الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Médéa University

Université YAHIA FARES de Médéa

Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Filière : Génie Civil

Option:Construction et Matériaux

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master

EFFET DE TIGES METALLIQUES SUR LE COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT DES MURS EN MAÇONNERIES EN PIERRE NATURELLE

Présenté par :

- Mr.KHALFI Mohamed.
- Mr.HADJARSI Rachid.

Proposé et dirigé par :

Mr.BOUKSANI Omar.

2016/2017

REMERCIEMENTS

Nous voudrissons d'abord remercierons dieu ,avant toute autre personne ,de m'avoir donné courage ,santé ,volontè,et surtout force afin de pouvoir réaliser ce modeste travail dans des meilleurs conditions.

Nous aimessons manifester ma gratitude pour la patience ,le soutien et l'aide prècesieuse à mon promoteur Mr BOUKSANI.

Nous adressons mes sincères remerciements à tous les professeurs ,intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles ,leurs ècrits,leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches .

Nous tenterons à remercierons vivement toutes personnes ayant contribué à la réalisation de ce précieux travail.et surtout les membres de CENTRE DE CNERIB à SOUIDANIA-ALGER,les membres de HALL TECHNOLOGIQUE de université de MEDEA.

A tous ces intervenants ,nous présentons mes remerciements ,mes respect et mes gratitude.

DEDICACE

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut…

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude ,

L'amour, le respect, la reconnaissance…

Aussi, c'est tout simplement que

Nous dédions cette thèse à…

- ✓ Qui ont tout sacrifié pour ma réussite qui ont tellement souhaité que j'atteigne mon but, ma mère et mon père.
- ✓ A mes collègue de université de MEDEA.
- ✓ A mes frères
- ✓ Tous les membres de ma famille.
- ✓ Tout ceux qui ont contribué à ma formation durant mon cursus ,et ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à surmonter positivement.

KHALFI MOHAMED

HADJARSI RACHID

TABLE DES MATIERES

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 :comportement des murs en maçonneries

1-1.introduction……...2

1-2.facteurs influents sur la résistance de la maçonneries……..2

1-3.comportement de la maçonneries en compression axiale……3

1-3-1.introduction……...3

1-3-2.comportementen compression uni axiale de la maçonnerie……..3

1-3-2-1.compression de la maçonnerie dans la direction normale de joint de mortier…….3

1-3-2-2.compression de la maçonnerie dans la direction parallèle de joint de mortiers……4

1-3-3.comportementen traction uni axiale de la maçonneries……5

1-3-3-1.traction de la maçonneries dans la direction normale aux joint de mortier…….5

1-3-3-2.traction de la maçonneries dans la direction parallèle aux joint de mortier…….5

1-3-4.comportementbi axial de la maçonneries……..6

1-3-5.mécanisme de rupture sous compression axiale……8

1-4.comportement de la maçonnerie vis-à-vis à la charge concentrée……10

1-5.comportement en flexion des murs en maçonneries……..12

1-5-1.flexionuni axiale……..12

1-5-2.flexion bi-axiale……...13

1-5-3.essai de résistance à la flexion suivant l'eurocode 6 et DTR C2.45…….14

1-5-3-1.essai de résistance à la flexion…….14

1-5-3-2.résistance caractéristique à la flexion f_{xk}…….15

1-6.comportement de la maçonnerie sous charge de cisaillement et sous charge diagonale..17

1-6-1.essai de cisaillement……18

1-6-2.essai de traction diagonale……..20

CHAPITRE2 :présentation de pierre, joint,mortier,les types de maçonneries,l'architecture rurale traditionnelle

2-1.introduction…….22

2-2.composition d'un mur…….22

2-2-1.assemblage des composants……22

2-2-1-1.murs uniquement constituées de pierre……23

2-2-1-2.murs à deux parements séparées par un blocage……23

2-2-1-3.murs organiques……...24

2-3.composant1 :la pierre…….25

2-3-1.géologie et qualité des pierres de construction……...25

2-3-1-1.classification des roches……...25

-les roches magmatiques……...25

-les roches plutoniques……..25

-les roches volcaniques…….26

-les roches sédimentaires……..26

-les calcaires……..26

-les grès et les meulières……...27

-les roches métamorphiques……27

2-3-2.classification selon le critère de dureté……..28

2-3-3.caractéristiques physiques des pierres de construction……...29

-la densité…….29

-la porosité……29

-l'absorption……29

-la perméabilité…….30

SOMMAIRE

-l'homogénéité…….30

2-3-4.caractéristiques mécaniques……30

-lit et délit……..30

-masse volumique…….31

-résistance à la compression……31

-résistance à la traction……31

-vitesse de propagation du son……32

2-3-5.tableau de synthèse pour les pierres calcaires……..32

2-4.composant2 :le joint……..33

2-4-1.morphologie des joints……...33

-partie apparente des joints…….34

-partie interne des joints……..34

2-5.préparation des mortiers……..34

2-5-1.les différentes liants……35

-l'argile…….35

-le plâtre……36

-la chaux……37

-le ciment……..37

2-6.le matériel……...37

2-7.les types de maçonneries……...39

2-7-1.le callade…….39

2-7-2.mur de pierre sèche……40

2-7-3.mur de pierres maçonnées…….40