لهذه المباني عندما شيدت في البداية.

عمليات الدعم متعددة و تختلف وفق عمل هياكل الأنظمة المنشئة لمواد البناء، و من أجل اختيار تقارب الدعم الملائم تجب بالنتيجة المعرفة الجيدة لتقنيات و ثقافات البناء القديم، بل و أيضا كيف تتفاعل مواد البناء مع المخاطر الطبيعية التي تشكل أحد أشعة التراث الهندسي المبني.

في دراستنا الحالية، سيشمل التطبيق الحصن التركي لمنطقة برج الكيفان الذي سنهتم بالحفاظ عليه ضد المخاطر الطبيعية و بناءا عليه سوف نقترح عدة نهجه لتدعيم مختلف الأجزاء الهالكة به.

### الكلمات التقنية:

المباني القديمة, الأخطار الطبيعية, تقوية, التراث المعماري



## *Introduction générale*

I.	Introduction .....	01
II.	La problématique générale.....	01
III.	Hypothèses.....	02
IV.	Objectifs de la recherche.....	02
V.	Méthodologie de la recherche.....	03
	1. Partie théorique.....	03
	2. Partie Investigation.....	03
VI.	Structure du mémoire.....	04
	<b><i>Partie théorique :.....</i></b>	<b>05</b>
	<b><i>Chapitre 1 : Les risques naturels sur le bâti ancien .....</i></b>	<b>06</b>
	<b>I. Introduction .....</b>	<b>07</b>
	<b>II. Présentation des risques.....</b>	<b>07</b>
	<b>1. Définition .....</b>	<b>07</b>
	<b>2. Les composants du risque.....</b>	<b>07</b>
	2.1. L'Aléa.....	07
	2.2. l'enjeu .....	08
	2.3. La vulnérabilité.....	08
	<b>3. Le risque naturel.....</b>	<b>08</b>
	<b>III. Le Séisme et le risque sismique en Algérie.....</b>	<b>09</b>
	<b>1. Définition .....</b>	<b>09</b>
	<b>2. L'action sismique.....</b>	<b>09</b>
	<b>3. Les Caractéristiques d'un séisme.....</b>	<b>09</b>
	3.1 L'intensité.....	09
	3.2 La Magnitude d'un séisme.....	10
	3.3 Le Foyer (hypocentre).....	10
	3.4L'épicentre.....	10
	<b>4. Les Différentes Cinématiques de Failles .....</b>	<b>10</b>
	<b>5. Les Caractéristiques des sollicitations sismiques.....</b>	<b>11</b>
	5.1. Le caractère de l'horizontalité.....	11
	5.2. Des Charges Cycliques.....	11
	5.3 Des Charges Dynamiques.....	12
	5.4 Charges internes.....	12



<b>6. Les Effets des séismes .....</b>	12
6.1. L'Effet des séismes sur l'environnement.....	12
a) Terrassement.....	12
b) Liquéfaction.....	12
c) Tsunami.....	13
6.2. l'effet de séisme sur la construction .....	13
<b>7. Le risque sismique en Algérie.....</b>	14
7.1. Situation géologique de l'Algérie.....	14
7.2. les Zones sismiques en Algérie.....	14
7.3. Le contexte géologique algérois.....	15
7.4 Les effets du séisme sur les constructions.....	16
<b>IV. Le risque du climat sur les constructions.....</b>	16
<b>1. Définition du climat.....</b>	16
<b>2. Les facteurs climatiques.....</b>	16
2.1. Les facteurs énergétiques.....	16
2.1.1. Rayonnement solaire.....	16
2.1.2 Lumière.....	16
2.1.3 Température de l'air.....	17
2.2. Les facteurs hydrologiques.....	17
2.2.1 Les précipitations.....	17
2.2.2 L'humidité relative.....	17
2.3 Les facteurs mécaniques (Le vent).....	17
<b>3. Etude climatique de la ville d'Alger.....</b>	18
3.1. Situation.....	18
3.2. Analyse quantitative du climat d'Alger.....	18
3.2.1 La température.....	18
3.2.2 La pluviométrie .....	19
3.2.3 Le vent.....	19
<b>4. L'humidité.....</b>	20
4.1 Définition.....	20
A. humidité relative.....	20
B. l'humidité absolue.....	20
C. l'humidité spécifique ou teneur en eau .....	20
D. point de rosée.....	20



4.2. Les sources d'humidité dans les bâtiments.....	21
4.2.1 les Remontées capillaires.....	21
4.2.2 Infiltrations de l'eau de pluie .....	22
4.2.3 Humidité de condensation.....	22
a. La condensation superficielle.....	23
b. La condensation interne.....	23
4.2.4 Humidité d'origine accidentelle.....	23
4.3 Répartition de l'humidité dans les ouvrages.....	24
4.4 Les effets de L'humidité.....	24
4.4.1 Effet de l'humidité sur les constructions.....	24
4.4.2 Effet de l'humidité sur la santé de l'homme .....	24
<b>5. Le vent .....</b>	<b>24</b>
5.1 Définition.....	24
5.2 Le phénomène vent à l'échelle urbain .....	25
5.3 L'érosion et le vent.....	26
5.4 L'effet du vent sur le sol.....	26
5.4.1 Naturel.....	26
5.4.2 Construit.....	26
• Effet de coin.....	27
• Effet de sillage .....	27
• Effet de trous sous immeuble.....	28
• Le rouleau tourbillonnaire.....	28
• L'effet de barre.....	28
• L'effet de Venturi.....	28
• Suite d'immeuble interrompu.....	29
<b>V. Conclusion .....</b>	<b>30</b>
<b><i>Chapitre 2 : comprendre le désordre du bâti ancien .....</i></b>	<b><i>31</i></b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>II. Typologies structurelles du bâti ancien.....</b>	<b>32</b>
<b>1. Les éléments structurels verticaux.....</b>	<b>32</b>
1.1 le Mur porteur.....	32
1.2 Les piliers.....	32
<b>2. Les éléments rectilignes.....</b>	<b>33</b>
2.1 Poutres en bois.....	33



2.2 Les planchers.....	33
<b>3. Les éléments horizontaux arqués.....</b>	<b>34</b>
3.1 l'arc.....	34
A. L'arc en plein cintre.....	34
B. l'Arcs brisés.....	35
C. Arcs en anse de panier.....	35
D. arcs surbaissés.....	35
E.arc surélevé.....	36
f. arc outrepassé.....	36
g. Arcs plats.....	36
3.2 la Voute.....	37
a. Voûte en berceau.....	37
b. Voûte d'arrête.....	37
c. voûtes d'ogive.....	38
3.3 les coupoles.....	38
<b>4. les fondations.....</b>	<b>39</b>
<b>III Matériaux de construction du bâti ancien : entre propriété et comportement .....</b>	<b>39</b>
<b>1. la terre.....</b>	<b>39</b>
1.1 Descriptif du matériau terre.....	39
1.2 Typologie de la terre.....	40
1.2.1 La technique de l'Adobe.....	41
1.2.2 La technique de la Bauge.....	41
1.2.3 La technique du Torchis.....	42
1.2.4 La technique du Pisé.....	42
1.2.5 Blocs de terre comprimée.....	43
A. Les Avantage de bloc de terre comprimée.....	43
B. LA gamme de produits de blocs de terre comprimée.....	44
1.3 Les propriété du matériau.....	44
1.3.1 Masse Volumique.....	44
1.3.2 Resistance Mécanique.....	45
1.4 Stabilisation de la terre.....	45
1.4.1 Objectifs.....	45
1.4.2 Procédés.....	45
a). Stabilisation mécanique.....	45
b).Stabilisation physique.....	45
c).Stabilisation chimique.....	45



1.4.3 Les moyens de stabilisation.....	46
<b>2. La pierre.....</b>	<b>46</b>
2.1 Généralité sur la pierre.....	46
2.2 Propriété du matériau.....	47
2.2.1 La résistance mécanique.....	47
2.2.2 Qualité physique et chimique de la pierre.....	47
2.3 La pierre de taille.....	47
2.3.1 Définition et descriptif.....	47
2.3.2 LES DIFFERENTS TYPES de la pierre de taille.....	47
<b>3 L'enduit.....</b>	<b>48</b>
3.1 Définition de l'enduit.....	48
3.2 Fonctions de l'enduit.....	48
3.3 Les types d'enduits.....	48
3.3.1 l'Enduit de ciment.....	49
3.3.2 Enduit de plâtre.....	49
3.3.3 Enduit à base de chaux.....	49
a) Les enduits de chaux aérienne.....	49
b) Chaux hydraulique.....	49
<b>4 Le bois.....</b>	<b>50</b>
4.1 Comportement mécanique.....	50
4.2 Typologie structurale du bois.....	50
4.3 Les lamellés collés Dérivé du bois.....	50
<b>5 L'Acier.....</b>	<b>51</b>
5.1 Définition.....	51
5.2 Comportement mécanique.....	51
<b>IV. Les dommages du bâti ancien.....</b>	<b>51</b>
<b>1. Les pathologies structurelles.....</b>	<b>51</b>
1.1 Les pathologies des murs.....	52
1.1.1 Pathologies coplanaires des parements d'un mur porteur.....	52
A. une trop forte compression sur une large partie du mur.....	52
B. des charges ponctuelles.....	53
C. problème de rigidité.....	53
D. Désordres dus à des différences de charges entre des murs transversaux.....	54
e. mouvements différentiels des fondations.....	54
F. mouvements sismiques les murs des bâtiments traditionnels.....	55
f.1. la presences des fissures en croix.....	55





F.2. fractures verticales au niveau des sections transversales des murs.. .....	56
f.3. Écrasements et bombements des façades.....	56
g. la Poussée des voûtes.....	57
1.2 Pathologie des planchers faits de poutres et de poutrelles.....	57
1.2.1 Les déformations (flèche).....	57
1.2.2 La présence de fissures.....	58
1.3. Pathologie des structures voûtées.....	58
<b>2. Les Pathologie sous l’action du climat.....</b>	<b>59</b>
2.1 Le désordre du mur.....	59
2.1.1 Les éléments structurels en maçonnerie pierre et brique.....	59
a) Efflorescence.....	59
b) exfoliation.....	59
c) Salissure et souillure.....	59
d) Alvéolisation et désagrégation sableuse.....	60
2.1.2. L’enduit.....	60
2.13..Le mortier.....	61
2.2 le désordre du plancher.....	61
2.3 Désordre des éléments en acier.....	62
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>62</b>
<b><i>Chapitre 3 : les techniques d’intervention sur le bâti ancien.....</i></b>	<b>64</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>65</b>
<b>II. La réhabilitation comme outils de préservation du bâti ancien.....</b>	<b>65</b>
<b>1. Définition de la réhabilitation.....</b>	<b>65</b>
<b>2. Objectifs de la réhabilitation.....</b>	<b>65</b>
<b>3. les Enjeux réhabilitation.....</b>	<b>66</b>
<b>4 Les niveaux de la réhabilitation.....</b>	<b>67</b>
4.1. Réhabilitation légère.....	67
4.2. Réhabilitation moyenne.....	67
4 3. Réhabilitation lourde.....	67
4.4 Réhabilitation exceptionnelle.....	67
<b>5. Le processus de réhabilitation.....</b>	<b>67</b>
5.1 Le diagnostic préalable.....	68
5.2 Les relevés.....	68
5.3 La conception d’un projet de réhabilitation.....	68
<b>III. Les techniques de réhabilitation de désordre structurel du bâti ancien.....</b>	<b>69</b>



<b>1. Technique de traitement des fissures.....</b>	<b>69</b>
1.1 Qu'est ce qu'une fissure ?.....	69
1.2 Les différents types de fissures.....	69
3.3 Les techniques de traitement des fissures.....	70
3.3.1 Injection d'un fluide.....	70
3.3.2 Remplacement de la partie endommagée : Reprise des fissures par remplacement partiel.....	71
3.3.3 Reprise des fissures par des agrafes de solidarisation.....	72
3.3.4 Reprise des fissures au moyen des potelets en béton armé.....	73
<b>2. Les types d'interventions pour traiter les pathologies des structures.....</b>	<b>73</b>
2.1 Intervention sur les fondations.....	73
2.1.1 L'amélioration du sol par injection.....	73
2.1.2 La reprise en largeur des fondations.....	74
2.1.3 Les reprises en sous-œuvre.....	75
2.1.4 reprise par des poutres adhérentes en Béton armé.....	76
A. Les poutres adhérentes transversales et longitudinales en Béton armé.....	76
B. poutres adhérentes en Béton armé en forme de L.....	77
2.1.5 La mise en place de micro-pieux.....	78
a. pieux adhérent accolé des deux côtés.....	78
b. pieux adhérent accolé d'un seul côté.....	78
c. micros pieux en Béton armé.....	79
2.2 Réparation des murs et des piliers en maçonnerie traditionnelle.....	80
2.2.1 Le rejointoiement.....	80
2.2.2 Technique de Chaînage.....	81
2.2.3 Le gainage en béton armé.....	81
2.2.4 L'Introduction de barres d'acier.....	82
2.3 Les intersections entre murs en maçonnerie.....	82
2.3.1 Placement des briques de liaison des murs.....	82
2.3.2 Utilisation des fers plats.....	82
2.4 Intervention sur les arcs, les voûtes et les coupes.....	83
2.4.1 le remplacement des claveaux.....	83
2.4.2 Technique de gainage.....	83
2.4.3 Les tirants.....	83
2.4.4 Taxidermies avec des armatures en acier.....	84
A -technique chaînage périphérique.....	84
B -L'introduction de barres d'aciers.....	85
2.4.5 Renforcement par des contreforts.....	85



2.4.6 Réparation des bouffements par pression convergente.....	86
2.5 Interventions sur les planchers .....	86
2.5.1 Remplacement des appuis des poutres et solives en bois.....	86
2.5.2 Le rajout d'une seconde rangée de profilé métallique.....	87
2.5.3 Division de la portée des poutres et solives d'un plancher soumis à une tension de flexion excessive.....	87
2.5.4 Pose additionnelle de dalles en béton armé.....	88
<b>IV. Les techniques de réhabilitation de désordre d'humidité.....</b>	<b>88</b>
<b>1. Les manifestation et les désordres de l'humidité dans le bâti ancien.....</b>	<b>89</b>
<b>2. Les techniques de lutte contre l'humidité ascensionnelle .....</b>	<b>89</b>
2.1 La technique du drainage du sol .....	89
2.1.1- Drainage du sol par drain perforé.....	89
2.1.2 Drainage du sol par bloc drainant.....	89
2.2 Technique de traitement par siphons atmosphériques.....	90
2.3 La technique de l'électro-osmose phorésie : L'électro-osmose phorésie.....	90
2.4 la technique de l'insertion d'une barrière étanche à la base des murs.....	91
<b>3. Les techniques de lutte contre l'humidité des infiltrations .....</b>	<b>91</b>
3.1 Les techniques L'hydrofugation de surface.....	91
3.2 Les revêtements et enduits minces d'étanchéité et d'imperméabilisation.....	91
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>92</b>
<b>Partie investigation .....</b>	<b>93</b>
<b>chapitre 1 : Présentation de fort turc de fort de l'eau .....</b>	<b>94</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>95</b>
<b>II. Situation Géographique du fort .....</b>	<b>95</b>
<b>III. Datation du Fort .....</b>	<b>96</b>
<b>IV. Description du fort .....</b>	<b>96</b>
1. Les dimensions du fort.....	98
2. L'accès au fort .....	99
<b>V. Système constructif du fort .....</b>	<b>99</b>
<b>VI. Lecture architectural du plan.....</b>	<b>100</b>
1. Lecture du plan .....	100
1.1 Lecture du RDC .....	100
1.2 Lecture de l'étage.....	102
<b>2. Lecture des façades .....</b>	<b>103</b>
2.1 Façade Sud .....	103
2.2 Façade Nord .....	104



2.3 Façade Est .....	104
2.4 Façade Ouest .....	105
<b>VII. Conclusion.....</b>	<b>105</b>
<b><i>chapitre 2 : Diagnostic du fort turc de fort de l'eau.....</i></b>	<b>106</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>107</b>
<b>II. Les pathologies de la structure .....</b>	<b>107</b>
2.1 Les murs.....	107
2.1.1 Le mur de la façade principale sud.....	108
2.1.2 Le mur de la façade Ouest.....	108
2.1.3 Le mur de la façade Est.....	108
2.2 les voûtes de RDC .....	109
2.3 La salle de l'étage .....	111
<b>III. Les pathologies dues à l'humidité .....</b>	<b>111</b>
<b>1. La pierre.....</b>	<b>111</b>
1.1 Apparition des alvéoles .....	111
1.2 Apparition des salissures.....	112
1.3 Apparition des algues et des végétations.....	112
<b>2. La brique pleine de terre cuite.....</b>	<b>113</b>
<b>3. Le mortier.....</b>	<b>114</b>
<b>4. La ferronnerie.....</b>	<b>114</b>
<b>5. La Boiserie.....</b>	<b>115</b>
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>115</b>
<b><i>Chapitre 3 : Proposition d'approches et de techniques pour le</i></b>	<b>117</b>
<b><i>renforcement du fort.....</i></b>	<b>117</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>118</b>
<b>II. Le renforcement : une branche de la réhabilitation.....</b>	<b>118</b>
1. Définition.....	118
2. Différence entre une réparation et un renforcement.....	118
3. Méthodologie pour la prise de décision de renforcement / réparation.....	118
A/ Analyse des désordres.....	118
B/ avoir une bonne connaissance de la structure existante .....	119
<b>III. Démarches adoptés pour l'intervention sur le fort turc .....</b>	<b>120</b>
<b>1. Intervention minimale .....</b>	<b>120</b>
<b>2. La réversibilité .....</b>	<b>120</b>
<b>3. Compatibilité.....</b>	<b>120</b>
<b>4. Distinguabilité et transparence.....</b>	<b>120</b>
<b>5. L'Authenticité.....</b>	<b>121</b>



6. Préserver La valeur historique.....	121
<b>IV. Introduction de la nouvelle approche des techniques de renforcement.....</b>	<b>121</b>
1. Renforcement par matériaux composites.....	121
1.1 Description des matériaux composites .....	121
1.2 Les domaines d'application des matériaux composites sont.....	122
2. Renforcement par isolateurs sismiques.....	122
3. Renforcement par perçants (contreventements): (méthode non destructive)	123
<b>V. La spécificité de l'intervention sur un monument historique .....</b>	<b>124</b>
1. Critère de la sélection du matériau adéquat pour le renforcement du bâti ancien.....	124
A. Résistance mécanique.....	124
B. Rapport « résistance /masse »élevé.....	125
C. Rigidité.....	125
D. La résilience.....	125
E. Ductilité .....	125
F. Ténacité.....	125
G. Endurance (résistance à la fatigue).....	125
H. Durabilité.....	125
<b>VI. L'approche pour le renforcement du fort turc (d'Alger).....</b>	<b>126</b>
1. Proposition d'approche de renforcement des murs .....	127
2. Approche pour la reconstitution de la voûte d'étage .....	130
3. Proposition d'approche de renforcement de l'arc de la façade principal .....	133
4. Proposition d'approches pour le renforcement des espaces à proximité des ouvertures.....	134
<b>VII. Conclusion .....</b>	<b>135</b>
<i>Conclusion générale .....</i>	<i>136</i>
<i>LISTE DES FIGURES .....</i>	<i>137</i>
<i>Liste des tableaux.....</i>	<i>142</i>
<i>bibliographie .....</i>	<i>144</i>
<i>Annexe .....</i>	<i>148</i>

# **Introduction générale**



## I. Introduction :

L'Algérie dispose d'un riche héritage culturel et naturel exceptionnel par sa portée historique et symbolique, témoignant du passage de nombreuses civilisations. Il s'agit d'une variété inestimable en matière de patrimoine archéologique, architectural et urbanistique.

Le bâti ancien s'agit, d'une architecture civile, religieuse ou militaire qui s'est constituée à l'aide de pratiques, de traditions et des matériaux locaux.

Mais Malheureusement ce bâti souffre d'un manque d'entretien, il se trouve dégradé, vulnérable et fragile. Cette dégradation est due à plusieurs critères, à savoir

- Les Matériaux utilisés et leur âge
- les techniques constructives
- l'état de conservation,
- les risques naturels tels que le séisme, L'humidité ,le vent .....

De nos jours ces risques naturels sont de plus en plus dévastateurs en milieux urbains, cela est dû essentiellement à la densité d'occupation et à la vulnérabilité de ces derniers. L'Algérie figure parmi les pays les plus touchés par ces aléas. Son histoire témoigne de terribles expériences catastrophiques on site par exemple le séisme de boumerdes de 2003

Le risque sismique est considéré parmi les phénomènes les plus actifs dans le nord du pays, car l'Algérie a de tout temps été soumise à une activité sismique avec comme résultats des pertes humaines et matérielles importantes, Cette activité sismique est due principalement à la nature géologique de la région maghrébine et ses caractéristiques tectoniques à la frontière des deux plaques : africaine et eurasienne en mouvement compressif.

Mais on trouve aussi d'autres pathologies, qui peuvent engendrer des dégradations sur les matériaux et la structure de ces derniers différents facteurs climatiques : humidité, température et vitesse de l'air.

Pour cela, dans le cadre de préservation de bâti ancien des opérations de réparation et du renforcement sont indispensables car par le biais de cette opération, on augmente la capacité de la structure et on redonne à un élément ses caractéristiques mécaniques initiales ou nécessaires, pour pouvoir résister à son chargement actuel d'une manière efficace.

En Algérie nous ne disposons d'aucune donnée concernant le renforcement de la structure du bâti ancien, les seules dispositions tenant compte des séismes sont les règlements techniques tels que le RPA et le règlement de réparation et de renforcement des ouvrages endommagé par les séismes.

Pour cela, il est nécessaire de développer une approche de renforcement du bâti ancien vis-à-vis aux risques naturels (le séisme en particulier), qui rentre dans le cadre de la réhabilitation, en tenant compte des matériaux utilisés dans la construction des anciens bâtis à savoir ; la terre, la pierre et la maçonnerie et sa compatibilité avec les nouveaux tout en concevant sa valeur historique et artistique.



## II. La problématique générale :

Face à la multiplicité des catastrophes naturelles (séismes, glissement de terrains...), le bâti ancien souvent vétuste présente parfois des pathologies qui engendrent un risque potentiel qu'aujourd'hui nous ne pouvons plus négliger.

Un patrimoine bâti, témoin unique et exceptionnel d'une culture ancestrale, illustré par un ensemble architectural riche, doté d'une authenticité : dans sa conception, ses matériaux, son système constructif son organisation spatiale et fonctionnelle,...c'est un héritage monumental porteur de symboles appartenant à la mémoire collective.

Malheureusement, face à la multiplicité des catastrophes naturelles (séismes, glissement de terrains...), le bâti ancien se dégrade de plus en plus, avec une vitesse accélérée surtout ces dernières années, le problème qui se pose :

**-Comment préserver le bâti ancien tout en préservant son authenticité et ses valeurs architectural et historique ?**

**-Quelle approche faut-il adopter pour le renforcement du bâti ancien vis-à-vis les risques naturels ?**

**-Comment introduire cette nouvelle technique de renforcement du bâti ancien tout en assurant la compatibilité entre l'ancien et le nouveau matériau ?**

## III. Hypothèses :

Afin de répondre à notre problématique, nous avons élaboré des hypothèses fondées essentiellement sur l'observation :

1. Comme le bâti ancien présent en générale des valeurs historiques et architecturales, il est conseillé de recourir à des techniques et des matériaux traditionnels.
2. Assurer la stabilité et la résistance par le biais des différentes techniques de renforcement.
3. Recoure à des technique et des matériaux moderne mais sans toucher à son authenticité architectural pour mieux le préserver

## IV. Objectifs de la recherche:

L'objectif de notre initiation à la recherche consiste tout d'abord, à essayer de comprendre le comportement de la structure et les matériaux de bâti ancien vis –à vis aux risques naturel afin de choisir la technique convenable de la réhabilitation, d'autant plus que ce dernier représente, la majeure partie du patrimoine bâti dégradé en Algérie.

Et D'autre part, il s'agit d'essayer de développer une approche de renforcement du bâti ancien avec des nouveaux matériaux toute en préservant sa valeur architectural et historique , en assurant la compatibilité entre l'ancien et le nouveau matériau et cela pour :





1. Améliorer la sécurité et la stabilité du bâti ancien.
2. préserver et protéger le bâti ancien des risques naturels et le transmettre à la génération future.
3. Assurer une meilleure résistance de ce bâti ancien vis-à-vis des risques naturels.

## V. Méthodologie de la recherche :

Afin d'atteindre les objectifs cités plus haut, et confirmés nos hypothèses, notre travail sera structuré en deux parties :

### 1. Partie théorique :

A ce stade nous nous baserons sur la recherche et la collecte des documents, en rapport avec notre thématique par un recueil de support pédagogique sous forme de : livre ; documents écrit et numérique ; mémoires de magistère, thèses de doctorat.

Ces supports pédagogiques sont en relation avec :

- Les risques naturels
- Etudes des séismes d'une manière générale
- La sismicité en Algérie
- Etude de climat
- La réhabilitation
- System constructif du bâti ancien et leur matériau
- Désordre structurel du bâti ancien
- Effet de l'humidité sur le bâti ancien
- Etudes des différentes techniques de renforcement du bâti ancien

### 2. Partie Investigation :

Le choix du cas d'étude s'est finalement porté sur le fort turc de fort de l'eau. Et cela pour l'histoire défensive auguste d'Alger dont il fait témoignage, et pour les multiples valeurs historiques, culturelles...etc., dont il dispose.

Pour mieux cerner notre cas d'étude, on procédera d'abord par une présentation de l'édifice :

Situation, historique, technique constructives et ces pathologies pour ensuite choisir l'approche convenable de renforcement

## VI. Structure du mémoire :

Notre recherche sera organisée dans le présent mémoire comme suit :

- *Une introduction générale* formulant et définissant notre sujet de recherche.

- *Une première partie* constituée de trois chapitres, où nous présenterons les données théoriques inhérentes à la réhabilitation de désordre du bâti ancien vis-à-vis les risques naturels en tant que mode d'intervention apte, à assurer sa conservation



- **Dans le chapitre 1** de la première partie du mémoire, on présente les différents risques naturels ainsi ses effets sur le bâti existant.
- **Dans le chapitre 2** on étudiera la typologie structurelle du bâti ancien ainsi les propriétés et le comportement physico chimique et mécanique de leurs matériaux afin de comprendre les désordres dus des risques naturels.
- **Dans le chapitre 3** nous aborderons la méthode d'intervention de réhabilitation, où nous présenterons un processus complet de réhabilitation d'un bâti ancien

- **Une deuxième partie** : investigation constituée de 3 chapitres, celle-ci sera consacré faire une analyse à notre cas d'étude afin de choisir l'approche convenable de renforcement de notre édifice

- **Le chapitre 1** de la deuxième partie, il sera consacré à présenter notre cas d'étude : sa situation, son historique son système constructif et ces matériaux
- **Le chapitre 2** de la deuxième partie, sera consacré au diagnostic de désordre du notre cas d'étude afin de comprendre leur désordre.
- **Chapitre 03** sera consacré aux choix de à l'approche convenable de renforcement du bâti ancien avec une simulation 3D de type de renforcement

- **Une conclusion générale**, consiste un récapitulatif de notre Étude mené d'une perspective de recherche

# **CHAPITRE N°1**

## **Les risques naturels sur le bâti ancien**



### I. Introduction :

Le risque naturel est la rencontre entre un aléa d'origine naturelle et des enjeux humains, économiques ou environnementaux, De nos jours ces aléas naturels sont de plus en plus dévastateurs en milieux urbains, cela est dû essentiellement à la densité d'occupation et à la vulnérabilité de ces derniers.

L'Algérie figure parmi les pays les plus touchés par ces aléas, son histoire témoigne de terribles expériences catastrophiques notamment celles, le séisme de Chleff et celui de Boumerdès, l'explosion de Skikda.....

Aujourd'hui l'important est que ces catastrophes ont attiré l'attention des gouvernements et du grand public sur le problème des risques naturel et poussent à l'adoption des mesures de mitigation des catastrophes pour préparer les villes menacées aux futurs afin de déminer leurs dégâts.

### II. Présentation des risques :

#### 1. Définition:

Le risque est défini par Le Petit Robert, Edition de 1996 comme un « danger éventuel plus ou moins prévisible » Deux notions sont rattachées à cette définition, le danger et sa probabilité. Elle rejoint ainsi la définition de C. Chaline et J. Dubois : "éventualité, probabilité de danger"(Chaline.C ; Dubois.J 1994)<sup>1</sup>

#### 2. Les composants du risque :

Le risque se traduit par (Voir Fig. N°01):

##### 2.1. L'Aléa:

L'aléa comme étant «... un évènement rare ou extrême, qui survient dans l'environnement naturel ou l'environnement créé par l'homme, et affect négativement la vie humaine, les biens et les activités, au point de créer des catastrophes » (PNUD-DHA-UNDRO)<sup>2</sup>

Les aléas ont la caractéristique d'être soit à déclenchement brusque, tel est le cas des aléas naturels (tremblements de terre, inondations, tempêtes, éruptions volcaniques, glissements de terrains...), et parfois technologiques (explosions d'une centrale nucléaire, accident lors des transports des matières dangereuses...) mais ils peuvent être progressifs avec un développement lent :(sécheresse, désertification, déforestation, remontée des nappes phréatiques ...)

---

<sup>1</sup> CHALINE.C ET DUBOIS-MAURY.J (1994). Les mesures de prévention des incendies s'étaient déjà développées dès le XIIe siècle

<sup>2</sup> Vue générale sur la gestion de catastrophes, programme de formation à la gestion des catastrophes (PNUD-DHA-UNDRO), p16

### 2.2. L'enjeu :

C'est l'ensemble des personnes et des biens susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel.

### 2.3. La vulnérabilité :

Au latin vulnérabilité signifiant être blessé ou exposé à recevoir des blessures, Mais la signification la plus générale de la vulnérabilité fait référence à la susceptibilité à succomber au danger ou pertes dues aux chocs externes (catastrophes naturelles), « elle englobe les caractéristiques d'une personne ou d'un groupe de personnes à la limite de leurs capacités d'anticiper, d'affronter, de résister ou de récupérer de l'impact d'un évènement naturel extrême »<sup>3</sup>.

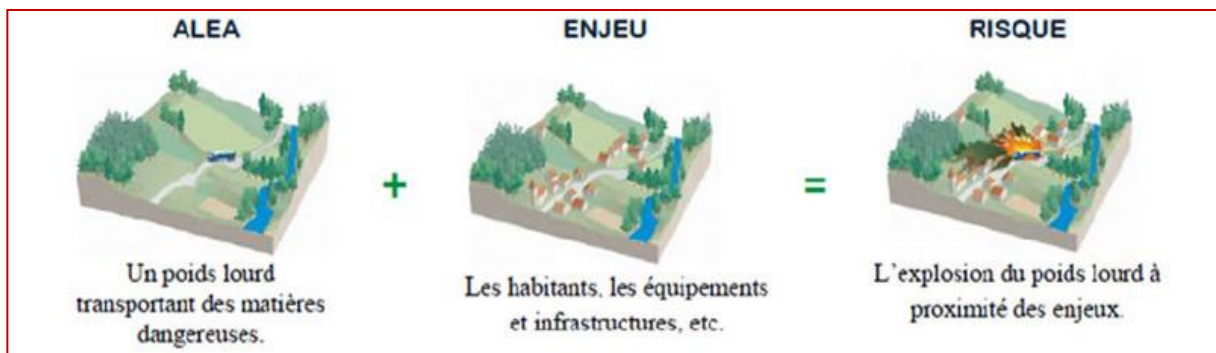


Figure 01 : illustration des composants du risque

Source : image internet juin 2018

## 3. Le risque naturel :

C'est un risque déclenché par un phénomène dans lequel la nature est l'unique composante. Il se produit dans l'atmosphère, dans l'océan, sur le sol et dans le sous-sol : vent, pluie, mouvements de l'eau ou du sol, feux.

Parfois, ces phénomènes se produisent avec une violence intense due à la dissipation d'une énergie considérable accumulée : ce sont des tempêtes, tornades et cyclones, des pluies intenses suivies de coulées de boues, de crues torrentielles ou d'inondations en plaine, des avalanches, des glissements ou affaissements de terrain, des séismes, des éruptions volcanique, ainsi que de grands feux de forêt. Leur caractère chaotique ne permet pas de prédire leur naissance et leur déroulement.

Ces phénomènes dévastateurs on situe l'aléa, première composante du risque, les conséquences sont plus ou moins graves selon le lieu et les circonstances de l'évènement, la présence de personnes ou de biens, les dispositions de prévention et les comportements durant la crise : c'est la vulnérabilité, seconde composante du

Sa source est donc un ou plusieurs aléas naturels, il peut être d'origine :

<sup>3</sup> WISNER Ben , “disaster RiskReduction in Megacities : Making the most of human and social capital “ P5, “ ... by vulnerability wemean the characteristics of a person or group terms of their Capacity to anticipate, copewith, resist and recoverfrom the impact of a naturalthazard.”

- **Terrestre** : Séisme, Tsunami, Eruption Volcanique, Mouvement de terrain...
- **Climatique** : Inondation, Cyclone, Ouragan, Tempête de vent, Avalanche, Sécheresse...
- **Environnementale** : Déforestation, Désertification ...

### III. Le Séisme et le risque sismique en Algérie

#### 1. Définition :

Un séisme, ou tremblement de terre, se traduit en surface par des vibrations du sol, il provient de la fracturation des roches en profondeur, cette fracturation est due à une grande accumulation d'énergie qui se libère, en créant ou en faisant rejouer des failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint.

La croûte terrestre est constituée de plusieurs grandes plaques qui évoluent les unes par rapport aux autres : certaines s'écartent, d'autres convergent, et d'autres coulissent. Environ 90 % des séismes sont localisés au voisinage des limites de ces plaques.

#### 2. L'action sismique :

L'action sismique peut se décomposer en la somme d'une composante horizontale (suivant deux directions principales (Hx et Hy) et d'une composante verticale Vz, il est utile de savoir que la composante verticale est, à l'aplomb de l'épicentre, égale à la composante horizontale. Plus nous nous éloignons de cette épicentre, plus la composante verticale est importante par rapport à la composante horizontale, elle perd environ 50 à 70% de son influence. L'importance du mouvement vertical est souvent négligeable, car moins dommageable, que le mouvement horizontal. D'autant plus, du fait, que les structures soient réalisées pour supporter leur poids propre, cette composante verticale est moins importante, alors que la composante horizontale, elle, sera préférée pour dimensionner les structures à la résistance aux efforts horizontaux. (Voir Fig. N°02)

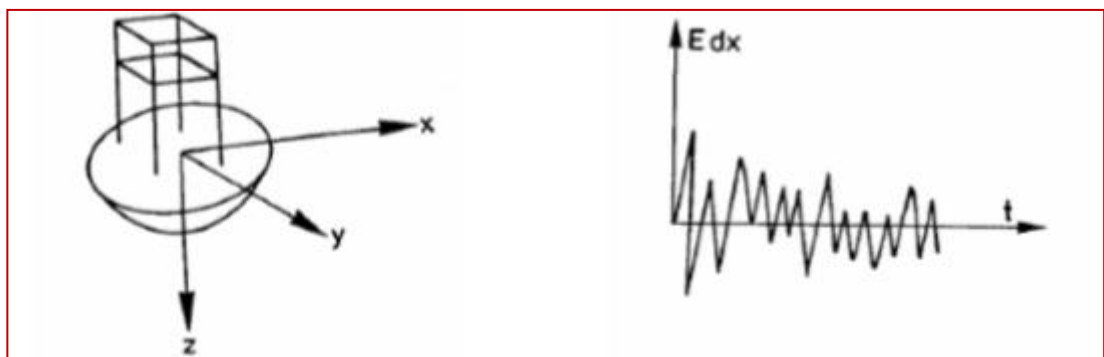


Figure 02 : décomposition de l'action sismique

Source : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00217/32856/31335.pdf> juin 2018

#### 3. les Caractéristiques d'un séisme :

**3.1 L'intensité** : elle mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. C'est une évaluation statistique sur une échelle descriptive de la manière dont le séisme se traduit en

surface. Pour ne pas la confondre avec la magnitude, elle est toujours notée en chiffres romains ;

**3.2 La Magnitude d'un séisme :** Est la mesure de l'énergie libérée à partir du foyer du séisme, elle est obtenue à partir des analyses des enregistrements des appareils et des outils d'enregistrements sismiques : les sismographes<sup>4</sup>, les accéléromètres<sup>5</sup>, disposés dans différentes station d'observation.

**3.3 Le Foyer (hypocentre) :** C'est le point de rupture des roches, à partir duquel les ondes sismiques se propagent dans toutes les directions. La profondeur maximale d'un foyer est de 700km (limite du manteau supérieur) (Voir Fig. N°03): Les séismes au foyer peu profond de 0 à 60km sont plus communs et plus destructeurs (cas de l'Algérie) 41

**3.4 L'épicentre :** c'est La projection verticale du foyer d'un séisme sur la surface terrestre

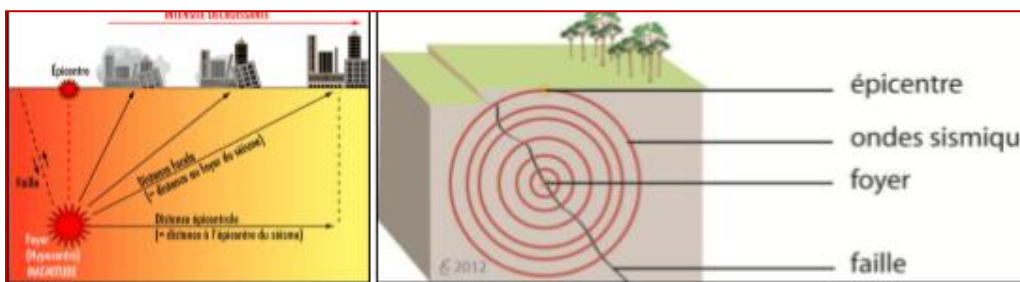


Figure 3: le mécanisme au niveau du foyer source : collectif, classeur, op, cit

## 4. Les Différentes Cinématiques de Failles :

L'activité sismique est le résultat d'une rupture au niveau des couches de la lithosphère suite à une accumulation de contraintes dépassant le seuil de résistance mécanique de ces couches. Cette rupture se produit au niveau du point le plus fragile appelé l'hypocentre ou foyer, le plan de cette rupture est appelé la faille.

La faille est une zone de rupture dans la roche, le long de laquelle les deux bords se déplacent l'un par rapport à l'autre parallèlement à la trace de la fracture. Les failles peuvent être réparties en trois catégories, selon leur mouvement relatif (Voir Fig. N°04):

- **failles normales** : où la déformation engendre un étirement des roches initiales, c'est le résultat d'un mouvement d'écartement. (Divergence)
- **Failles inverses** : c'est le mouvement de surélévation d'un côté par rapport à l'autre, c'est le résultat d'un mouvement de rapprochement (convergence)
- **Failles en décrochement** : c'est le mouvement de déplacement des roches uniquement sur un plan horizontal.

<sup>4</sup> Sismographe : détecteur de mouvements du sol qui comporte un capteur mécanique, un amplificateur et un enregistreur, on utilise parfois le mot sismomètre ou séismomètre

<sup>5</sup> Les accéléromètres enregistrent les accélérations des mouvements du sol en fonction du temps, ce sont des sismographes adaptés à l'enregistrement de fortes secousses.

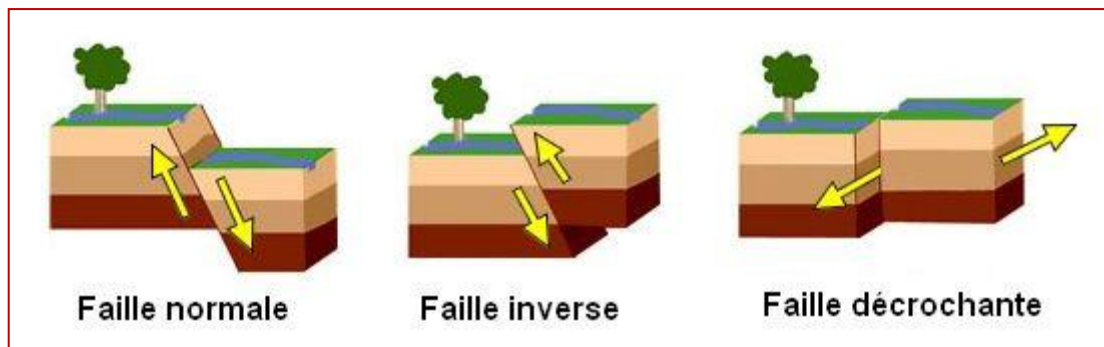


Figure 04 : illustration des composants du risque

Source : internet juin 2018 / [www.liberation.fr/futurs/2016/10/12/seisme-le-big-one-californien-est-il-](http://www.liberation.fr/futurs/2016/10/12/seisme-le-big-one-californien-est-il-)

## 5. Les Caractéristiques des sollicitations sismiques :

Les charges sismiques qui frappe le bâtiment se distinguent des charges ordinaires de la structure (charges permanentes, charges d'exploitation...etc.) Par des caractéristiques particulières, ce sont ces dernières qui font des sollicitations sismiques dernières qui font des sollicitations sismiques des menaces pour les structures et entraînent des conséquences catastrophiques :

**5.1 Le caractère de l'horizontalité :** Les structures (excepté les structures parasismiques) sont traditionnellement conçues et dimensionnées afin de faire face à des charges verticales (charge permanente, d'exploitation, poids propre...etc.), lors d'un séisme ces structures seront soumises à de brusques accélérations horizontales. Ce qui entraîne des dépassements des limites élastiques et l'effondrement des structures bâti, qui à la base n'ont pas été calculé pour résister à des charges horizontales importantes.

**5.2 Des Charges Cycliques :** Lorsque les charges sismiques sollicitent une structure- et contrairement aux charges ordinaires- elles le font d'une manière cyclique sous forme de mouvement brutal de va-et vient. Cette alternance de sollicitations engendre des dégradations rapides et progressives.

Le graphe suivant (voir Fig. N°05). Est une étude comportementale d'un matériau sous l'effet des charges cycliques. En effet suite au mouvement des va et vient engendrer par les sollicitations sismiques, le matériau subit des déformations, la succession de ces mouvements entraîne une progression de la déformation du matériau, jusqu'à l'atteinte d'un niveau de déformation important, où le matériau ne revient plus à la position initiale, il s'agit donc d'une déformation plastique résiduelle. En langage technique le matériaux dépasse son seuil de résistance et rompt suite à la déformation plastique.



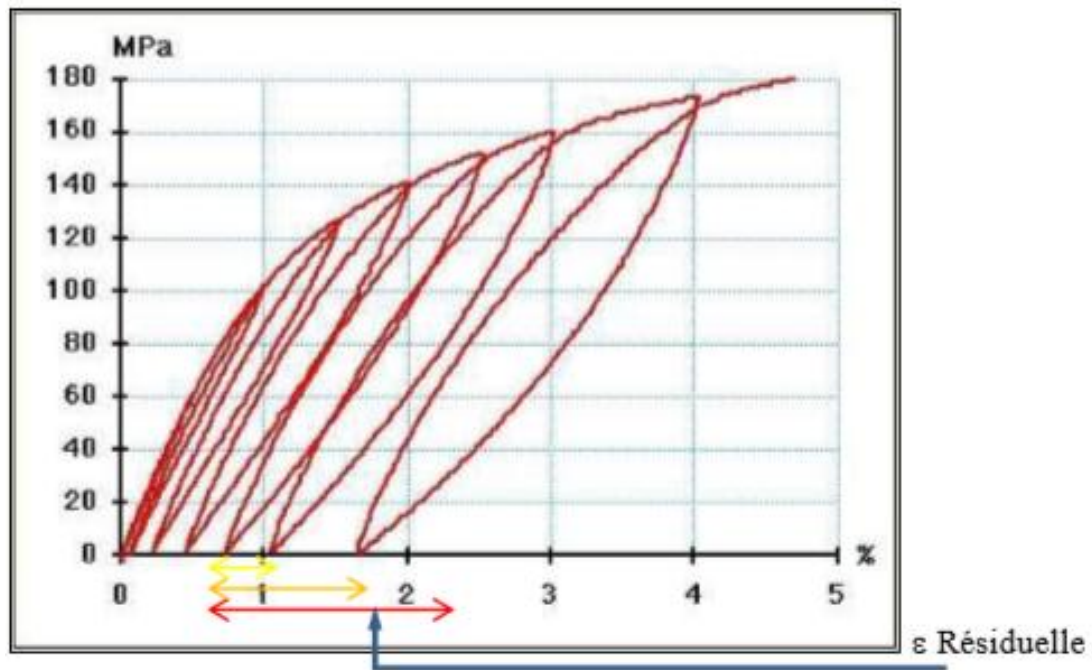


Figure 05: graphie comportement d'un matériau sous l'effet des charges sismiques cycliques

Source: DR djebri boualem, thèse doctorat, ENTPE, LYON, 1992

**5.3 Des Charges Dynamiques :** Lors d'un séisme la base de la structure est la première à être touchée par des mouvements brusques et des accélérations dans toutes les directions, suivis par les étages et les niveaux supérieurs avec un temps de retard proportionnel à leurs masses. Ces mouvements brusques et cette différence de temps entre la base et les étages engendrent une oscillation (vibrations) du bâtiment.

**5.4 Charges internes :** Les charges sismiques entraînent des efforts internes, très importants en particulier des efforts tranchant et des efforts de cisaillement. Contrairement aux charges habituelles, les charges sismiques n'agissent pas de la même façon sur toutes les structures.

## 6. Les Effets des séismes

### 6.1. L'Effet de séismes sur l'environnement

#### a) Tassements :

Des tassements importants peuvent être la conséquence de séisme. Ces tassements peuvent être estimés par la mesure des vides du sable sec, ils peuvent atteindre une dizaine de centimètres et être fortement préjudiciables pour tout type de construction.

#### b) Liquéfaction :

Un phénomène très courant lors d'un passage d'un tremblement de terre est le phénomène de liquéfaction, La mise en mouvement du sol entraîne une remontée de la pression interstitielle provoquant la réduction de la résistance au cisaillement de ce sol jusqu'à

atteindre une résistance nulle. Cette annulation de la résistance au cisaillement provoque que le sol se comporte dès lors comme un liquide, d'où le terme de liquéfaction du sol.

Une des conséquences de la liquéfaction est le fait qu'une couche non liquéfiable se trouvant sur une couche liquéfiée provoquera qu'il y ait un glissement de la première couche sur la deuxième. Ce glissement entraîne le plus souvent la chute ou le renversement du bâtiment. (Voir Fig. N°06)

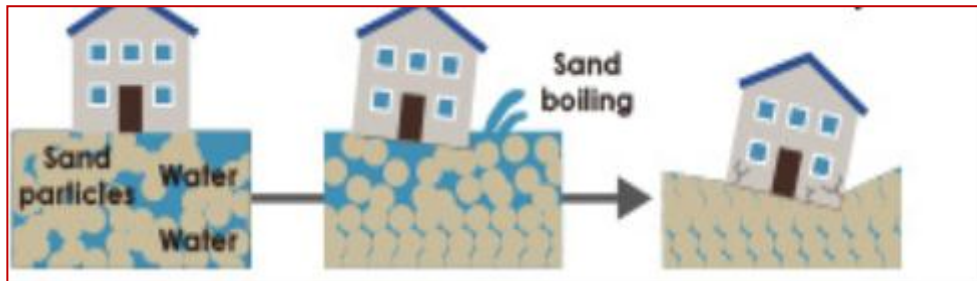


Figure 06 : le phénomène de liquéfaction

Source <http://www.cti.co.jp/en/solution/cae/cae2/> juin 2018

c) **Tsunami** :

Lors d'un tremblement de terre, si celui-ci a lieu en fond de mer et que le mouvement relatif des bords de la faille est de type vertical, il entraîne soit une aspiration d'eau soit une poussée appliquée à l'eau. Le risque de tsunami concerne surtout les zones littorales des DOM TOM, mais le littoral métropolitain n'en est pas à l'abri, en particulier les rivages de la Méditerranée. (Voir Fig. N°07)

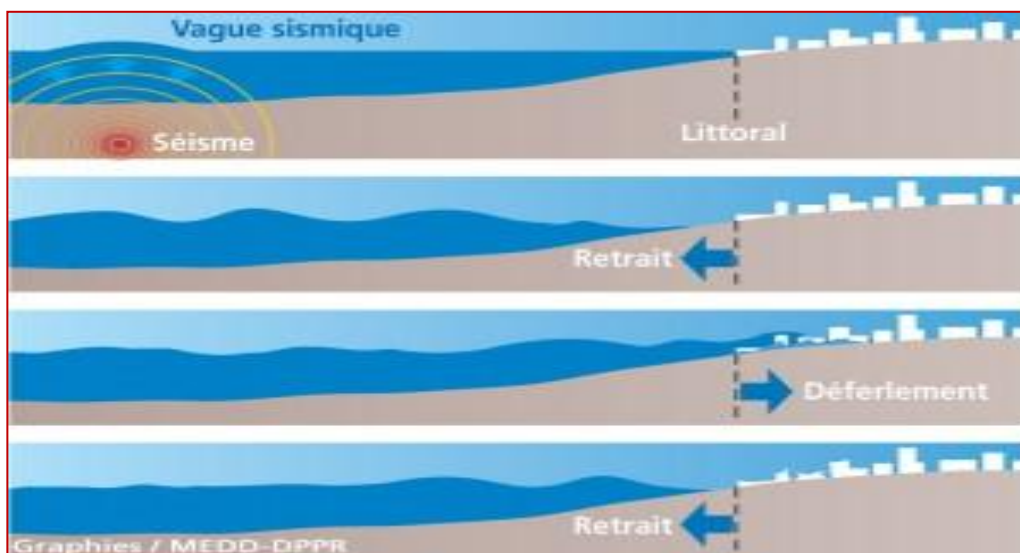


Figure 07 : le phénomène de tsunami

Source <http://www.mementodumaire.net/les-risques-naturels/rn-6-seismes-et-tsunami/juin 2018>

**6.2 L'effet de séisme sur la construction :**

Lorsqu'un matériau rigide est soumis à des contraintes de cisaillement, il va d'abord se déformer de manière élastique, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, il se plastifie et il cède, en dégageant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulé

durant la déformation élastique. Dans l'état actuel des choses, il est question de prévoir les modes de déformation des constructions sous l'effet des secousses, et de maîtriser l'importance de ces déformations et contraintes sur l'ensemble de la structure porteuse. Pour des raisons de bon fonctionnement et de stabilité générale de la construction, on ne peut pas laisser un bâtiment se déformer comme un roseau. On doit contrôler son endommagement en empêchant la rupture brutale et l'effondrement, tout en assurant un comportement ductile pour la structure de ce bâtiment.

## 7. Le risque sismique en Algérie :

L'Algérie est un pays à très fortes sismicité et qui à travers l'histoire a payé des conséquences très lourdes, perte de vies humaines, destructions de villes entières. Ces conséquences se revoient principalement à l'effondrement des constructions sur leurs occupants suite à de fortes sollicitations sismique. L'enjeu donc aujourd'hui est d'assurer un maximum de résistance face aux charges sismiques.

Face à l'imprévisibilité de l'événement sismique les constructions doivent aujourd'hui être préparées à supporter de fortes sollicitations horizontales. En Algérie et depuis la catastrophe d'El Asnam de 1980, qui a engendré 3 000 victimes, dû principalement à l'effondrement des bâtiments sur leurs occupants, un règlement pour la prise en compte du risque sismique est mis en vigueur, il s'agit du RPA1981.

### 7.1 . Situation géologique de l'Algérie :

L'Algérie se situe sur la plaque tectonique continentale Africaine. Cette dernière est en perpétuelle collision avec la plaque de l'Eurasie (Un mouvement de convergence entre les deux). Avec une vitesse moyenne de 5mm/ans, la plaque africaine se rapproche de l'Eurasiatique (la plaque Eurasiatique étant stable) ce mouvement de collision entraîne au niveau des zones de contact des plaques des chaînes de montagnes, des plis et des failles orientés principalement NE-SO, et engendre également un raccourcissement orienté SE-NO48. Cette zone de contact entre les deux plaques tectoniques est située en Algérie le long de la parallèle 36°N. Et c'est ce qui révèle à l'Algérie son caractère de zone à forte sismicité. La sismicité de l'Algérie se concentre au nord, sur une bande littorale. Tans dis qu'au sud la sismicité est quasi nulle.

### 7.2. Les Zones sismiques en Algérie :

Le zonage sismique du territoire algérien montre que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléas sismique le plus élevé. Le territoire national est divisé en cinq (5) zones de séismicité croissante, définies <sup>6</sup>(Voir Fig. N°08) :

- Zone 0 : sismicité négligeable
- Zone I: sismicité faible
- Zone II a et II b : sismicité moyenne

---

<sup>6</sup>Synthèse du règlement parasismique Algérien version 2003le zonage sismique 2003 (arrêté du 11 Janvier 2004 portant approbation du document technique réglementaire relatif aux « règles parasismiques algériennes RPA 99/ version 2003 ») et les catalogues des séismes en Algérie (1994 et 2002)

- Zone III : sismicité élevée

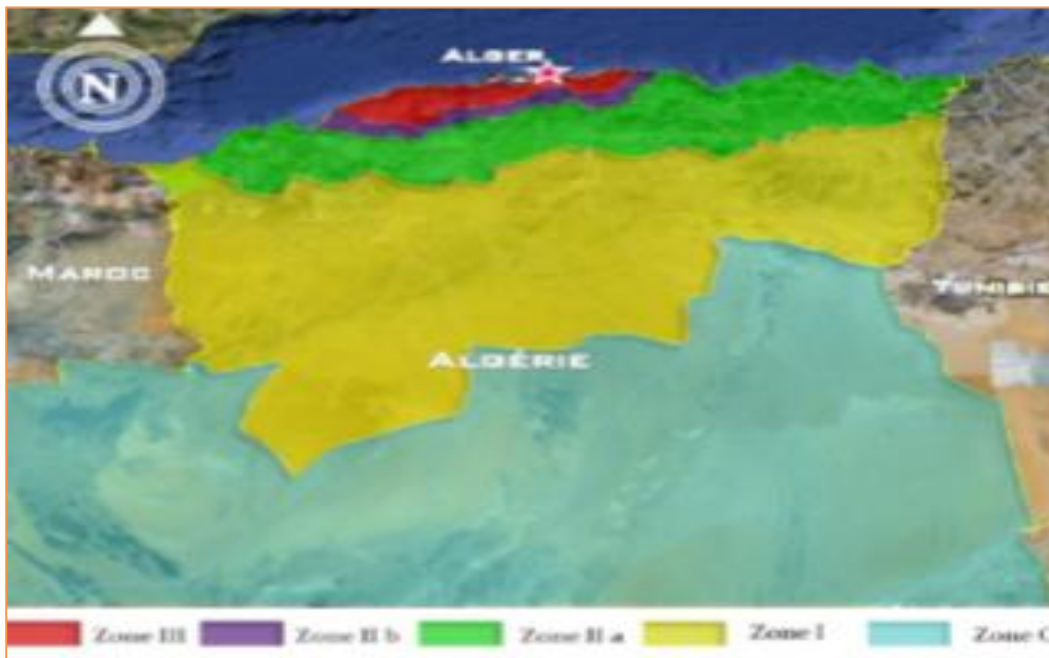


Figure 08 : zonage sismique en Algérie  
 Source : auteur en référence du RPA 99 VERSION (2003) / APRES

### 7.3. Le contexte géologique algérois :

L’algérois est essentiellement structuré par la plaine de la Mitidja qui est un bassin de type intra montagneux, bordé au sud par le domaine des nappes formant l’Atlas Tellien. La série sédimentaire du bassin de la Mitidja s’étend du Jurassique au Miocène. Au pliocène, la mer y dépose des marnes bleues à intercalations gréseuses d’une épaisseur pouvant atteindre 1000 m (MEDD/DPPR/SDPR2003)14. A l’est la Mitidja est bordée par des affleurements de socle de type granitoïde apparaissant à Boumerdès et le long de la faille de Thénia. (Voir Fig. N°09)

I Les principales structures compressives récentes dans la chaîne tellienne sont :

- Le pli-faille d’el Asnam
- Le pli-faille de Bou Kadir
- Le pli-faille de Dahra
- Le pli-faille de Ténès-Abou el –Hassan
- Le pli-faille de Sahel d’Alger
- Le pli-faille de Murdjadjo

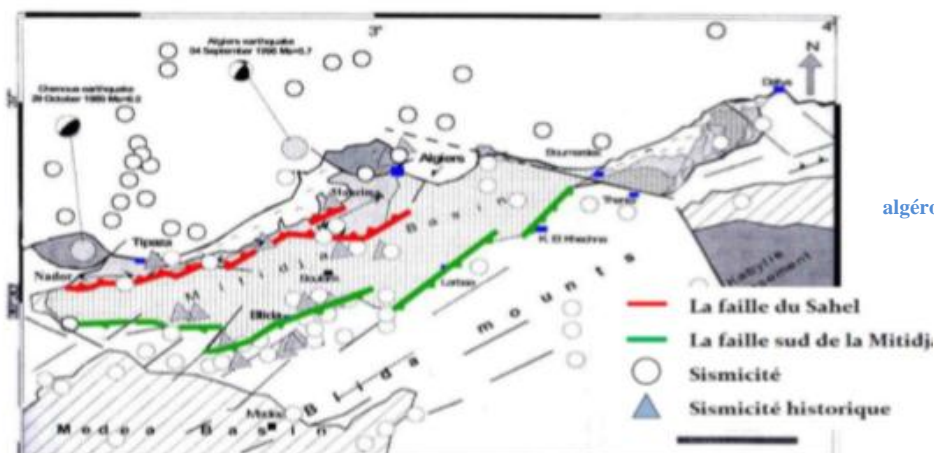


Figure 09 : contexte géologique algérois (les différentes failles)

Source : M.H.A.T, programme



### 7.4 Les effets du séisme sur les constructions :

Un séisme destructeur est souvent celui qui affecte une zone fortement urbanisée causant d'énormes dégâts affectant en 1er lieu les constructions mais sauf que les vieux bâtis sont les plus vulnérable à cause de manque de chaînage et de renforcement.

Les conséquences du séisme d'Alger Boumerdès sur les constructions étaient surprenante, c'est la première fois que des bâtiments de quatre voir cinq niveaux se sont effondrés en mille-feuilles L'effondrement en millefeuilles des immeubles a prouvé que les normes parasismiques étaient une notion totalement étrange. Ni les particuliers et encore moins les pouvoirs publics n'ont construit de manière à ce que les bâtisses résistent aux séismes. Même si les spécialistes ont fini par reconnaître que la législation de l'époque n'était pas parfaite, cependant des textes existaient, réglementant l'acte de bâtir.

## IV. Le risque du climat sur les constructions :

Le risque climatique est un risque lié à la vulnérabilité accrue des bâtiments par rapport aux variations des indices climatiques température, précipitations, vent, neige...

Afin de comprendre les causes de dégradation du bâti ancien et ensuite le préserver cela nécessite avant tout une compréhension approfondie des éléments météorologiques

### 1. Définition du climat :

Le mot climat vient du mot grec « Klimat », qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la terre<sup>1</sup>. Le dictionnaire le petit Larousse définit le mot : « climat », comme l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression, vents, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné.

### 2. Les facteurs climatiques :

La combinaison de divers paramètres tels que : les radiations solaires, la température et l'humidité de l'air, les vents, les précipitations constituent le climat d'un lieu. Ces éléments sont mesurables à l'aide des instruments de mesure, et l'analyse de leurs valeurs permet d'évaluer la nature et la qualité du climat. L'importance de ces paramètres se révèle surtout dans la phase amont de conception et même pour des projets de réhabilitations. L'ensemble de ces facteurs climatiques à considérer peuvent être classés en trois différentes catégories :

#### 2.1 Les facteurs énergétiques :

##### 2.1.1. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est une radiation électromagnétique émise par le soleil. La quantité du rayonnement disponible sur le sol dans un lieu donné dépend de :

- L'altitude du lieu
- La saison et de l'heure de la journée.
- La qualité du ciel (ciel clair, semi couvert ou bien couvert).
- La pureté de l'air, le bioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.
- Le vent





### 2.1.2 Lumière :

Le soleil source de toute énergie lumineuse et thermique, nous approvisionne en éclairage naturel et en chaleur. Le spectre électromagnétique solaire se compose de plusieurs ondes. Parmi les plus sensibles par l'homme sont le spectre lumineux et le spectre thermique.

### 2.1.3 Température de l'air :

La température est une grandeur très fluctuante, car elle résulte de plusieurs facteurs<sup>7</sup> : l'altitude, le rayonnement solaire incident, rayonnement émis par le substrat, éventuels apports issus de la mobilité de l'air, densité de l'air, quantité d'énergie consommée pour l'évapotranspiration.

Les variations de température sont la somme : d'une variation saisonnière et de fluctuations journalières.

Les variations saisonnières sont fonction des variations saisonnières, du rayonnement solaire et de la position géographique du lieu par rapport aux mers.

Les fluctuations journalières sont fortement influencées par l'importance de l'ensoleillement.

## 2.2 Les facteurs hydrologiques :

### 2.2.1 Les précipitations :

On appelle « précipitations » toutes les eaux qui se condensent dans l'atmosphère et tombent ou se déposent ensuite à la surface de la Terre : pluie, neige, grêle, rosée, etc., leur répartition à la surface du globe est très inégale :

Les zones les plus arrosées se situent dans la zone chaude, à proximité de l'équateur, et dans la zone tempérée, à l'ouest des continents. Les régions sèches se trouvent près des tropiques ainsi que dans les zones polaires

### 2.2.2 L'humidité relative :

L'humidité relative (HR) est le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la quantité d'eau que l'air saturé peut contenir à une température donnée. Les stations météorologiques effectuent des relevés de l'humidité relative moyenne et son évolution journalière, à l'aide de ces données on peut calculer l'humidité relative moyenne mensuelle pour tracer la courbe d'évolution annuelle de l'humidité relative d'une région

## 2.3 Les facteurs mécaniques (Le vent) :

C'est le mouvement de l'air dans diverses directions par rapport à la surface de la Terre. Il s'effectue sur un plan horizontal, cependant les déplacements horizontaux ne peuvent être dissociés des mouvements verticaux. Les mouvements synoptiques sont verticaux, malgré leur faible intensité. Ils modifient de manière assez sensible l'état thermodynamique de l'air. Ces modifications résultent essentiellement des variations de pression subies par les particules ascendantes ou descendantes.

---

<sup>7</sup> Martine Tabeaud, la climatologie, Armand Colin, 2000, Paris. P : 28.

### 3. Etude climatique de la ville d'Alger :

#### 3.1 Situation :

Elle est située au nord –centre du pays et occupe une position géostratégique intéressante, aussi bien, du point de vue des flux et échanges économiques avec le reste du monde, que du point de vue géopolitique. Elle s'étend sur plus de 809 Km<sup>2</sup>.

Elle est limitée

- au nord par la mer méditerranée
- au Sud par la wilaya de Blida
- à l'ouest par la wilaya de Tipaza
- à l'est par la wilaya de Boumerdes

La ville d'Alger bénéficie d'un climat tempéré chaud. La pluie dans Alger tombe surtout en hiver, avec relativement peu de pluie en été Les vents dominants sont de direction Nord à Nord Ouest en hiver

#### 3.2 Analyse quantitative du climat d'Alger :

##### 3.2.1 La Température:(Voir tableau N°01)

L'interprétation des données climatique de la ville d'Alger (tab 1), illustrée sur les courbe (Courbe 1) révèle En hiver, il fait froid par temps clair, surtout dans les banlieues sud, alors que les journées sont généralement douces.

	jan	fév.	MAR	avr	mai	jui	jui	aou	sep	oct	nov	déc
Température moyenne (c°)	11.5	12.1	13.5	15.5	18.2	21.5	24.3	25.2	23.3	19.4	15.1	12.3
Température minimale	8.1	8.3	9.7	11.3	14	17.4	20.2	21	19.5	15.7	11.5	9
Température maximal	14.9	15.9	17.3	19.7	22.5	25.6	28.5	29.5	27	23.2	18.8	15.6

- [tableau 1: variation de la température](#)
- [Source : internet fr.climate-data.org/afrique/algerie/alger/alger-3684](http://fr.climate-data.org/afrique/algerie/alger/alger-3684) juin 2018

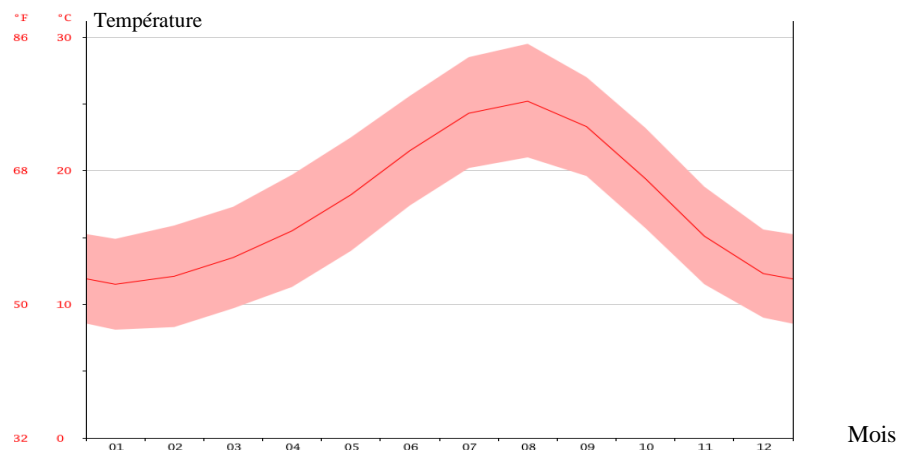
En été, le temps est généralement chaud et ensoleillé, avec la brise qui souffle de la mer, la

Différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 118 mm. La température moyenne au court de l'année varie de 13.7 °C.



Courbe 2: courbe de température Alger

Source internet climat Alger <https://fr.climate-data.org/location/3684/>



Sachant que Le mois le plus chaud de l'année est celui d'Aout avec une température moyenne de 25.2 °C. et Au mois de Janvier, la température moyenne est de 11.5 °C. Janvier est de ce fait le mois le plus froid de l'année.

### 3.2.2 La pluviométrie :(Voir tableau N°02)

L'analyse de la précipitation du tableau révèle que :

Les précipitations totalisent 600 mm par an; le régime est typiquement méditerranéen, en fait, la période la plus pluvieuse va de novembre à janvier, tandis qu'en été il pleut très rarement

Mois	jan	fev	mar	avr	mai	jui	jui	aou	sep	oct	nov	déc	année
Préc (mm)	80	75	55	60	40	9	5	8	30	60	90	90	<b>600</b>
jour	11	11	10	9	7	3	2	3	5	9	11	12	<b>92</b>

Tableau2: Tableau de pluviométrie ALGER

Source internet climat Alger <https://fr.climate-data.org/location/3684/> juin 2018

### 3.2.3 Le vent

L'interprétation des données du diagramme montre que le vent soit fort de décembre à avril et calme de juin à octobre

Mois de l'année	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Direction du vent	↖	↖	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↖	↖	↗
Probabilité du vent >= 4 Beaufort (%)	30	38	46	43	44	38	35	34	35	29	29	26	35
Vitesse du vent moyenne (kts)	10	11	12	11	11	10	10	10	10	9	9	9	10
Temp. de l'air moyenne (°C)	15	15	16	19	21	24	27	27	25	24	19	16	20

Diagramme1: la vitesse du vent d'Alger

Source : internet <https://fr.windfinder.com/windstatistics/alger-port> consulté juin 2018





#### 4. L'humidité:

L'humidité dans ses aspects les plus divers est responsable de l'apparition de la majorité des pathologies dans le bâtiment dont la cause est générée essentiellement par la circulation de l'eau dans la construction ou à l'extérieur de celle-ci.

##### 4.1 Définition :

D'après Larousse, l'humidité est l'état de ce qui est humide c'est-à-dire chargé d'eau ou de vapeur d'eau.

L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs manières<sup>8</sup>:

**A. humidité relative :** C'est une mesure de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air exprimée en pourcentage de la quantité maximum de vapeur d'eau que l'air peut renfermer à la même température.

**B. l'humidité absolue :** représente la masse d'eau par unité de volume d'air, en  $\text{kg/m}^3$  ; la pression partielle de vapeur d'eau,  $p$ , s'obtient en supposant que la vapeur d'eau occupe à elle seule le volume à disposition. cette pression s'exprime en pascals [Pa]. la pression atmosphérique est égale à la somme des pressions partielles de tous les composants de l'air (azote, oxygène, vapeur d'eau, gaz carbonique, argon, etc.)

À chaque température correspond une pression partielle de vapeur d'eau maximum, appelée pression de vapeur saturante. La part d'eau en excès se condense sous forme de liquide ou de glace, suivant la température

**C. l'humidité spécifique ou teneur en eau :** (en volume ou en poids) est définie comme le rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air humide. L'humidité spécifique se conserve lors d'un changement d'altitude ou de température de la masse d'air, tant qu'il n'y a ni condensation ni évaporation

**D. point de rosée :** correspond à la température à laquelle l'air humide doit être amené, à pression constante, pour qu'il se sature. C'est la température à laquelle l'eau ne peut pas s'évaporer car l'air est déjà saturé en humidité. La température du point de rosée est donc inférieure ou égale à la température de l'air. Lorsque le point de rosée est atteint, la vapeur d'eau se condense alors pour former de la rosée.

En météorologie, la température du point de rosée est avec l'humidité relative le paramètre le plus utilisé pour quantifier l'humidité de l'air.

Il est important de noter que ce qu'on appelle généralement l'humidité est en réalité l'humidité relative.

Lorsque la température change, l'humidité relative change aussi, étant donné que la capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau augmente avec la température. Des courbes psychrométriques sont établies pour représenter ces relations.

Exemple de représentation sur le diagramme de l'air humide.

<sup>8</sup>Belakhowsky.S, Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation, Paris, 1980, pp94-97

La figure n°10 montre l'évolution de l'état de l'air sur le diagramme de l'air humide : pour un air à 20 °C, 50 % d'humidité relative la condensation apparaît lorsque la température est réduite à 10 °C ou moins (à pression constante).

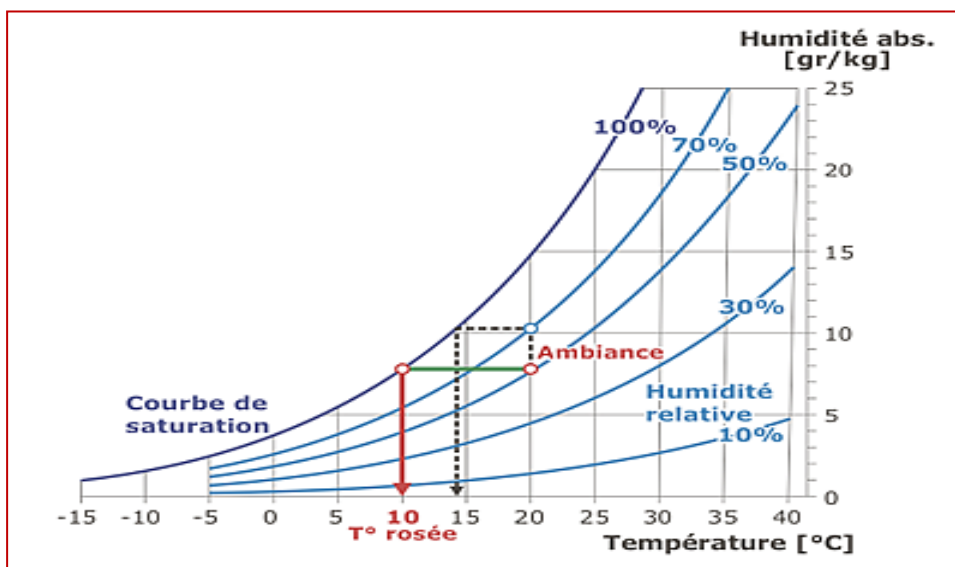


Figure 10: Exemple de représentation sur le diagramme de l'air humide

Source : internet [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be) juin 2018

## 4.2 Les sources d'humidité dans les bâtiments :

On peut répartir les sources de l'humidité en trois grandes familles:

**4.2.1 Remontées capillaires** « humidité ascensionnelle »: Il s'agit de l'eau contenue dans le sol qui s'élève par capillarité par l'intermédiaire des maçonneries, des murs et des dallages. Cette eau est absorbée par des matériaux de porosité importante (Voir Fig. N°11)<sup>9</sup>

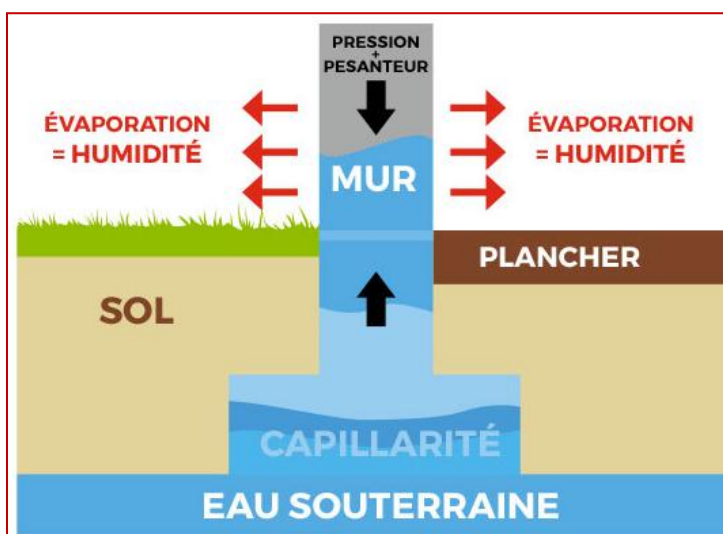


Figure 11:Figure 2:figure illustrant les remonté capillaires

Source : [www.global-habitat.com](http://www.global-habitat.com) juin 2018

<sup>9</sup>Patrice de Brandois et Florence Babics, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, juin 2006, P7

### 4.2.2 Infiltrations de l'eau de pluie :

Avec l'absence d'entretien et de maintenance, l'eau de pluie peut s'infiltrer directement dans un mur ou dans un toit. Ces infiltrations prennent de l'ampleur lorsque l'eau de pluie est associée au vent, car cette dernière frappe contre les parois des murs et exerce une pression qui génère la pénétration de l'eau dans le corps de l'ouvrage.

Les zones maritimes sont les plus vulnérables du fait que la pluie, chargée d'embruns, dépose le sel sur les murs de la construction en formant ainsi une tâche pulvérulente blanchâtre. Par ailleurs, l'eau de pluie peut pénétrer dans la construction par des infiltrations latérales indirectes, engendrées par des précipitations atmosphériques en provoquant les actions suivantes:

Rejaillissement d'eau affecte les façades du bâtiment les plus exposées aux eaux de pluie battante (Voir Fig. N°12)

Infiltration latérale, elle se produit lorsque les sols sont absorbants et produit ainsi une infiltration au niveau des parties des murs enterrés

Les Eaux de ruissellement peuvent être brutales en cas de fortes pluies et pourraient ainsi créer des crevasses au niveau du soubassement

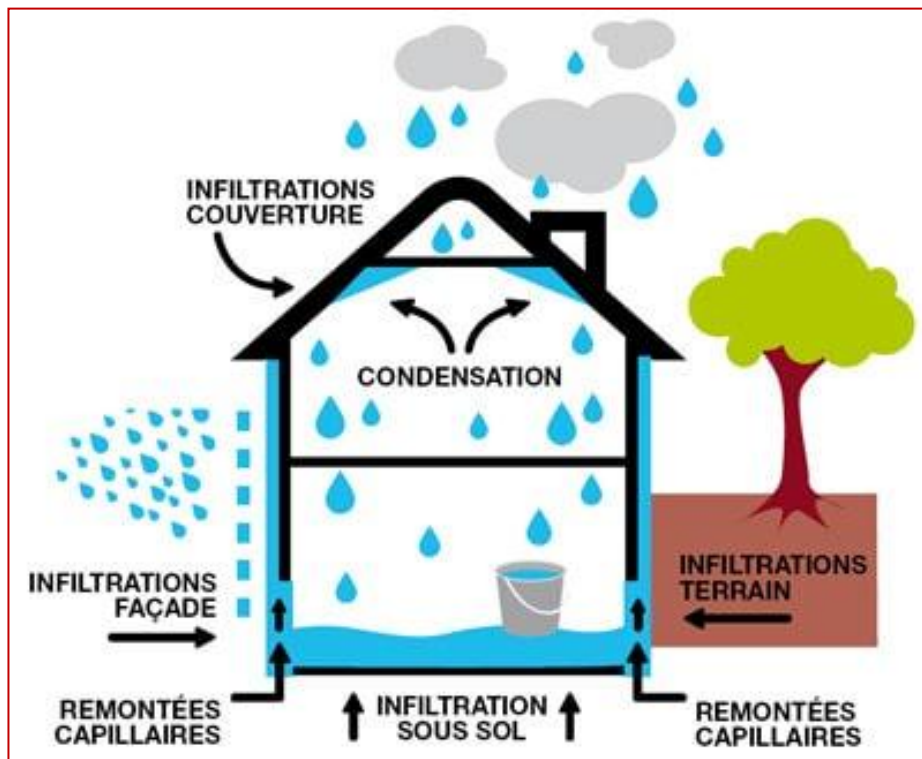


Figure 12:infiltration de la pluie

Source internet <http://www.artiform33.fr> juin2018

### 4.2.3 Humidité de condensation :

La condensation est le passage de l'eau de l'état liquide à la vapeur, cette humidité résulte essentiellement de la vie du bâtiment c'est-à-dire par l'activité de ses occupants (humaine végétale ou animale) d'une part, et d'autre part l'utilisation de la cuisine et de la salle de bain. (Voir Fig. N°13)

La condensation peut avoir lieu à l'intérieur du bâtiment « condensation superficielle » ou à l'intérieur des parois du mur « condensation interne »

### a). La condensation superficielle :

Lorsque l'air humide atteint son point de rosée au contact d'une paroi froide, on constate la formation de fines gouttelettes d'eau sur les parois.

### b). La condensation interne :

Ce phénomène est due à la grande différence de température entre l'espace intérieure et l'espace extérieure du bâtiment ce qui provoque la migration de la vapeur de l'intérieur vers l'extérieur à travers les parois du mur et lorsque celle-ci atteint son point de rosée dans l'épaisseur du mur elle se condense sous formes d'eau liquide, qui pénètre dans le mur et alimente une circulation capillaire

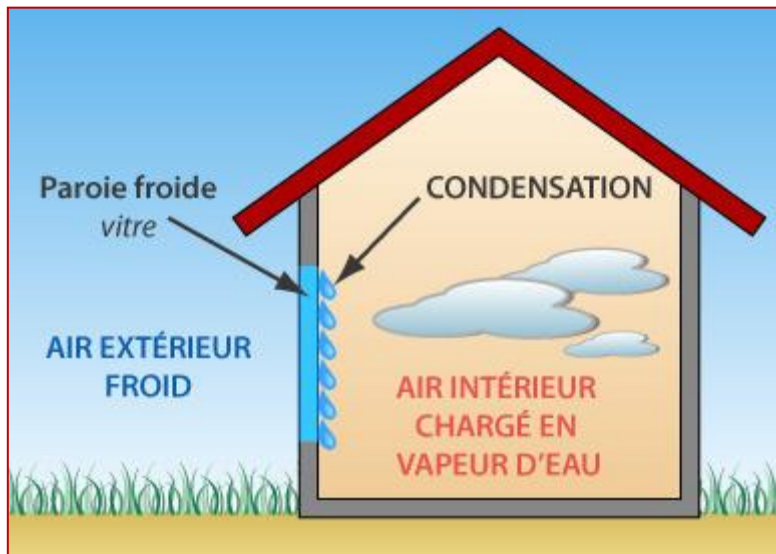


Figure 13: Humidité de condensation  
Source : internet humidite.ooreka.fr juin 2018

### 4.2.4 Humidité d'origine accidentelle :

Il s'agit de fuites d'eau qui ont pour origine les défauts constructifs ou un manque d'entretien de la construction relatifs à la toiture (chêneaux, gouttières ou descentes), ou à des canalisations (colonnes montantes, réseau de distribution encastré, chutes d'eaux usées, etc...). Ces désordres se manifestent donc à proximité du point d'infiltration.

Ce type d'humidité se manifeste d'une manière ponctuelle semblable aux infiltrations directes de l'eau de pluie mais celle-ci atteint un niveau plus destructeur lorsque son débit est plus important.



Dans certains cas, lorsque le débit de l'eau est faible celle-ci pénètre lentement dans la maçonnerie sans toutefois être détectable et ce avant que l'humidité se manifeste d'une manière apparente.

### **4.3. Répartition de l'humidité dans les ouvrages**

A cause de la capillarité des maçonneries, l'humidité ascensionnelle provoque les taux d'humidités les plus élevés, par contre l'humidité de condensation dans la masse enregistre les plus basses. Donc, Les valeurs d'humidité de la maçonnerie varient selon les types d'humidité.

L'humidité de remontée capillaire diminue au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol. Dans la maçonnerie des rez-de-chaussée, lorsque la situation est grave, on constate des taux cependant, l'humidité de condensation, présente un taux relativement constant sur toute la hauteur de la paroi intérieure, mais un taux décroissant de la face interne vers la face externe, dans la section horizontale du mur.

Quant à l'humidité provenant d'une infiltration latérale de pluie battante, ses manifestations sont des plus contradictoires : dans certains cas, seule la paroi extérieure du mur est humide ; dans d'autres, contre toute attente, les deux parois extérieure et intérieure sont humides, mais la masse intermédiaire reste sèche

### **4.4 Les effets de L'humidité**

#### **4.4.1 Effet de l'humidité sur les constructions :**

L'humidité est l'une des principales causes des désordres qui affectent les constructions. Elle peut menacer la bonne conservation des structures et des matériaux constitutifs du bâtiment. Elle se manifeste par un grand nombre de désordres : salissures, décollement de revêtements, effritement des enduits, gonflement et gauchissement des bois, etc. ....Elle peut en cas de gel avoir des conséquences encore plus graves telles les fissurations et les éclatements de matériaux

#### **4.4.2 Effet de l'humidité sur la santé de l'homme :**

Un milieu de vie sain passe nécessairement par une bonne qualité de l'air au foyer. Un surcroît d'humidité dans l'air peut favoriser la croissance de moisissures, un phénomène qu'on associe toujours à des problèmes respiratoires pour les occupants. L'humidité est donc, l'un des plus graves facteurs de dégradation de la qualité de l'air intérieur des logements.

## **5. Le vent**

### **5.1 Définition**

Le dictionnaire Larousse définit le vent comme étant, le mouvement de l'air qui se déplace d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression.

En d'autres termes, il peut être défini par le mouvement horizontal de l'air ambiant provoqué par la différence de pression entre certaines zones et qui tend à les équilibrer. Il faut qu'il y ait mouvement pour que les pertes de charges provoquées par celui-ci correspondent à la différence de pression provocatrice

Le vent est considéré comme la donnée climatologique la plus variable, au cours d'une journée et d'une journée à l'autre. Ses variations ne concernent pas uniquement la direction mais aussi la vitesse ; celle-ci est en général plus faible la nuit que dans la journée.

Afin de déterminer les vents dominants pour chaque période de l'année il est possible de dresser un diagramme appelé « Rose des vents ». Il est rare que la direction des vents dominants soit identique pour toutes les saisons.

Selon Dreyfus<sup>10</sup>, dans une zone résidentielle où les obstacles au vent sont toujours nombreux, la répartition la plus probable des vitesses relatives aux différents étages d'un immeuble est la suivante :

- R.D.C..... 0,5 m/s
- 1er et 2eme étage ..... 1 à 1.3 m/s
- 5ème étage. 1,5 m/s

Les actions du vent qui s'applique aux parois dépendent de :

- La direction.
- L'intensité.
- La région.
- Le site d'implantation de la structure et leur environnement.
- La forme géométrique et les ouvertures de la structure.

### 5.2 Le phénomène vent à l'échelle urbain :

La rugosité du site influe considérablement sur la vitesse du vent, notamment, au niveau du sol où elle est beaucoup plus faible qu'à une centaine de mètres plus haut (Voir Fig. N°14), ceci est dû aux frottements avec le sol et la présence des constructions cette figure montre que la vitesse moyenne évolue en fonction de l'altitude et de la nature et la taille des aspérités du terrain, qui constituent au fait des rugosités variables<sup>11</sup>.

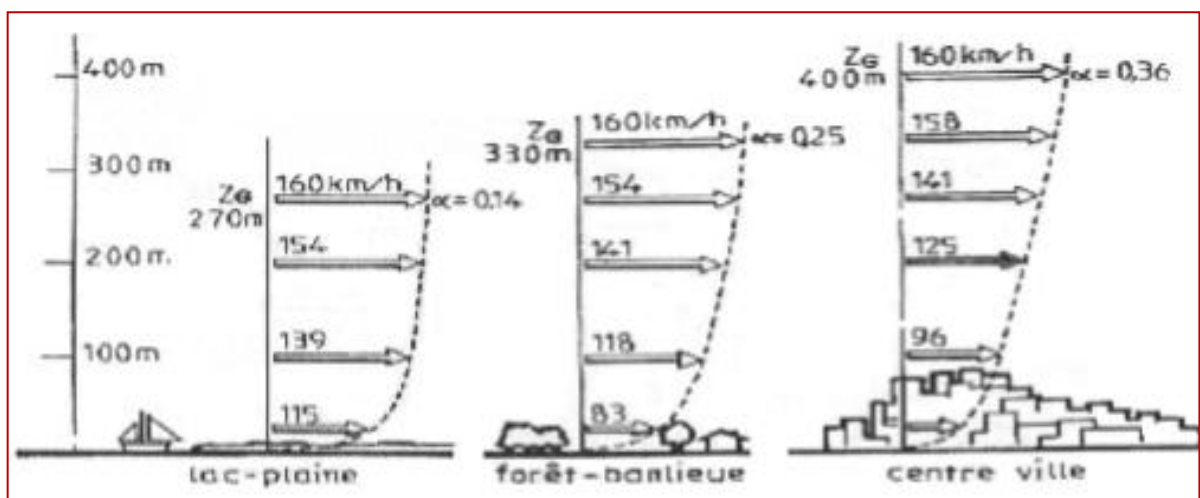


Figure 14:Densité élevé d'un tissu ancien /Accidents aérodynamiques au niveau bas de la tour

Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

<sup>10</sup>Dreyfus.Jacques, Le confort dans l'habitat en pays tropical, Eyrolles, Paris, 1960

<sup>11</sup>Chatelet A, FERNANDEZ P, Lavigne P, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p45.



A cause de la rugosité, la vitesse moyenne du vent peut chuter de 30%, par rapport à ce qu'elle aurait été en rase campagne, le niveau de turbulence augmente et l'intensité peut doubler. Donc plus l'agglomération est dense plus la vitesse est faible. Toutefois, cette règle ne peut s'appliquer aux immeubles trop élevés, même s'ils sont situés dans un tissu ancien dense, car des accidents aérodynamiques peuvent se produire aux pieds des éléments de grande hauteur (déviation du vent vers le bas).

### 5.3. L'érosion et le vent

L'érosion peut être le résultat du mouvement de déplacement par le vent. Il y a deux effets principaux, d'abord, les petites particules sont soulevées à cause du vent et se retrouvent donc déplacées dans une autre région. Ceci s'appelle la déflation.

En second lieu, ces particules suspendues peuvent se frotter sur des objets pleins causant l'érosion par l'abrasion (succession écologique). L'érosion par le vent se produit généralement dans les secteurs avec peu ou pas de végétation, souvent dans les secteurs où il y a des précipitations insuffisantes pour soutenir la végétation. Un exemple est la formation des dunes, sur une plage ou dans un désert.

Lorsque le vent érode des sols, il peut aller jusqu'à la roche et/ou désertifier complètement une région comme pour la mer de sable du Hoge Veluweaux Pays-Bas, phénomène se nomme également déflation.

Le vent peut également provoquer des tempêtes de sables comme par le chammal ou de poudrière (chasse-neige) comme le blizzard. En outre, si l'érosion éolienne, pluviale, maritime et fluviale n'était pas contrebalancée par les mouvements magmatiques divers, la Terre serait recouverte d'eau depuis longtemps car cette érosion aurait effrité tous les solides dépassant une couche de boue sous-marine. Le vent érode et transporte les roches qui finiront par s'accumuler dans la mer jusqu'à une modification de relief terrestre à la suite de mouvements tectoniques qui pousseront ces sédiments comprimés par la pression de l'eau vers le haut. C'est donc un des mécanismes de création des roches sédimentaires qui seront alors à nouveau érodées par le vent dès qu'elles seront découvertes à l'air libre.

### 5.4 .L'effet du vent

#### 5.4.1 Sol Naturel :

Un sol rugueux aura un effet de ralentissement sur le vent, une éminence quelconque provoquera une accélération locale et des perturbations déterminées par la pente et l'ampleur du relief. Ainsi une plage, une plaine sont venteux et peu perturbés, une forêt dense est abritée, un parc aéré et des montagnes peuvent devenir des couloirs à vents.

#### 5.4.2 Sol Construit :

L'effet du vent sur une construction est assez prépondérant et a une grande influence sur la stabilité de l'ouvrage

- **Effet de coin :** C'est l'effet d'écoulement aux angles des constructions, le vent est à cet endroit pincé entre le bâtiment et un autre ou bien comprimé par une partie de lui-même qui « refuse » ce changement de direction non conforme, cette accélération de coin est ceinturé par une protection (Voir Fig. N°15)

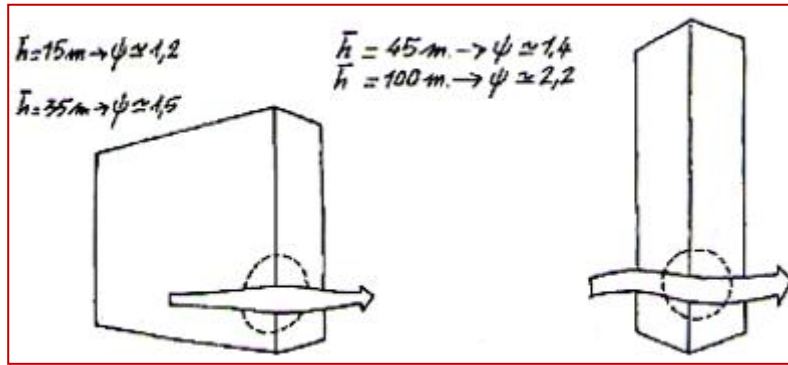


Figure 15: Effet de coin

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018

• **Effet de sillage :**

C'est un phénomène de circulation fluide tourbillonnaire en aval d'une construction, il intègre l'effet de coin mais son importance est inversement proportionnelle à la densité du bâti. De plus c'est une perturbation induite et non directe donc faible (Voir Fig. N°16)

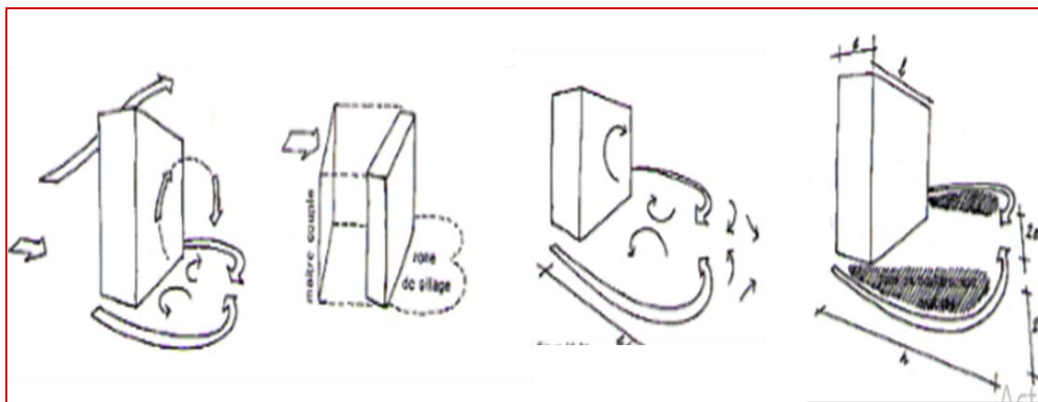


Figure 16: Effet de sillage

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018

• **Effet de trous sous immeuble** C'est un phénomène d'écoulement relatif aux bâtiments sur pilotis ou disposant d'un large porche traversant de part en part, l'effet sera d'autant plus limité que le vent se perpendiculaire à l'axe du trou et la forme, le non-remplissage éventuel et la présence de végétation peuvent diminuer ou annuler cette effet. L'accélération en ces points peut aller de 20 à 50 % (Voir Fig. N°17)

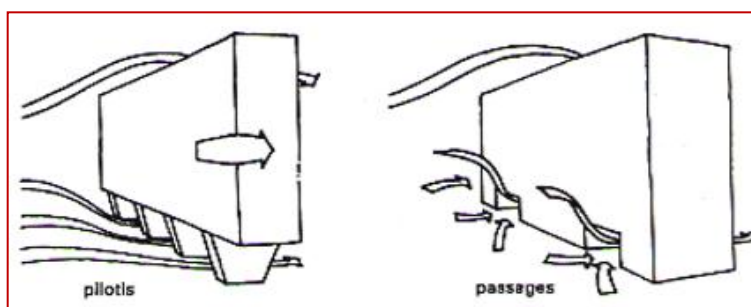


Figure 17: Effet de trous sous immeuble

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018



- **Le rouleau tourbillonnaire**, c'est le phénomène urbain par excellence, c'est simplement l'effet provoqué par l'impact direct du vent sur une façade et qui va générer d'ample perturbations du côté amont de l'immeuble. L'intensité sera dépendante de la distance à l'immeuble précédent, de la vitesse du vent, de la présence de végétation et de celle d'éventuels auvents de protection. C'est ici aussi que la forme, la hauteur, la modénature et les matériaux de façade vont jouer au maximum (Voir Fig. N°18)

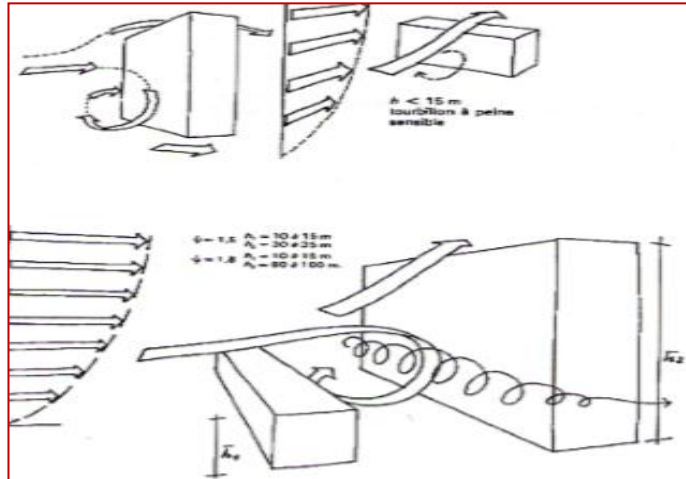


Figure 18: le rouleau tourbillonnaire

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018

- **L'effet de barre** : C'est un phénomène de déviation en ville d'un vent qui arrive entre 45 et l'axe d'une construction en forme de barre. On peut limiter l'effet en aménageant le toit et les arêtes de la construction (Voir Fig. N°19)

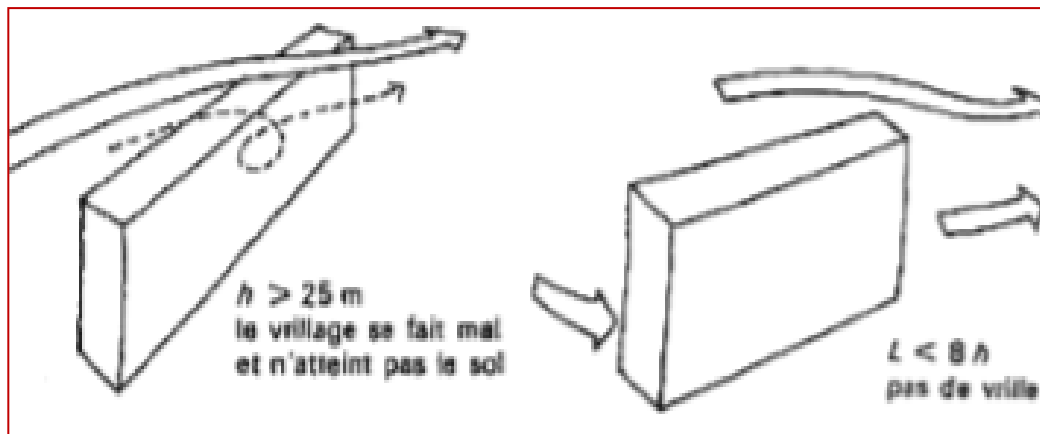


Figure 19: Effet de barre

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018

- L'effet de Venturi :

C'est l'effet d'entonnoir que peut former l'urbanisme de certain quartier, ainsi une place va le provoquer si une ou des rues donne sur ses coins et que la direction du vent est favorable à son engouffrement dans ces rues. L'ampleur de ce phénomène peut aller jusqu'à faucher un piéton et la présence de volume arrondi dans la zone d'accélération même va empirer la situation. C'est un problème d'urbanisme et il peut être diminué par les plantations des barrières ou le morcellement de l'espace incriminé (Voir Fig. N°20)

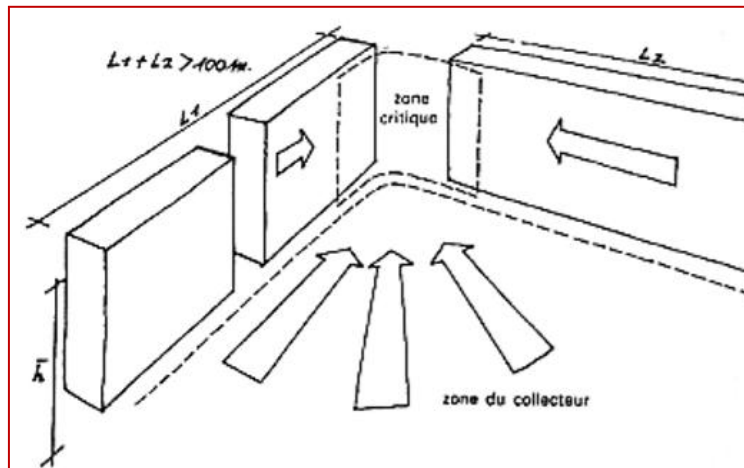


Figure 20: Effet de venturi

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018

- **Suite d'immeuble interrompu** C'est le cas où dans un aménagement d'urbanisme, des bâtiments sont réguliers tant sur le plan de la forme que de la hauteur et de l'implantation. Si l'un d'entre eux manque ou disparaît, alors, il se créera une perturbation à la mesure du « trou » (Voir Fig. N°21)

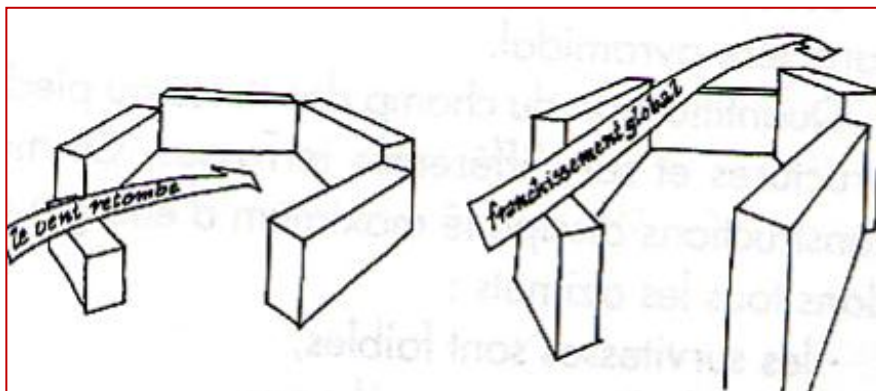


Figure 21: Effet d'immeuble interrompu

Source : internet MICV-SB02-thermique\_urbaine.pdf juin 2018



### V. Conclusion

Les risques naturels sont des événements accidentels, par conséquent ils constituent une menace pour la population et les constructions.

Suite à l'analyse des différents types de risque naturel et leur vulnérabilité on a constaté que la ville d'Alger a une très forte vulnérabilité par rapport aux risque sismique vu sa situation sur la bordure de la plaque africaine qui est en mouvement continue de collision avec la plaque eurasienne.

On trouve aussi les risques dus au climat : l'humidité et le vent qui peuvent être considérés comme une valeur ajouté à l'augmentation du risque.

## **CHAPITRE N°2**

### **Comprendre le désordre du bâti ancien**

## I. Introduction :

L'architecture est un repère, elle reflète la société qui la produit; Au fil du temps le système structurel et les différents matériaux constructifs du bâti ancien subissent des diverses dégradations d'ordre physique, chimique mécanique ou biologique, sans oublier l'action de l'homme à travers le manque d'entretien et parfois des interventions inadaptées.

dans ce présent chapitre nous allons étudier en premier temps la typologie structurelle du bâti anciens ainsi le comportement physico chimique et mécanique de son matériaux pour connaître et comprendre les différents désordre du bâti anciens car une bonne connaissance des désordres nous permettra d'établir un bon diagnostic et de designer la technique de réhabilitation adéquate.

## II. Typologies structurelles du bâti ancien :

### 1. Les éléments structurels verticaux :

#### 1.2 Mur porteur :

Les murs ont pour fonction de porter les planchers, de transmettre au sol, par l'intermédiaire des fondations, leur poids et les charges qu'ils supportent, de protéger des intempéries. Les murs porteurs les plus sollicités sont constitués de murs en moellons d'une épaisseur de 50 cm. anciennes constructions (brique, bois, pierre, verre...). Ils comportent également des percements pour les portes et les fenêtres. (Voir Fig. N°22)



Figure 22: mur porteur

Source internet <http://www.emmanuelruben.com/archives/2015/04/30/31980470.html> consulté juillet 2018

#### 1.2. Les piliers :

Le pilier est un élément important du vocabulaire architectural, depuis les structures préhistoriques jusqu'aux constructions actuelles. Il supporte des charges verticales. Il a plusieurs types qui peuvent être : la simple pile de plan carré, le pilier de section rectangulaire, faisceau de colonnes, Si leur fonction structurelle est permanente (Voir Fig. N°23)



Figure 13: Colonnes monumentales datant de l'Antiquité romaine du temple de Bel à Palmyre, Syrie

Source : [internet.fr.wikipedia.org/wiki/Colonnes\(architecture\)](http://internet.fr.wikipedia.org/wiki/Colonnes(architecture)) consulté juillet 2018

## 2. Les éléments rectilignes :

Dans la plupart des bâtis anciens la couverture des espaces à l'intérieur d'un bâtiment traditionnel est assurée par des planchers traditionnels en bois supportés par des poutres maîtresses, elles aussi en bois.

### 2.1 Poutres en bois :

Une poutre maîtresse en bois (ou «Qantra») est constituée d'un assemblage de madriers accolés en bois de cèdre massif (d'une épaisseur usuelle de 7 cm à 7,5 cm) dont le nombre est fonction de la section de la poutre désirée. En général, les poutres en bois ne dépassent pas une portée de 4 mètres. Au-delà de 4 mètres, on fait appel à une ou deux consoles de par et d'autre pour soulager les poutres. La principale caractéristique des poutres en bois est leur résistance à la traction et à la compression et, partant, à la flexion. Les poutres maîtresses sont généralement façonnées en bois de cèdre, mais d'autres essences sont utilisées dans les régions du Sud du Maroc et dans certaines zones montagneuses (palmier, laurier, ...).

### 2.2 Les planchers

Jusqu'au milieu du XIX siècle. L'ossature des planchers d'étage était en bois. Pour des pièces de moins de 5 m de large, elle était souvent simplement constituée de solives en bois prenant appui sur les deux murs porteurs. Ces pièces de bois prennent appui sur le mur ou bien reposent sur une lambourde, encastree dans le mur ou posée sur des appuis en pierre appelés corbeaux, des poutres de dimensions plus importantes sont placées dans la largeur de la pièce. Des solives, plus petites, sont fixées perpendiculairement à ces poutres. (Voir Fig. N°24)

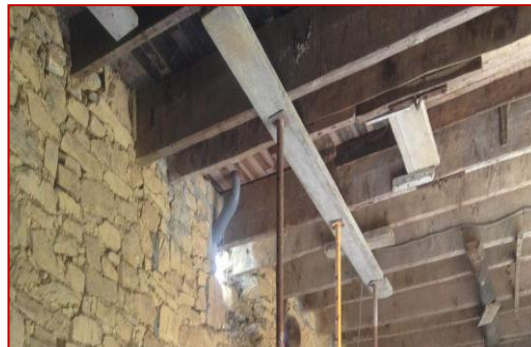


Figure 24 planchers à ossature en bois

Source internet <http://trolann.over-blog.com/2015/07/ouverture-dans-le-mur-en-pierre-face-nord.html> consulté juillet 2018

### 3. Les éléments horizontaux arqués

#### 3.1 L'arc :

l'arc est tout assemblage de pierre, de moellon ou de brique destiné à franchir un espace plus ou moins grand au moyen d'une courbe (ou par la rencontre de deux éléments courbes), reposant sur deux points d'appui, les piédroits, et destiné à couvrir une baie, une ouverture ou une distance à l'intérieur d'une maçonnerie de mur plein<sup>12</sup> (Voir Fig. N°25)

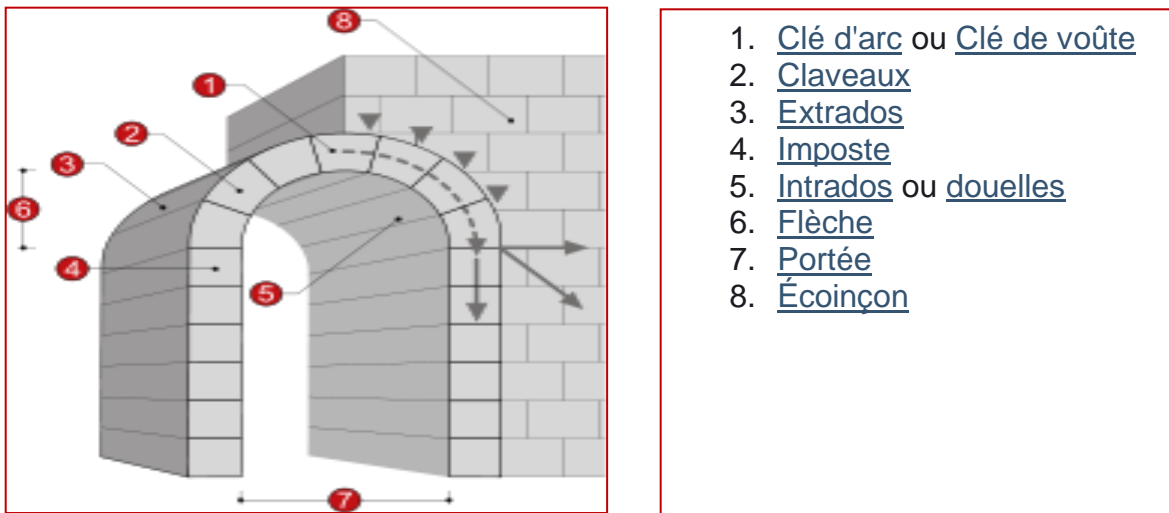


Figure 25:Éléments matériels constitutifs de l'arc

Source : [http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20\(architecture\)/fr-fr](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20(architecture)/fr-fr) consulté en juillet 2018

#### A. L'arc en plein cintre :

C'est un des plus courants, car sa forme en demi-cercle est une des plus faciles à tracer et à réaliser, de même que son coffrage. C'est la forme des arcs dans le style roman. Cette forme est courante, car lorsqu'elle est utilisée pour créer une ouverture dans un mûr, la charge du mûr au dessus des reins (des côtés) équilibre les poussées horizontales induites par sa forme. (Voir Fig. N°26)

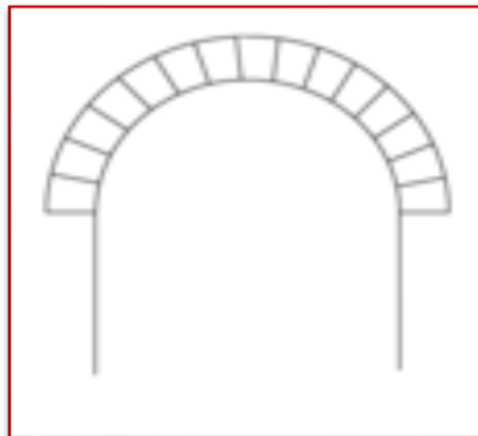


Figure 26 arcs en plein cintre

Source : internet [http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20\(architecture\)/fr-fr](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20(architecture)/fr-fr)

<sup>12</sup> [Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle - Tome 1, Arc](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20(architecture)/fr-fr) Dictionnaire disponible sur [http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20\(architecture\)/fr-fr](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20(architecture)/fr-fr) (page consulté le 10 -07-2018)



### B. l'Arcs brisés

Cet arc se compose de 2 arcs de cercle dont les centres ne se trouvent pas au milieu de l'arc (voir croquis), de façon à ce que l'arc ainsi formé soit pointu, «brisé». On trouve cette forme d'arc notamment dans l'architecture gothique et dans les arcs doubleaux des voûtes d'ogives. Module Maçonnerie (Voir Fig. N°27)



Figure 27: croquis arc brisé

Source : Module Maçonnerie file:///C:/Users/ACER/Desktop/Nouveau%20dossier%20(5)/Mémoire%20soutenance/Module\_maçonnerie.pdf

### c. Arcs en anse de panier :

L'arc en anse de panier se compose de 3 arcs de cercle : les deux extrémités sont des quarts de cercle qui sont liés par un arc de cercle au rayon plus grand, de manière à ce que le tout forme un arc surbaissé. Cette forme est pratique pour avoir des portées de longueur supérieure à la hauteur de l'arc (Voir Fig. N°28)



Figure 28: croquis Arcs en anse de panier Source : Module Maçonnerie file:///C:/Users/ACER/Desktop/Nouveau%20dossier%20(5)/mémoire%20soutenance/Module\_maçonnerie.pdf

### d. arcs surbaissés :

L'arc surbaissé est une portion de demi-cercle. L'avantage d'un tel arc est d'être un peu plus bas qu'un plein cintre, il permet de créer une ouverture qui, pour la même largeur, nécessitera une hauteur de mur moins importante. Par contre, sa forme étant plus plate, il génère des poussées horizontales plus importantes et donc un pied droit (pilier) plus important. (Voir Fig. N°29)





Figure 29: croquis arcs surbaissés : Source : Module Maçonneriefile:///C:/Users/ACER/Desktop/Nouveau%20dossier%20(5)/mémoire%20soutenance/Module\_maçonnerie.pdf

#### e. arc surélevé :

Contrairement au précédent, l'arc surélevé est un plein cintre qui prend sa base plus haut que l'imposte du pied droit.

#### f. Arc outrepassé :

L'arc outrepassé, lui, est encore un dérivé du plein cintre, sa particularité est d'être composée d'un arc de cercle plus grand que le demi-cercle. Il s'accompagne, en général, de deux colonnettes qui supportent la partie basse de l'arc qui n'est pas porteuse... Cette forme « humanoïde » est très présente en Orient. (Voir Fig. N°30)

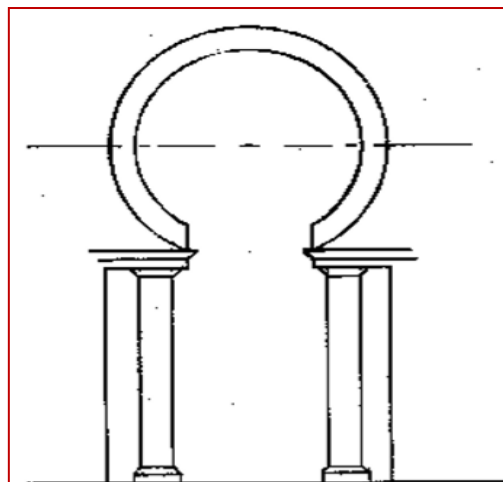


Figure 30: croquis outrepassé

Source : internet Module Maçonneriefile:///C:/Users/ACER/Desktop/Nouveau%20dossier%20(5)/mémoire%20soutenance/Module\_maçonnerie.pdf

#### g. Arcs plats :

Ce sont, comme leur nom l'indique, des arcs plats (ou presque) qui permettent de faire des linteaux de portes ou de fenêtres en n'utilisant que des briques ou autres éléments plus petits que la distance à couvrir.

### 3.2 La voûte :

Une voûte est un ouvrage dont la forme est générée à partir d'un arc ou d'une courbe en translation. Une voûte, si elle n'est pas de forme chaînette, crée toujours des poussées horizontales dans ces éléments

On classe les voutes comme suite :

#### a. Voûte en berceau :

Ces voûtes sont générées à partir d'un arc en plein cintre - elles ont donc la forme d'un demi-cylindre. C'est la voûte de l'époque romane. (Voir Fig. N°31)

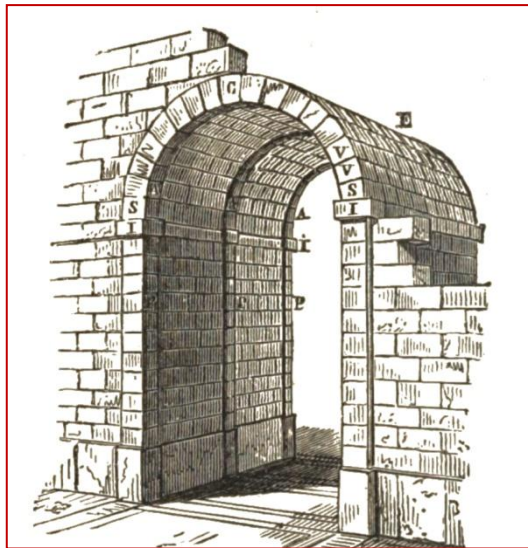


Figure 31:voûte en berceau

Source : internet consulté juillet 2018  
[www.meubliz.com/definition/voute\\_en\\_berceau/](http://www.meubliz.com/definition/voute_en_berceau/)

#### b. Voûte d'arrête :

La voûte d'arête est le résultat d'une croisée de deux voûtes, elle s'élève à partir d'une base carrée la plupart du temps. L'avantage de ce type de voûte est qu'elle forme un module qui en le répétant, peut couvrir un espace important avec un minimum de piliers. (Voir Fig. N°32)

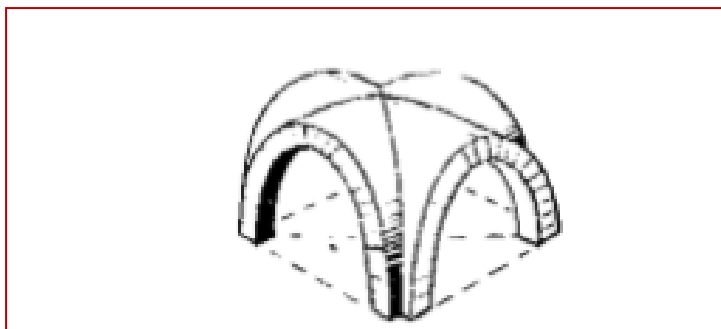


Figure 32 : Axonométrie d'une voûte d'arrête

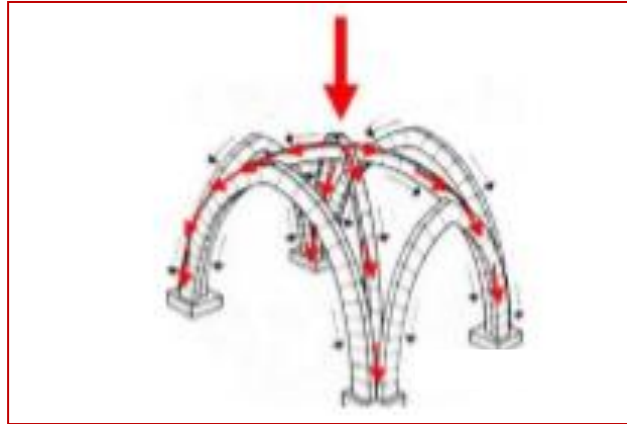
Source [www.google.com/ image](http://www.google.com/image)

**c. voûtes d'ogive :**

Ce sont des voûtes croisées bâties à partir de nervures en diagonale en demi-cercles

Les arcs doubleaux sur les côtés sont des arcs brisés de même hauteur que les diagonales.

(Voir Fig. N°33)



Figures 33 : axonométrie d'une voûte d'ogive

Source [www.google.com/](http://www.google.com/) image

**3.3. Les coupoles :**

La coupole est définie comme une voûte circulaire construite en brique, en pierre, en béton. Sa forme est engendrée par la rotation d'une courbe autour d'un axe. Cette courbe peut être circulaire, elliptique, parabolique. Le plan sur lequel elle s'élève peut être lui-même circulaire, elliptique, carré ou polygonal. La coupole a pour vocation de générer un espace intérieur (Voir Fig. N°34)

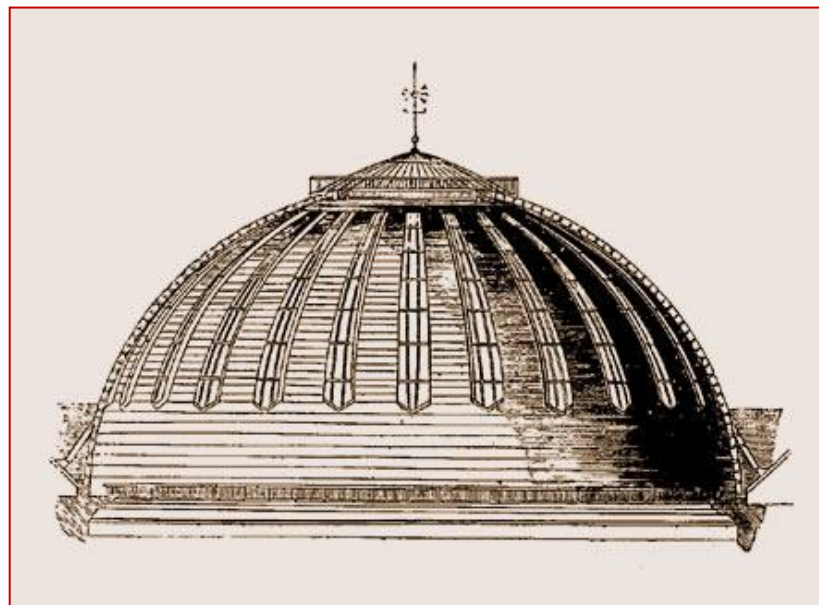


Figure 34: vue d'une coupole

Source <http://roubo.free.fr/>

#### 4 .Les fondations :

Les fondations des bâtiments traditionnels en médina sont généralement constituées de semelles continues rigides, peu profondes et de largeur sensiblement supérieure à celle du mur porteur. Elles sont isolées ou filantes sous les piliers. Les fondations sont généralement construites en maçonnerie de briques pleines traditionnelles ou de moellons. Dans certains cas, on utilise le pisé (Voir Fig. N°35)

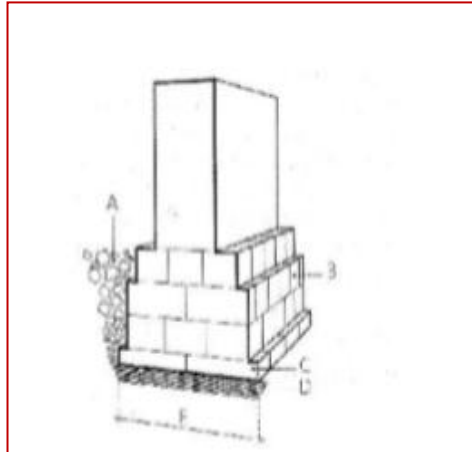


Figure 35:Fondation exceptionnelle en pierre sur un bon sol  
Source : Ibid., p.14.

### III. Les matériaux de construction du bâti ancien : entre propriété et comportement

La meilleure compréhension de l'architecture du bâti ancien se fait à travers une meilleure compréhension de la matière qui le compose pour cela il faut comprendre ses propriétés et son comportement physique, chimique et mécanique

#### 1. La terre :

La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence, de nombreux monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue. Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue, de même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO2 exceptionnel.

##### 1.1 Descriptif du matériau terre :

Le matériau terre, que l'on trouve selon des épaisseurs variables, résulte d'un processus de transformation complexe : la pédogenèse. Sa nature est conditionnée par de nombreux facteurs de nature physique, chimique et biologique, par des conditions climatiques et la vie végétale et animale.

Le matériau terre est constitué de différents composants (eau, air, matières organiques et les matières solides) dont les proportions respectives caractérisent la structure et la texture de la terre. Il est formé d'un mélange d'agrégats aux éléments, natures, et proportions variables (graviers, sables, limons, argiles).





### 1.2.1 La technique de l'Adobe :

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes ». Elle peut être moulée ou façonnée à la main ou mécaniquement, à l'état plastique (un peu plus d'eau que pour le pisé). Elle est ensuite séchée à l'air libre. . Beaucoup de solutions sont permises : murs arcs et coupoles peuvent être réalisées en adobe.

Il fait d'un mélange de sable, d'argile et d'une quantité de paille hachée ou d'autre fibre. Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexible, ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon fabriqué des petits éléments de maçonnerie la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol. La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25X 10 cm soit 30 X 60 X 10cm (Voir Fig. N°37)



Figure 37:préparation et confection de l'adobe pour la construction

Source : Boissard et al, 2008, p9



Figure 38: exemple d'un monument en adobe

Source : internet [www.alamyimages.fr](http://www.alamyimages.fr) consulté juillet 2018

### 1.2.2 La technique de la Bauge :

Il s'agit de l'empilement de boules de terre (état plastique), éventuellement mélangée à des fibres, installées les unes sur les autres et triturées pour obtenir une masse homogène. Le mur est souvent battu pour refermer les fissures, puis taillé pour obtenir une face plane (Voir Fig. N°39)



Figure 39: construction suivant la technique de la Bauge  
source Bossard et al ,2008 p7



### 1.2.3 La technique du Torchis :

Le torchis est une technique qui associe une structure légère en bois (traditionnellement pan de bois, colombages etc.), qui est ensuite parementée d'un lattis, sur lequel va être mise en œuvre de la terre à l'état plastique, souvent mélangée à des fibres (souvent de la paille) (Voir Fig. N°40)



Figure 40: utilisation de la technique du torchis dans la construction source boissard et al 2008, p6

### 1.2.4 La technique du Pisé :

La technique du pisé consiste à la mise en œuvre de couches comprimées les unes après les autres (terre humide et pulvérulente). Ces couches sont mises en œuvre dans des coffrages (banches), comprimées avec des passoirs (manuels ou mécaniques).

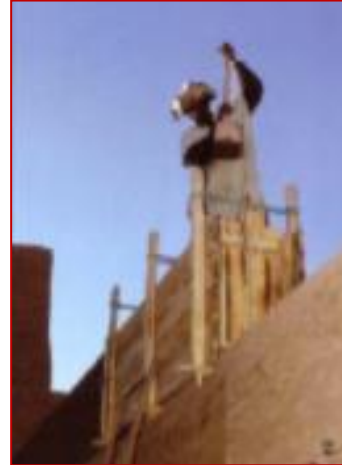
L'aspect général du matériau pisé, une fois compacté et décoffré est celui d'un "béton maigre de terre", variable selon

- le type de terre (apparence de graviers et cailloux ou texture plus fine)
- le type de coffrage utilisé et les principes constructifs adoptés pour édifier la maçonnerie de terre en "banchées" successives (en progression horizontale ou verticale avec des coffrages traditionnels)<sup>13</sup> (Voir Fig. N°41)

<sup>13</sup> MEUKAM P., « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments »  
Thèse doctorat, université Yaoundé, Décembre 2004



Figure 41: la technique du pisé dans la construction source boissard et al 2008,p11



### 1.2.5 Blocs de terre comprimée

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits pas compactage, exception faite de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique. (Voir Fig. N°42)



Figure 42 bloc de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse

Source : <http://www.google.com/image>

#### A/. Les Avantages de bloc de terre comprimée

- BTC est un matériau écologique : composé essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de par son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique
- BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm<sup>2</sup>)



- BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre. <sup>14</sup>

### **B/LA gamme de produits de blocs de terre comprimée** (Voir Fig. N°43)

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée

- **Blocs pleins** : Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.
- **Blocs creux** : On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).
- **Blocs alvéolaires** : Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.
- **Blocs à emboîtements** : Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.
- **Blocs parasismiques** : Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.
- **Blocs spéciaux** : Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.

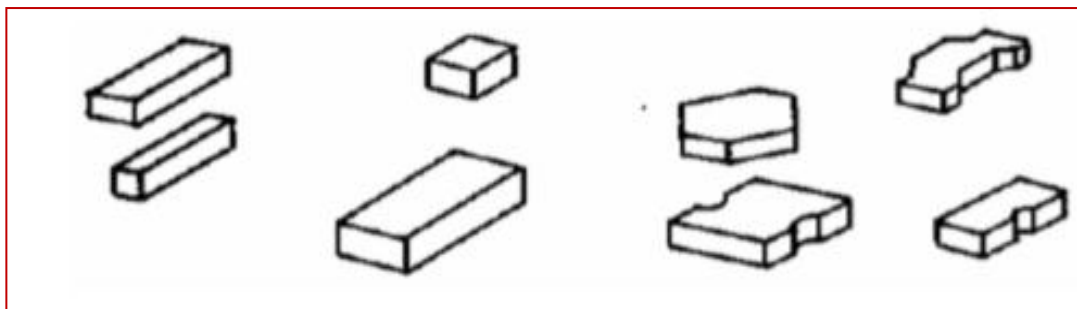


Figure 43 : diversités des produits de blocs de terre comprimée

Source : <http://www.google.com/image>

### 1.3 Les propriétés du matériau :

#### 1.3.1 La masse Volumique :

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre.

<sup>14</sup> LIVERT S., «Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février2011

Elle s'étale de 1 200 kg/m<sup>3</sup> à 1 600 kg/m<sup>3</sup> pour de la terre foisonnée. Cette valeur augmente suite à une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors idéalement une masse volumique de 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Les mélanges amendés en paille sont plus légers :

En terre-paille, la masse volumique est de 300 kg/m<sup>3</sup> à 1300 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.3.2 Résistance Mécanique:

La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Du point de vue mécanique, elle **fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression** (les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles). La terre mise en œuvre de manière monolithique (pisé, bauge) a généralement une résistance à la compression d'environ 2 MPa. Les éléments de maçonnerie (adobes) ont des résistances à la compression pouvant aller de 2MPa à 5 MPa.

### 1.4 La Stabilisation de la terre :

L'ajout de stabilisant permet d'améliorer les caractéristiques de nombreuses variétés de la terre

#### 1.4.1 Objectifs :

- L'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- La réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau)
- L'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

#### 1.4.2. Procédés : On dénombre trois procédés de stabilisation

##### a). Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

##### b). Stabilisation physique

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

##### c). Stabilisation chimique

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité.

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- **Un traitement dans la masse** (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- **Un traitement de surface** (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari, 1989), moyens de stabilisation dans la littérature.

**1.4.3. Les moyens de stabilisation :**

On peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme qui sont donnés par le tableau ci-dessous <sup>15</sup>(Voir tableau N°03)

Moyens de stabilisation des terres remaniées				
stabilisant	nature	procédé	moyens	Principe
Sans apport de stabilisant		mécanique	densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires
Avec apport de stabilisant	minéraux	physique	armer	
	fibres			Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement
Stabilisants physico-chimique	liants	chimique	enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement
			liaisonner	Former des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile
	Hydro-phobant		imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux
			hydrofuger	Eliminer au maximum l'absorption d'eau

Tableau 3: Moyens de stabilisation des terres

**2. La pierre :**

**2.1 Généralité sur la pierre**

La pierre est l'élément de construction le plus ancien .C'est un matériau régionale noble qui permet des réalisations à la fois belles et solides : les maisons en pierre ont une longévité importante. Cependant, ce n'est pas un matériau standardisé, donc facile à travailler et qui demande de ce fait des compétences certaines en maçonneries

**Typologie structurale**

- Points porteurs : poteau, colonne...etc.
- mur porteur.

<sup>15</sup> SELMI,Hacène(2012). Matériaux locaux et développement durable : Cas de la Brique de Terre Comprimée appliquée au sud Algérien. Mémoire de magistère : architecture et environnement. Algérie : EPAU. Page 86-88.

-voûte et coupole et arc.

### 2.2 Propriété du matériau :

#### 2.2.1 La résistance mécanique

Les pierres sont connues pour leur grande résistance mécanique à la compression et une faible résistance à la traction

#### 2.2.2 Qualité physique et chimique de la pierre :

La pierre leurs qualités ne se limitent pas aux propriétés mécaniques mais elles exhibent les qualités suivantes Selon leur nature les pierres:

- homogénéité, - dureté, et une résistance à l'usure et aux chocs,
- résistance aux variations des facteurs atmosphériques et climatiques
- imperméabilité et infélicité
- adhérence au mortier de pose
- bonne résistance aux agents chimiques (solvants, acides, alcalis)
- bonnes caractéristiques thermiques (conductivité thermique, dilatation)

### 2.3 La pierre de taille :

#### 2.3.1 .Définition et descriptif :

La pierre de taille est un matériau qui est utilisé pour les grands ouvrages, c'est une pierre naturelle dont toutes les faces ont été taillées et dont la face visible est parfaitement rectiligne.

Souvent d'origine calcaire, la pierre de taille n'est pas très poreuse (grès, granit).

#### 2.3.2 Les différents types de la pierre de taille :

- a) **les pierres calcaires** : sont les plus faciles à tailler avec précision et de ce fait à assembler à joint mince. Certaines pierres calcaires, comme le tuffeau sont assez fragiles;
- b) **les pierres granitiques** : plus difficiles à dresser, offrent des faces moins régulières et imposent un assemblage à joints plus important;
- c) **les pierres schisteuses** : sont proches de l'ardoise. Moins homogènes que les pierres calcaires ou granitiques, elles ont tendance à se déliter en feuillets;
- d) **Les laves** : sont des **roches magmatiques** issues d'éruptions volcaniques produites principalement dans la région des volcans du Massif central, notamment en Auvergne et dans le Cantal où elles sont essentiellement utilisées dans le **bâtiment**;
- e) **Les grès** : sont caractéristiques de l'Est de la France (Vosges, principalement), mais on les retrouve aussi dans d'autres régions : Massif armoricain, Massif central, Pays

basque, Île-de-France. Ils offrent une palette de couleurs allant du rouge au gris, au rose, au blanc, au jaune, et sont parfois bigarrés:

### 3. L'enduit :

#### 3.1 Définition de l'enduit :

L'enduit est un ouvrage exécuté sur une paroi par application, c'est un mélange sous forme pâteuse ou semi-fluide en une ou plusieurs couches du produit, les enduits sont constitués d'un liant et de charges minérales<sup>16</sup>, les enduits à base de terre ont des charges végétales ou animales (pailles de blé, de riz, solution de néré, bouse de vache, crins d'animaux divers, etc.).<sup>16</sup>

Les enduits peuvent servir pour avoir des surfaces uniformes et planes. À l'extérieur, ils sont destinés à protéger les parois des intempéries, et à l'intérieur comme parement uniforme à caractère décoratif et esthétique.

Les enduits doivent avoir comme qualités<sup>17</sup> : une bonne adhérence au support de maçonnerie, une bonne étanchéité à la pluie et une tenue dans le temps

#### 3.2 Fonctions de l'enduit :

Un enduit de façade sert, selon sa nature et selon le résultat voulu à<sup>18</sup> :

**A- Uniformiser** : les enduits dressent les parois et les rendent lisses en rattrapant les irrégularités du gros œuvre.

**B- Protéger** : l'enduit assure l'imperméabilité de la paroi en laissant le support respirer. L'imperméabilité dépend du nombre de couches et de l'épaisseur d'enduit.<sup>19</sup>

**C-Décorer** : l'enduit donne l'aspect final de la paroi ce qu'il donne un caractère esthétique et décoratif.

#### 3.3 Les types d'enduits :

Le type d'enduit dépend du type de support : béton, brique ou pierre. Il est impératif que l'enduit soit compatible avec son support afin de garantir sa tenue dans le temps.

Il existe plusieurs catégories d'enduits selon le type des liants employés : ces derniers déterminent les caractéristiques d'étanchéité et de plasticité et de résistance mécanique du revêtement, on cite l'Enduit de ciment, enduit de chaux, enduit de plâtre et enduits de terre.

<sup>16</sup> KADJILE Edouard. Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité. Mémoire de master. Génie civil. Ouagadougou : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. 2010. Page : 5.

<sup>17</sup> L'HERMITE Robert et CASSOU Francis. Au pied du mur. Edition : société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics. Paris. 1969. Page 160

<sup>18</sup> CORDIER MM. et TROUILLEZ. Guide Ravalement de façade. [En ligne]. Edition : OOREKA. Paris. 2012. Page

<sup>19</sup> BETTRAND Ruot. Guide pratique « Les enduit de façade » : mise en œuvre des enduits minéraux sur supports neufs et anciens. Paris : CSTB. 2009. Page 5.

**3.3.1 L'enduit de ciment :** Les mortiers de ciment sont d'utilisation plus récente, ils regroupent le ciment portland et la chaux hydraulique artificielle. Le ciment portland résulte du broyage de clinker et de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise étant donné que le ciment a des prises très rapides et acquiert de la résistance à une vitesse plus rapide. Il se compose également de constituants secondaires en faible qualité (inférieure à 5%).

L'enduit de ciment est de faible porosité, il offre une bonne étanchéité, ce qu'il empêche au mur de respirer<sup>20</sup>. Les enduits à base de ciment sont très résistants aux chocs mécaniques, ils sont tellement rigides, qu'ils ne suivent pas les mouvements du support et ils finissent par se fissurer. Ils doivent être utilisés sous forme de mortier bâtard pour éviter les risques de fissuration.

**3.3.2 Enduit de plâtre :** Le plâtre naturel est une roche sédimentaire de structure cristalline, il est obtenu après calcination du gypse (sulfate de calcium hydraté). Le plâtre utilisé comme liant aux enduits de plâtre est obtenu par cuisson à une température de 130°C à 170°C de roche de gypse et perd une partie de son eau et devient pulvérulent (sulfate de chaux anhydre).<sup>21</sup>

Le plâtre ne se déforme pas par son propre poids, et cela revient au degré élevé de plasticité pendant une longue durée.<sup>22</sup> Il est souvent utilisé comme enduit intérieur de murs et de plafonds, mais on peut le trouver également comme revêtement extérieur. L'enduit de plâtre a une excellente adhérence aux briques et aux pierres, en revanche, il ne convient pas au scellement de pièces en fer.

**3.3.3 Enduit à base de chaux :** Les mortiers à base de chaux sont les premiers à avoir été utilisés. Il existe deux sortes de chaux naturelle : chaux aérienne et chaux hydraulique. Les deux sont issues de roches calcaires composées principalement de carbonate de calcium et de silice, oxyde de fer, magnésie et argile.<sup>23</sup>

#### a). Chaux hydraulique :

Chaux hydraulique, provenant de calcaires argileux (20% d'argile) avec des silicates et ou des aluminates réactifs, donnant une pâte moins liante que celle de la chaux grasse, mais qui a le grand avantage de durcir sous l'eau.

Les chaux hydrauliques ont été traditionnellement classifiées en éminemment, ou moyennement ou faiblement hydrauliques. Cette classification est représentée par l'indice d'hydraulicité, qui est en rapport avec la quantité d'argile, c'est-à-dire, plus les indices sont élevés plus l'hydraulicité du liant est importante.

#### b). Les enduits de chaux aérienne :

La chaux aérienne, est obtenue par calcination de pierre à chaux compactes, à structure microcristalline, extraits de roches sédimentaires de carbonate de calcium et rarement de

<sup>20</sup> Ministère de l'habitat et de l'urbanisme. CNERIB. 2000. Op.cit. Page 08

<sup>21</sup> COIGNET, Jean. COIGNET, Laurent. La maison ancienne. Construction, diagnostic, interventions. Édition EYROLLES, Paris, 2012. Page 10

<sup>22</sup> LABIADH Mohamed Riadh. Thèse de doctorat 2009. Op. cit. Page .25.

<sup>23</sup> LABIADH Mohamed Riadh. Thèse de doctorat 2009. Op.cit. Page 28.

Carbonate de magnésium. Elle se gonfle par l'absorption de l'eau, donnant une pâte onctueuse et liante. Elle durcit à l'air, mais se dissout et disparaît lentement lorsque elle est immergée

#### 4. Le bois

Le bois, nécessitant peu de transformations et facile à travailler, était et reste apprécié dans la construction, C'est un des matériaux les plus appréciés pour ses propriétés mécaniques (résistance en traction) et son pouvoir isolant. Il sert à fabriquer des structures porteuses, voire des habitations complètes

##### 4.1 Comportement mécanique :

Le bois étant un matériau naturel, il présente des qualités variables selon l'âge, l'essence, l'origine géographique, les conditions de séchage La construction en bois se fait à partir de troncs d'arbres linéaires résistants à la compression, la traction et à la flexion.

Le bois présente des performances différentes selon la direction (parallèle ou perpendiculaire aux fibres). Elles sont similaires au béton en compression axiale et cisaillement, supérieures au béton en traction axiale, et inférieures au béton en traction et compression perpendiculaire.

##### 4.2 Typologie structurale du bois :

Quelques soient les technologies, les matériaux utilisés, ou l'époque, les parties de structures en bois peuvent être regroupées en trois familles qui ont des rôles qui leur sont propres. Ces trois familles sont les poutres et les poteaux qui constituent le squelette de la structure, les planchers qui ont un rôle de diaphragme horizontal et les parois qui ont un rôle de diaphragme vertical. Dans l'architecture et les techniques constructives d'aujourd'hui, ces trois types d'éléments sont, dans la quasi-totalité des typologies d'ouvrages construits, bien présents<sup>24</sup>.

##### 4.3 Les lamellés collés Dérivé du bois :

On appelle bois lamellé-collé des pièces massives reconstituées à partir de lamelles de bois assemblées par collage. Ces lamelles sont disposées de telle sorte que leurs fibres soient parallèles. Généralement, le lamellé-collé a les caractéristiques mécaniques du ou des bois qui le composent. Il est surtout utilisé comme élément de structure, poteau ou poutre. Les

Poutres en lamellés collés permettent de réaliser des structures de très grandes portées, jusqu'à 100 m voir plus.

On appelle bois lamellé-collé des pièces massives reconstituées à partir de lamelles de bois assemblées par collage. Ces lamelles sont disposées de telle sorte que leurs fibres soient parallèles. Généralement, le lamellé-collé a les caractéristiques mécaniques du ou des bois

<sup>24</sup> Resch, L(2010). DÉVELOPPEMENT D'ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION EN BOIS DE PAYS LAMELLÉS ASSEMBLÉS PAR TOURILLONS THERMO-SOUDÉS. Thèse de doctorat : sciences du bois et des fibres. Nancy II : École doctorale : Ressources Produits Procédés Environnement. P 19. (Consulté le 01-11-2017). Disponible sur : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD\\_T\\_2009\\_0142\\_RESCH.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2009_0142_RESCH.pdf)



Qui le composent. Il est surtout utilisé comme élément de structure, poteau ou poutre. Les poutres en lamellés collés permettent de réaliser des structures de très grandes portées, jusqu'à 100 m voir plus

## 5. L'Acier :

### 5.1 Définition :

l'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0,005 % et 1,5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 %.

Il relève d'un univers bien spécifique avec ses familles de produits, longs ou plats, ses profilés à froid, ses pièces moulées, forgées ou mécano soudées, ses poutres, poutrelles et poteaux en forme de H de I, de U, etc.

### 5.2 Le comportement mécanique :

Le métal ressemble au bois. Il travaille très bien à la traction, la flexion et la compression. C'est donc un matériau utilisé de la même manière que le bois. : On le pose en poteau, en poutre et on recouvre le tout par du remplissage qui peut être une tôle, un bardage, et parfois même, de la maçonnerie.

## IV. Les dommages du bâti ancien :

Les constructions sont soumises durant leur vie à des désordres liés à des maladies appelées pathologies, celles-ci affectent la structure et les matériaux de construction et provoquent parfois des dommages dangereux pour l'occupant.

Les pathologies peuvent être divisées en deux secteurs : pathologies humides et pathologies structurelles

### 1. Les pathologies structurelles :

Le comportement et la durabilité des éléments qui structurent un bâtiment ancien sont liés aux matériaux utilisés, à la forme de construction mais aussi aux modifications qu'a subit le bâtiment au cours de sa vie<sup>25</sup>, ces variantes sont des facteurs qui influent sur la pérennité de l'édifice et qui induisent l'apparition de multiples désordres sur l'ensemble de la structure du bâtiment et parmi ces pathologies :

Parmi les éléments structurels qui composent une construction, nous pouvons citer en premier lieu les fondations. Celles-ci jouent un rôle d'intermédiaire entre la construction et le sol et assurent une certaine stabilité au bâtiment.

<sup>25</sup> César Diaz Gomez. Les désordres structurels des bâtiments dans l'architecture traditionnelle méditerranéenne. Méthode Rehabimed. Architecture traditionnelle méditerranéenne. II : Réhabilitation bâtiments, 2007. (PDF téléchargé en 2013)



**1.1 Les pathologies des murs :**

La structure verticale des bâtiments auxquels nous nous référons se compose généralement de murs construits avec les matériaux présents sur la zone

**1.1.1 Pathologies coplanaires des parements d'un mur porteur :**

Ce type de pathologies est constaté sur les plans superficiels verticaux du mur porteur et sont généralement traversant.

La principale caractéristique de ces pathologies réside dans le fait que les dommages, sous forme de lézardes, de fissures ou de tassements, apparaissent sur les parements superficiels et traversent généralement un élément de part en part. Les causes de ces désordre sont dues à

**A. une trop forte compression sur une large partie du mur**

Apparait sur les parties d'un mur porteur recevant les charges verticales de son propre poids et celle des planchers exerçant une forte compression qui dépasse la tension de compression admissible au niveau de la zone sollicitée (Voir Fig. N°44)

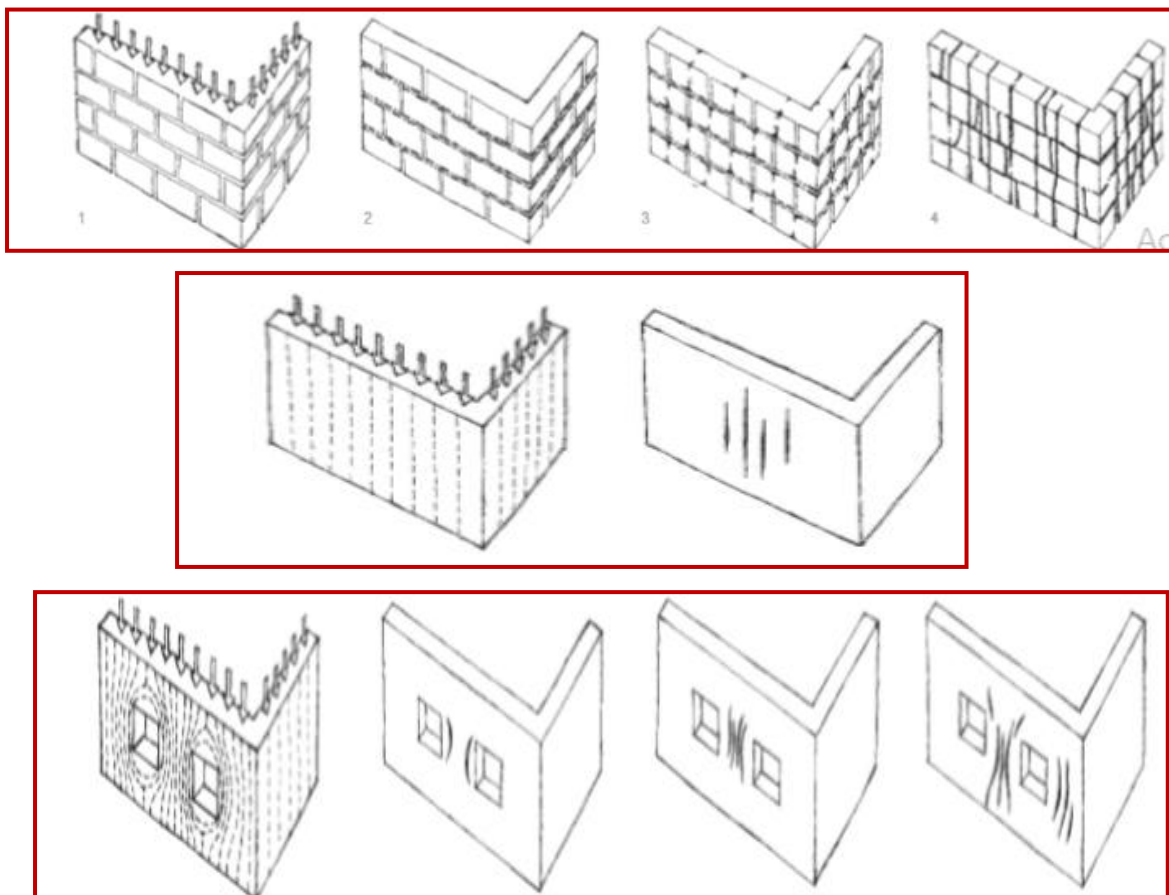


Figure 44 : Exemples de désordres dus à une trop forte compression sur une large partie du mur

Source : méthode de RehabiMed

**B. des charges ponctuelles :**

Ce type de pathologie apparait généralement dans le cas d'un élément structurel (en général une poutre ou une console) qui exerce une tension concentrée sur un point du mur porteur, les fissures sont inclinées par rapport aux côtés de l'élément à l'origine de la charge. (Voir Fig. N°45)

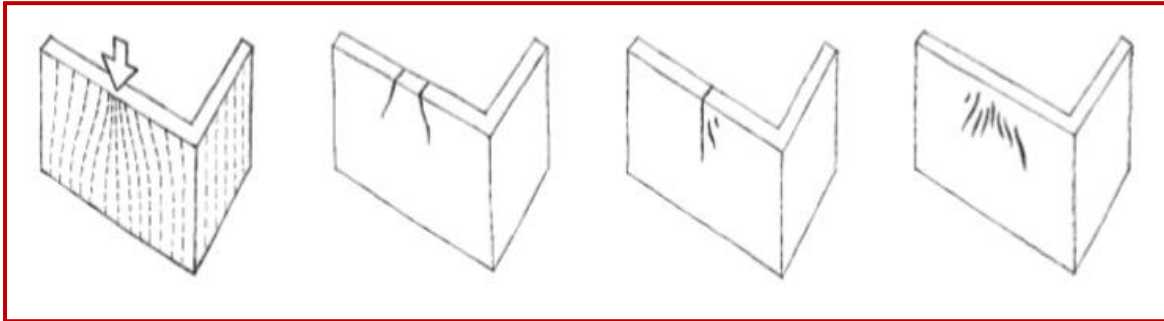


Figure 45 : Exemples de désordres dus à une trop forte compression sur une large partie du mur

Source : méthode de RehabiMed

**C. problème de rigidité :**

- **Désordre dû au manque de rigidité des éléments associé :**

Le manque de rigidité d'un élément associé comme un linteau en bois au-dessus d'une porte ou d'une fenêtre par exemple peut causer la déformation d'une partie du mur selon un schéma singulier de fracture (Voir Fig. N°46)

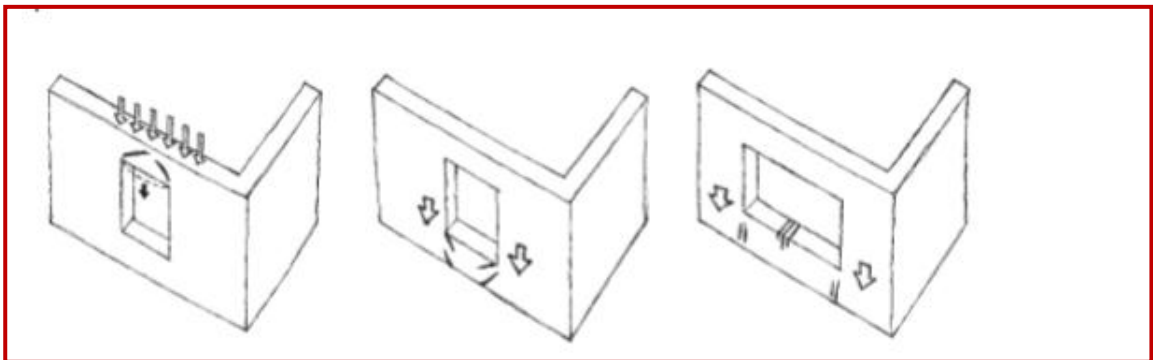


Figure 46 : Exemples de désordres au manque de rigidité des éléments associé

Source : Méthode RehabiMed

- **Désordre dû à une différence de rigidité entre les matériaux composant les murs mixtes**

Ce type de pathologie observé dans le cas de murs porteurs mixtes comportant des portions distinctes construites avec des matériaux de différentes rigidités dans ce cas, le désordre constaté est sous forme de lézardes dues aux efforts de cisaillement qui se produisent au niveau des zones de contact des deux matériaux. (Voir Fig. N°47)

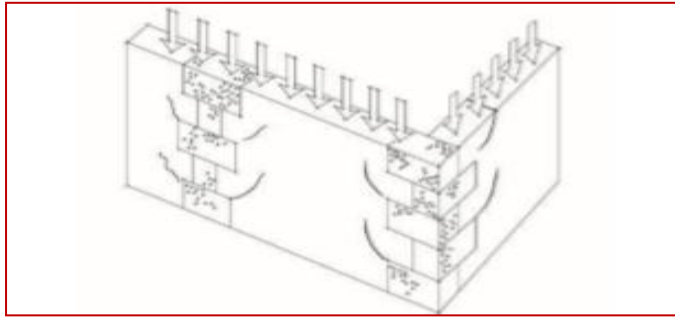


Figure 47 : Exemples de désordres au manque de rigidité des éléments associé

Source : (Méthode RehabiMed)

#### d- Désordres dus à des différences de charges entre des murs transversaux

En générale, La présence d'une fracture verticale dans l'angle formé par le mur supportant la charge du plancher et le mur transversal est due à la différence de charges entre les deux (Voir Fig. N°48)

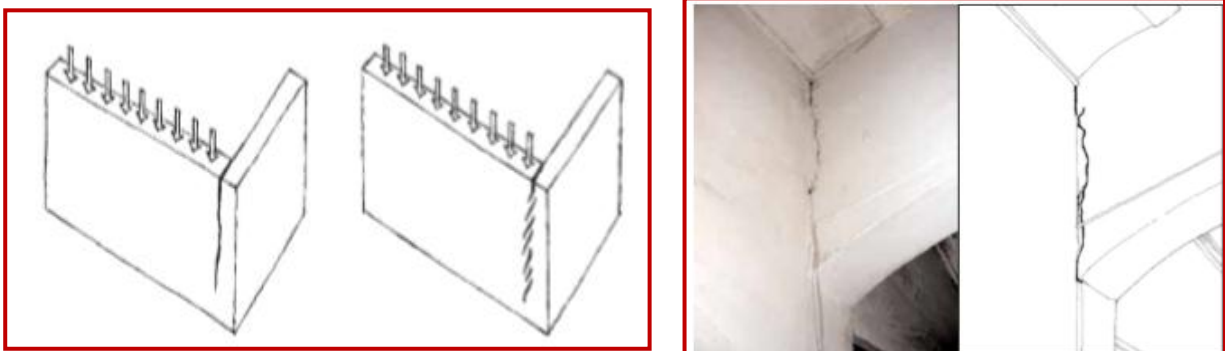


Figure 48 : Exemples de - Désordres dus à des différences de charges entre des murs transversaux

Source : (Méthode RehabiMed)

#### e- mouvements différentiels des fondations

Les mouvements de terrain constituent une des causes les plus fréquentes des fissures et des lézards des murs traditionnels certaines de ces mouvements sont liées à l'instabilité du terrain (Voir Fig. N°49) d'autres sont liées directement avec les caractéristiques des fondations existantes dans la construction du bâtiment en question ou avec l'action des constructions riveraines.

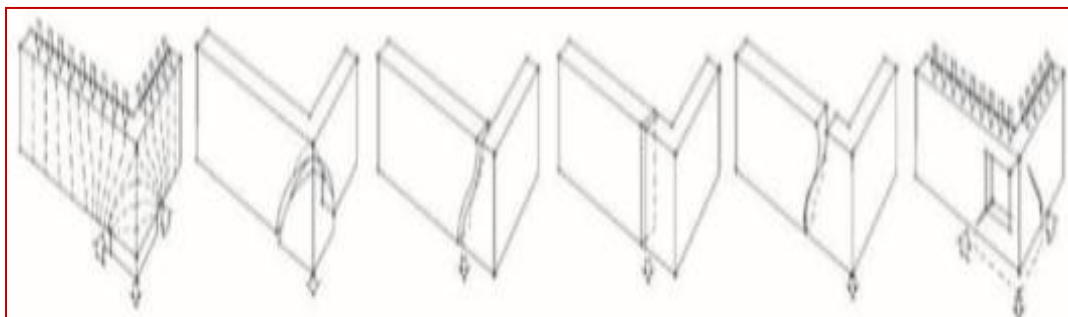


Figure 49 : Exemples de désordres dus à un affaissement du sol sous un angle du bâtiment

Source : méthode de RehabiMed

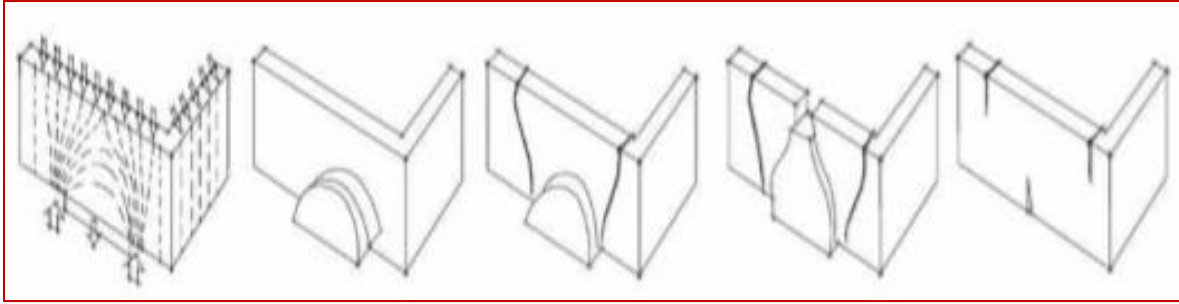


Figure 50 Exemples de désordres au niveau d'un mur porteur dus à des mouvements de fondations

Source : méthode de RehabiMed

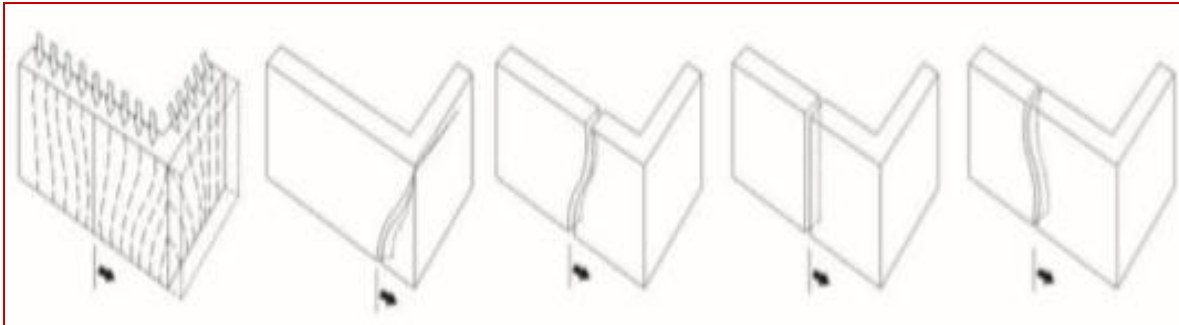


Figure 51 Exemples de désordres dus à un glissement du sol sous une partie de la construction

Source : méthode de RehabiMed

**f. mouvements sismiques les murs des bâtiments traditionnels.**

**f.1 la Présences des fissures en croix :**

La construction de l'architecture traditionnelle (pierre ou briques pleines), présentent une forte résistance à la compression mais une faible résistance aux efforts de cisaillement causés par les secousses multidirectionnelles caractéristiques des mouvements sismiques, de ce type de désordre cause la présence de fissures en croix au niveau des pans du mur situés entre les ouvertures. (Voir Fig. N°52)

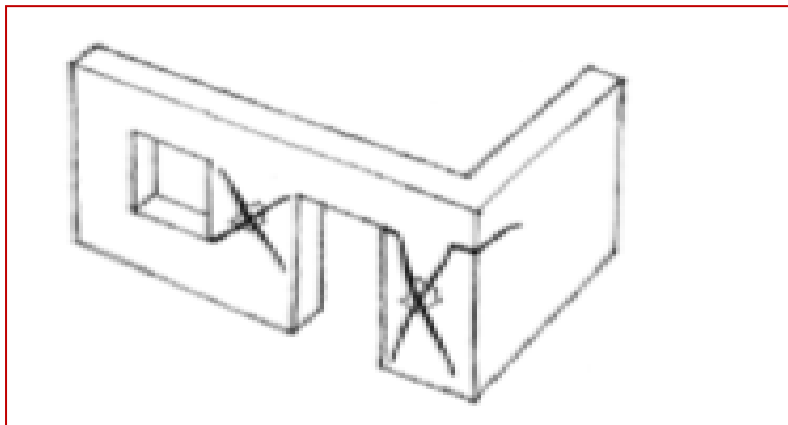


Figure 52 : Exemples de désordres de mouvement sismique constaté sur le plan transversal

Source : méthode de RehabiMed

### f.2 Fractures verticales au niveau des sections transversales des murs :

Un excès de compression sur un mur épais peut entraîner une fracture verticale interne qui, suivant la ligne de compression isostatique passant par le point de dépassement de la tension de rupture du matériau, tend progressivement à partager le mur en deux, en réduisant d'autant son élancement et sa capacité portante. ; Les fractures qui se développent à l'intérieur du mur ne sont généralement pas perceptibles, ce qui peut conduire à un effondrement imprévisible de l'ouvrage. (Voir Fig. N°53)

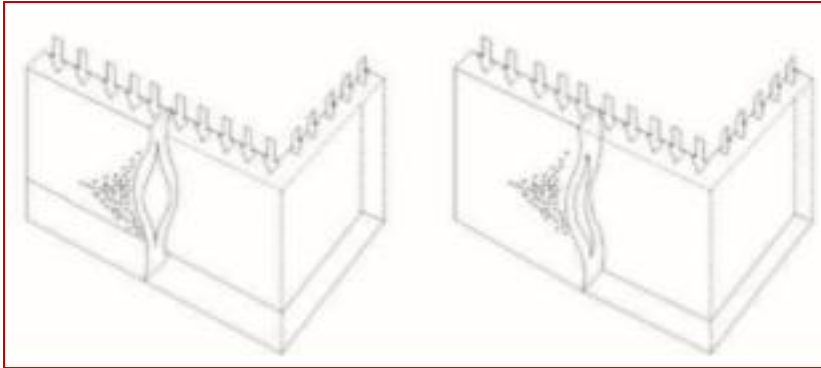


Figure 53 Exemples de désordres dus à un glissement du sol sous une partie de la construction

Source : méthode de RehabiMed

Ce type de désordre est fréquent dans le cas de murs porteurs composés de deux ou plusieurs couches verticales de maçonneries dont les pièces n'ont pas été parfaitement imbriquées les unes avec les autres ou dont la constitution interne n'est pas homogène

### f.3 Écrasements et bombements des façades :

Ce type de désordre est l'aboutissement d'un long processus de déformation dus aux effets prolongés des sollicitations verticales ou horizontales sur les matériaux des murs et découlent de ceux liés à leur rhéologie propre, qui conduit à des modifications de leurs caractéristiques mécaniques au fil du temps

Les écrasements de façades sont généralement causés par des poussées des couvertures, des déplacements des fondations ou des effets de l'humidité et de la température. Par contre les bombements des murs de façades sont, généralement, la conséquence de processus de déformation lente des matériaux du mur sous l'effet de charges transmises par la toiture et par les planchers (Voir Fig. N°54)



Figure 54 désordres dus aux Écrasements et bombements des façades source : méthode de RehabiMed

Source : méthode de RehabiMed

**g. la Poussée des voûtes :**

Les éléments voûtés produisent des poussées, au niveau de leurs points de raccord avec les murs du périmètre, qui doivent être compensées par l'épaisseur et par la masse de ces murs, parfois à l'aide de contreforts, dans le cas où ces efforts ne sont pas compensés, la formation de désordres qui peuvent affecter aussi bien le mur que l'élément arqué lui-même (Voir Fig. N°55)

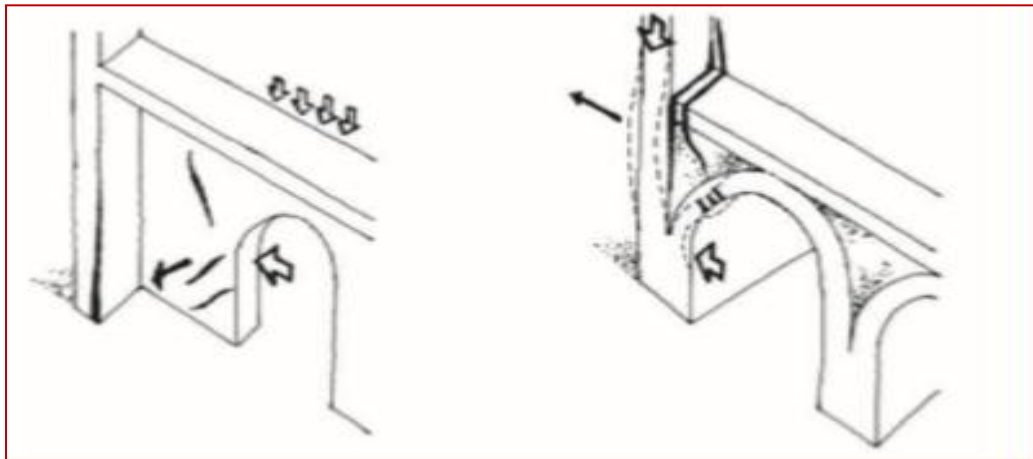


Figure 55. Exemples de désordres dus aux poussées non compensées des éléments arqués

Source : méthode de RehabiMed

**1.2 Les Pathologies des planchers faits de poutres et de poutrelles**

**1.2.1 Les déformations (flèche) :**

L'une des pathologies les plus observées dans les planchers en bois des bâtiments traditionnels en médina est la déformation en flèche excessive de ses éléments structurels (poutres et solives) sous l'effet des charges supportées par ces planchers. (Voir Fig. N°56)

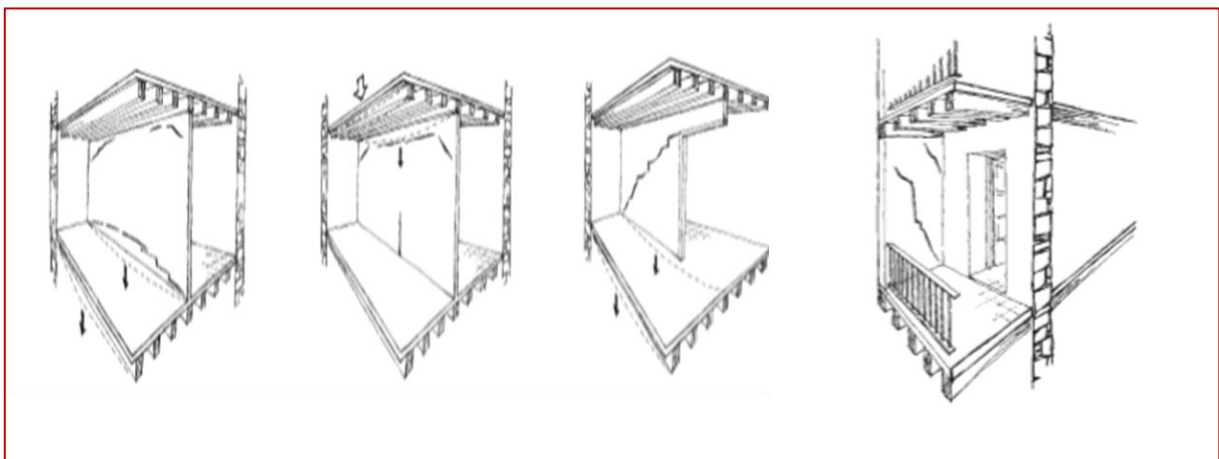


Figure 56. Exemples différents déformation poutre et poutrelle

Source : méthode de RehabiMed



### 1.2.2. La présence de fissures :

Les fissures observées au niveau des planchers traditionnels en bois peuvent avoir différentes origines .Les fissures ayant une origine mécanique sont généralement dues à un dépassement des valeurs limites de déformation des éléments structurels du plancher en bois (poutres et solives) sous l'effet d'une surcharge, par exemple. Ces types de désordres provoquent un affaiblissement des éléments structurels pouvant entraîner la rupture de l'ouvrage. (Voir Fig. N°57)

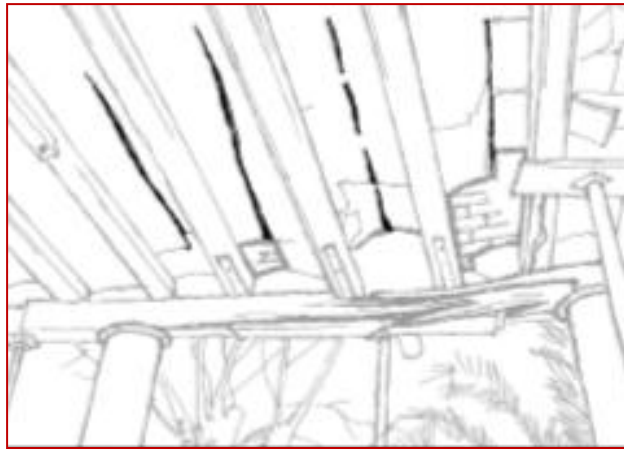


Figure 57. Exemples des fissurations au niveau de plancher

Source : méthode de RehabiMed

### 1.3. Pathologie des structures voûtées :

Les désordres affectant les structures voûtées sont généralement le résultat de la conjonction de plusieurs sollicitations, à commencer par le poids propre de la voûte qui crée un état de contrainte et de déformation initial, auquel s'ajoute l'application d'actions supplémentaires telles que les charges concentrées ou non ou le mouvement des appuis (murs, piliers, etc.) sous l'effet des poussées générées par la voûte elle-même (Voir Fig. N°58)



Figure 58: schémas montrant le sens des poussées exercées sur les structures voûtées

Source : rehabimed

## 2. Les Pathologies sous l'action du climat :

L'humidité est l'une des principales causes des désordres qui affectent les constructions. Elle peut menacer la bonne conservation des structures et des matériaux constitutifs du bâtiment. Elle se manifeste par un grand nombre de désordres des endroits très divers dans le bâtiment

### 2.1 Le désordre du mur :

Le mur est l'élément qui définit l'intérieur et l'extérieur, protégeant ainsi les occupants des aléas climatiques et leur offrant ainsi une bonne isolation thermique et acoustique. Mais au fil du temps, cette résistance diminue et la stabilité de l'ouvrage est mise en péril. Pour comprendre ces désordres il faut d'abord comprendre l'influence de l'humidité sur chacun des éléments qui le composent

#### 2.1.1 Les éléments structurels en maçonnerie (pierre et brique)

Les matériaux composant le mur : pierre et brique subissent l'action mécanique et chimique des intempéries (action directe de la pluie, remontées capillaires). Ces derniers engendrent des désordres souvent apparents, et influent directement sur l'aspect extérieur de ces deux matériaux. Nous citerons les désordres les plus courants :

A. **Efflorescence** : Elle résulte essentiellement des formations salines qui apparaissent sur un matériau poreux soumis à une circulation d'eau chargée de sels. Elle se manifeste sous forme de tâches **blanches** ou **grises** et affecte souvent les parties basses des murs des constructions dont les fondations ne sont pas bien isolées. La morphologie de ces encroûtements de sels varie avec la nature et la morphologie de matériau et le type de sel rencontré. (Voir Fig. N°59)



Figure 59: c Détails d'efflorescence

Source : [www.google.com /image/http](http://www.google.com/image/http) consulté aout 2018

B. **Exfoliation** : elle se caractérise par le détachement du calcaire en feuilles par les bords de la pierre ou en boursoufflures, et le gonflement des parties sous-jacentes qui deviennent pulvérulentes.

C. **Salissure et souillure** : Elles peuvent être constituées par des matières étrangères issues de la pollution atmosphérique et qui pénètrent plus ou moins profondément dans la microstructure des roches en modifiant l'aspect, par exemple la suie ou le goudron. Elles peuvent être aussi le résultat de la dégradation biologique. Par exemple, les salissures vertes résultent de la présence des différents types d'algues (chlorophycées, chlorococquées ou cyanobactéries), les salissures noires des cyanobactéries et les salissures rouges des chlorophycées



D. **Alvéolisation et désagrégation sableuse** : Elle se présente sous forme d'une accumulation poudreuse de résidus de roche suite au dessertissage des grains provoqué par la dissolution du ciment de la calcite. Elle se développe dans les endroits humides mais non lessivés. Elle est caractéristique des pierres calcaires granulaires subissant l'action de la cristallisation des sels comme la halite (NaCl) et la thernadite (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). (Voir Fig. N°60)



Figure 60: détail alvéolisation

Source internet [www.google.com /image](http://www.google.com/image)

### 2.1.2. L'enduit :

Cette dégradation se produit par infiltrations directes et par remontées capillaires. la pression de la pluie entraîne une pénétration de l'eau dans les enduits réduisant ainsi leur épaisseur. Concernant les remontées capillaires peuvent former des traces brunes ou blanchâtres et dégradent de manière irréversible le matériau<sup>26</sup>. Elle peut aussi être due à la présence de l'humidité : résultat des actions du liants (la chaux) action des bactéries cryptophages et des moisissures. (Voir Fig. N°61)



Figure 61: décollement d'enduit

Source : [www.google.com/image](http://www.google.com/image)

<sup>26</sup> J. Jeannet B Pignal, G Pollet et P. scarato .Op.Cite.p.47

### 2.1.3 Le mortier :

Quant au troisième élément, les joints de mortier, ils subissent également des altérations dues à l'action de l'eau. Ces joints jouent un rôle très important dans la structure des murs ; ils sont à la fois la partie la plus "stratégique" et la plus faible de l'ensemble. En effet, la qualité d'un mur dépend de la qualité de ces composants notamment du mortier. Lorsque l'eau monte par capillarité sur le mur, elle est emprisonnée à l'intérieur, celle-ci va exercer une pression sur les joints intérieurs qui finissent par s'élargir et se dégarnir conduisant ainsi une perte de cohésion entre les pierres pouvant aller jusqu'à la déstabilisation du mur voir son effondrement

### 2.2 Le désordre du plancher (Voir Fig. N°62)

Le désordre le plus courant que l'on constate sur les éléments en bois des structures horizontales traditionnelles est la putréfaction du bois causée par les attaques des champignons et des insectes xylophages tels que les termites ou les vrillettes. Les bouts des poutres et des solives des planchers qui sont en contact avec les murs en maçonnerie humides Les zones sont généralement les plus endommagées à cause des remontées capillaires ou des infiltrations des eaux

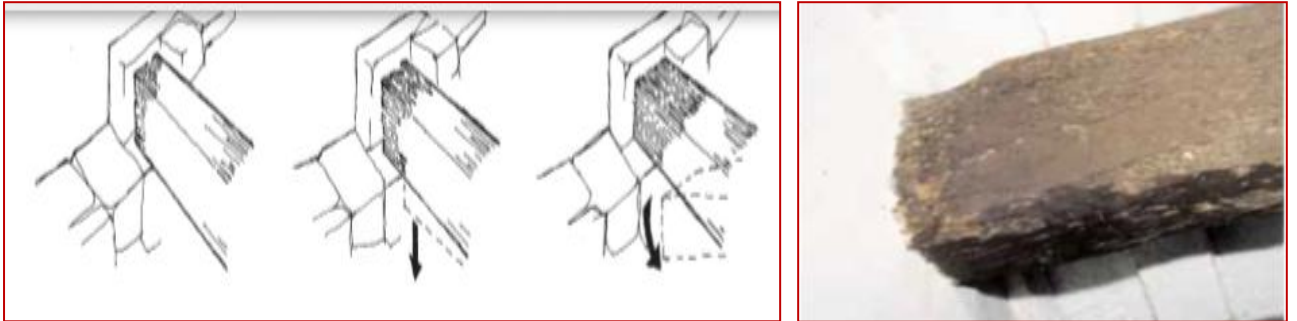


Figure 62: le désordre du plancher

Source : méthode de RehabiMed

### 2.3 Désordre des élément en acier: -

La corrosion des aciers n'est que le retour de ces derniers à leur état naturel (oxyde), ce phénomène se produit sur la surface extérieure du matériau qui laisse apparaître généralement des dégradations sous forme de rouille. La corrosion est causée essentiellement lorsque la température de surface du métal qui est au contact direct avec l'atmosphère atteint le point de rosée, ainsi, la vapeur de l'air se condense et forme de fines gouttelettes d'eau enrobant le métal d'une mince pellicule liquide.



## V. Conclusion :

Après une étude effectuée sur le bâti ancien sur les pathologies qui se développent dans les bâtiments anciens, dans ce chapitre, nous avons essayé de comprendre les causes de désordre du bâti ancien et sa relation avec sa typologie architecturale, son comportement du matériau et son environnement. On a constaté que ces désordres sont d'origine humide ou structurelle et tous les deux sont liés à des facteurs tels que l'environnement immédiat ou l'âge de bâtiment qui provoque des détériorations qui s'aggravent au fil du temps l'humidité, quelque soit son origine a des effets sur :

- les variations dimensionnelle des matériaux qui se manifestent par : retrait, gonflement et dilatation causant ainsi des fissures, la résistance mécanique des matériaux, tel : le fluage, éclatement des revêtements
- action du gel, etc., les interactions physico-chimiques des matériaux poreux comme la corrosion (acier), sels minéraux (terre cuite), hydrolyse

Le tableau suivant synthétise ce chapitre :

Type	Pathologie structurelles	
<b>Types de pathologie</b>	Les causes de ces pathologies	Conséquence de ces pathologies
<b>Pathologie des fondations</b>	Sol hétérogène Modification irrégulier de décente de charges Ouverture d'un tranché	Tassement différentielles
<b>Pathologies des murs</b>	Parement des murs	Les différents types de charges
	Tassement différentiels Mouvement sismique	
	Plan transversal de mur	La poussé des ouvrage porté
<b>Pathologies des planchers</b>	Les charges et les surcharges Tassement des fondations	Déformation, apparitions des fissures
<b>Pathologies les coupoles et les voutes</b>	Les poussés des piliers Tassement des fondations	Apparition des fissures Décomposition des éléments de ces structures
<b>Pathologies</b>	Les	Apparition des fissures



<b>des planchers</b>	surcharges		
<b>Pathologies des ouvertures</b>	Pourrissement des appuis  Consistance des appuis		Fissure de linteau  Le basculement d'une partie de mur

Tableau N°04 : synthèse de chapitre 02

Source : fait par l'auteur

## **CHAPITRE N°3**

# **Les techniques de réhabilitation du bâti ancien**

## I. Introduction

Le bâti ancien c'est une architecture civile, religieuse ou militaire qui s'est constituée à l'aide de pratiques et de traditions locales avec des matériaux dans le cadre de la réhabilitation du bâti ancien, les travaux de remise en état sont souvent nécessaires à réaliser, pour qu'on puisse le maintenir. En effet, il s'agit dans ces travaux de réhabilitation structurelle, de remettre en état ces éléments de structure et d'améliorer leur performance mécanique et physicochimique, pour satisfaire les exigences des évolutions ultérieures à leur construction.

Ce chapitre est consacré à présenter, les principales techniques qui s'impliquent à la réhabilitation du bâti ancien

## II. La réhabilitation comme outils de préservation du bâti ancien :

### 1. Définition de la réhabilitation :

La réhabilitation est un Terme de jurisprudence dans son sens premier, elle signifie l'action de rétablir une personne dans ses droits, au figuré le fait de faire recouvrer l'estime ou la Considération (révèle le petit Larousse illustré 2010).

**-Par extension dans le domaine du bâti**, le concept de réhabilitation désigne selon une première source<sup>1</sup>, les procédures visant la remise en état d'un patrimoine architectural et urbain longtemps déconsidéré et ayant récemment fait l'objet de revalorisation économique, pratique et/ou esthétique, qu'il s'agisse de tissu et architecture mineurs à vocation d'habitat, ou d'ensembles et bâtiments industriels (usines, ateliers, habitat ouvrier,...etc.).

**-Le terme de réhabilitation est aussi défini<sup>27</sup>**, comme l'action d'améliorer un édifice en conservant sa fonction principale, cela en précisant que le terme s'emploie aussi bien, pour des modifications légères, que pour des restructurations lourdes et n'excluant pas l'adjonction d'une partie neuve.

**- Enfin, une tierce définition<sup>28</sup>** consultée présente la réhabilitation, par l'amélioration des bâtiments, pouvant se réaliser par des travaux de réparation, d'aménagement et de transformation dans le bâtiment.

### 2. Objectifs de la réhabilitation

L'objectif de la réhabilitation est de restituer au logement, à l'immeuble, ou plus généralement au quartier, « une meilleure image sociale et une plus grande valeur économique<sup>29</sup> ». Donc c'est une action de remise en valeur qui entreprend des actions concertées après un processus de dévalorisation dû à plusieurs causes. Ainsi, l'opération de réhabilitation touche certains secteurs, et a de ce fait de multiples effets :

<sup>27</sup> JOFFROY Pascale, La Réhabilitation des bâtiments : conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements, coll. «Techniques de conception », Editions Le Moniteur, Paris, 1999, p.13.

<sup>28</sup> ANAH, Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, Réhabiliter et entretenir un immeuble ancien point par point, Edition du Moniteur, Paris, 1989, p.18 et 26 à 28.

<sup>29</sup> Y. Grafmeyer, Sociologie urbaine, Paris, Nathan, 1994



Sur le plan architectural, elle assure non seulement la conservation des constructions et donc d'un patrimoine, mais sa réinsertion dans un cadre bâti agréable, avec des adaptations aux nécessités et usages contemporains. Sur le plan urbanistique, elle permet l'amélioration des quartiers anciens insalubres et les ensembles immobiliers récents atteints par la dégradation, en cherchant l'homogénéité et l'équilibre entre ces quartiers.

Sur le plan économique, elle permet de prolonger la vie d'un bâtiment dévalorisé pour le « rétablir dans l'estime » faire des économies d'énergie après une réhabilitation thermique, en améliorant l'étanchéité, la ventilation, l'isolation thermique et l'élimination de l'humidité. Possibilité de création de l'emploi et l'injection d'équipements et de petites activités.

Sur le plan social, elle renforce l'enracinement des habitants dans leur quartier, leur permet de s'approprier leur cadre de vie, de ne plus se sentir assistés dans un univers uniforme et dépersonnalisé. La réhabilitation permet donc de lutter contre l'exclusion sociale, atténuer les maux et crises sociaux par conséquent, consolide la cohésion sociale.

### 3. Les enjeux de la réhabilitation :

Bien que le concept de réhabilitation suppose un respect du caractère architectural du bâtiment ou du quartier, il s'oppose tout de même à la notion de la restauration qui, elle, tend à rétablir une image originelle, c'est-à-dire, la restitution intégrale de l'état initial avec un minimum de perte d'intégrité esthétique et historique. Cette dernière, touche seulement des édifices ou ensembles particulièrement prestigieux. Dans cette perspective de restauration, des questions se posent sur la manière d'intervenir. Est-il faisable de cacher les ajouts ? Le restaurateur, peut-il tromper en faisant « authentique » ? Pourrions-nous rendre visible les inscriptions actuelles ? Toutes ces questions, certes fondamentales pour la préservation, néanmoins restent restreintes dans la sphère des spécialistes de la restauration et surtout ceux qu'on appelle les « puristes ». Ainsi, deux tendances de création architecturale s'y affrontent. Le projet de réhabilitation, se situe donc, dans cette démarche de concorde. « L'enjeu est d'éviter que, pour des raisons stylistiques ou idéologiques, l'une prenne le pas sur l'autre : soit qu'en survalorisant le passé on adopte un principe de neutralité, ce qui aboutit au pastiche ou à la muséification, et fige le bâtiment dans un décor factice ; soit, au contraire, qu'on surestime le présent par « progressisme » naïf qui prétend faire forcément mieux que ce qui existe »<sup>1</sup>.

Le respect de certaines formes de l'organisation traditionnelle des logements anciens va parfois dans le sens du plaisir d'habiter ailleurs que dans un logement de ce type. Le principe même de cette conservation pose le problème du respect des règles qui contribuent à intégrer les composantes du confort moderne : isolation thermique et phonique, ventilation et organisation spatiale du logement.

Par conséquent, respecter un édifice existant, c'est admettre qu'il doit évoluer et accepter les transformations positives. C'est aussi respecter les occupants en actualisant le niveau de confort optimum. C'est pourquoi les enjeux de la réhabilitation ne devraient jamais se situer sur le plan du style mais plutôt sur celui du besoin, Car habiter un lieu engage profondément les êtres qui font des investissements en vue d'une sédentarisation.

#### 4. Les niveaux de la réhabilitation :

Selon le rapport SIMON NORA de 1975 en France on distingue Quatre niveaux de réhabilitation<sup>30</sup> :

**4.1. Réhabilitation légère :** Elle consiste en l'installation d'un équipement sanitaire complet avec salle d'eau (y compris les canalisations, l'électricité et les peintures accompagnant ces agencements). Elle ne comporte pas de travaux sur les parties communes de l'immeuble, ni l'installation d'un chauffage central.

**4.2. Réhabilitation moyenne :** En plus de l'installation d'un équipement sanitaire cité plus haut, la réhabilitation moyenne implique des travaux plus complets, concernant les parties privatives de l'immeuble à l'intérieur des logements, comme : - la réfection de l'électricité et des peintures ; - l'ajout du chauffage central ou électrique avec amélioration de l'isolation thermique et changement des fenêtres.

En règle générale, la distribution intérieure du logement et les cloisonnements ne sont pas modifiés sur les parties communes de l'immeuble, des travaux légers sont entrepris, tels que, peinture des cages d'escalier et ravalement des façades sans reprise des toitures.

**4.3. Réhabilitation lourde :** En plus des travaux décrits ci-dessus, il est prévu une redistribution des pièces dans le logement par modification ou suppression de cloisons ou une redistribution des logements étage par étage. L'intervention est beaucoup plus complète sur les parties communes de l'immeuble ainsi : - réfection des façades avec amélioration (isolation par l'extérieur par exemple) ; réfection des toitures (couvertures et toitures, terrasses).

**4.4 Réhabilitation exceptionnelle :** Cette opération est préconisée dans le cas où les désordres ou l'état de la structure menace, l'intégrité et la stabilité de l'ouvrage, alors, on reprend les structures, voire les fondations avec renforcement éventuel. C'est le cas notamment, d'immeubles dont les façades sont classées et nécessairement conservées avec restauration (nettoyage, réparation), alors que la structure intérieure (planchers, refends porteurs) est entièrement reconstruite.

#### 5. Le processus de réhabilitation

Le projet de réhabilitation s'effectue évidemment sur un bâtiment déjà réalisé. Ce dernier possède une identité dont les caractéristiques architecturales et techniques vont ainsi, être prises en compte lors de l'étude de sa réhabilitation. Le processus de réhabilitation se déroule de façon très différente d'un projet de construction neuf. Il est nécessaire de faire des expertises sur la base d'un diagnostic préalable, où il sera déterminé toutes les composantes structurant le projet (architectural et technique), les conditions d'habitabilité, d'hygiène et de confort, ainsi que la faisabilité du projet. Ensuite une méthodologie d'intervention sera adoptée en concertation avec les habitants et les instances locales.

<sup>30</sup> - DREGE Jacques, PUTTATI Jacques, ILLOUZ Corinne. Et al. Pathologie des ouvrages de bâtiment T.1 : Fiches techniques pour l'établissement du diagnostic-la mise en œuvre des solutions appropriées-la prévention et la résolution des litiges, Editions Weka, Paris, 1997, Dispositions générales relatives à la pathologie, Chap.1/1, page 7 et 8.





### 5.1 Le diagnostic préalable

Avant d'entamer tous travaux du projet de réhabilitation, il sera utile de clarifier certains points : - la nature du programme et la faisabilité de sa réalisation ; - le montant total des travaux selon un devis quantitatif et estimatif ; - la ou les sources de financement. Pour que le maître de l'ouvrage puisse se prononcer, le diagnostic préalable doit être achevé par l'architecte et doit comporter les conclusions de l'expertise du bâtiment et ses environs.

À cet effet, Cette analyse préalable et rapide doit concerner :

- les structures porteuses et tous les éléments portés - tous les dommages : fissures, déformations, boursoufflures, effritement et décollement des enduits et peintures...etc. - étanchéité des toits et des descentes d'eau pluviale - état des menuiseries et des canalisations - mesures des taux d'humidité (de l'air et dans les maçonneries) et identifier son origine si elle existe. - Évaluation détaillée des travaux à exécuter, le montant total doit s'approcher du réel (pas trop d'incertitudes).

L'expertise doit examiner aussi les bâtiments environnants, seulement de l'extérieur afin de pouvoir évaluer la stabilité de l'îlot, en d'autres termes s'assurer, d'une part que les désordres éventuels sont localisés. D'autre part, collecter les informations concernant l'origine historique et le caractère architectural à l'origine du bâtiment à réhabiliter ;

### 5.2 Les relevés

Le relevé architectural est indispensable pour tout projet de réhabilitation et de restauration. Car il précise les informations techniques nécessaires à la réussite du projet. Il est recommandé que le relevé soit effectué par le concepteur lui-même, ou du moins chapoté par lui. Ceci lui permettra une meilleure connaissance du projet et d'éviter les éventuelles erreurs. Néanmoins, le concepteur est souvent appelé à retourner sur les lieux pour vérifier ou confirmer certains détails et éventuellement s'assurer de la compatibilité de ses propositions avec l'état des lieux.

### 5.3 La conception d'un projet de réhabilitation

La réhabilitation ne permet pas aux architectes de s'exprimer librement comme dans un projet neuf. Évidemment, les premiers bâtisseurs se sont déjà fortement exprimés et ont revêtus leurs œuvres d'une empreinte architecturale qui reflète la culture de l'époque. Donc, Il semble plus judicieux de s'intégrer en douceur dans leur ouvrage plutôt que de lui faire violence.

Décider de réhabiliter un bâtiment ancien, c'est intervenir sur un patrimoine en opérant des choix. L'option adoptée est nourrie d'une profonde réflexion basée sur le diagnostic d'où résulte une méthodologie adéquate ; tout en veillant à ce que les objectifs du maître d'ouvrage soient atteints.

Il est à noter, l'existence de plusieurs tendances dans le champ de l'intervention sur le patrimoine, en voici quelques unes :

La réhabilitation à l'identique en vue d'une muséographie, il s'agit là de transmettre un patrimoine bâti, témoignage d'une tradition ancestrale avec le moins de transformations possible, pour une génération future. Cette tendance est adoptée par les conservateurs. 2. une autre vision complètement contradictoire et purement utilitariste, consiste à chercher la

valeur marchande du patrimoine, et l'utiliser en tant que telle. Ainsi toute modification ou démolition est permise.

Entre ces deux dispositions, plusieurs scénarios intermédiaires peuvent prendre place, où il serait important de favoriser l'esprit créatif tout en restant respectueux du patrimoine. L'un des problèmes auquel se heurte la réhabilitation des bâtiments traditionnels est l'application des règles et réglementations venant du champ de la construction neuve moderne. Cette interférence entre deux modes de constructions : moderne et traditionnel, suscite une réflexion approfondie, afin de diminuer la pression de la modernité, qui pèse lourdement sur le bilan de la réhabilitation sans pour autant que le résultat soit meilleur. Certes, la réhabilitation a besoin d'un cadre législatif et réglementaire approprié mais qui doit puiser ses fondements des expérimentations qui ont prouvé leur fiabilité.

### III. Les techniques de réhabilitation de désordre structurel du bâti ancien :

#### 1. Technique de traitement des fissures :

##### 1.1 Qu'est ce qu'une fissure ?

Dans le domaine de la construction, les fissures se concrétisent par des fentes, des brisures ou encore, des déchirures qui touchent certains éléments d'une construction, comme les murs, les plafonds, les planchers,... etc.

##### 1.2 Les différents types de fissures :

Type de fissure	Caractéristique	cause
<b>Le faïençage</b>	Il s'agit d'un réseau de fissures en mailles, de largeur généralement inférieure à 0,2 mm et ne concerne que la couche superficielle de l'enduit. Le faïençage ne peut donc mettre en péril la stabilité du bâtiment, le problème qu'il pose est d'ordre esthétique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le séchage superficiel trop rapide (dessiccation) de l'enduit ou du badigeon</li> <li>- L'excès de talochage.</li> </ul>
<b>Les microfissures</b>	Ce sont des ouvertures de largeur inférieur à 0,2mm, elles concernent généralement toute l'épaisseur de l'enduit	<p>Maçonnerie composée d'éléments divers, ayant des comportements hygrothermiques différents ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Mauvais dosage de l'enduit</b></li> <li>- <b>Excès de l'eau de gâchage</b></li> <li>- <b>Mauvaise adhérence de l'enduit</b></li> <li>- <b>Epaisseur trop importante de l'enduit</b></li> </ul>
<b>Les fissures</b>		L'instabilité du terrain ou des fondations, entraînant des mouvements importants des

	C'est des ouvertures de largeur comprise entre 0,2 et 2mm, qui concernent l'enduit, mais également les éléments de structure à l'instar des murs	<p>constructions</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La déformation ou rotation du plancher sur le chaînage périphérique, voire le chaînage horizontale trop faible ;</li> <li>- Chaînage vertical absent ou trop faible</li> </ul>
<b>Les lézardes</b>	C'est des grosses fissures, dont la largeur de l'ouverture est supérieure à 2mm et concernent la totalité de l'épaisseur du mur	L'instabilité du sol ou des fondations qui entraînent des mouvements important de l'édifice.

Tableau : réalisé par l'auteur

### 3.3 Les techniques de traitement des fissures :

#### 3.3.1 Injection d'un fluide:

L'injection se traduit en l'introduction d'un fluide au niveau des décalages dus aux fissures dont le but est de colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure la technique d'injection permette d'améliorer les caractéristiques des ouvrages par régénération interne des mortiers, par collage des parties d'ouvrage désolidarisées ou par amélioration de l'étanchéité, la nature du liquide<sup>31</sup> ainsi que la pression de son injection sont déterminés en fonction des matériaux qui constituent le mur et des trous à reboucher. (Voir Fig. N°63)



Figure 63: Exemple de reprise de fissure par injection.

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

**Les composants pouvant être utilisés dans les coulis d'injection des maçonneries sont :**

- Les liants hydrauliques (chaux hydraulique, ciments, ciments tamisés, ciments sur broyés.
- La chaux aérienne
- le plâtre il concerne seulement les maçonneries hourdées au plâtre).
- Les fillers (calcaire, siliceux ....)

<sup>31</sup> Généralement des liquides d'origine époxydique



- Les charges ultrafines (bentonite, fumée de silice...)
- Les adjuvants (plastifiant, super plastifiant, entraîneur d'air...)
- L'eau (NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons – Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi)
- Les résines organiques (époxydes, polyuréthanes, acryliques...).

### **Ces produits d'injection doivent posséder les qualités suivantes :**

- Une facilité d'injection quel que soit le type de coulis
- Un faible retrait et une faible décantation
- Une bonne insécabilité sous faible pression pour éviter des désordres dans la maçonnerie
- Une stabilité de leurs caractéristiques dans le temps après injection, la résistance mécanique du produit d'injection doit être adaptée à la résistance de la maçonnerie pour ne pas créer de points durs.

#### **• La mise en œuvre :**

1. Nettoyer la partie fissurée: en utilisant de jet d'eau et des solvants compatibles pour supprimer la poussière et dépouiller l'enduit présent.
2. Trouer le mur tout en suivant l'axe et la direction de la fissure, à intervalle de 30 à 60cm.
3. Placer les injecteurs du liquide au niveau du percement à une profondeur de 05cm ;
4. Colmater les fissures sur toute leur longueur doit s'effectuée obligatoirement.
5. Pour que la fissure supporte la pression de l'introduction du fluide.
6. Injection du fluide.

#### **• Observations et conseils :**

Pour les zones fortement humides, il est conseillé de traiter les fissures, par injection d'un mélange de latex et de bitume ou de résines acryliques, ces produits ont la qualité de permettre de redonner l'étanchéité nécessaire aux zones altérées du mur.

Il n'est pas de bonne pratique, de traiter des fissures par injection de résine sous des températures élevées, car l'injection de la résine sous une température supérieure à 15°C, favorise une polymérisation rapide qui risque d'induire une prise trop rapide et donc incomplète, de même, si la température est basse, en général inférieure à 10°C au moment de l'injection de la résine dans la fissure, il est nécessaire de réchauffer la zone à traiter.

### **3.3.2 Remplacement de la partie endommagée : Reprise des fissures par remplacement partiel:**

- Dans le cas de fissures ponctuelles ne dépassant pas les 10cm de largeur on procède par cette technique. Elle consiste à remplacer les éléments qui présentent des détériorations.

- Devant une distance de 15 à 20 cm de part et d'autre de la fissure, les éléments endommagés (briques, pierre...etc.) sont soit remplacés par un autre élément de même : **couleur, forme, caractéristique mécanique et physico-chimique.**

La mise en œuvre :

1. Supprimer l'ensemble de la partie endommager ;
2. Nettoyage et séchage de la partie en question durant quelques jours ;
3. Procéder, À l'aide de goujon de fixation et de coulis de mortier de chaux, a la mise en place du nouvel élément dans le défoncement ;
4. A l'aide d'un mortier riche en hydraulique avec une compacité voisine à celle du mur, Jointer l'élément du remplacement avec le reste du mur, sur une profondeur de 02cm

### 3.3.3 Reprise des fissures par des agrafes de solidarisation:

La reprise des fissures pourra également s'effectuer par des éléments rigides et résistants tel que les agrafes métalliques (Voir Fig. N°64) qui viennent de remplacer le partie lézardée dans le but d'éviter la reconstruction de cette dernière. Ou encore par un procédé qui consiste à mettre en place un système de plusieurs barres d'acier inoxydable.

Cette technique est efficace dans le cas de fissure intérieure ou extérieure dans les joints verticaux du mur placés tous les 25cm en raison de 10 à20 épingle

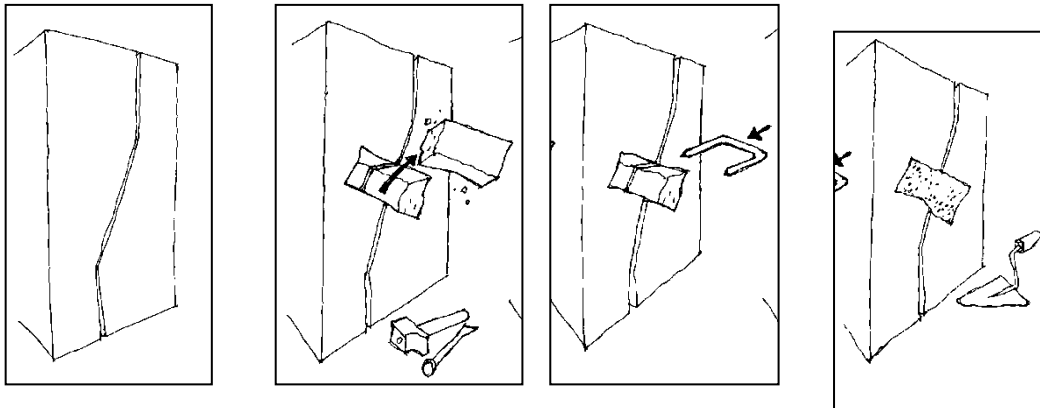


Figure 64: Les différentes étapes de la mise en œuvre de la technique du remplacement partiel

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Eurom

La mise en œuvre : Supprimer tous type de crasse dans les joints verticaux avant la mise en place des épingles à une distance de 70 cm de l'axe de la fissure ; (Voir Fig. N°66-65)

1. Perforation de ces joints ;
2. Planter les épingles, en assurant un espacement horizontal égale (u moins une pierre par rangée horizontale);
3. Sur une distance qui surpasse de 30 cm les ancrages des épingles, Purifier les joints des pierres chevauchées par les épingles
4. Scellement des épingles par le bais d'un mortier sans retrait, (au moins 1 à 2cm du parement)
5. Mouiller l'ensemble (mur et épingles) par un enduit de mortier de chaux riche en liant hydraulique.



Figure 65 : Epingle protégée ancré dans le mur pour renforcement.

Source Achab Samia



Figure 66: Remplacement des parties lézardées par des agrafes métalliques.

Source Achab Samia

### 3.3.4 Reprise des fissures au moyen des potelets en béton armé:

On fait appel à cette opération en situation de développement transversal de fissures. Elle consiste à remplir par le béton armé les cheminées verticales avec une largeur maximale de 20cm. On peut répéter cette technique plusieurs fois jusqu'à arriver à la résistance souhaitée.

#### La mise en œuvre :

1. Le paçement des étais pour éviter tout dommage non prévu. ;
2. Éviter la cheminée verticale,
3. Nettoyage et dépoussiérage du vide obtenu ;
4. Introduire le ferrailage essentiel pour les potelets (calculé au préalable) ;
5. Placer le coffrage ;
6. Projeter du béton dans la cheminée ;

## 2. Les différents types d'interventions pour traiter les pathologies de la structure

### 2.1 Intervention sur les fondations :

Plusieurs types d'interventions pour réparer les désordres des fondations sont possibles.

On site :

#### 2.1.1 L'amélioration du sol par injection:

Cette technique consiste à combler par injection sous pression, les vides et fissures du sol, afin d'augmenter sa résistance à la compression.

Les produits d'injection<sup>32</sup> sont selon les cas constitués :

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

Elle fait appel à des matériaux «nouveaux» (coulis ou résines qui peuvent avoir des effets secondaires sur l'état des fondations d'un bâtiment traditionnel. Elle se distingue également par son caractère agressif vis-à-vis du sol et de l'ouvrage à réparer

### 2.1.2 La reprise en largeur des fondations<sup>33</sup> :

Cette technique consiste à réaliser une nouvelle fondation en briques pleines et au mortier de ciment en dessous de celle existante, cela conduira à l'approfondissement et à l'élargissement du plan de la fondation, car il faut tenir compte du fait que l'approfondissement de la fondation, implique nécessairement son élargissement (Voir Fig. N°67)

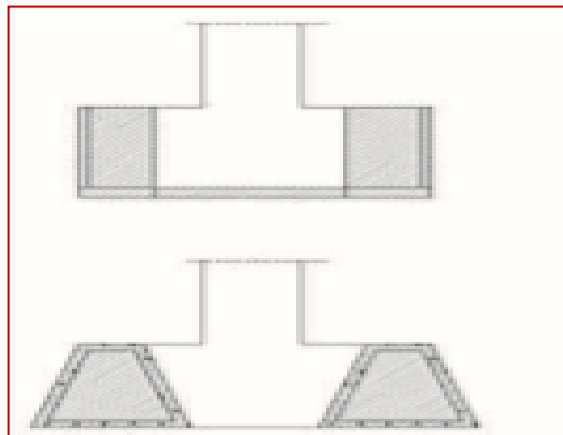


Figure 67: consolidation par élargissement  
Source méthode rehabimed

### Démarche de mise en œuvre :

La technique s'effectue sur multiple tronçons simultanés et non successifs, dont le but est de garantir la stabilité de l'ensemble, en suivant les démarches qui suivent :

1. Division de la longueur du mur (des fondations continues sous ce mur) en plusieurs tronçons, en les numérotant.
2. Creuser au niveau du premier tronçon, jusqu'à l'atteinte de la base de la fondation.
3. Une fois la base est atteinte, le tronçon sera encore divisé en sous tronçons .

<sup>32</sup> ANAH, Agence National pour l'Amélioration de l'Habitat (Paris), Techniques et produits pour l'amélioration de l'habitat, Editions du Moniteur, Paris, 1981, p. 15.

<sup>33</sup> BRENDA Pietro, op. cit. p. 64 à 69



4. La nouvelle fondation se construit alors avec de la brique forte et un mortier de ciment. En réservant un vide de 08 à 10 cm entre le plan inférieur de la fondation existante et le plan supérieur de la nouvelle fondation
5. Ce vide au début sera rempli par des chevilles en bois, pour une durée de 03 à 04 jours, qui seront par la suite remplacé par une rangé de brique bien lié avec un mortier de ciment.
6. On refait les mêmes procédés au niveau des autres tronçons. Une fois le travail sur le premier tronçon est achevé,
7. L'adhérence entre les nouvelles fondations des différents tronçons est assurée par des harpes laissées à chaque début et fin de tronçon.

### 2.1.3 Les reprises en sous-œuvre: (Voir Fig. N°68)

Cette technique consiste à réaliser en sous-œuvre de la fondation existante, une semelle élargie en béton armé et cela pour assurer d'une part, la stabilité du mur existant et aussi, afin d'augmenter la surface de la répartition des charges sur le sol, dans le cas d'un bon sol, il suffit d'élargir les semelles afin d'augmenter la surface de répartition de la charge au sol.

Ce procédé consiste à :

1. Fouiller le sol des deux côtés du mur jusqu'au niveau de la fondation.
2. Creuser au-dessous de la semelle existante sur la moitié de sa largeur. Procéder par tranches de longueur qui ne dépassent pas les 02 mètres chacune.
3. Couler une semelle en béton armé dont les dimensions et le ferrailage dépendent de la charge qu'elle va supporter.
4. Garder des aciers en attente pour la continuité du ferrailage dans la nouvelle semelle, du côté opposé
5. Creuser du côté opposé de la première intervention, sur la même hauteur et les mêmes longueurs et largeurs.
6. Nettoyer les aciers en attente, compléter le ferrailage et couler la deuxième partie de la semelle.
7. Continuer dans le même principe l'élargissement de la semelle

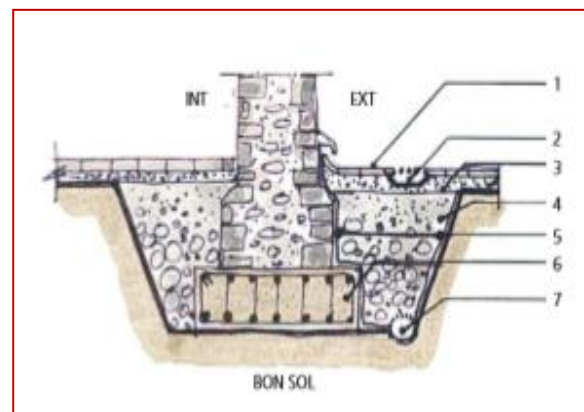
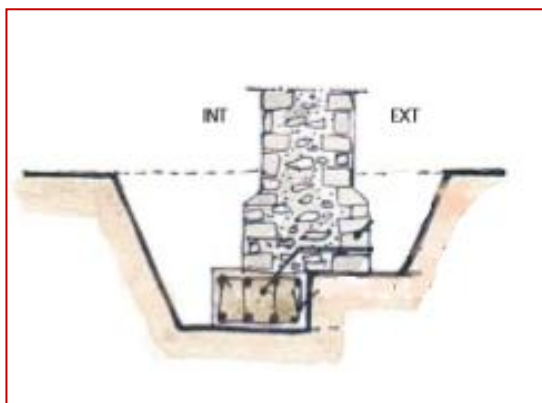


Figure 68: renforcement par semelle en béton

Source : internet aout 2018 Downloads/Documents/1-01%20FR.pdf

### 2.1.4 reprise par des poutres adhérentes en Béton armé:

#### A. Les poutres adhérentes transversales et longitudinales en Béton armé

Il s'agit de renforcer en sous œuvre les fondations en question par la réalisation de poutres en béton armé longitudinale et transversales colée en adhérence avec les fondations initiales en cavités, ces poutres transversales assurent la transmission des charges issues des fondations vers les poutres longitudinales, qui à leur tour les transmettent au sol. (Voir Fig. N°69-70)

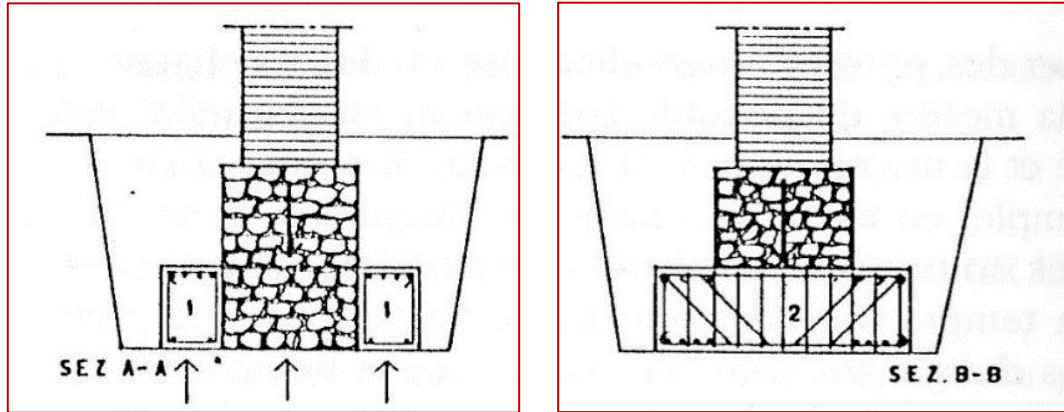


Figure 69: Renforcement par des poutres adhérentes en B A

Source : PIETRO Brenda, bâtiment en maçonnerie Analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidation, P\_73

#### Démarche de mise en œuvre :

La mise en œuvre passe par les étapes suivantes :

1. mise en place d'un système d'étaieement en veillant sur la stabilité de la superstructure durant les travaux.
2. Creuser jusqu'à l'atteinte même niveau de base de l'ancienne fondation
3. La pose du ferrailage des poutres longitudinales le long de la fondation.
4. Coulage des poutres longitudinales en réservant des aciers d'attente pour but de liaison avec les poutres transversales.
5. Passer à la perforation de cavités dans les fondations accueillera les poutres transversales, une fois que la reprise de poutre longitudinale est terminée.
6. Coulage les poutres transversales après installation du ferrailage des poutres transversales, afin d'assurer l'attachement avec les aciers d'attente des poutres longitudinales.

Pour éliminer au maximum les effets du retrait, Les poutres longitudinales et les traversines sont coulées les unes après les autres. Il est indispensable d'humidifier amplement la maçonnerie et/ou travailler avec des bétons spéciaux anti-retraits. Les exigences à suivre sont:

-produire des niches irrégulières dans l'ancienne maçonnerie dont le but est de mettre en avance le jointement « structurelle » entre les éléments en béton armé et la maçonnerie de la fondation.

-Prévoir minimum dix jours avant de mettre sous charges ces structures coulées; afin de permettre au béton de développer une résistance mécanique suffisante<sup>34</sup>.

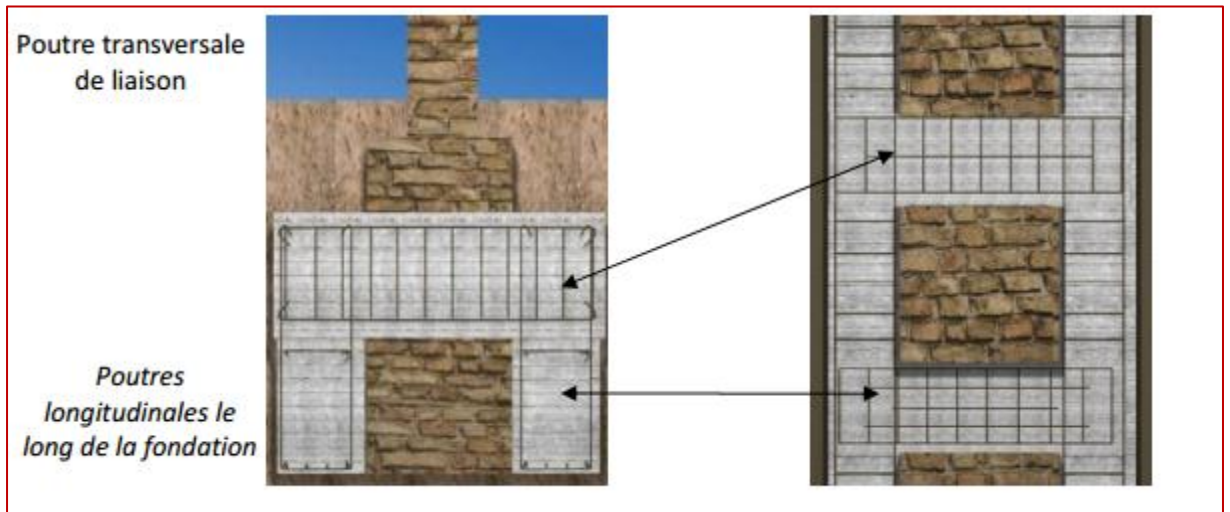


Figure 70: Renforcement des fondations par des poutres longitudinales rattachées par les poutres transversales.

Source : ACHAB SAMIA, Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane, P\_113

### b- poutres adhérentes en Béton armé en forme de L:

C'est un système identique au précédent, avec la forme de la poutre de renforcement en L, qui joue un double rôle de sous fondation et de soutènement vertical à la maçonnerie de fondation. (Voir Fig. N°71)

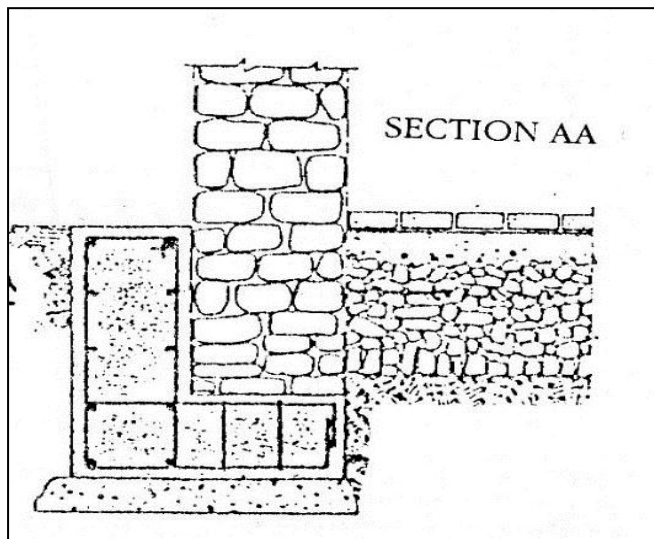


Figure71:: Renforcement par des poutres adhérentes en B A

Source : PIETRO Brenda, bâtiment en maçonnerie Analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidation, P\_73

<sup>34</sup> PIETRO Brenda (1993). Bâtiment en maçonnerie Analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidation, Centoanalisi sociale progetti S.R.L, Rome, P\_72-73

### 2.1.5 La mise en place des pieux:

Cette technique est applicable lorsque le sol est de faible résistance<sup>35</sup>, d'une façon à éviter les perturbations pouvant affecter les maçonneries anciennes, ce renforcement peut être exécuté de deux manières :

#### A. pieux adhérent accolé des deux côtés

Ce procédé est utilisé lorsque la perforation des murs en maçonnerie est possible sur les deux côtés, (Voir Fig. N°72)



Figure 72: Renforcement par des poutres adhérentes en B A

Source : ACHAB SAMIA, Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane, P\_114

#### La mise en œuvre :

- Percement de 1/3 de la profondeur de la fondation à consolider, à gauche et à droite ;
- Perforation des fondations et mise en place des traversines ;
  - Enfoncement des pieux par rotation, devant chaque cavité de traversine ;
  - Joindre les pieux aux traversines ;
  - La pose de deux longrines longitudinales des deux côtés de la fondation ;

Attachement des pieux (par le bas des traversines) avec les longrines, qui s'étend le long de la fondation

#### B. pieux adhérent accolé d'un seul côté

Il est utilisé Lorsque la perforation des murs en maçonnerie n'est pas possible sur les deux côtés, (Voir Fig. N°73)

<sup>35</sup> P. Brenda. Bâtiment en maçonnerie, analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidations, 1993 EPAU Snap



Figure 73: Pieux adhérents accolés d'un seul côté du mur

Source : ACHAB SAMIA, Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane,

### La mise en œuvre :

- Creuser le 1/3 du sol du côté extérieur du mur de la façade de la profondeur de la fondation;
- Enfoncer le pieux du coté extérieur de la construction ;
- Maitre en place Une console dans une cavité percée dans la fondation ;
- Joindre l'extrémité du pieux à la console déjà colée.
- Relier les extrémités des pieux aux consoles à l'aide d'une longrine longitudinale posée parallèlement au mur de façade,

En conséquence, Les armatures de cet ensemble sont strictement liées entre elles

### **C. . des micros pieux en Bêton armé:**

La technique des micro-pieux est utilisée généralement pour stabiliser une construction ancienne en cas de sinistres (tassements en cours d'une construction, désordres survenu après affouillements limitrophes,...etc.).

Cette technique consiste, à implanter des micro-pieux qui descendent profondément vers le bon sol au-dessous des semelles existantes. (Voir Fig. N°74)

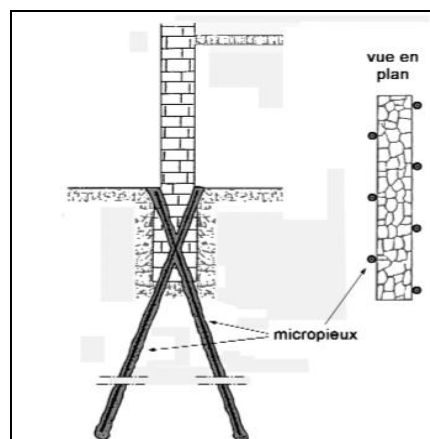


Figure 74: renforcement par des micros pieux,

Source : site internet consulté aout 2018  
 Nouveau%20dossier%20(5)/mémoire%20soutenance/1réhabilitation%20%20complet%20.pdf



## 2.2 Réparation des murs et des piliers en maçonnerie traditionnelle

Selon le degré de dégradation du mur on fait appel aux différentes techniques et méthode de réparation pour supprimer dans un premier lieu les causes de cette déformation et dans un autre de rétablir la verticalité du mur, mais il faut d'abord faire un diagnostic des désordres

### 2.2.1. Le rejointoiment:

C'est une technique qui consiste à rejointoyer au mortier à base de chaux les joints entre les éléments de maçonnerie détériorés par l'érosion ou par des racines de plantes. L'opération de rejointoiment englobe le curetage des joints existants sur une certaine profondeur, puis leur remplissage avec un nouveau mortier à base de chaux. L'injection se fait de deux manières : (Voir Fig. N°75)

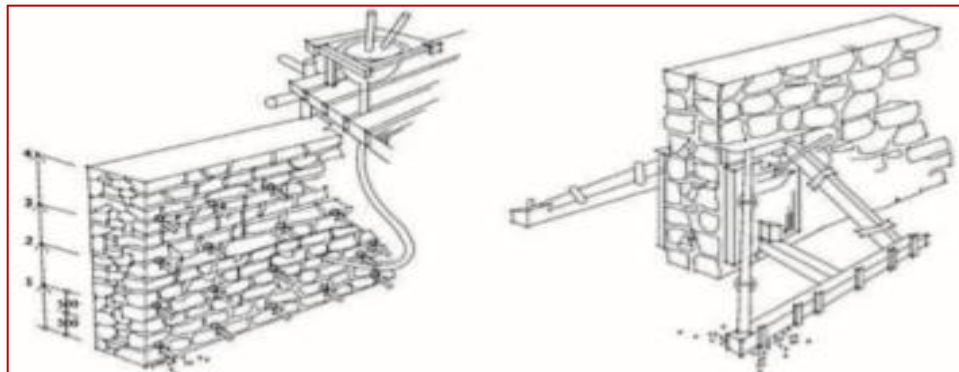


Figure 75: technique de rejointoiment

Source : rehabimed

- Par la mise en place d'un coffrage en parallèle au parement du mur.
- Par la mise en place de système en treillis métallique galvanisé et solidarisé entre eux, fixé au préalable sur le mur à renforcer.

On décide la méthode d'exécution de l'injection (soit système en treillis, soit le coffrage) en fonction des résultats voulus :

- la résistance voulue ;
- épaisseur cherchée.

Les étapes de mise en œuvre :

1. Nettoyer le parement du mur à renforcer ;
2. Placer soit un système en treillis ou du coffrage, selon la méthode choisie ;
3. Préparer en parallèle le mortier à introduire,
4. Contrôler l'installation du système (treillis/coffrage) ;
5. Injecter du mortier sur le parement ;
6. Décoffrage après durcissement.

### 2.2.2 Technique de Chaînage

La technique de chaînage consiste à installer des ceintures ou des courroies sur le pourtour de murs structurants fermés en maçonnerie traditionnelle d'un bâtiment ou sur ses piliers, afin de les rendre plus robustes et d'augmenter leur résistance. C'est une technique ancienne que l'on retrouve dans beaucoup d'édifices historiques en Italie, le plus célèbre étant le Colisée romain. Les éléments de chaînage étaient généralement fabriqués en fer ou en acier. Aujourd'hui on trouve sur le marché des bandes en fibre de carbone qui remplissent le même rôle. (Voir Fig. N°76)

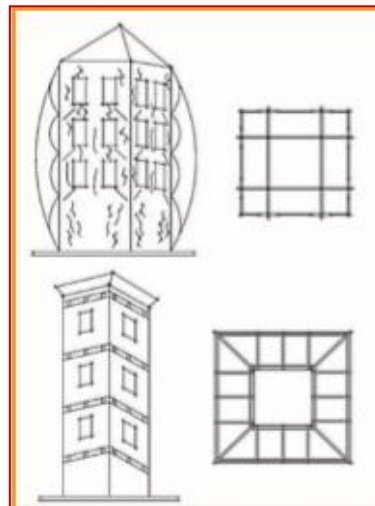


Figure 76: chaînage métallique

Source : (P. Rocchi, C. Piccirilli, Manuale del Consolidamento.)

### 2.2.3 Le gainage en béton armé :

Afin de consolider des murs qui présentent des dommages au niveau de leur composant due à la décohésion du mortier qui les liaisonne, cette intervention procède par la mise en place de deux grillages métalliques sur les deux coté du mur endommagé (de l'extérieur et l'intérieur), le jointement entre ces deux panneaux de grillage se fait par des trous enfoncés dans l'épaisseur du mur (4trous/m<sup>2</sup>) dans lesquels on place des tiges métalliques de 08mm d'épaisseur, après avoir terminé les étapes déjà cité, un coulage de béton est mis en place par projection d'une couche de 3 à 4mm. (Voir Fig. N°77)

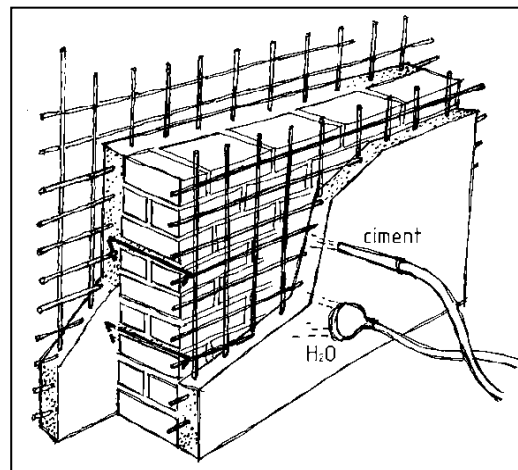


Figure 77: Renforcement par gainage en B A

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed





### La mise en œuvre :

1. Nettoyage des parements du mur à renforcer ;
2. Perforation du mur pour faire passer les traverses qui garantissent le lien entre les deux ferrillages, en moyenne de 04 traverses /m<sup>2</sup>
3. Placement du ferrillage sur les deux parties du mur ;
4. Assurer le joigne des deux grillages par le biais des traverses ;
5. Coulage du béton sur l'ensemble préparé (avec une épaisseur de 03 à 04 cm pour maçonnerie de brique, et 08cm pour maçonnerie lourde)

### **2.2.4 L'Introduction de barres d'acier :**

Afin de procurer une consolidation intégralr.il s'agit de l'enfoncement de barres d'acier dans l'épaisseur du mur de façon oblique, permettant ainsi d'avoir une seconde structure qui contribue à l'amélioration de la résistance du mur. Cette technique assure la création des zones rigides toute en répartissant les charges de façon mieux homogène.

### **2.3 Les intersections entre murs en maçonnerie:**

Généralement, les parties les plus fragiles sont ceux d'intersection entre deux murs, les liaisons à ce niveau sont le plus souvent mal ou totalement supprimé ce qui résulte de larges fissures verticales ou bien un divorce total supprimant les effets d'interaction.

Les réparations devront être combinées avec celles de rigidifiassions des intersections. Ces opérations seront effectuées en utilisant les méthodes suivantes:

#### **2.3.1 Placement des briques de liaison des murs :**

Il s'agit de mettre en place des briques liaisons ou des moellons-liaison, qui unifient les deux murs (Fig.41). Les jonctions seront mises en place avec un intervalle de 70 cm avec des pièces de même :

1. Texture ;
2. Caractéristiques mécaniques ;
3. Caractéristiques physico-chimiques ;
4. Densité et capillarité.

#### **2.3.2 Utilisation des fers plats :**

Cette méthode est utilisée en cas de décalage important entre les deux murs. On consolide ici à l'aide des fers plats en forme de T (avec ne tête plus large) encastrés au niveau de liaison de sorte à ce que ces tiges puissent sceller les deux fragments.

L'enfoncement doit respecter un intervalle de 30cm au minimum (il est de 50 à 70cm, en moyenne). Ce dernier est le résultat de l'état de conservation et de la composition du mur.

Ainsi, on traite La fissure en procédant à la mise en place de treillis métallique galvanisé produit à 1 m d'environ (sur les deux côtés de la fissure), associé entre eux au mur, par des tiges de liaison (50 à 60 cm), sur chaque face, scellés et recouverts d'un enduit.



### 2.4 Intervention sur les arcs, les voûtes et les coupoles :

Parmi les solutions qui existent pour renforcer les éléments structurels arqués, nous

#### 2.4.1 le remplacement des claveaux :

Il s'agit de mettre en place de nouveaux voussoirs à la place de ceux altérés, dont le but est de rétablir la continuité mécanique des composants et de garantir une descente des charges aux piliers. Cette technique présente une certaine complexité et pas toujours réalisable vue la difficulté du placement des étais au niveau de l'intrados.

#### 2.4.2 Technique de gainage :

Pour le but de renaitre les jonctions entre les claveaux et de garantir une descente des charges correcte. Cette technique consiste à gainer l'élément (arc/voute) de coté de ou Extrados ou de part et d'autre, par le biais des gaines métalliques attachées entre elles par des tiges métalliques.

La mise en œuvre <sup>36</sup>:

- Métrer les dimensions de la voûte (portée ; flèche et section)
- Définir une section en acier équivalente à celle de la voûte, en assurant que la voûte travaille seulement en compression et non à la flexion.
- Exécuter cette section sur site tout en épousant convenablement la forme de la voûte en intra comme en extrados.
- L'assemblage des éléments venant à l'extrados sera par tiges traversant le corps des voussoirs via des trous percés auparavant par perceuses et non par burins et masses.

#### 2.4.3 Les tirants :

Parlant ici d'une procédure exécutée en utilisant des tirants en acier dont le but est de pallier les fissures des murs. (Voir Fig. N°78)

Il s'agit de mettre en place une tige métallique réglable par le bais d'un système de boulonnage à l'extérieur qui traverse l'édifice et « retient » l'écartement du mur extérieur. La fixation de la tige se fera par boulonnage sur une plaque métallique plus souvent en U; l'exécution doit se faire de manière à ne pas perturber la circulation et la bonne utilisation de l'ensemble de la construction.

La technique préserve l'équilibre du mur de l'arcature, en réparant les dommages et les fissurations qu'il comporte.

Il s'agit d'introduire un câble de précontrainte, qui travaille en exerçant des tractions qui bloque à leurs tours l'effondrement du mur et ses dommages qui poursuivent.

<sup>36</sup> MOULOUD KHEMOUCHE (2007). Procédés de renforcement du vieux bâti, Office des publications universitaires, Alger, P\_111

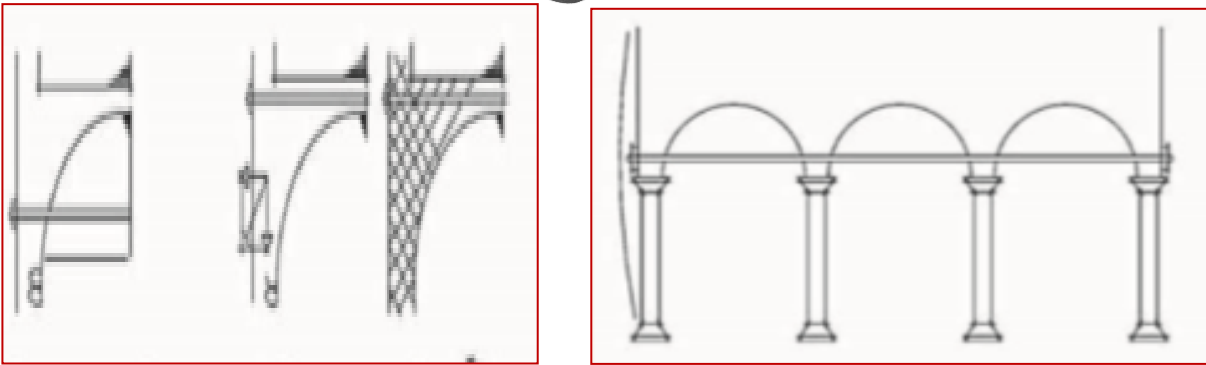


Figure 78: Renforcements des arcatures par des tirants

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

La mise en œuvre :

1. Encreur par forage d'un câble de précontrainte, à une distance de  $\frac{1}{3}$  de la hauteur par rapport à la flèche.
2. Scellement du câble au moyen de pièces spécifiques de part et d'autre du mur,

### 2.4.4 Taxidermies avec des armatures en acier

Il s'agit d'une technique de renfort qui consiste à insérer des armatures en acier à l'intérieur des murs malades en maçonnerie de briques pleines ou de pierre, de façon à augmenter leur solidité et leur résistance. On utilise généralement un produit adhérent à base époxydique pour assurer le contact entre les armatures d'acier et le matériau du mur à renforcer

#### A. technique de chaînage périphérique

Cette technique qui met en avant le renforcement des composantes linéaires posés afin de soutenir les arcs et les voutes, dont le but est d'arrêter/ralentir l'effondrement du mur ou leurs déformations graduelles transversalement à leur plan tels les tirants métalliques.

Ces derniers seront placés sur l'extrados; la résistance aux surcharges des arcs a la possibilité d'être établie par l'introduction de barres d'acier inoxydables (Voir Fig. N°79) en guise de taxidermie partir de l'intrados.

On peut aussi intervenir sur certaines voutes surbaissées à l'exécution déchainages périphériques en acier ou en béton armé qui absorberont les efforts créés au niveau du soubassement.

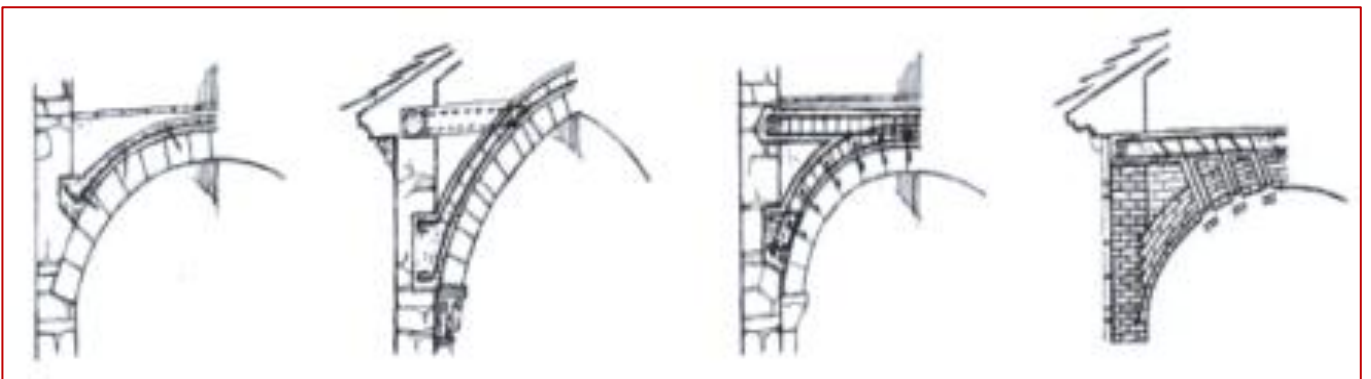


Figure 79: Renforcement des tirants (avec chaînage périphérique).

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

**B. L'introduction des barres d'aciers :**

Pour le but de freiner l'effondrement de l'arc et du mur supérieur qu'il supporte. Et qui sont face à des déformations transversales dans son plan, il s'agit de l'introduction de tirants métalliques commençant de l'intrados jusqu'à l'extrados pour les consolider contre la traction qu'ils subissent.

Dans les cas de voûte le renfort est assuré par un chaînage périphérique, en acier ou en béton armé pour absorber les poussées latérales au niveau du soubassement. (Voir Fig. N°80-81)

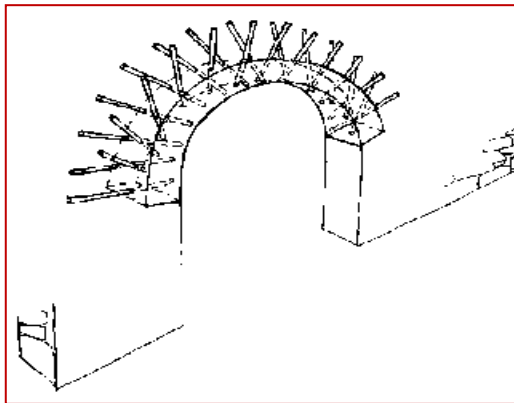


Figure 80 : Renforcement des voûtes par introduction des barres d'acier

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

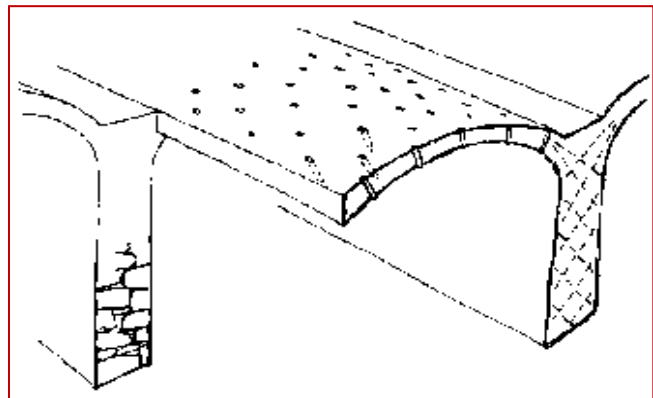


Figure81: Renforcement des arcs par des barres d'acier

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

**2.4.5 Renforcement par des contreforts :**

Ce procédé présente l'alternative à la technique du renforcement par les tirants, cette méthode est appelée quand la structure fragile n'est pas en mesure de soutenir les tensions ponctuelles au niveau des points d'ancrage.

Les poussées pratiquées au niveau des murs par les arcs et les voûtes sont des poussées inclinées. Leurs absorptions peuvent alors être maintenue par le biais de contreforts qui à leurs tours transmettent ces charges au sol. (Voir Fig. N°82)

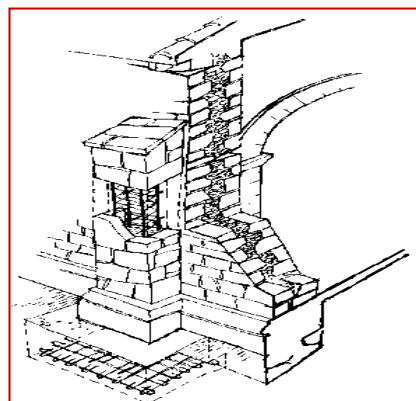


Figure 82: Renforcement par des contreforts

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

### 2.4.6 Réparation des bouffements par pression convergente :

La technique de réparation consiste en sa réduction par pression convergente contre la partie convexe du bouffement : (Voir Fig. N°83)

-en adossant par le bas d'un système d'étaiyage consécutif de l'élément de la structure portée à la provenance de ce désordre ;-en deuxième lieu l'étaiyement du bouffement lui-même commençant par les arcs de décharge supérieur qui sera suivi d'une unification par des éléments installés en boutisse des deux parements du mur désolidarisé<sup>37</sup>.



Figure 83: Pose de boutisse après réduction du bouffement par étaiyement.

Source : ACHAB SAMIA, Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane, P\_1

## 2.5 Interventions sur les planchers

Comme cela a été développé précédemment, les causes de dégradation des planchers traditionnels en bois peuvent être liées à l'attaque d'agents biotiques, au fluage du bois ou à des déficiences de la structure du plancher sous l'effet de sollicitations mécaniques causées par les charges supportées par le plancher.

### 2.5.1 Remplacement des appuis des poutres et solives en bois : (Voir Fig. N°84)

L'une des solutions consisterait à remplacer les appuis dégradés par des éléments de substitution façonnés dans la même essence de bois, et ce, après avoir pris soin de bien nettoyer et traiter les parties malades des solives (ou des poutres). Le traitement curatif du bois peut être fait en utilisant une solution de traitement Xylophène. La longueur des éléments de substitution en bois des appuis malades et le type d'assemblage choisi pour les relier aux bois anciens sont des éléments fondamentaux pour garantir la solidité des solives et leur permettre de continuer à assurer leur fonction structurelle.

Une autre solution pourrait consister en le renfort des appuis malades à l'aide d'éléments métalliques (des sabots par exemple) qui viendraient habiller les bouts des solives malades après leur nettoyage et traitement.

<sup>37</sup> ACHAB, SAMIA(2012). Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane. Mémoire de magister : architecture. Algérie : NIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE Tizi-Ouzou. P 137.

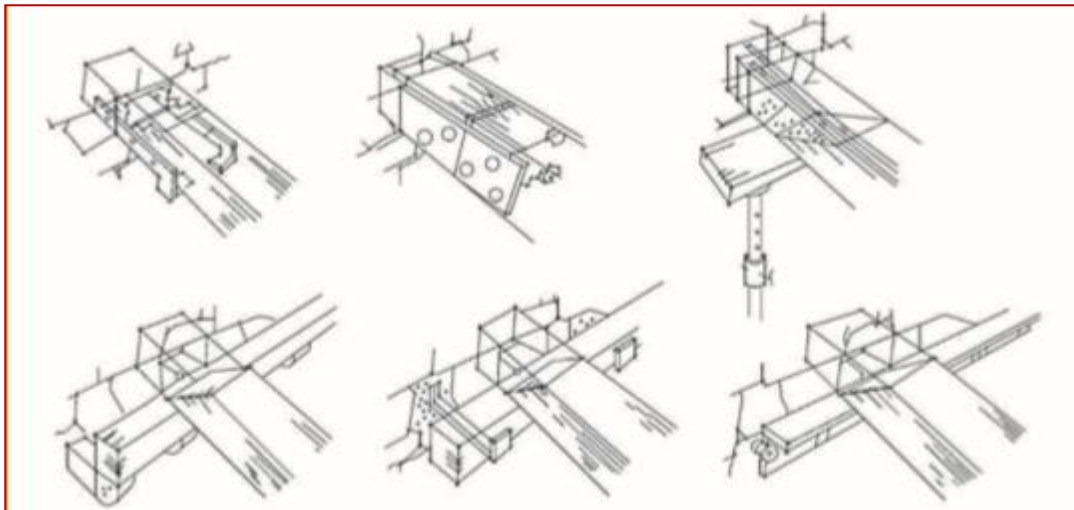


Figure 84 : renforcement d'un plancher

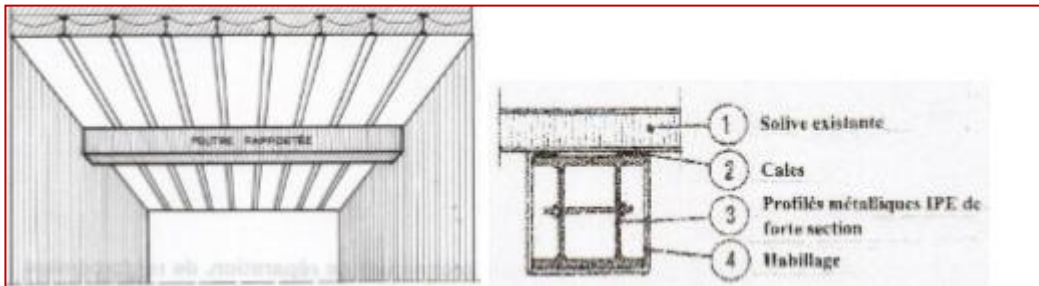
Source IBID .P 58

### 2.5.2 Le rajout d'une seconde rangée de profilé métallique :

Cette technique consiste à conserver la structure porteuse (la poutraison du plancher existant) après avoir étayé les solives conservées (traitées) et entièrement dégarnis l'ancien plancher ; à rajouté une seconde rangée de profilé métallique, cette structure mixte réalisé permet d'exploiter au mieux les caractéristiques des deux matériaux, créant ainsi une meilleur rigidité et une meilleure résistance grâce à l'augmentation des performances du plancher (Voir Fig. N°85)

Figure 85: Remplacement des appuis des poutres et solives en bois

Source méthode rehabimed



### 2.5.3 Division de la portée des poutres et solives d'un plancher soumis à une tension de flexion excessive : (Voir Fig. N°86)

Pour absorber les tensions de flexion introduites par les surcharges sur les poutres et solives d'un plancher traditionnel en bois et réduire les déformations dues au fluage du bois, une solution simple et efficace consiste à diviser la portée de ces éléments structurels en plaçant une ou plusieurs poutres transversales en bois ou en acier sur la partie inférieure





Figure 86: Division de la portée des poutres et solives d'un plancher soumis à une tension de flexion excessive

Source [www.google.com /image](http://www.google.com/image)

### 2.5.4 Pose additionnelle de dalles en béton armé

La pose additionnelle de dalles en béton armé, raccordées aux poutrelles en bois des planchers, est l'une des solutions les plus courantes aujourd'hui dans les interventions de réhabilitation de bâtiments. Le principe réside dans la transformation des poutrelles d'origine en poutres mixtes, bois et béton, et offre la possibilité de distribuer les tensions de la flexion de manière coplanaire dans toutes les directions du plan du plancher en augmentant la rigidité globale de la construction par la liaison de la nouvelle dalle dans l'épaisseur des murs et sur tout le périmètre, ce qui améliore aussi la résistance au séisme.

Par ailleurs, le béton ajouté améliore aussi l'isolation acoustique du plancher. L'élément le plus critique de cette solution est celui de la liaison de la nouvelle dalle avec le mur, laquelle va dépendre des caractéristiques de rigidité, de cohésion et de percement des murs, ces caractéristiques étant très variables et imprévisibles. (Voir Fig. N°87)

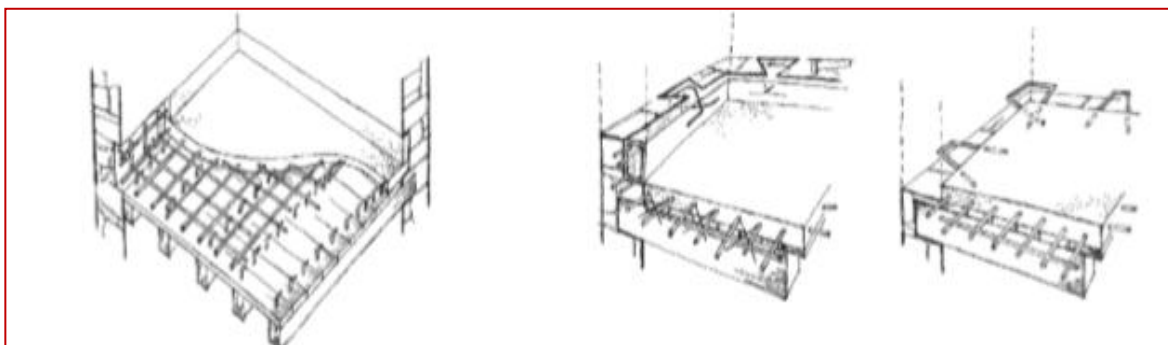


Figure 87 Pose additionnelle de dalles en béton armé

Source : technique de réhabilitation et renforcement, Euromed

## IV. Les technique de réhabilitation de désordre d'humidité

L'humidité est l'une des principales causes des désordres qui peuvent affecter le bâti ancien, et qui peut menacer la bonne conservation, de sa structure et des matériaux qui le constituent. A cet égard, la lutte contre l'humidité compte parmi les actions propres à la réhabilitation d'un bâti ancien, si elle est diagnostiquée dans ce dernier.



## 1. Les manifestations et désordres de l'humidité dans le bâti ancien :

Généralement l'humidité se manifeste dans le bâtiment par l'existence de :

- Taches caractéristiques ;
- Moisissures ;
- Efflorescences ;
- Crypto florescences ;
- Décollements des revêtements ;
- Ecaillages des peintures. Ces manifestations sont souvent le témoin de l'existence de désordres ayant gagné le bâtiment tels que :
- La dégradation des maçonneries et des enduits par dissolution, puis cristallisation en surface des sels et aussi par leur désagrégation par éclatement, dans les régions soumises au gel ; d'autres travaux récurrents dans la réhabilitation du patrimoine bâti ancien, méritent d'être explicités dans le cadre de notre recherche, parmi ceux-là, nous présenterons entre autres, les essentiels travaux de lutte contre l'humidité

## 2. Les techniques de lutte contre l'humidité ascensionnelle

### 2.1 .La technique du drainage du sol :

Le but de cette technique est d'intercepter les eaux d'infiltration, pour les diriger le plus loin de la partie enterrée des murs et fondations, et cela pour empêcher leur remonté par capillarité.

Cette technique de drainage du sol, ne peut être efficace, que si le niveau de la nappe phréatique se situe en dessous de l'arase inférieure des fondations. Elle permet alors de protéger la partie enterrée. A cela, on peut citer trois procédés de drainage :

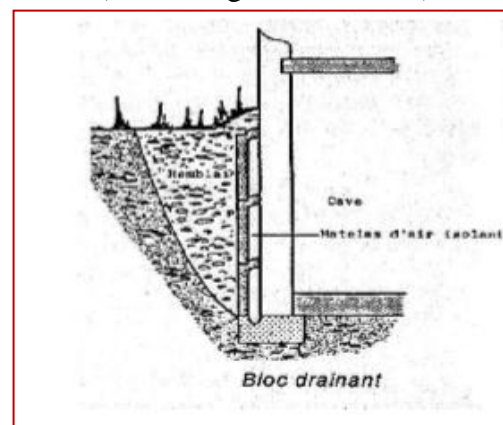
#### 2.1.1- Drainage du sol par drain perforé :

Ce procédé consiste à placer un drain perforé au fond d'une tranchée creusée autour de l'immeuble ou de l'ilot, cela dans le but de récupérer les eaux d'infiltration, pour lesquelles ne remonté pas par capillarité dans les murs, le drain perforé, placé en tranchée au niveau des semelles de fondation est couvert de matériaux filtrants (cailloux, gravier et sable).

**2.1.2 Drainage du sol par bloc drainant :** Il s'agit pour ce troisième procédé de lutte contre l'humidité ascendante, de blocs drainants composés d'éléments placés verticalement le long du mur enterré et de la fondation de l'immeuble, dans le double but, de drainer les eaux et de protéger les maçonneries (Voir Fig. N°88)

Figure 88 : drainage du sol par bloc drainant

Source : IBID



### 2.2 Technique de traitement par siphons atmosphériques :

Il s'agit dans ce traitement, de placer des petits tubes très poreux en terre cuite à la base du mur, afin d'en évacuer l'humidité, ces petits tubes cités sont introduits sur les 2/3 de l'épaisseur du mur à espaces réguliers, dans des trous forés, puis scellés au mortier dans la maçonnerie. (Voir Fig. N°89)

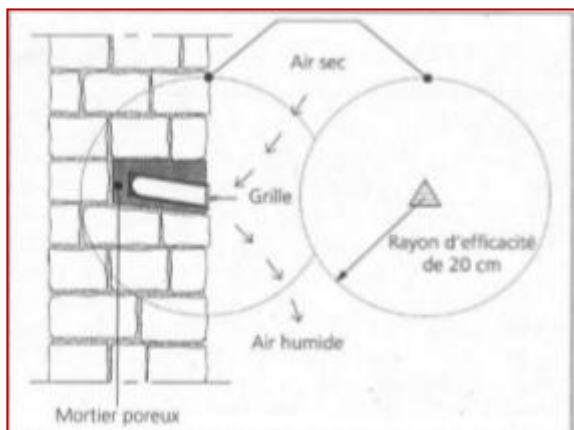
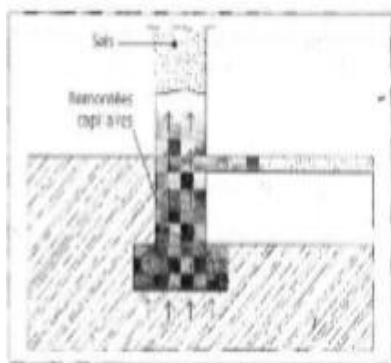


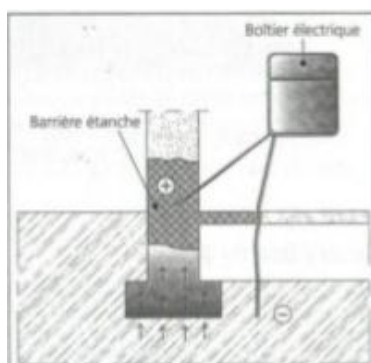
Figure 89 : principe du traitement par siphon atmosphérique  
Source : CAUSSARIEU ALEXANDRE, GAUMART THOMAS, GUIDE PRATIQUE de la rénovation de façades : pierre-brique-béton , eyrolles, paris, 2005, p120

### 2.3 La technique de l'électro-osmose phorésie :

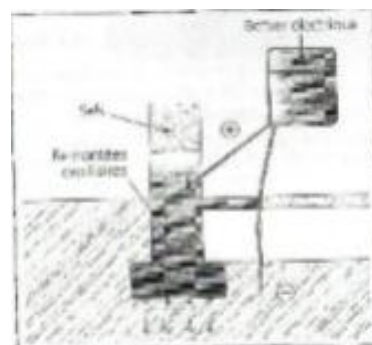
L'électro-osmose phorésie Consiste à faire passer un courant faible, entre des électrodes implantées dans le mur (+) et une prise de terre (-), pour créer une différence de potentiel entre le (+) et le (-), qui va entraîner l'eau et les particules métalliques en suspension vers le sol, après cela, un produit colmatant est injecté autour de l'anode disposée dans le mur, ce produit colmatant, va être entraîné par le courant qui circule entre l'anode et la cathode, pour venir boucher les capillaires du mur, créant ainsi, une barrière étanche qui bloquera les remontées capillaires. (Voir Fig. N°90)



Etat naturel d'un mur avant traitement



Création d'un courant électrique permettant le déplacement de particules



Création de la barrière étanche grâce au colmatage du mur

Figure 90 : La technique de l'électro-osmose phorèse  
Source : Ibid p.

**2.4 La technique de l'insertion d'une barrière étanche à la base des murs:** Autre technique pour lutter contre l'humidité ascensionnelle, celle-là, consiste à scier le mur sur toute son épaisseur, pour y introduire une barrière étanche (feuille de polyester, aluminium, mastic à base d'asphalte,... etc.). (Voir Fig. N°91)

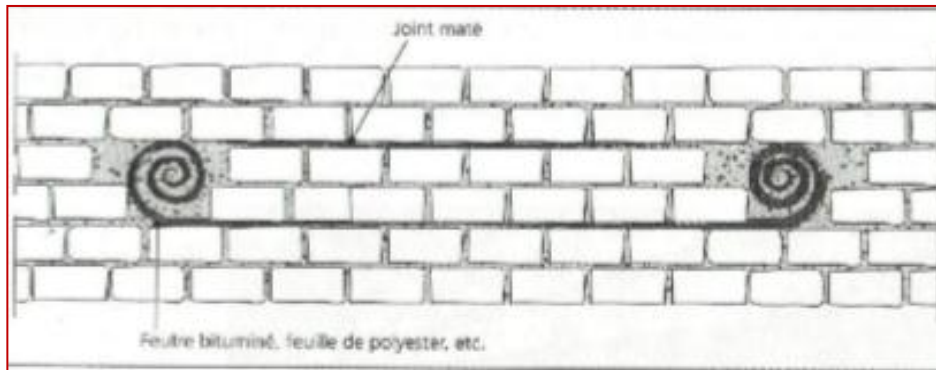


Figure 91 : principe d'insertion d'une barrière étanche à la basse d'un mur

Source ibid ,p119

### 3. Les techniques de lutte contre l'humidité des infiltrations :

#### 3.1 Les techniques L'hydrofugation de surface

Cette technique consiste à appliquer, sur le parement à traiter par pulvérisation ou au pinceau un produit hydrofuge incolore, dont le rôle est d'empêcher l'eau de pénétrer dans la maçonnerie. Cela sans pour autant empêcher, la perméabilité à la vapeur d'eau, du fait que le mur devra pouvoir continuer à « respirer ».

Les hydrofuges ont en général des effets secondaires, bénéfiques, rendant les façades moins salissantes, ralentissant la détérioration des matériaux de construction et empêchant le développement des mousses et lichens. Il existe trois grandes familles de produits d'hydrofugation :

- Les siliconâtes en solution dans l'eau ;
- Les siliconâtes en solution dans un solvant ;
- Les savons métalliques (stérâtes de zinc, d'aluminium ou de calcium).

#### 3.2 Les revêtements et enduits minces d'étanchéité et d'imperméabilisation :

Cette autre technique de lutte contre l'humidité des infiltrations, consiste en l'application sur la paroi à traiter, des types de revêtement dits d'imperméabilisation et d'étanchéité, qui sont conçus pour arrêter la pénétration de l'eau dans les façades. Au niveau pratique, le traitement d'un mur par un revêtement d'étanchéité est plus durable, qu'un traitement par un revêtement d'imperméabilisation, ceci revient à la grande aptitude des revêtements d'étanchéité, à résister aux probables fissures du bâtiment.



### V. Conclusion :

Nous avons revu dans ce présent chapitre, les différentes techniques qui sont préconisées de nos jours, pour réhabiliter les divers éléments de structure d'un bâti ancien dégradé.

A cet égard, il a été attesté dans la plus part des cas de réhabilitation du bâti ancien, la nécessité d'entreprendre des travaux de réhabilitation structurelle où il s'agissait surtout, de consolider, de réparer ou de remplacer des éléments structuraux des bâtis objet de ces travaux, de manière à respecter dans leur mise en œuvre, les valeurs architecturales que peut présenter le bâti ancien objet de l'intervention.

# **Partie d'investigation**

**Chapitre N°01 :**

**Présentation du fort turc  
de Fort de l'eau**

## I. Introduction

Au cours de l'histoire, l'Algérie par sa situation stratégique et les richesses dont elle dispose elle suscita l'intérêt des conquêtes et des expéditions étrangères, surtout européennes, en vue de sa colonisation.

Pour faire face à ses conquête plusieurs fort furent édifiés le long du littoral afin d'assurer la protection de la ville. Parmi ces forts nous citerons le fort de Bordj El Kiffan. Qui signifie fort des coteaux ou falaises du fait qu'il ait été construit sur un rocher semblable à une tête avancé dans la mer. C'est de ce fort que la ville de bordj el Kiffan prend son nom.

## II. Situation Géographique du fort :

Le fort se situe **sur la rive côtière d'Alger, à 20 km à l'est de celle-ci** il couronne sur un rocher dominant la plage, il est accessible **depuis** la mer et depuis la ville à partir de deux accès, un qui mène au front de mer, et l'autre qui mène au centre. (Voir Fig. N°92)



Figure 92: plan maps situation du fort

Source : [www.google.com /Google maps](http://www.google.com/Google_maps) consulté aout 2018

Il est délimité au nord par la méditerranée et du côté ouest par le front de mer, à côté d'une mosquée, et Du côté est par un marché et de son côté sud par la ville de Bordj El Kiffan. (Voir Fig. N°93)



Figure 93: Vue panoramique sur le fort

Source : rapport de l'expertise sur le fort turc de fort de l'eau, études réalisées par le BET Archimed, Juin 2006



### III. Datation du Fort :

La date **exacte** de d'édification du fort de l'eau reste douteuse, les écrits historiques<sup>38</sup> qui l'évoquent, transportent des dates différentes, certains la remontent au 16<sup>e</sup> siècle d'autres au 18<sup>e</sup> siècle, la plus vieille source ayant évoqué ce fort fut l'ouvrage<sup>39</sup> de Boutin<sup>40</sup>, revient à **1808**, et ce dans le cadre d'une enquête sur Alger ayant pour but la préparation de l'expédition de 1830, le bataillon Boutin avait mis au point un relevé, des forts et des batteries de la ville d'Alger, entre autre il avait fourni une esquisse du plan du fort de Bordj El Kiffan. (Voir Fig. N°94)

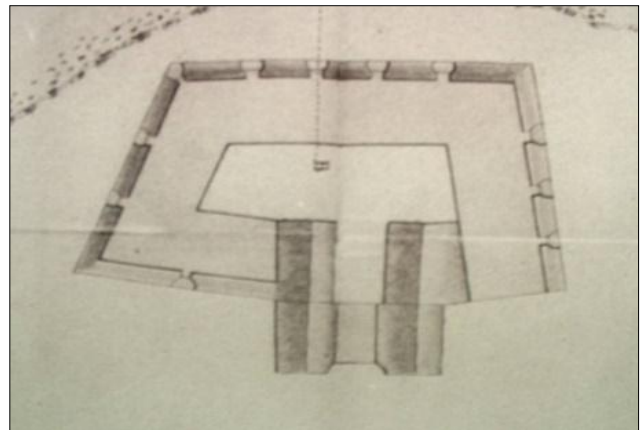
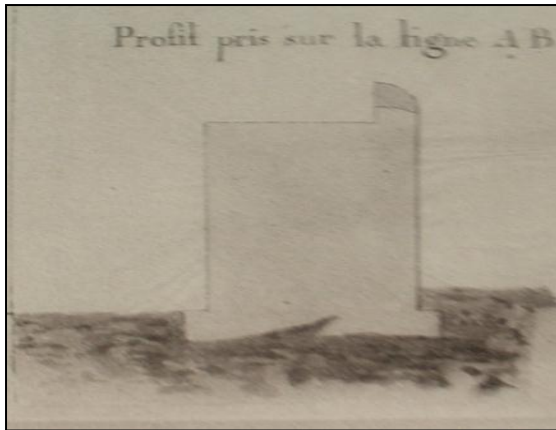


Figure 94 Esquisse de plan et profil du Fort

Source : Boutin, Reconnaissance des villes, forts, et batteries d'Alger

Les insuffisances de cette esquisse avec l'absence de source et de date précise nous ont laissé penser que Boutin ne s'est fondé que sur son observation et des témoignages.

En 1901, G Colin<sup>41</sup> renvoie la construction du fort au 18<sup>e</sup> siècle, Colin dans son ouvrage corpus des inscriptions arabes et truques de l'Algérie, avait traduit l'épigraphe en arabe écrite sur une plaque en marbre sur le mur à l'extérieur au-dessus de la porte : (Voir Fig. N°95)



Figure 95: Inscription au-dessus de la porte d'entrée du fort

Source : rapport de l'expertise sur le fort turc de fort de l'eau, études réalisés par le BET Archimedé, Juin 2006

<sup>38</sup> Un nombre très limité de documents qui l'évoquent

<sup>39</sup> Reconnaissance des villes, forts, et batteries d'Alger, Paris, 1808

<sup>40</sup> Vincent Yves Boutin, (1772-1815), un bataillon Français, qui remplissait des missions d'espionnage en Afrique du nord, notamment sur Alger, en 1808 Il a fourni un plan d'invasion de cette dernière.

<sup>41</sup> Gabriel Colin, (1860-1924), Docteur en médecine (Montpellier, 1905) et docteur des lettres (Paris, 1911). - Agrégé d'arabe (1907). - Professeur d'arabe moderne à l'université d'Alger



« Louange à Dieu dans son unité! Qu'il répande ses grâces sur son prophète! Ce fort a été construit sous le règne de Mohamed Pacha. Que Dieu facilite l'accomplissement de ses desseins et lui fasse obtenir tout ce qu'il souhaite. Année 1135 »<sup>42</sup>

Selon citation, le fort fut construit en 1153 hégire qui convient à 1722 /1723 de l'ère chrétienne soit le 18<sup>e</sup> siècle, par Mohamed Pacha<sup>43</sup> dey d'Alger de 1718 à 1724.

Plus tard, en 1910, Henri Klein<sup>44</sup> dans son ouvrage Feuillet d'El Djazaïr<sup>45</sup>, renvoie sa construction au 16<sup>e</sup> siècle, précisément en 1581 par Djafar Pacha<sup>46</sup> : « A quelques kilomètres vers l'Est: Bordj El Kiffan (le fort des coteaux), dénommé plus tard : Fort de l'Eau, que bâtit Djafar Pacha en 1581. L'ouvrage fut cédé à la douane le 25 Avril 1855 »<sup>47</sup>

Klein n'appuyait sur aucune source de ses informations. Par ailleurs, Il avait donné une description du plan du fort : « ce fort présentait quatre pièces du côté de la mer, une du côté des terres. Les autres étaient pointés à gauche et à droite sur le champ de la plage »<sup>48</sup>

en 1957, BRESSON Gilbert<sup>49</sup> reprend la même date d'Henri Klein dans son ouvrage<sup>50</sup> comme étant la date d'achèvement des travaux de construction du fort, qui d'après lui aura été conçu en 1556 par le Pacha turc Mohamed Kurdogli<sup>51</sup> : « Ce Fort de l'Eau, qui contrôlait la baie d'Alger contre toute attaque et en particulier celle des Rais, avait été conçu en 1556 par le Pacha turc Mohamed Kurdogli. Il fut terminé en 1581 par un autre fonctionnaire : Djafar Pacha. Cette forteresse construite sur les rochers bas coupait cette plage qui se termine à l'embouchure du Hamiz »<sup>52</sup>

Après l'indépendance des historiens algériens ont évoqué ce fort, et la date de sa construction,

EN 1985, d'Ali Khelassi<sup>53</sup> a confirmé les informations données par Colin, en s'appuyant sur l'inscription au-dessus de la porte d'entrée du fort sur la façade sud, comme certification.

Suit à La synthèse des études effectuées et l'analyse des plusieurs documents historiques disponibles et En prenant compte en considération l'exposition de la baie d'Alger durant le 16<sup>ème</sup> siècle à de multiples expéditions et invasions européennes, notamment celle menée par Charles Quint<sup>54</sup> qui débarqua à l'est des Bordj el Kiffan en 1541<sup>55</sup>, nous conduisent à conclure que les dattes révélées par H. Klein et G. Bresson s'avèrent plus plausibles.

<sup>42</sup>G. Colin, Corpus des inscriptions arabes et turques de l'Algérie, Paris, 1901, p.97

<sup>43</sup> Mohamed Pacha dey d'Alger de 1718 à 1724, appelé également Mohamed affendi

<sup>44</sup> Henri Klein, Instituteur français, fondateur du comité du vieil Alger, en 1905, pour l'éclaircissement de l'histoire d'Alger, et la défense de ses vestiges du passé. Ce comité qui créa la revue de feuillet d'El-Djazaïr

<sup>45</sup> Henri KLEIN, Feuillet d'El-Djazaïr, Tome I, édition Comité du vieil Alger, 1910, Collection "Comité du vieil Alger"

<sup>46</sup> Djafar pacha, un pacha turc d'Alger de 1580 à 1582

<sup>47</sup> KLEIN Henri, Les feuillets d'El Djazaïr, Editions du Tell, Alger, 1910, Collection "Comité du vieil Alger" P\_82

<sup>48</sup> Idem

<sup>49</sup> Bresson Gilbert, Auteur français,

<sup>50</sup> Histoire d'un centre rural Algérien: Fort de l'Eau, Ed: Vve J. Bringau, Alger, 1957

<sup>51</sup> Mohamed Kurdogli un ancien raïs. Quatrième beylerbey en Algérie Appelé aussi Mohamed Takarli, pacha d'Alger durant huit mois, en 1556/1557

<sup>52</sup> BRESSON Gilbert 1957, Histoire d'un centre rural Algérien: Fort de l'Eau, Ed: Vve J. Bringau, Alger, P\_18, 19

<sup>53</sup> Historien algérien, auteur de l'ouvrage : constructions militaires ottomane d'Alger, ouvrage en arabe.

<sup>54</sup> Charles Quint (1500-1558), empereur germanique (1519-1556), prince des Pays-Bas (1506-1555), roi d'Espagne (Charles 1er) [1516-1556], roi de Sicile (Charles IV) [1516-1556]

<sup>55</sup> En Aout 1541, Charles Quint débarqua à l'est de Bordj el Kiffan. Et retourna chez lui en Octobre après l'échec de sa mission

Et que le fort était construit, quelques années après cette invasion, afin de garantir la défense et affirmer la sécurité du côté est de la baie d'Alger.

Concernant l'épigraphie sur le mur de la façade sur du fort, au-dessus de la porte d'entrée, nous figurons qu'elle remonte à une intervention de restauration ou de réhabilitation de ce fort deux siècle après sa construction.

### Plusieurs évènements ayant marqué l'histoire du fort :

**1722/1723** : nous supposons qu'il a fait l'objet, d'une intervention de restauration ou de réhabilitation sous la gouvernance de Mohamed Pacha.

**1775** : le fort fut la cible d'une attaque espagnole qu'il a ciblée pendant 48h d'obus, et qui s'est retiré après l'échec de sa mission et la résistance du fort.

**1855** : On cède le fort aux forces douanières coloniales, qui y réalisent une extension verticale ainsi que, en addition à la structure initiale, une grande salle voûtée au niveau de la terrasse du côté sud. Ils recouvrent aussi le patio d'une verrière en ajoutant des éléments métalliques.

**En 1987**, ce fort a donné lieu à un musée maritime exposant les richesses du littoral algérien.

**En 2005**, il a été classé sur l'inventaire supplémentaire pour des fins de restauration et par la suite classement en tant que patrimoine national puis exploité dans le domaine culturel et éventuellement touristique.

## IV. Description du fort

### 1. Les dimensions du fort

Le fort a une forme de carré irrégulier portant les dimensions ci-dessous : (Voir Fig. N°96)



Figure 96: Photo actuelle du fort  
Source : Photo prise par l'auteur

- Le mur Sud 21.50m de long,
- Le mur Nord 20.20m,
- Le mur Est 20.20m
- Le mur Ouest 21.40m.<sup>56</sup>

## 2. L'accès au fort

L'accès vers le fort de Bordj El Kiffan se fait par à l'aide d'un pont-levis, jeté au-dessus d'un fossé, qui prolonge l'ensemble de la façade principale.

## V. Système constructif du fort :

Comme le fort a subi une intervention lors de la colonisation qui a été traduite par une extension verticale, chaque partie du fort (partie turc et coloniale) présente un système constructif différent. (Voir Fig. N°97)



Figure 97 les deux parties du fort

Source : carte postal

**1. La base, soit le RDC :** la partie initiale du fort, remonte à la période turque, 16<sup>e</sup> siècle, d'une forme d'un carré irrégulier, en maçonnerie de pierre.

Elle est composée de murs porteurs en maçonnerie de blocs de pierre en tuf de dimensions importantes, unis par un mortier à base de chaux et de sable. Ces murs porteurs sont d'une épaisseur très importante (de 1m20 à 1m50), suite à leur composition de deux parements parallèle en pierre de taille équarrie rempli à l'intérieur par un blocage.

<sup>56</sup> KHELASSI Ali (1985). Constructions militaires ottomans de la ville d'Alger, Ed: Musée central de l'armée: Ministère de la défense nationale, Alger, P\_110

Le système de couverture du fort est en voûtes en berceau basses réalisées en pierre de taille. Les pilastres qui bordent le patio sont de la même composition que les murs extérieurs, le patio quant à lui est couvert par une verrière aux éléments métalliques.

**2. L'étage :** une extension verticale qui se renvoie à l'époque coloniale, du 19<sup>ème</sup> siècle, qui n'occupe pas toute la surface du fort, elle s'étend le long de la façade sud. Constitué d'une seule salle voûtée. Construite en brique pleine de terre cuite. Cette partie est en maçonnerie de briques pleines de terre cuite, attachés par un mortier à base de chaux et de sable, sa couverture est aussi en voûte appareillé en brique pleine de terre cuite.

Il est important de signaler l'existence d'un tunnel ancien longeant le pied de la façade Sud jusqu'au terre-plein derrière la clôture, il rapprochait autrefois le fort à la plage.

Probablement, ce tunnel devait faciliter le déplacement de la poudre vers la petite pièce située au-dessous de la rampe de l'étage sur l'angle nord-est du fort. (La cave)<sup>57</sup>.

## VI. Lecture architectural du plan

### 1. Lecture du plan

#### 1. 1. Lecture du RDC :

La porte principale est localisée sur la façade sud, qui donne accès sur un vestibule de forme rectangulaire (3.70m sur 2.90m) habillé par un dallage en brique, couvert par une voûte en berceau  
(Voir Fig. N°98)

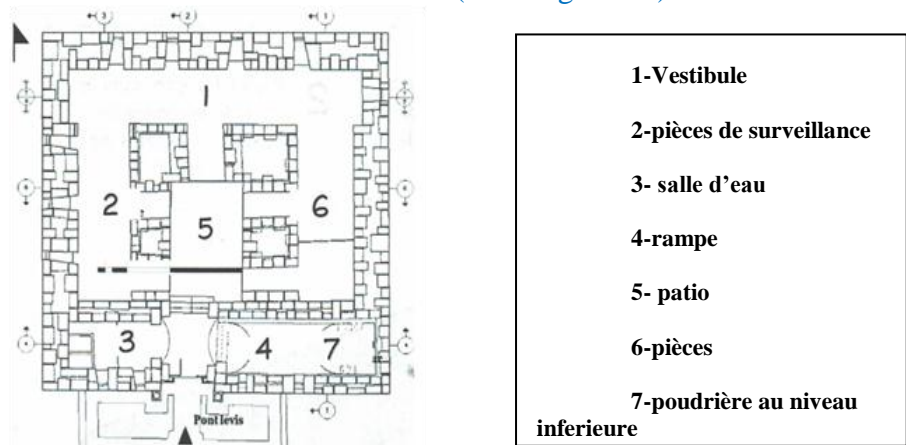


Figure 98 Plan du RDC du fort de Bordj el Kiffan.

Source : Bureau d'étude Archimède 2006

Le côté gauche du vestibule l'adéquat de l'angle sud-ouest du fort s'installe une porte qui donne accès à la salle d'eau accessible à partir des pièces de gardes et à partir du vestibule. Sur le côté opposant se dressent une rompe et quelques marches qui donnent accès à l'étage.

<sup>57</sup> Dossier d'études du fort, élaboré par le BET Archimède, 2006



Face à la porte principale, il ya une deuxième porte qui mène, au patio (Voir Fig 99-100)après avoir surmonter quelques marches. Le patio a une rectangulaire qui fait 07 m de longueur sur 04,50 m de largeur , couvert par une verrière avec des éléments métalliques qui remonte à l'époque coloniale.



Figure 99 : une photo du patio qui date de 2006  
Source : dossier d'étude élaboré par le BET Archimedé),



Figure 100: une photo actuelle du patio de sol de patio  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018

Par analogie, le vestibule et le patio sont revêtu d'un dallage en brique (Voir Fig. N°101) Le patio est entouré de salle voûtée (Voir Fig. N°102--103) qui servait jadis de salles de surveillance.



Figure 101:une photo actuelle du revêtement de sol de patio  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018



Figure 102 : une photo actuelle de la salle  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018

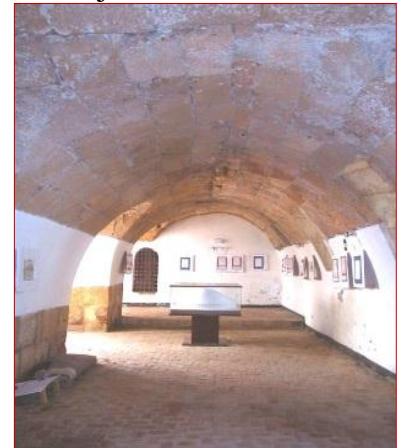


Figure103:une photo de la salle qui date de 2006  
Source dossier d'étude élaboré par le BET Archimedé

A noter que sur l'angle Sud-est du fort se dresse une cave.  
(Voir Fig. N°104)

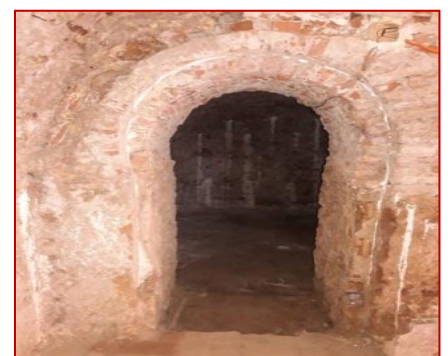
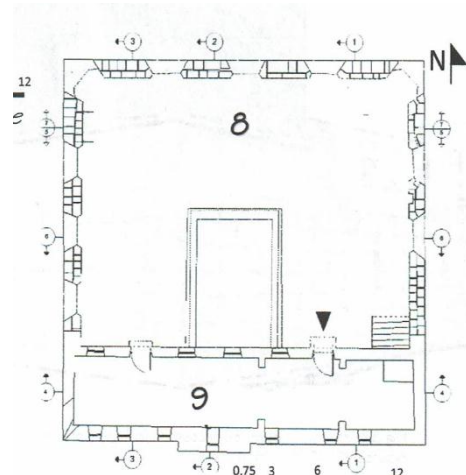


Figure 104: l'entrée à la cave  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018

### 2. 2. Lecture de l'étage : (Voir Fig. N°105)

L'étage, qui est une extension qui remonte à la période coloniale, est accessible à partir d'une rampe voûtée (Voir Fig. N°106-107) et quelques marches qui s'installe sur l'angle sud-est du fort.



8-terrasse  
9-salle de surveillance

Figure 105: Plan de l'étage du fort de Bordj el Kiffan.

Source : Bureau d'étude Archimed 2006



Figure 106: une photo actuelle de La rampe menant à l'étage  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018

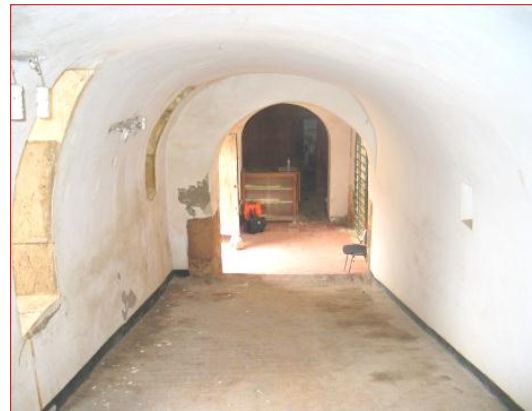


Figure 107: une photo de La rampe menant à l'étage date de 2006  
Source dossier d'étude élaboré par le BET Archimed

L'étage est composé d'une unique grande salle voûtée (Voir Fig. N°108-109) d'une forme rectangulaire qui fait 21,50m sur 10m, et qui allonge l'ensemble de la façade sud l'étage



Figure 108: une photo de la salle date de 2006  
Source dossier d'étude élaboré par le BET Archimed



Figure 109: Une photo actuelle la salle  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018



Cette salle donne sur la terrasse où se trouve la verrière aux éléments métalliques qui couvrent le patio, la terrasse quant à elle est revêtue d'un dallage en brique, bordé de mur présentant plusieurs embrasures (Voir Fig. N°110-111)

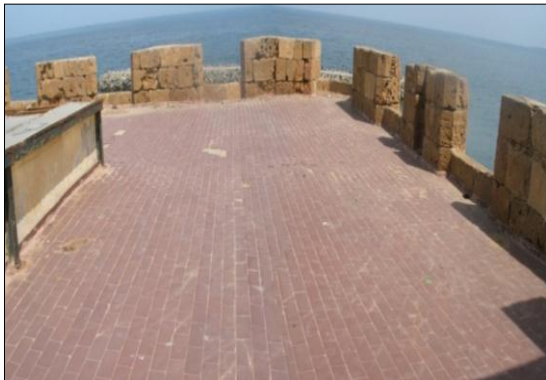


Figure 1:une photo de la salle date de 2006  
Source dossier d'étude élaboré par le BET Archimed



Figure111:une photo actuelle de la terrasse  
Source photo prise par l'auteur, aout 2018

## 2. Lecture des façades :

### 2.1 Façade Sud :

Elle est la façade principale du fort, où se trouve la porte d'entrée

**La partie inférieure ou Le RDC :** Est composé de Quatre fenêtres rectangulaires, séparées par le portique d'entrée. Les deux ouvertures qui se situent du côté ouest de la porte ont une forme presque carrée avec une petite longueur, tandis que celles du côté Est on une longueur beaucoup plus importante

Suit à une comparaison entre une vieille (Voir Fig. N°112) et le relevé architectural de cette façade (Voir Fig. N°113) on affirme que les ouvertures étaient de mêmes dimensions, puis celles du côté Est ont subi un agrandissement, et ont pris les dimensions et la forme que nous voyons actuellement. Nous supposons que cette intervention est faite suite à l'ajout de l'extension verticale et l'ajout de la rampe qui mène à l'étage de cette dernière.



Figure 113:relevé architectural de la façade sud  
Source dossier d'étude élaboré par le BET Archimed



Figure 112:Photo ancienne du fort  
Source : fort de l'eau prise d'internet

La porte d'entrée elle, est surmontée d'un arc de décharge en tuf et encadrée par un portique constitué de deux colonnes toujours en tuf, surélevées sur une base. Le chambranle qui borde la porte elle aussi en tuf est surplombé d'une inscription sur une plaque rectangulaire en marbre.

Quant à la pierre de construction du RDC est dépouillée de tous revêtement, on suggère que ce geste a pour but de garder le caractère d'authenticité de pierre arrivant de ruines romaines.

**La partie supérieure ou l'étage**, qui revient à la période coloniale, est aussi simple et dépourvu d'ornement, composé de sept ouvertures, de morphologie rectangulaires, trois de chaque côté du porche, et une au milieu de ce dernier. Les deux parties sont séparées par une corniche.

### 2.2 Façade Nord :

Cette façade donne sur la mer, elle est composée de quatre merlons et quatre ouvertures de morphologie rectangulaires et trois embrasures le long du mur, avec des dimensions qui varient de 1,50m à 2,20m, et deux sur les deux angles est et ouest.

L'extension française sur sa façade nord montre quatre ouvertures rectangulaires et deux portes d'accès à la salle (Voir Fig. N°114)



Figure 114:Façade nord du fort

Source : photo prise par l'auteur aout 2018

### 2.3 Façade Est :

Façade presque aveugle avec trois merlons, elle comprend une ouverture unique de forme rectangulaire qui fait 1,39m sur 0,71. Quant aux embrasures, cette dernière montre deux embrasures au niveau du mur, 1,50m à 2,60m, et une au niveau de l'angle nord du fort. (Voir Fig. N°115)



Figure115:Façade est du fort

Source : photo prise par l'auteur aout 2018

### 2.4 Façade Ouest :

La partie inférieure est composée de trois baies, deux de forme rectangulaires et une de forme carré avec des dimensions plus réduites, c'est l'ouverture de la salle d'eau.

Le crénelage de cette façade est constitué de trois embrasures dans le mur et d'une quatrième au niveau de l'angle nord, avec quatre merlons de différentes dimensions.

Quant à l'extension française qui prend le quart gauche de la façade est aveugle. (Voir Fig. N°116)



Figure 116: Photo Actuelle de la façade Ouest du Fort

Source : photo prise par l'auteur

## VII. Conclusion :

Le fort turc de Bordj El Kiffan présente un monument de victoires et de gloire de l'histoire défensive d'Alger.

Malgré son état actuel, le fort se présente comme un témoin de son époque, Chaque coin raconte une partie de l'histoire d'Alger, de sa résistance face aux invasions qui la visaient.

Ce fort fait partie du répertoire des richesses du pays, par sa valeur historique en premier lieu, et par sa situation dominante sur le côté est de la baie d'Alger en second lieu. Il devrait privilégier d'un intérêt particulier et d'une prise en charge adéquate afin que son potentiel puisse enfin être exploité et préservé.

A présent le fort présente un état vulnérable face à tous ce qu'il a subi. Afin de faire face à cette fragilité , dans le second chapitre nous allons procéder par un diagnostic des états des matériaux et des éléments structurels, puis nous essayerons de proposer une approche des techniques pour son renforcement, sans pour autant toucher à son caractère architectural et son authenticité , tout en prenant compte de la spécificité de ses matériaux et la fragilité de ses éléments structurels.

**Chapitre N°02 :**

**Diagnostic du fort Turc de  
fort de l'eau**

## I. Introduction

Le fort turc constitue une richesse patrimoniale pour sa valeur historique, et pour sa situation dominante sur le côté est de la baie d'Alger. Au court de son vécu et vue l'activité sismique d'Alger et sa situation près de la mer, le fort de l'eau a subit de multiples dégradations due à des multiples facteurs humaine, naturels... mais principalement aux secousses sismiques. Le dernier séisme fut celui de Boumerdes de 2003, qui a violement touché le fort, notamment au niveau de l'étage où la voûte en berceau qui couvre la salle s'est complètement effondrée.

## II. Les pathologies de la structure :

### 2-1 les murs:

Les murs du fort sont de type porteur en maçonnerie de pierre non chaînées, d'une épaisseur importante de 1m20 à 1m50. Lors de chacune des secousses telluriques ayant touché Alger depuis la construction du fort, ces murs subissent des vibrations brusques alternées et sont soumis à des forces principalement horizontales.

Ces différents mouvements ont engendré des déformations et des altérations au niveau de ces murs.

#### 2.1.1 Le mur de la façade principale sud : (Voir Fig. N°117)

1. Tend à se désolidariser du reste du corps du fort,
2. Subit un affaissement notamment de son côté Est.
3. Ses deux parements, de part et d'autre de la porte d'entrée, tendent à se décoller.
4. Le décolllement des pierres qui composent l'arc de la porte d'entrée

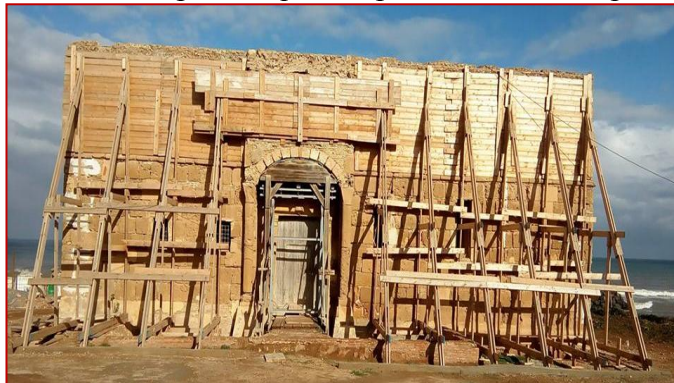


Figure 117: mur de la façade sud

Source : prise par l'auteur aout 2018

En effet le mur est soumis à des poussées latérales venant des deux voûtes, celle qui couvre la rompe menant à l'étage et celle qui couvrait jadis la salle de l'étage (effondré suite au séisme de 2003). Ces deux voûtes et suite au dis-jointoiment de leurs claveaux sous l'effet de l'action sismique, développent des poussées latérales qui agissent sur le mur et entraînent sa désolidarisation du reste du fort.

Ce même mur subit également; sous l'effet du poids de ces deux voûtes; un affaissement. Ces deux voûtes rappelon-le ne furent pas construites lors de la construction du fort, elles



font partie de l'extension qui date de l'époque coloniale, et donc lors de la construction de ce mur, le poids de ces deux voûtes n'a été pris en compte.

L'interruption du mur par la porte d'entrée crée des points faibles, où l'action sismique engendre des fissurations verticales, se développant le long du blocage et tendant à séparer les deux parements du mur.

### **2.1.2 Le mur de la façade Ouest:**

Au niveau de cette façade se repère une seule lézarde très importante qui se développe le long de la surélévation de haut vers le bas, d'une manière verticale avec tendance à une inclinaison de 45° vers l'angle du fort. (Voir Fig. N°118)

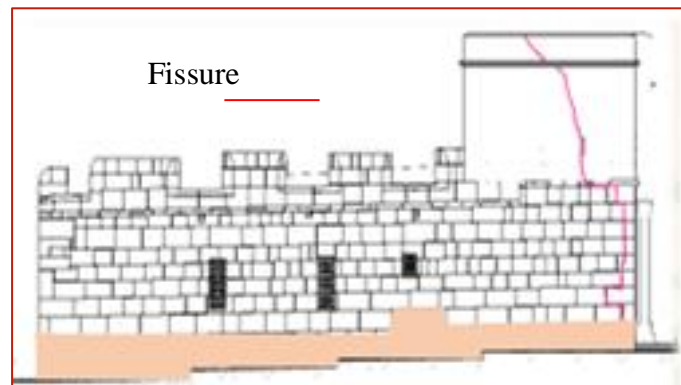


Figure 118 : façade ouest

Source dossier d'étude élaboré par le BET ARCHIMED

L'action sismique qui agit en exerçant des efforts tranchant et des efforts cisailant engendre des désordres importants au niveau du mur qui résiste principalement à des efforts normaux de compression. Sous l'effet des charges sismiques qui agissent par des mouvements vibratoires d'une manière brusque, et cyclique des fissurations apparaissent le long du mur.

Sur ce mur l'action sismique agit également d'une manière indirecte. Et cela à travers son effet sur la voûte qui couvrait la grande salle de l'étage, en effet cette dernière sous l'action sismique subit un dis-jointoiment de ces claveaux surtout à proximité de sa cime, développant ainsi des poussées latérales qui agissent à leurs tours sur le mur de la façade principalement en le poussant à se désolidariser du reste du corps du fort. La force de cette désolidarisation accentue l'effort tranchant sur les deux murs latéraux de la surélévation, et donc accentue l'apparition des lézardes.

### **2.1.3 Le mur de la façade Est:**

De même que la façade ouest, la façade Est au niveau de la surélévation est caractérisée par une importante lézarde, qui se développe pratiquement de la même manière que celle de la façade ouest, provenant de mêmes causes. (Voir Fig. N°119)

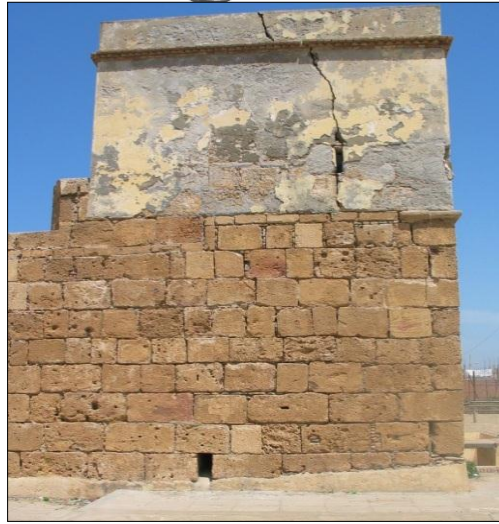


Figure 119: mur de la façade est

Source dossier d'étude élaboré par le BET ARCHIMED

Cependant cette façade est caractérisée par d'autres désordres et fissurations sur son niveau RDC : (Voir Fig. N°120)

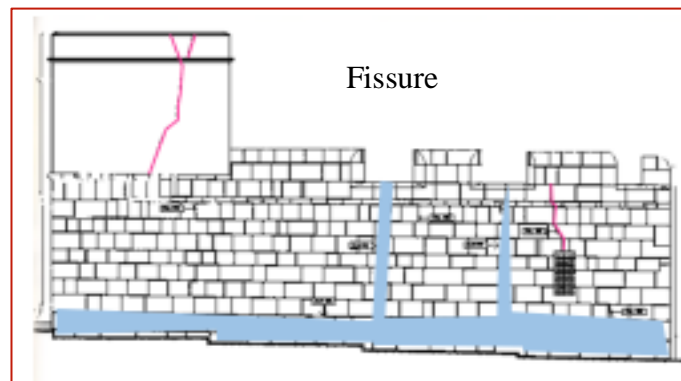


Figure 120 : Fissuration au niveau surélévation de la façade est

Source dossier d'étude élaboré par le BET ARCHIMED

- Une mini fissuration verticale que se développe de haut vers le bas, à partir du crénelage,
- Une autre fissure qui se développe aussi de haut vers le bas, d'une manière verticale avec tendance à s'incliner à 45°.

L'origine de ces fissures est sans doute les sollicitations sismiques, encore elles s'accroissent par l'absence du chaînage dans cette maçonnerie

## 2.2 Les voûtes de RDC :

Les voûtes en berceau qui couvrent les différents espaces du RDC, sont en maçonnerie de pierre équarrie en calcaire non chaînées. Les vides entre les gros blocs et l'unité de l'appareillage est assurée par de petits blocs de pierres de même nature réajustées. Les éléments constitutifs de ces voûtes, à savoir les claveaux, travaillent essentiellement en compression en développant des poussées dans le vide, c'est-à-dire divergentes au niveau des culés. (Voir Fig. N°121)





Figure 121: la voûte de RDC

Source : Photo prise par l'auteur aout 2018

Lors d'un séisme ou un vent considérable (efforts horizontales), la voûte notamment les claveaux qui ne travaillent qu'en compression subissent des accélérations ; brusques ; rapides ; qui agissent d'une manière alternée et qui entraînent par la suite une dislocation des claveaux surtout au niveau de la cime et ses alentours.

Plusieurs désordres structuraux peuvent être repéré au niveau des voutes des différents espace du fort :

- **La voûte qui couvre le vestibule** : une longue fissure la traverse le long de sa cime et lui cause un affaissement très important.
- **La voûte qui couvre la salle orienté Ouest** : une fissuration qui démarre du milieu de la cime de la voûte et progresse vers l'endroit de l'intersection avec la voûte couvrant la salle orienté nord
- **La voûte qui couvre la salle orienté Est** : l'intrados de cette voûte est couvert par un revêtement récent, mais vu la sismicité que vécu le fort à travers son histoire et par similitude avec la salle orientée ouest, on peut supposer que même cette voûte est caractérisée par une fissuration le long de sa cime jusqu'à la zone d'intersection avec la voûte couvrant la salle orienté nord.
- **Au niveau de la salle orientée nord**, le problème se manifeste sur la cime de la voûte, qui la couvre, avec l'apparition d'un élargissement des joints de l'appareillage.

Les lézardes repérées au niveau des voûtes couvrant les différents espaces du RDC, résultent de la combinaison entre l'action sismique et l'absence du chaînage dans cette maçonnerie. Aussi le vieillissement, l'humidité, le poids propre et d'exploitation jouent un rôle vis-à-vis ces dommages.

### 2.3 La salle de l'étage

Cette partie du fort est en état très dégradé. Des fissurations verticales localisées sur les façades latérales du fort du mur du refend à la salle de l'étage, ce désordre est accentué par l'effondrement de la voûte qui couvre cette salle suite au séisme de 2003. (Voir Fig. N°122)



Figure 122: la salle de l'étage

Source : Photo prise par l'auteur aout 2018

### III. Les pathologies due à l'humidité

Aujourd'hui et sous l'effet des facteurs naturels les matériaux principaux (pierre de taille, brique de terre cuite, ferronnerie et boiserie) subissent des altérations, des dégradations, et des dommages très avancés :

#### 1. La pierre :

Le dépouillement des façades du revêtement qui protégeait jadis ses pierres, les expose aujourd'hui à de multiples dangers et menaces, favorise l'apparition de différentes altérations :

##### 1.1 Apparition des alvéoles :

Il s'agit d'un ensemble de creux qui apparaissent sur les pierres les plus fragiles notamment au niveau des façades et du crénelage dû principalement aux vents dominants Est. Ce phénomène s'accompagne d'une décomposition de la pierre des façades. (Voir Fig. N°123)



Figure 123: arc de l'entrée façade sud

Source : Photo prise par l'auteur

### 1-2. Apparition des salissures :

La présence permanente des ruissellements des eaux pluviales laisse apparaître des noircissures, présentes en abondance au niveau de l'angle nord –est du fort. (Voir Fig. N°124)



Figure 124: Apparition des noircissures

Source : Photo prise par l'auteur aout 2018

### 1.3 Apparition des algues et des végétations :

Par défaut d'entretien, des algues, des mousses se développent, sur les murs du fort et cause la dégradation et la détérioration de sa maçonnerie, elles ne concernent pas que la dégradation physique mais apportent des éléments chimiques agressif favorisant l'humidification du milieu (Voir Fig. N°125)





Figure 125 : Apparition des algues et des végétations

Source : Photo prise par l'auteur aout 2018

## 2. La brique pleine de terre cuite:

La cuisson traditionnelle de la brique pleine de terre, lui fait perdre certaines de ses caractéristiques mécaniques notamment sa résistance à la compression, qui s'accroît beaucoup plus lorsqu'elle est en contact avec l'eau.

La voûte qui couvrait la salle de l'étage, souffrait d'une mauvaise étanchéité, la brique de son intrados et suite à la présence abondante de l'eau a perdu sa résistance, ce qui a entraîné son effondrement suite à la secousse sismique de 2003. (Voir Fig. N°126-127)

La brique localisée au niveau du revêtement subit une humidité, à cause des remontés de l'eau. (Voir Fig. N°128)



Figure 126: Effondrement de la voûte qui couvrait la salle de l'étage

Source BET Archimède



Figure 127: vue de la salle état actuel

Source : prise par l'auteur



Figure 128: état de la brique de la salle de l'étage

Source : Photo prise par l'auteur

### 3. Le mortier:

Le mortier qui assemble les pierres de tailles, et suite à la disparition du crêpi qui jadis protégeait les façades, est exposé a des effets des sels marins portés par les vents dominants Est, et d'autres facteurs naturels ce qui cause sa dégradation. (Voir Fig. N°129)



Figure 129: Dégradation du mortier surtout au niveau de la façade nord

Source : Photo prise par l'auteur aout 2018

### 4. La ferronnerie:

La proximité de la mer fait que les vents portent des substances acides, qui influent sur les éléments métalliques, sous l'effet des sels marins et de l'humidité apparait le phénomène de rouille des éléments métallique au niveau du fort: (Voir Fig. N°130)

- Dégradation de la structure portante de la verrière
- Désagrégation des pommelles de la porte
- Disparition des tirants de la salle de l'étage.



Figure 130: Apparition rouille au niveau de grillage de la fenêtre

Source : Photo prise par l'auteur

5. La Boiserie:

La variation du taux de l'humidité entre les saisons cause une instabilité des formes des éléments en bois, avec une dégradation de ses propriétés. On observe même un décolllement des fibres.

IV. Conclusion

La structure du fort présente deux types de problèmes dus principalement à deux causes :

1. Problèmes structuraux manifestés sous formes de fissurations multiples et variées résultant des efforts tranchants et cisailant, sur les parois verticales, et au niveau des couvertures (les voûtes). Ces désordres sont liés principalement à la succession des tremblements de terre qu'a connu Alger depuis la construction du fort jusqu'au derniers séisme majeur qui date de 2003.
2. Problèmes de consistances des matériaux et des différentes composantes du fort, ce problème est liés à la présence abondante de l'eau, de l'humidité du à la proximité de la mer et au disfonctionnement du ruissellement que connaît le fort Le relevé pathologique et le tableau synthétise notre diagnostic :

Les pathologies due à l'humidité : (Voir Fig. N°131-132)

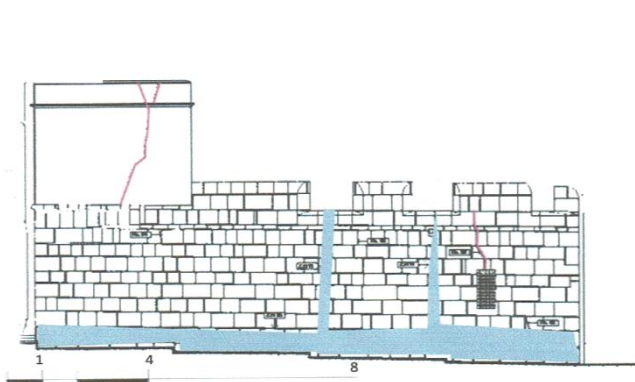


Fig. 131 : Façade est relevé pathologique  
Source relevé BET Archimède

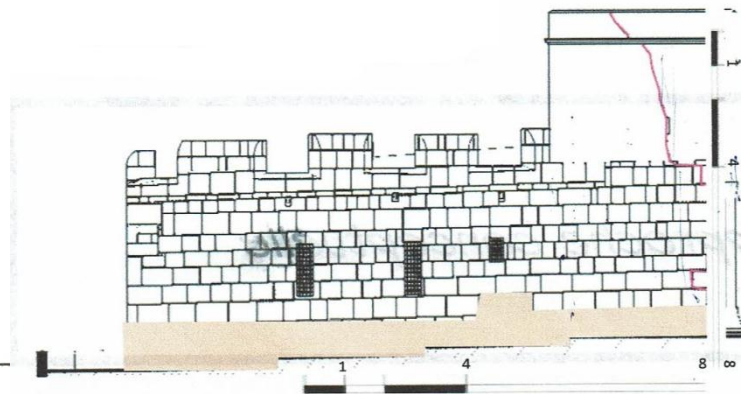
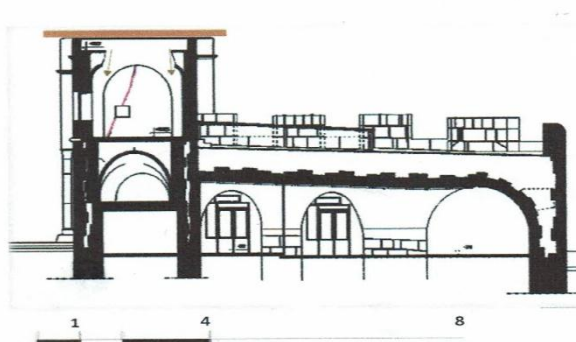


Fig. 132 : Façade est relevé pathologique  
Source relevé BET Archimède

Infiltration des eaux pluviales

Erosion

Les pathologies anthropologiques (Voir Fig. N°133)



Couverture en zinc

FIG 133 : coupe relevé pathologique  
Source relevé BET Archimède



Les pathologies mécaniques (structurelles) : (Voir Fig. N°134)

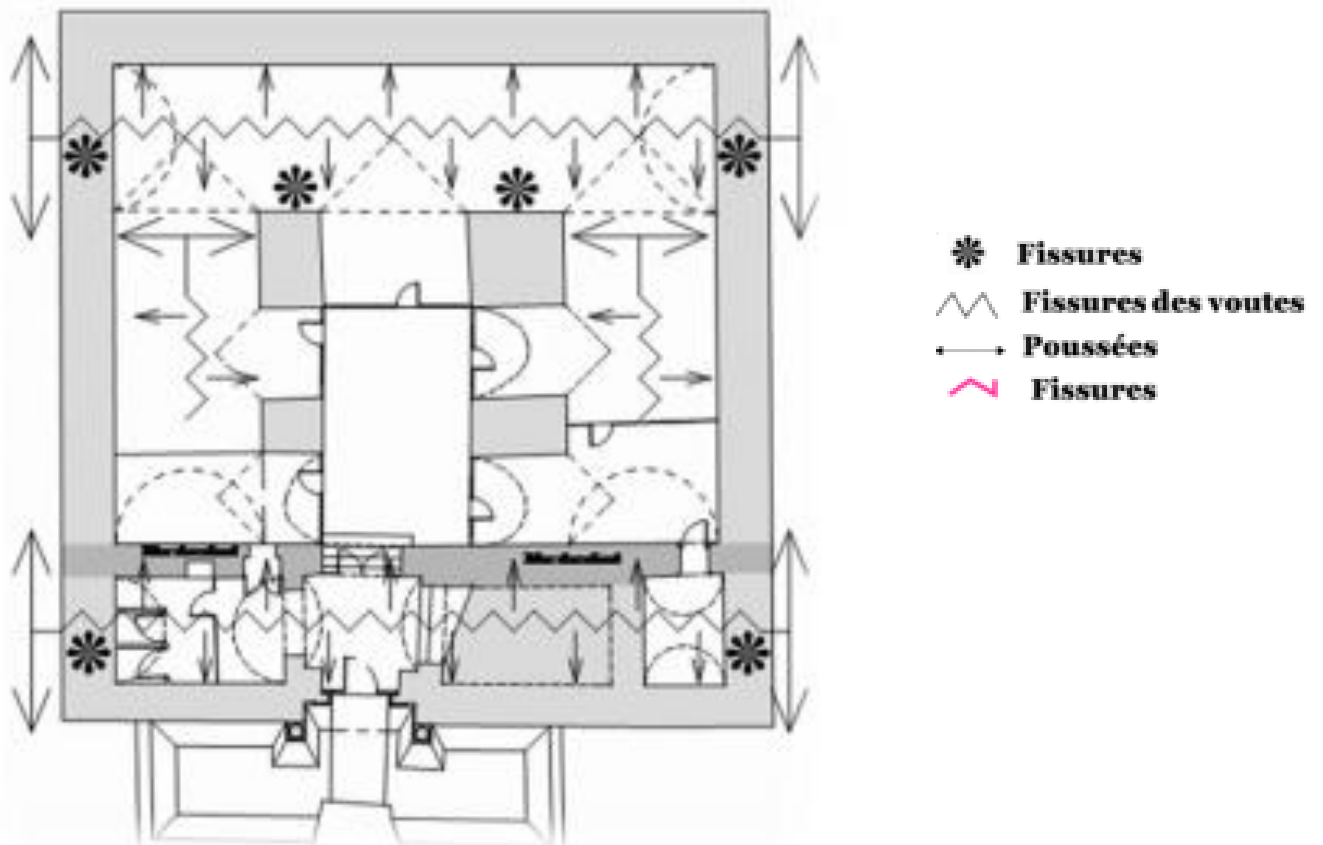


Figure 134: plan de pathologie mécanique du fort

Source : Dossier d'études élaboré par le BET Archimède

**Chapitre N°03 :**

**Proposition d'approches et de  
Techniques pour le renforcement  
Du fort**

## I. Introduction :

Le fort connu une histoire très agitée marquée par de multiples événements et phénomènes qui ont entraîné des altérations et une dégradation générale. Ces phénomènes sont d'origines diverses ; d'abord les expéditions et les attaques qui l'ont ciblé durant des siècles, puis la proximité de la mer qui accentue l'humidité et favorise le phénomène de corrosion des matériaux sous l'effet des sels marins, et enfin l'activité sismique.

C'est à ces altérations que nous allons proposer une approche de renforcement pour les colmater et les renforcer, afin d'assurer une meilleure résistance au fort face aux sollicitations sismiques. Lors de notre intervention sur ce fort nous sommes tenus de prendre en considération certains facteurs, tels que les matériaux déjà existants au niveau du fort, leur vulnérabilité et leurs réponses par rapport aux nouveaux matériaux introduits.

## II. Le renforcement : une branche de la réhabilitation.

### 1. Définition :

D'une manière générale le renforcement est l'opération qui consiste à donner à une structure un niveau de résistance élevé par rapport à ce qui lui a été donné au début.

Le renforcement: Est l'opération ou l'intervention par laquelle on redonne à un élément ses caractéristiques mécanique initiales ou nécessaires pour pouvoir résister à son chargement actuel d'une manière efficace tout en tenant compte des coefficients de sécurité imposé par le règlement<sup>58</sup>.

### 2. Différence entre une réparation et un renforcement:

**Réparation** : consiste à intervenir sur un ouvrage pour lui redonner pratiquement les mêmes caractéristiques et résistance qu'il avait avant les désordres subit<sup>59</sup>.

**Le renforcement**: consiste à intervenir (études et réalisation) sur un ouvrage pour lui conférer des caractéristiques et une résistance supérieure à celle qu'il avait avant les désordres subit

### 3. Méthodologie pour la prise de décision du renforcement/ réparation

L'exécution d'une technique de renforcement, de réparation d'une bâtisse est la dernière étape après l'avoir diagnostiqué, cela passe par les étapes suivantes :

#### A/ Analyse des désordres ;

1. Détermination des causes de ces désordres ;
2. Inventaire des tous les désordres ;
3. Evolution (mesures extensomètres, et témoins)

<sup>58</sup> DEKHMOCHE Mouloud (2007). Procèdes de renforcement du vieux bâti, Office des Publications Universitaire, Alger, P\_03

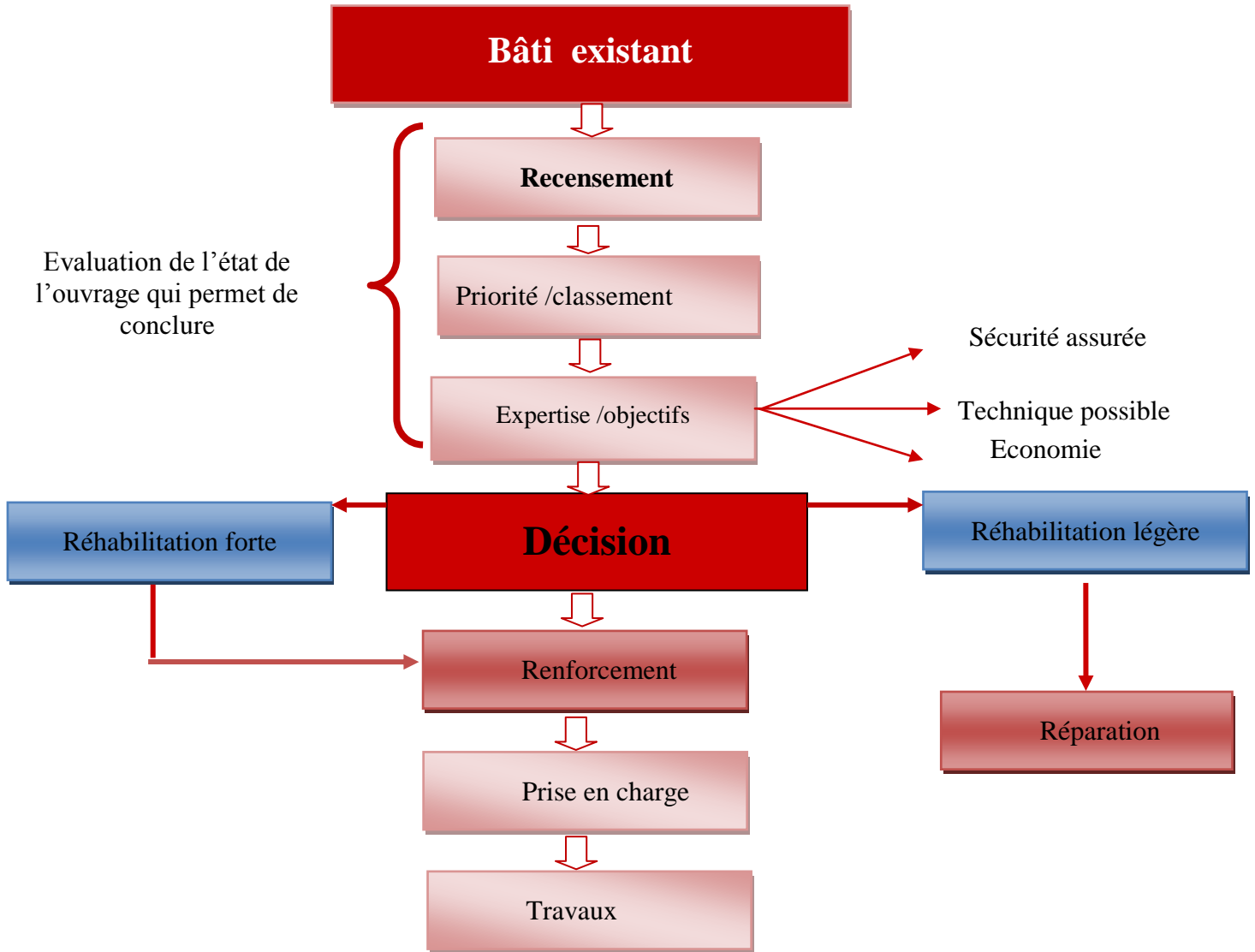
<sup>59</sup> Confortement des ouvrages : un atout majeur pour la réduction de la vulnérabilité sismique, Par Hamid Azzouz, Revue Vie de villes, édition alternative Urbaine, N°04, Février 2006,

4. Surveillance (analyse des mesures sur une période suffisamment longue)

**B/ avoir une bonne connaissance de la structure existante :**

1. Evaluation de la résistance de la structure
2. Evaluation de la capacité portante d'un ouvrage après réparation ou renforcement.

Comme le synthétise l'organigramme<sup>60</sup> suivant :



Le renforcement d'une structure est donc la dernière étape, après avoir évalué sa vulnérabilité et le risque sismique auquel elle est exposée, pour arriver à la fin à proposer une approche convenable pour la renforcer

<sup>60</sup> Confortement des ouvrages : un atout majeur pour la réduction de la vulnérabilité sismique, Par Hamid Azzouz, Revue Vie de villes, édition alternative Urbaine, N°04, Février 2006

### III. Démarches adoptés pour l'intervention sur le fort turc :

Un monument historique est à la base une typologie et morphologie que ce soit matériel ou structural. Intervenir sur un monument historique en adoptant la restauration et le renforcement comme démarches nécessite une très grande modération. Ainsi nous devrions respecter les paramètres qui suivent, tout en les mettant en corrélation afin d'obtenir de meilleurs résultats :

#### 1. Intervention minimale :

Nous devons intervenir de la manière la plus cohérente possible avec l'unité potentielle de l'œuvre artistique, en respectant ces valeurs historiques et artistiques et en facilitant sa lisibilité compromise pour un maximum de compréhension du monument.

#### 2. La réversibilité :

Afin de pouvoir être éventuellement supprimée dans le futur sur base d'hypothèses plus fondées. La réversibilité obéit à un critère de prudence auquel il faudrait toujours se conformer dans une intervention de restauration et de renforcement.

Il est toujours nécessaire, pour des raisons d'image, de compléter par des parties neuves des éléments manquants. Dans ce cas, les adjonctions doivent être conçues de façon à pouvoir être supprimées en cas où elles provoqueraient des dommages matériels<sup>61</sup>.

#### 3. Compatibilité

La sélection des produits selon les caractéristiques des matériaux originaux. Il suffit que la nouvelle matière utilisée ne vienne pas aggraver l'état physique actuel de la matière ancienne.

Ce nouveau matériau peut être utilisé pour compléter l'usage de vieux matériaux.

Il convient alors de s'assurer de la compatibilité physico-chimique de ces différents matériaux avant d'en poser l'indication<sup>62</sup>.

#### 4. Distinguabilité et transparence :

L'intervention doit veiller à conserver son authenticité et à réparer les dommages matériels qui en compromettent la jouissance esthétique, l'usage et la mémoire.

Les principes qui guident ce paramètre sont :

- -l'intervention minimale ;
- -la simplification des silhouettes ;
- -le caractère visible et reconnaissable de l'intervention ;

<sup>61</sup> Giandro, Palamerio. Cours de restauration. Roma : centroanalisi social progettis.r.l. (1993). P35-37

<sup>62</sup> Nicolas, Concha. Compatibilité et durabilité des pierres de substitutions dans les monuments. Aspects physicochimiques et visuels. Autre. Saint-Etienne : thèse de doctorat : science de la terre. France : Ecole Nationale Supérieure des Mines. (2012). P 30-31

- -l'utilisation des matériaux et de moyens constructifs différentes et compatibles avec l'original.
- -la nécessité de documenter de façon rigoureuse toutes les phases de vie du monument.

### **5. Authenticité :**

Maintenir l'authenticité et l'intégrité, en respectant les valeurs historiques et l'intégrité physique de la structure. L'action du temps sur l'œuvre, qui se manifeste par le vieillissement transformation, détermine et enrichit son caractère historique, et ce de façon irréversible; c'est pourquoi toutes les modifications introduites dans la matière dans les conditions, dans les conditions de perception, de l'œuvre ne peuvent être effacées et l'effort produit pour retrouver « l'état original » présumé est vain. Afin de sauvegarder l'authenticité de l'œuvre, et elle son intégrité physique, l'intervention de restauration ne devra pas supprimer les modifications naturelles et encore moins les témoignages de l'activité humaine

### **6. Préserver La valeur historique :**

L'intervention doit veiller à respecter les apports successifs du temps qui nous conduit à conserver les marques de la diversité historique en tant que témoignages de la vie du monument ou d'un site qu'il convient à préserver

## **IV. Introduction de la nouvelle approche des techniques de renforcement :**

### **1. Renforcement par matériaux composite :**

#### **1.1 Description des matériaux composites :**

Un matériau composite résulte d'un assemblage de deux ou plusieurs matériaux : l'assemblage obtenu présentant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

Tous les matériaux composites présentent la même constitution :

- Un renfort, qui joue le rôle d'ossature et assure la tenue mécanique,
- Une matrice, qui a un rôle de liant et permet ainsi la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.

Dans le domaine du bâtiment, le matériau composite le plus connu est le béton armé : l'acier qui représente le renfort, et le béton correspondant à la matrice Un matériau composite résulte d'un assemblage de deux ou plusieurs matériaux : l'assemblage obtenu présentant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

Tous les matériaux composites présentent la même constitution :



- Un renfort, qui joue le rôle d'ossature et assure la tenue mécanique,
- Une matrice, qui a un rôle de liant et permet ainsi la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.

Il existe différents types de renfort parmi lesquels les plus employés dans le domaine du Génie Civil sont:

- **Les fibres de verre** : les fibres de verre sont les plus utilisées de nos jours, en raison du faible coût de production qu'elles représentent.
- **Les fibres de carbone** : les fibres de carbone, dont le coût est un peu plus élevé, sont généralement employées pour des applications structurantes : c'est ce type de renfort qui constitue le matériau composite utilisé lors de nos essais.
- **Les fibres d'aramide** : les renforts, type fibres d'aramide, se retrouvent traditionnellement dans les protections balistiques, telles que les protections pareballes.

### 1.2 Les domaines d'application des matériaux composites sont :

Les matériaux composites sont couramment employés pour le renforcement d'éléments structuraux (poutres, poteaux, dalles ...). Il peut s'agir de travaux de réhabilitation de bâtiments, de parkings, de canalisations ... mais les composites sont également utilisés dans le renforcement d'ouvrages d'art.

- l'accroissement de la résistance des structures aux moments de flexion
- l'accroissement de la rigidité des structures en bois l'accroissement de la résistance de parois en briques aux efforts sismiques
- l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant
- le renforcement de piles et poteaux

De plus la résistance aux agressions chimiques évite toute dégradation à long terme du matériau composite par corrosion. Les fibres de carbone sont donc les mieux adaptées aux problèmes de renforcement de structures. Ils existent sous formes de tissus ou plats.

- On procède à cette technique par l'injection de ce matériau au niveau des blocs fissurés, les fibres comprises dans cette matière s'ancrent sur les deux côtés du bloc et restituent ainsi sa continuité en lui donnant une ductilité mieux importante.

## 2. Renforcement par isolateurs sismiques :

Les isolateurs sont en caoutchouc (associés ou non à un amortisseur), garantissent la stabilité de la toute la structure qu'ils supportent en absorbant l'énergie du séisme.

Ce procédé vise la diminution des accélérations horizontales que subites la structure lors d'un séisme. (Voir Fig. N°135)

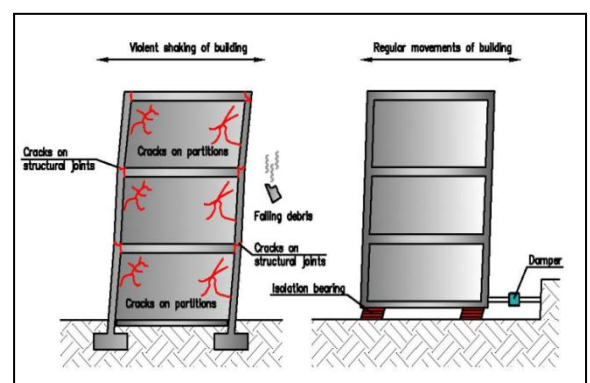


Figure 135 : Action sismique sur un bâtiment avant isolation et après isolation  
Source : ingénierie structurelle parasismique avancée, groupe Algéro-Hellénique

**La mise en œuvre :**

Technique pratiqué que par des entreprises spécialisées. Qui passe par les étapes suivantes :

1. Préparation des emplacements des isolateurs : les endroits du renforcement,
2. Reprises-en sous-œuvre.
3. Placement des vérins.
4. Découpe des fondations.
5. Placement des isolateurs.
6. Retraits des vérins.
7. Rétablissement des accès

**3. Renforcement par perçant (contreventements): (méthode non destructives).**

Ce procédé consiste en la mise en place de panneaux additionnels sur le périmètre du bâtiment, ces derniers se caractérisent par un système de fondations indépendant. Réalisé en acier, ils sont fixés à la structure avec des liens (fixation métallique étudiée à cet effet).

Technique appliqué en façade sans dégâts, et sans interruption de leurs fonctionnements.

Durant un séisme la majorité des forces horizontales seront transférées à ces panneaux supplémentaires, confortant ainsi les colonnes existantes, qui opposeront une résistance suffisante aux charges réduites qu'elles recevront. Cette technique permet d'éviter l'application des procédés destructives<sup>63</sup>. (Voir Fig. N°136-137)



Figure 136 : Insertion de panneaux sur les façades



Figure 137: Fixation des panneaux sur des fondations indépendantes

<sup>63</sup> Ingénierie structurelle parasismique avancée, groupe Algéro-Hellénique

## V. La spécificité de l'intervention sur un monument historique :

L'intervention sur le patrimoine bâti dans une optique de renforcement face aux sollicitations sismiques diffère de l'intervention sur le bâti ordinaire.

En effet les monuments historiques sont ancestraux, souvent bâti avec des matériaux et des systèmes constructifs peu favorables sismiquement, tels que les maçonneries non chaînées, en compagnie d'éléments fragiles au niveau des couvertures notamment les systèmes de couvertures en voûtes.

Ils doivent faire objet d'une réflexion particulière où plusieurs paramètres doivent être pris en compte, d'abord les matériaux introduits doivent être définis en fonction des matériaux déjà existants car une interaction entre eux peut aggraver la situation et augmenter la vulnérabilité de l'édifice en question. Puis certains matériaux doivent être évités car ils s'accroissent l'humidité au niveau des parois tel que le ciment. Et enfin certains pour leur poids qui peut augmenter les charges sur l'édifice et engendrer des détériorations importantes au lieu de le soulager.

### Les Critères de la sélection du matériau adéquat pour le renforcement du bâti ancien

Le tableau suivant nous synthèses le comportement de matériaux du bâti ancien en général et les matériaux d fort turc en particulier (Tableau N°05)

	COMPRESSION	TRACTION	FLEXION	CISAILLEMENT
LA PIERRE	++	-	/	/
LA TERRE	++	Cuite +	/	/
		Crue -		
TERRE STABILISE	++	+	+	+

Tableau de synthèse 05 : comportement des matériaux du fort Source : l'auteur

Afin de renforcer le bâti ancien il faut choisir le bon matériau pour faire face à la sollicitation sismique. Leur choix est souvent le fruit d'un compromis entre divers critères.

#### A. Résistance mécanique :

Il s'agit de la résistance à la traction, au cisaillement et à la compression. Il est souhaitable que la résistance soit comparable dans les trois directions principales, donc que le matériau soit homogène et isotrope.

**L'acier et les alliages d'aluminium donnent le meilleur résultat de ce point de vue. Le béton armé précontraint, bien que n'étant pas homogène, présente une très bonne résistance à la traction et au cisaillement.**

**B. Rapport « résistance /masse »élevé**

Les matériaux ayant un meilleur rapport résistance / masse volumique conviennent très bien pour la construction parasismique

**Le bois, l'acier, l'alliage d'aluminium et le textile utilisé pour les structures à membranes gonflées et suspendues. Ils permettent la réalisation de structures légères**

**C. Rigidité :**

La rigidité des matériaux est requise afin de limiter les problèmes de stabilité de forme. Elle ne doit pas être confondue avec la rigidité des éléments constructifs. En effet, des éléments flexibles sont couramment réalisés **en acier qui est un matériau très rigide.**

**D. La résilience :**

Caractérise la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant rupture sous un choc.

**L'acier (selon sa nuance et sa qualité), les alliages d'aluminium, les textiles et le bois ont une très bonne résilience.**

**E. Ductilité :**

La ductilité est la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors des efforts élevés sans diminution significative de la résistance. Il est souhaitable qu'elle subsiste pendant plusieurs cycles de chargement. Nous avons vu que la ductilité constitue une réserve de résistance des structures. Par ailleurs, les déformations plastiques des matériaux ductiles entraînent une réduction de la vitesse et des accélérations de la structure et par là celle des charges sismiques qui la sollicitent.

**L'acier, l'alliage d'aluminium et dans une moindre mesure le béton armé correctement ferrailé ont une bonne ductilité**

**F. Ténacité :**

La ténacité caractérise la dépense d'énergie nécessaire à la rupture du matériau. Les matériaux très ductiles sont donc tenaces du fait que leurs déformations plastiques entraînent une absorption importante d'énergie. On peut également dire que la ténacité caractérise la capacité des matériaux à s'opposer à la propagation des fissures car l'énergie qu'ils stockent ou dissipent ne peut pas servir à faire progresser ces dernières. Or la rupture ne peut se produire qu'à la suite de la propagation d'une fissure à travers le matériau Les matériaux fragiles ne sont pas tenaces. Fissurés ou rayés, ils se rompent rapidement sous le choc ou autres charges dynamiques (brique, pierre, béton non armé...).

Les matériaux de structure les plus tenaces sont l'acier et, en certaines circonstances, le bois grâce à sa structure fibreuse.

### G. Endurance (résistance à la fatigue)

Une répétition et une alternance rapide des charges réduisent la résistance des matériaux. Dans le cas **de l'acier**, cette réduction n'est en général sensible qu'après un nombre de cycles de charge élevé. Par contre, la résistance et la rigidité d'autres matériaux comme la **maçonnerie ou le béton non armé** se dégradent assez rapidement avec le nombre de cycles de chargement. L'endurance de ce type de matériau doit être améliorée par les dispositions constructives appropriées

### H. Durabilité

Les constructions peuvent être exposées aux tremblements de terre plusieurs années après leur achèvement. Il est donc important que leur résistance ne se soit pas été altérée par des agents atmosphériques (acier, béton, maçonnerie), par des champignons ou par des agents, insectes (bois), humidité du sol, etc. Par ailleurs, les constructions doivent résister au feu. En effet, celui-ci se déclare fréquemment pendant les tremblements de terre et peut entraîner des dommages plus importants que les secousses sismiques elles-mêmes.

Dans le but de renforcer Notre cas d'étude ( le fort turc de fort de l'eau ),le maintenir et résoudre ses désordre tout en gardant et préservant ses valeurs : historique , scientifique ,architectural et esthétique ,on a opter pour L'acier vu qu'il soit le seul matériau qui se caractérise par tout les critères cités précédemment aussi il peut épouser des formes géométriques variables selon notre besoin à condition d'assurer sa durabilité par des protections appropriées.

## **VI. L'approche pour le renforcement du fort turc (d'Alger):**

La super structure de notre fort souffre de multiple désordres a cause des sollicitations sismiques, l'eau pluviale, et l'effet de l'humidité et de vent par contre son infra structure n'a pas subi des désordres de glissement ou de tassement car il est construit sur un rocher. À cet effet notre approche de renforcement est basée sur la super structure seulement.

Suite à la conclusion de chapitre passé, Le système constructif du fort est en maçonnerie non chaînée, de blocs de pierre de calcaire et de tuf au niveau du RDC, et de brique pleine de terre cuite au niveau de l'étage. Pour la couverture est un système de voûtes en berceau.

L'état général du fort est vétuste, caractérisé par plusieurs lézardes et déformations dus aux secousses telluriques, l'humidité et à l'usure du temps.



### 1. Proposition d'approche de renforcement des murs

Vue les deux lézards important sur la façade est et la façade ouest qui sont montrés en (fig. 138-139)

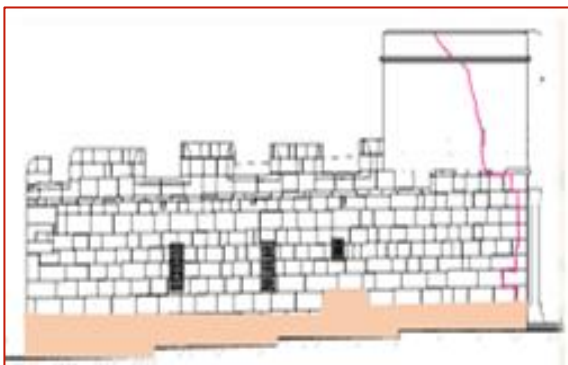


Figure 138: Fissuration au niveau surélévation de la façade ouest  
Source dossier d'étude élaboré par le BET ARCHIMED

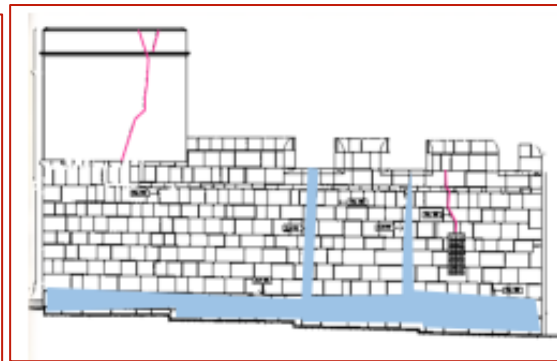


Figure 139 Fissuration au niveau surélévation de la façade est  
Source dossier d'étude élaboré par le BET ARCHIMED

L'approche que nous semble la plus adéquate et efficace pour notre cas est le **renforcement par des contreventements latéraux en acier sur les sur deux façades** afin d'assurer la stabilité du fort ainsi sa résistance. (fig. 140-141)



Figure 140: proposition de contreventement pour la façade est

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI  
simulation 3d réalisé par l'auteur

Figure 141: proposition de contreventement pour la façade ouest

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI  
simulation 3d réalisé par l'auteur





On a opté pour Cette approche car elle se caractérise par des multiples avantages :

- c'est une méthode non destructive.
- sa mise en oeuvre ne touche pas à la structure existante et ne présente aucun risque ou dommage car elle a sa propre fondation

Les forces engendrées par le séisme et le vent seront transférés à ces panneaux supplémentaires, soulageant ainsi le reste du fort. Ces panneaux assurent également l'attachement de l'ensemble du corps du fort surtout le mur sud qui tend à se désolidariser.

Ces panneaux sont constitués de deux croix de contreventement qui à leur tour sont le résultat d'intersection de deux barres rondes, fixées sur des goussets, qui sont eux fixés sur deux profilés métallique en PRS. L'ancrage de cette ossature sur la paroi se fait par le biais d'une plaque en tôle assez dimensionnée afin d'assurer une surface d'influence importante. Et réduit le risque de nuire à la maçonnerie, et même assure une stabilité de l'ensemble. (Voir Fig. N°142)

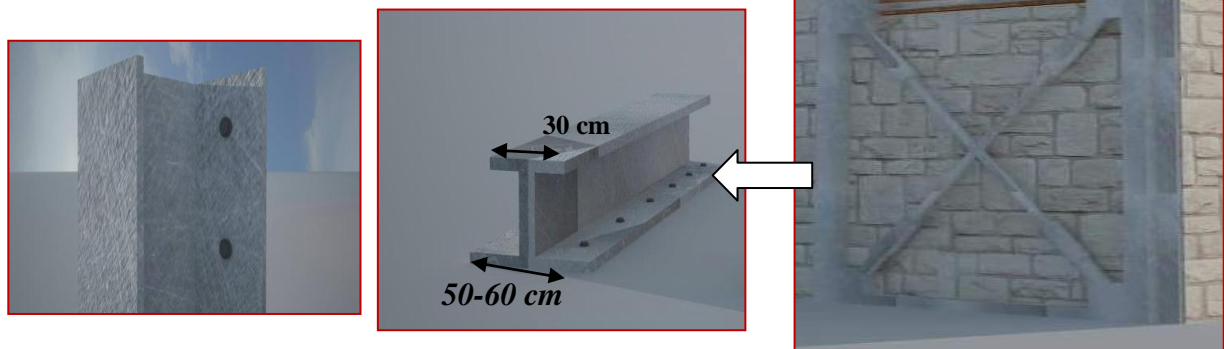


Fig. N°142 : Détails de profilé métallique en PRS

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI

Simulation 3d réalisé par l'auteur

Vue les grande lézard sur la façade ouest on a opté pour un contreventement en forme de croix « x » avec des amortisseur à fluide visqueux sur les deux partie du fort pour assurer une meilleure reprise des charges horizontales, et dissipation d'énergie. . (Voir Fig. N°143)

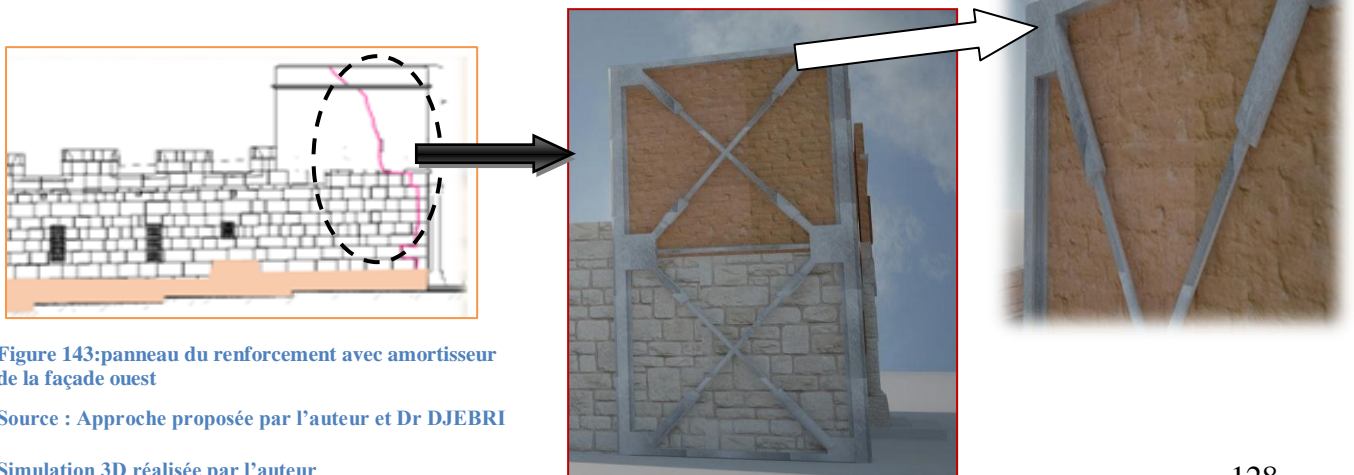


Figure 143:panneau du renforcement avec amortisseur de la façade ouest

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI

Simulation 3D réalisée par l'auteur

Concernant la façade Est ,son lézard est moins important par rapport à la façade ouest .pour cela on a repris le même dispositif mais seulement avec un contreventement latérale en forme de croix « x » dans la partie supérieur car elle est la plus endommagé (Voir Fig. N°144)

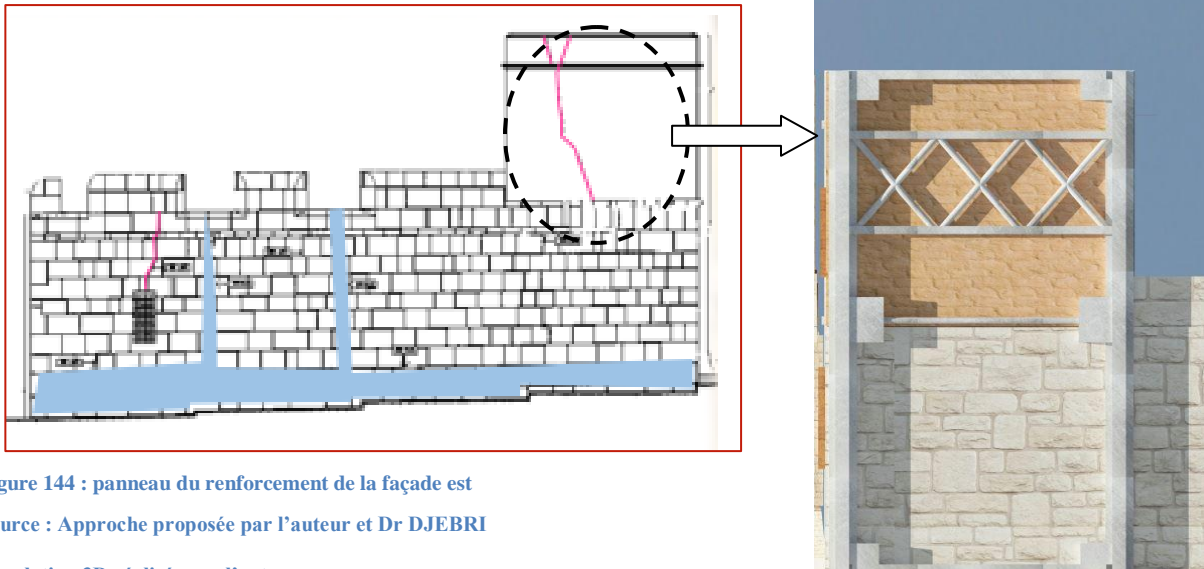


Figure 144 : panneau du renforcement de la façade est  
 Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI  
 Simulation 3D réalisée par l'auteur

La fissure qui apparaitre dans la façade est, sa réparation se fait par le baie des **agrafes métalliques**.ces derniers sont des éléments régies et résistant qui viennent de remplacer la partie lézardes dans le but d'éviter sa reconstruction et la renforcer (Voir Fig. N°145)



Figure 145 : réparation de la fissure par des agrafes  
 Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI  
 Simulation 3D réalisée par l'auteur

**2. Approche pour la reconstitution de la voute d'étage :**

Suite au séisme de 2003 La voute de l'étage a subi des déformations importante, ensuite le manque d'entretien et de préservation lui a causé son effondrement dans l'objectif de préserver l'authenticité du fort et respecter sa valeur architectural et historique on a opté dans cette approche à faire la reconstitution de la voute en suivant le même système constructif ancien et les matériaux initiaux.

**A/ La constitution est faite selon l'équation de la chaînette**

L'arc parabolique est donc le funiculaire d'une charge répartie. Il est fréquent que le chargement ne soit pas distribué uniformément ne serait-ce que par la construction, le poids de la maçonnerie étant plus important dans les écoinçons qu'en haut de l'arc. Le poids propre par unité de longueur horizontale (figure 18) est alors plus important aux appuis qu'à la clef. (Voir Fig. N°146)

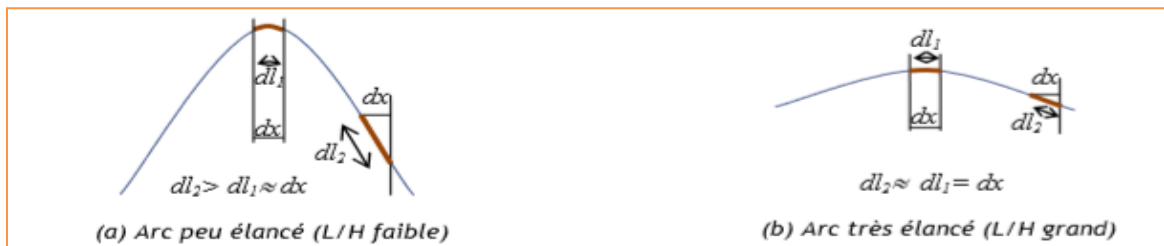


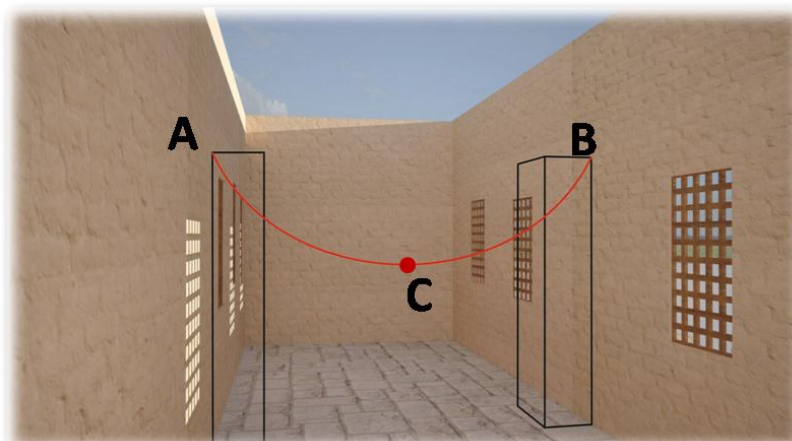
FIG 146 : Poids propre par unité de longueur en fonction de l'élancement de l'arc

Source : internet 8020-conception-et-construction-des-arcs-ensps\_0.pdf septembre 2018

En poursuivant l'analogie exprimée entre arc et câble, la chaînette est la forme que prend un câble suspendu entre deux appuis sous son poids propre (figure 1). Le funiculaire d'une telle charge s'énonce avec des fonctions hyperboliques et non plus paraboliques ; lorsque l'arc est élancé (on le dit aussi surbaissé), la forme du câble est alors tendu, et la forme en chaînette se rapproche d'une fonction parabolique.

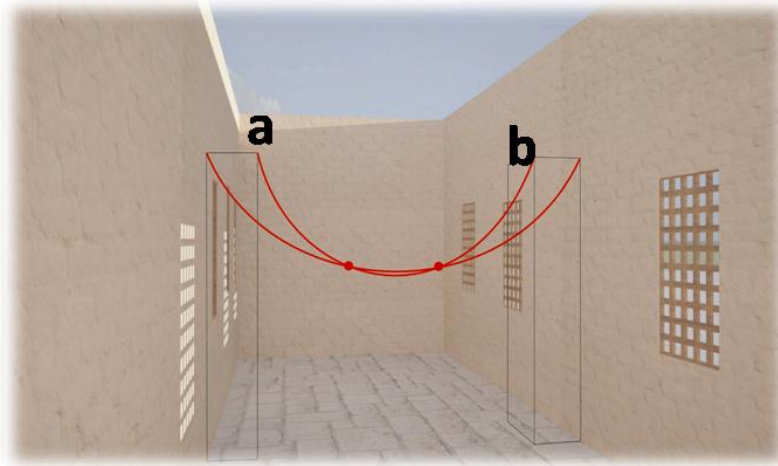
**La figure suivante démontre les étapes de la constitution de l'arc selon l'équation de la chaînette**

1. on attache sur le deux points **A et B** une chaine ou un cordeau de sorte qu'il passe sur le point **C** (Voir Fig. N°147)

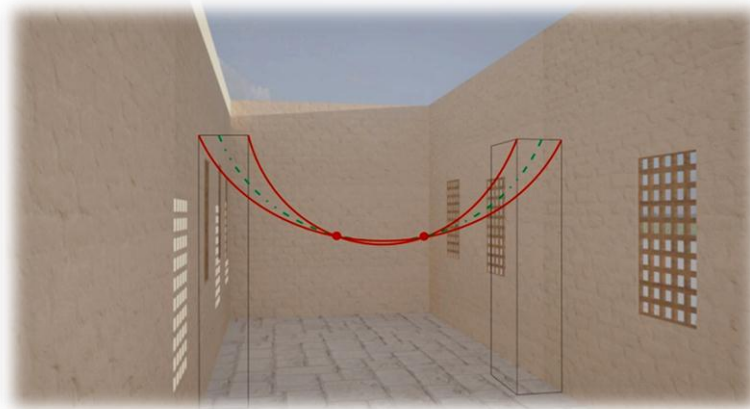




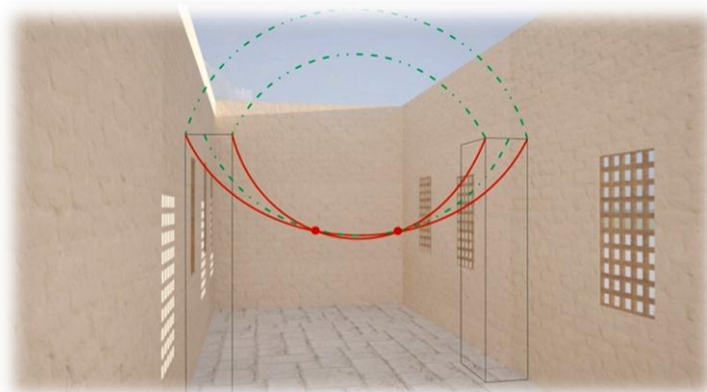
2.. Le même tracé en le refait sur les points **a** et **b** les deux points. (Voir Fig. N°148)



3. l'intersection entre les deux tracés nous donne l'intrados medium qui nous offre plus de sécurité (Voir Fig. N°149)



4. on fait miroir au tracé et on obtiendra notre tracé de l'arc (Voir Fig. N°150)



5. Ensuite on place notre coffrage selon les tracés obtenus .Et on commencera à placer les briques que constitue l'arc Er Pour avoir 'une bonne adhésion entre les briques on ajoute du sika entre les différents blocs de l'arc (Voir Fig. N°151)



Figure 147-148-149-150- 151 : les étapes de la reconstitution de l'arc

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI

Simulation 3D réalisée par l'auteur

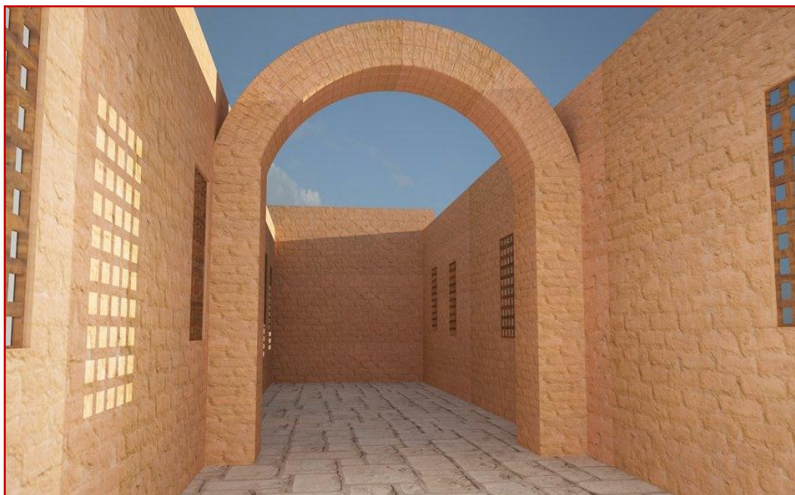


Figure 152 :L'arc de la salle de l'étage après la reconstitution

Source simulation 3d par l'auteur

la technique appliquée sur l'arc est la meme pour toute la voûte qui constitue la salle de l'étage (Voir Fig. N°153)

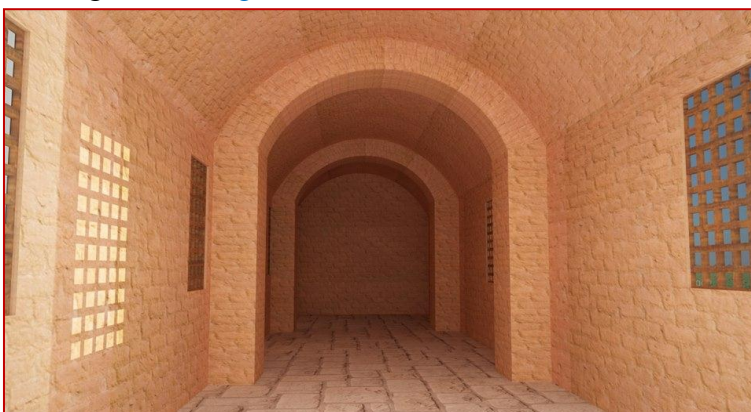


Figure 153: la voûte après la reconstitution

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI

Simulation 3D réalisée par l'auteur

Afin d'augmenter la résistance de cette voûte Ce dispositif est renforcé par : (Voir Fig. N°154)

- un chinage périphérique en profilé métallique pour augmenter la résistance des murs porteurs
- des tirants perforés sur les deux murs porteurs de la voûte afin d'assurer leur stabilité et éviter son écartement, fixés par un système d'ancrage modifiable.
- des tirants perforés sur les deux murs porteurs de la voûte afin d'assurer leur stabilité et éviter son écartement, fixés par un système d'ancrage modifiable.

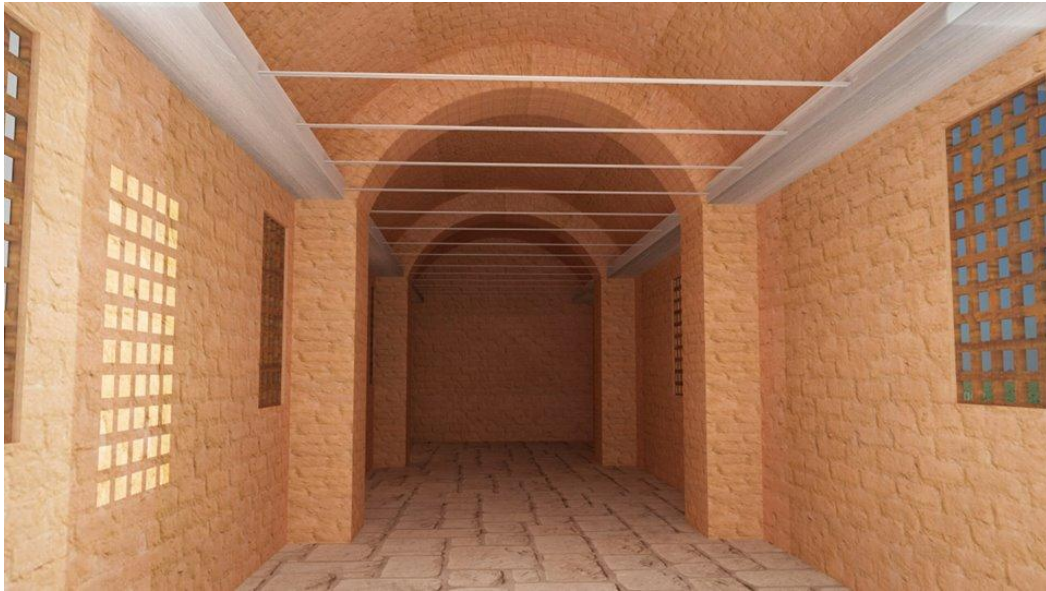


Figure 154: renforcement de la voûte par des tirants et des profilés métalliques

Source : Simulation 3D réalisée par l'auteur

### 3. Proposition d'approche de renforcement de l'arc de la façade principal :

Le découlement des pierres qui constitue l'arc a causé son effondrement et sa ruine, pour cela la technique de renforcement qui nous semble être la plus convenable et la plus efficace, **est le gainage de l'arc par un profilé métallique en forme de U en PRS**, avec les ailes d'une profondeur importante, afin d'assurer une surface d'ancrage plus importante et même un niveau de résistance plus élevé.

Ce profilé prend la forme de l'intrados de l'arc il est cintré à partir du relevé de géométrie de l'intrados

Cette technique est considérée comme une technique non destructive et discrète, procure au fort une bonne résistance tout en préservant son aspect architectural et eustatique. (Voir Fig. N°155)





Figure155: renforcement de l'arc par la technique de gainage

Figure156: détails du placement des tiges sur l'arc sur l'arc

Source : Approche proposée par l'auteur et Dr DJEBRI

Simulation 3D réalisée par l'auteur

Ce dispositif est renforcé par des tirants injecté dans l'arc, (Voir Fig. N°156)

Les tirants de face ont pour rôle d'assurer la liaison des deux ailes du profilé. Et contribue à la stabilité générale de l'arc et ceux qui on à l'intrados ont pour rôle d'augmenter la résistance du l'arc .afin de protégé ce profilé de la corrosion ils seront galvanisé à chaud.

Après la mise en ouvre de ce dispositif de renforcement les pierres de l'arc seront colmater par un mortier composite à base de fibre de même nuance. À la fin on ajoute de sika afin d'assurer une bonne adhésion entre les blocs de pierre.

#### 4. Proposition d'approches pour le renforcement des espaces à proximité des ouvertures:

L'origine de ces fissures est due aux sollicitations sismiques, et aussi au effet de l'humidité au du vent et elles s'accroissent par l'absence du chaînage dans cette maçonnerie, ce qui nous semble être la solution dans ce cas est l'introduction de barres d'acier qui assurent le rôle d'un chaînage transversal. Elles assurent la liaison entre les différentes parties disjointes et renforce la résistance du mur affaiblit par l'ouverture, après colmatage avec un mortier bitumineux. Ou encore injection un fluide d'origine époxydique.

**VII. Conclusion :**

Sous l'effet du temps, de la nature et de l'activité humaine. Le fort présente aujourd'hui des désordres et des détériorations qui nuisent à ses valeurs architecturales et historiques. Pour faire face à ces dégradations plusieurs approches de renforcement existent et peuvent être efficace pour le sauvegarder et le protéger.

Parmi ces différentes techniques du renforcement on a opté pour l'introduction d'une structure secondaire en acier, pour les différents avantages qu'elles présentent, notamment sur pour le fait qu'elles soient non destructives, ne touchant ni à l'intégrité ni à l'authenticité du fort. Cela vu la finesse des éléments qui les composent et sa forte résistance à la traction.

En effet cette technique de renforcement du fort, lui procurent une résistance plus élevée face à d'éventuelles secousses sismiques. Certes ces approches ne sont pas les seules, mais elles présentent de multiples avantages.



## I. Conclusion générale :

L'Algérie dispose d'un patrimoine bâti d'une richesse exceptionnelle, mais sa sauvegarde reste problématique. Il présente aujourd'hui un état de dégradation avancé dont la cause est multiple à savoir l'indifférence, la négligence, le manque d'entretien

La sauvegarde du bâti ancien se fait par sa protection contre les différents risques naturels qui le menacent, entre autre l'activité sismique Qui touche violemment aux structures bâtis, notamment les anciennes. Engendrant ainsi des dégradations très importantes pouvant atteindre l'effondrement des bâtisses sur leurs occupants.

La solution face à ces risques est de procurer à ce bâti ancien une meilleure résistance par son renforcement. Cela par l'introduction d'autres matériaux, et de nouveaux éléments structuraux, ayant de meilleure résistance face aux efforts de tractions et de cisaillement. Cependant cette intervention reste complexe et sensible, dépend de plusieurs facteurs.

Les techniques du renforcement sont multiples se varient en fonction des structures des systèmes constructif, des matériaux, et d'autres paramètres. Or que Les différentes opérations de réhabilitation menées jusqu'à présent reste très limité vu l'absence de spécialistes dans le domaine et d'outils permettant de bien mener ces opérations comme le plan d'action efficace

A travers notre étude nous avons tenté de proposer des approches pour le renforcement de ce fort tout en respectant ses matériaux son architecture, son histoire et son authenticité.

L'analyse du système constructif du fort, les matériaux utilisés et sont comportement, sa typologies son 'environnement nous ont aidé à comprendre les causes de ce désordre et nous ont orienté à choisir la structure et le matériau compatible et qui répond a notre problématique et objectif de recherche

## II. Perspectives de recherche :

A travers notre étude, nous avons tenté à développer une approche de renforcement du bâti ancien vis-à-vis les risques naturels tout en préservant sa valeur architectural et historique sauf que ce domaine de réhabilitation est très large donc on s'est limité seulement au renforcement structurel du bâti ancien

Au cours de l'avancement de notre recherche, nous nous étions aperçus, de la multitude de perspectives de recherche:

- Lancer une recherche en faveur de l'optimisation des performances physiques et mécaniques des matériaux du patrimoine bâti algérien, dans le but d'augmenter leur résistance aux sollicitations de l'environnement qui devient de plus en plus agressif
- Développer une approche de renforcement du même thème mais avec des matériaux innovants et compatibles.
- Lancer les essais mécaniques et physicochimiques des matériaux du bâti ancien
- Développer le coté numérique via la modélisation numérique.

# Liste des figures



## CHAPITRE N° 01 :

Figure N°1	Illustration des composants du risque.....	08
Figure N°2	Décomposition de l'action sismique.....	09
Figure N°3	Le mécanisme au niveau du foyer.....	10
Figure N°4	Illustration des composants du risque.....	11
Figure N°5	Graphie comportement d'un matériau sous l'effet des charges sismiques cycliques.....	12
Figure N°6	Le phénomène de liquéfaction.....	13
Figure N°7	Le phénomène de tsunami.....	13
Figure N°8	Zonage sismique en Algérie.....	15
Figure N°9	Contexte géologique algérois (les différentes failles).....	15
Figure N°10	Exemple de représentation sur le diagramme de l'air humide.....	21
Figure N°11	Illustrant les remonté capillaires.....	21
Figure N°12	Infiltration de la pluie.....	22
Figure N°13	Humidité de condensation.....	23
Figure N°14	Densité élevé d'un tissu ancien /Accidents aérodynamiques au niveau bas de la tour...	25
Figure N°15	effet de coin.....	27
Figure N°16	effet de sillage.....	27
Figure N°17	effet e trous sous immeuble.....	27
Figure N°18	le rouleau tourbillonnaire.....	28
Figure N°19	effet de barre.....	28
Figure N°20	effet de venturi.....	29
Figure N°21	effet d'immeuble interrompu.....	29

## CHAPITRE N°02

Figure N°22	Mur porteur.....	31
Figure N°23	Colonnes monumentales datant de l' <u>Antiquité romaine</u> du temple de <u>Bel à Palmyre</u> , Syrie.....	33
Figure N°24	Plancher à ossature en bois.....	33
Figure N°25	Éléments matériels constitutifs de l'arc.....	34
Figure N°26	Arc en plein cintre.....	34
Figure N°27	Croquis arc brisé.....	35
Figure N°28	Croquis Arcs en anse de panier.....	35
Figure N°29	Croquis arcs surbaissés.....	36
Figure N°30	croquis outrepassé.....	36
Figure N°31	Voûte en berceau.....	37
Figure N°32	Voûte d'arête.....	37
Figure N°33	Voûtes d'ogive.....	38
Figure N°34	Vue d'une coupole.....	38
Figure N°35	Fondation exceptionnelle en pierre sur un bon sol.....	39
Figure N°36	Typologie de la terre.....	40
Figure N°37	Préparation et confection de l'adobe pour la construction.....	41
Figure N°38	Exemple d'un monument en adobe.....	41



Figure N°39	Construction suivant la technique de la Bauge.....	42
Figure N°40	Utilisation de la technique du torchis dans la construction.....	42
Figure N°41	La technique du pisé dans la construction.....	43
Figure N°42	Blocs de terre comprimée .....	43
Figure N°43	Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	44
Figure N°44	Exemples de désordres dus à une trop forte compression sur une large partie du mur.	52
Figure N°45	Exemples des charges ponctuelles .....	53
Figure N°46	Exemple de désordre au manque de rigidité des éléments associés.....	53
Figure N°47	Désordre dû à une différence de rigidité entre les matériaux composant les murs mixtes.....	54
Figure N°48	Exemples de Désordres dus à des différences de charges entre des murs transversaux	54
Figure N°49	Exemples de désordres dus à un affaissement du sol sous un angle du bâtiment.....	55
Figure N°50	Exemples de désordres au niveau d'un mur porteur dus à des mouvements de fondations.	55
Figure N°51	Exemples de désordres dus à un glissement du sol sous une partie de la construction...	55
Figure N°52	désordres dus aux Écrasements et bombements des façades.....	55
Figure N°53	Exemples de désordres dus aux poussées non compensées des éléments arqués.....	56
Figure N°54	Exemples différents déformation poutre et poutrelle .....	57
Figure N°55	Exemples des fissurations au niveau de plancher .....	57
Figure N°56	schémas montrant le sens des poussées exercées sur les structures voûtées.....	58
Figure N°57	Détails d'efflorescence.....	58
Figure N°58	détail alvéolisation.....	59
Figure N°59	décollement d'enduit.....	59
Figure N°60	le désordre du plancher .....	60
		61
Figure N°62	le désordre du plancher .....	61

## CHAPITRE N° 03

Figure N°63	Exemple de reprise de fissure par injection.....	70
Figure N°64	Les différentes étapes de la mise en œuvre de la technique du remplacement. Partiel...	72
Figure N°65	Reprise des fissures par des agrafes de solidarisation.....	73
Figure N°66	Remplacement des parties lézardées par des agrafes métalliques.....	73
Figure N°67	Consolidation par élargissement.....	74
Figure N°68	Renforcement par semelle en béton.....	75
Figure N°69	Renforcement par des poutres adhérentes en B A.....	76
Figure N°70	Renforcement des fondations par des poutres longitudinales rattachées par les poutres transversales.....	77
Figure N°71	Renforcement par des poutres adhérentes en B A.....	77
Figure N°72	Renforcement par des poutres adhérentes en B A.....	78
Figure N°73	Pieux adhérents accolés d'un seul côté du mur.....	79
Figure N°74	Technique de rejointoiement.....	79
Figure N°75	Chainage métallique.....	80
Figure N°76	Renforcement par gainage en B A .....	81
Figure N°77	Renforcements des arcatures par des tirants.....	81
Figure N°78	Renforcement des tirants (avec chainage périphérique).....	84





Figure N°79	Renforcement des tirants (avec chaînage périphérique).....	84
Figure N°80	Renforcement des voutes par introduction des barres d'acier.....	85
Figure N°81	Renforcement des voutes par des barres.....	86
Figure N°82	Renforcement par contreforts .....	85
Figure N°83	Pose de boutisse après réduction du bouffement par étaieement .....	86
Figure N°84	Renforcement d'un plancher.....	87
Figure N°85	Remplacement des appuis des poutres et solives en bois.....	87
Figure N°86	Division de la portée des poutres et solives d'un plancher soumis à une tension de flexion excessive.....	88
Figure N°87	Pose additionnelle de dalles en béton armé.....	88
Figure N°88	Drainage du sol par bloc drainant.....	89
Figure N°89	Technique de traitement par siphons atmosphériques.....	90
Figure N°90	La technique de l'électro-osmose phorésie : L'électro-osmose phorésie.....	90
Figure N°91	La technique de l'insertion d'une barrière étanche à la base des murs.....	91

## CAS D'ETUDE : CHAPITRE N° 01

Figure N°92	Plan map situation du fort .....	95
Figure N°93	Vue panoramique sur le fort .....	95
Figure N°94	Esquisse de plan et profil du Fort.....	96
Figure N°95	Inscription au-dessus de la porte d'entrée du fort.....	96
Figure N°96	Photo actuelle du fort .....	98
Figure N°97	Les deux parties du fort.....	99
Figure N°98	Plan du RDC du fort de Bordj el Kiffan.....	100
Figure N°99	Une photo du patio qui date de 2006 .....	101
Figure N°100	Une photo actuelle du patio de sol de patio .....	101
Figure N°101	Une photo actuelle du revêtement de sol de patio.....	101
Figure N°102	Une photo actuelle de la salle.....	101
Figure N°103	Une photo de la salle qui date de 2006 .....	101
Figure N°104	L'entrée à la cave.....	101
Figure N°105	Plan de l'étage du fort de Bordj el Kiffan.....	102
Figure N°106	Une photo de La rampe menant à l'étage date de 2006 .....	102
Figure N°107	Une photo actuelle de La rampe menant à l'étage.....	102
Figure N°108	Une photo de la salle date de 2006.....	102
Figure N°109	Une photo actuelle la salle.....	102
Figure N°110	une photo de la salle date de 2006.....	103
Figure N°111	une photo actuelle de la terrasse .....	103
Figure N°112	Photo ancienne du fort .....	103
Figure N°113	Relevé architectural de la façade sud.....	103
Figure N°114	Façade nord du fort.....	104
Figure N°115	Façade est du fort.....	104
Figure N°116	Photo Actuelle de la façade Ouest du Fort.....	105



## CAS D'ETUDE CHAPITRE N°02

Figure N°117	Mur de la façade sud.....	107
Figure N°118	Fissuration au niveau surélévation de la façade ouest.....	108
Figure N°119	Mur de la façade est.....	109
Figure N°120	Fissuration au niveau surélévation de la façade est.....	109
Figure N°121	la voute de RDC.....	110
Figure N°122	La salle de l'étage.....	111
Figure N°123	Arc de l'entrée façade sud.....	112
Figure N°124	Apparition des noircissures.....	112
Figure N°125	Apparition des algues et des végétations.....	113
Figure N°126	Effondrement de la voûte qui couvrait la salle de l'étage.....	113
Figure N°127	Vue la salle état actuel.....	113
Figure N°128	État de la brique de la salle de l'étage.....	113
Figure N°129	Dégradation du mortier surtout au niveau de la façade nord.....	114
Figure N°130	Apparition de rouille au niveau de grillage de la fenêtre.....	114
Figure N°131	Façade est relevé pathologique.....	115
Figure N°132	Façade est relevé pathologique.....	115
Figure N°133	Coupe relevé pathologique.....	115
Figure N°134	plan de pathologie mécanique du fort.....	116

## CAS D'ETUDE Chapitre N° 03

Figure N°135	Action sismique sur un bâtiment avant isolation et après isolation.....	122
Figure N°136	Insertion de panneaux sur les façades.....	123
Figure N°137	Fixation des panneaux sur des fondations indépendantes.....	123
Figure N°138	Fissuration au niveau surélévation de la façade ouest.....	127
Figure N°139	Fissuration au niveau surélévation de la façade est.....	127
Figure N°140	proposition de contreventement pour la façade est.....	127
Figure N°141	proposition de contreventement pour la façade ouest.....	127
Figure N°142	Détails de profilé métallique en PRS.....	128
Figure N°143	panneau du renforcement avec amortisseur de la façade ouest.....	128
Figure N°144	panneau du renforcement de la façade est.....	129
Figure N°145	réparation de la fissure par des agrafes.....	129
Figure N°146	Poids propre par unité de longueur en fonction de l'élancement de l'arc.....	130
Figure N°147	les étapes de la reconstitution de l'arc étape 01.....	130
Figure N°148	les étapes de la reconstitution de l'arc étape 02.....	131
Figure N°149	les étapes de la reconstitution de l'arc étape03.....	131
Figure N°150	les étapes de la reconstitution de l'arc étape04.....	131
Figure N°151	les étapes de la reconstitution de l'arc étape 05.....	132
Figure N°152	L'arc de la salle de l'étage après la reconstitution.....	132
Figure N°153	la voute de la salle de l'étage après la reconstitution.....	132
Figure N°154	renforcement de la voute par des tirant et des profilé métalliques.....	133
Figure N°155	Renforcement de l'arc par la technique de gainage.....	134
Figure N°156	Détails du placement des tiges sur l'arc.....	134



**Liste des  
Tableaux, Courbes  
et Diagrammes**



## **LA LISTES DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE 1**

Tableau N°1	Variation de la température	19
Tableau N°2	Tableau de pluviométrie ALGER	20

### **CHAPITRE 2**

Tableau N°3	Moyens de stabilisation des terres	46
-------------	------------------------------------	----

### **CAS D'ETUDE CHAPITRE N°3**

Tableau N°4	Critère de la sélection du matériau adéquat pour le renforcement du bâti ancien	126
-------------	---	-----

## **LA LISTE DES COURBES ET DES DIAGRAMMES**

### **CHAPITRE 1**

Courbe 01	Courbe de température Alger	19
Diagramme01	La vitesse du vent d'Alger	20

# **Bibliographie**





Bibliographie :

1. **ACHAB, SAMIA(2012)**. Elaboration d'un guide technique de réhabilitation du patrimoine (habitat) de la période Ottomane. Mémoire de magister : architecture. Algérie : NIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE Tizi-Ouzou. P 137
2. **ANAH**, Agence National pour l'Amélioration de l'Habitat (Paris), Techniques et produits pour l'amélioration de l'habitat, Editions du Moniteur, Paris, 1981, p. 15.
3. **ANAH**, Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, Réhabiliter et entretenir un immeuble ancien point par point, Edition du Moniteur, Paris, 1989, p.18 et 26 à 28.
4. **Belakhowsky.S**, Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation, Paris, 1980, p94-97
5. **BETTRAND Ruot**, Guide pratique « Les enduit de façade » : mise en œuvre des enduits minéraux sur supports neufs et anciens. Paris : CSTB. 2009. Page 5
6. **Brenda .P** , Bâtiment en maçonnerie, analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidations, 1993 EPAU Snap
7. **BRESSON Gilbert1957**, Histoire d'un centre rural Algérien: Fort de l'Eau, Ed: Vve J. Bringau, Alger, P\_18, 19
8. **CAUSSARIEU Alexandre, GAUMART Thomas**, Guide pratique de la rénovation de façade : Pierre-brique-béton, Eyrolles, paris, 2005, p. 12
9. **Chatelet A, FERNANDEZ P, Lavigne P**, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p45
10. **COIGNET, Jean. COIGNET, Laurent**, La maison ancienne. Construction, diagnostic, interventions. Édition EYROLLES, Paris, 2012. Page 10
11. **xColin .G**, Corpus des inscriptions arabes et turques de l'Algérie, Paris, 1901, p.97
12. **Djebri B, et Akkouche**, S(8 mai 2017). Patrimoine architectural et urbain. *Renforcement du vieux bâti vis-à-vis des sollicitations sismiques : Cas d'étude Le Fort turc de Fort de l'eau*. France : Univ Européenne.
13. **DREGE Jacques, PUTTATI Jacques, ILLOUZ Corinne. Et al**, Pathologie des ouvrages de bâtiment T.1 : Fiches techniques pour l'établissement du diagnostic-la mise en œuvre des solutions appropriées-la prévention et la résolution des litiges, Editions Weka, Paris, 1997, Dispositions générales relatives à la pathologie, Chap.1/1, page 7 et 8.
14. **Dreyfus.Jacques**, Le confort dans l'habitat en pays tropical, Eyrolles, Paris, 1960
15. **JOFFROY Pascale**, La Réhabilitation des bâtiments : conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements, coll. «Techniques de conception », Editions Le Moniteur, Paris, 1999, p.13.



16. **Henri KLEIN**, Feuillet d'El-Djazair, Tome I, édition Comité du vieil Alger, 1910, Collection "Comité du vieil Alger"
17. **Grafmeyer .Y** , Sociologie urbaine, Paris, Nathan, 1994
18. **KADJILE Edouard**, Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité. Mémoire de master. Génie civil. Ouagadougou : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. 2010. Page : 5.
19. **KHELASSI Ali** (1985), Constructions militaires ottomans de la ville d'Alger, Ed: Musée central de l'armée: Ministère de la défense nationale, Alger, P\_11
20. **L'HERMITE Robert et CASSOU Francis**. Au pied du mur. Edition : société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics. Paris. 1969. Page 160
21. **MEUKAM P**, « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments » Thèse doctorat, université Yaoundé, Décembre 2004
22. **MOULOUD KHEMOUCHE** (2007). Procédés de renforcement du vieux bâti, Office des publications universitaires, Alger, P\_111
23. **Patrice de Brandois et Florence Babics**, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, juin 2006, P7
24. **PIETRO Brenda (1993)**, *Bâtiment en maçonnerie Analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidation*, Centoanalisi sociale progetti S.R.L, Rome, P\_72-73
25. **SELMI, Hacène** (2012), matériaux locaux et développement durable : Cas de la Brique de Terre Comprimée appliquée au sud Algérien. Mémoire de magistère : architecture et environnement. Algérie : EPAU. Page 86-88
26. **Synthèse du règlement parasismique Algérien version 2003**, le zonage sismique 2003 (arrêté du 11 Janvier 2004 portant approbation du document technique réglementaire relatif aux « règles parasismiques algériennes RPA 99/ version 2003 ») et les catalogues des séismes en Algérie (1994 et 2002)
27. **Tabeaud**, la climatologie, Armand Colin, 2000, Paris. P : 28.
28. **Vue générale sur la gestion de catastrophes**, programme de formation à la gestion des catastrophes (PNUD-DHA-UNDRO), p16
29. **WISNER Ben** , “disaster Risk Reduction in Megacities : Making the most of human and social capital “ P5, “ ... by vulnerability we mean the characteristics of a person or group terms of their.



### Site internet :

1. **AIT HAMOUDA Ibrahim** ,mémoire magistère, la conservation du patrimoine Bâti en Algérie, Cas de la réhabilitation d'immeubles urbains du bâti ancien en Algérie, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf , Département d'Architecture,2013 .consulté le 01/06/2018) disponible sur : [Nouveau%20dossier%20\(2\)/Nouveau%20dossier%20\(5\)/mémoire%20soutenance/1réhabilitation%20%20complet%20.pdf](#)
2. **César Diaz Gomez**. Les désordres structurels des bâtiments dans l'architecture traditionnelle méditerranéenne. Méthode Rehabimed. Architecture traditionnelle méditerranéenne. II : Réhabilitation bâtiments, 2007. (PDF téléchargé en 2018)
3. **Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle - Tome 1**, Dictionnaire disponible sur [http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20\(architecture\)/fr-fr](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Arc%20(architecture)/fr-fr) (page consulté le 10 -07-2018)
4. **Maamoun SAADE**, Étude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites cas d'étude : application aux ouvrages d'assainissement ,thèse de doctorat ,université d'Artois,2012, consulté le 01/06/2018, disponible sur : [Nouveau%20dossier%20\(2\)/Nouveau%20dossier%20\(5\)/mémoire%20soutenance/Thse finale SAADE maamoun.pdf](#)
5. **Resch, L(2010)**. Développement d'éléments de construction en bois de pays lamellés assemblés par tourillons thermo-soudés. Thèse de doctorat : sciences du bois et des fibres. Nancy II : École doctorale : Ressources Produits Procédés Environnement. P 19. (Consulté le 01-11-2017). Disponible sur : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD\\_T\\_2009\\_0142\\_RESCH.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2009_0142_RESCH.pdf)

# **Annexe**

## Annexe N°01: Les différents matériaux du fort de l'eau

	Matériau	Localisation	Observation
1	Pierre équarrie en calcaire. Trois dimensions récurrentes : 80x43x43cm ; 60x43x43cm et (90 à 110)x43x60cm	En façade, murs intérieurs et intrados des voûtes intérieurs du RDC et crénelures	Provenant du site archéologique de Rusgunae.
2	Pierre en calcaire équarri réajusté	Intrados des voûtes intérieures et crénelures	
3	Brique pleine de terre cuite	a. Intrados de la voûte de la rampe	Dénote probablement par sa différence avec les espaces couverts des autres salles sa réalisation après-coup.
		b. Les parois sud du fossé et son couronnement	Appareillage récent réalisé en briques pleines perforées
		c. L'ensemble des revêtements des sols à l'intérieur des espaces couverts et dans la cour ; les marches d'escaliers menant à la cour et ceux menant à la terrasse	Revêtement récent réalisé au moyen de briques de type traditionnel
		d. Colmatage des appareillages imparfaits sur les façades extérieures et de la cour intérieure	Démontre la récupération pour une réutilisation
		e. Murs et voûte de la salle de l'étage	Dénote de la réalisation de l'étage après coup



4	Brique creuse de terre cuite	Cloisons des sanitaires au rez-de-chaussée	
		Colmatage du chenal de drainage des eaux pluviales provenant des escaliers menant à la terrasse et longeant la rampe	
5	Tuf	Eléments architectoniques du portique d'entrée au fort (Chambranle, colonnes, claveaux, etc.)	
6	Marbre	Eléments architectoniques du portique d'entrée au fort (Inscription surplombant le chambranle d'entrée)	
7	Liants et revêtements à base de chaux, de sable, et éventuellement de terre.	Joint entre les pierres et les briques de terre cuite, sur l'ensemble des appareillages du rez-de-chaussée et quelques fragments du mur sud de la salle à l'étage	
8	Liants et revêtements à base de chaux, de sable, et éventuellement de terre.	Traces sporadiques sur les façades extérieures	
9	Revêtement à base de mortier bâtard (probablement renforcé avec du ciment blanc)	Reprise imitative relativement récente de quelques surfaces de pierres sur la façade principale	Ces travaux de réfection des surfaces des pierres révèlent l'interprétation erronée du traitement originel des façades et le développement arbitraire très tardif (en vigueur au 19 <sup>ème</sup> siècle) pour le goût du « rustique »



0	Badigeonna ge en chaux	Traces sporadiques sur la pierre de l'ensemble des façades extérieures et surfaces étendues sur les façades de la surélévation	Démontre que l'apparence extérieure actuelle du fort est due à la disparition des revêtements à la suite de l'absence totale d'entretien
1	Mortier de ciment portland	<b>a.</b> Colmatages de lézardes sur les façades est et ouest au niveau du rez-de-chaussée	Rebouchage réalisé probablement à la suite des différents séismes survenus à Alger.
		<b>b.</b> Faces des murs donnant sur la cour intérieure	Opération récente de réfection
		<b>c.</b> Intrados de la voûte et des murs intérieurs de la rampe	Opération de réfection
		<b>d.</b> L'ensemble des surfaces intérieures et extérieures de la salle à l'étage	Revêtement appliqué à la suite de la surélévation et l'intégration des portions de murs au sud aménagés de petites baies en meurtrières
		<b>e.</b> Revêtement général de la grande salle est, ainsi que le soubassement des grandes salles, nord et ouest, au rez-de- chaussée	
		<b>f.</b> L'ensemble des surfaces des sanitaires	
		<b>g.</b> Chapes des terrasses et mortier pour la fixation des carreaux de revêtement de sol	
	<b>h.</b> Gargouilles		
2	Carreaux de terre cuite	<b>a.</b> Sol du hall d'entrée : pièces hexagonales émaillées, de 14cm de côté, formant tapis encadré sur trois côtés de	

		carreaux de 20x20cm	
		<b>b.</b> Sol de la grande terrasse : pièces rectangulaires émaillées de 30x15cm	
		<b>c.</b> Sol de la salle à l'étage : carreaux émaillés de 30x30cm ; et plinthes émaillées de 15x7,5cm	
3	Granito	Sol des sanitaires au rez-de-chaussée	
4	Etanchéité bitumée	Couverture de la surélévation et en couche sous-jacente au niveau de l'ensemble de la surface de la grande terrasse	
5	Boiserie	Porte d'entrée au fort, l'ensemble des fenêtres du rez-de-chaussée et de l'étage, les cloisons ajourées du rez-de-chaussée séparant les grandes salles de la cour, les portes des sanitaires et de la grande salle à l'étage.	
6	Ferronnerie	<b>a.</b> Barreaux (barre de 16mm) de l'ensemble des fenêtres	
		<b>b.</b> Grille séparant la cour du hall d'entrée	
		<b>c.</b> Porte en tôle du réduit aménagé sous la rampe	
		<b>d.</b> Structure de la verrière recouvrant la cour (IPN, cornières, fer plat, etc.)	
		<b>e.</b> Portions préexistantes de la	



		clôture du site du fort.	
		f. Résidus d'attaches des canons au niveau de la crénelure	

**Annexe N°02 : Dossier graphique du fort établi par le BET Archimed**

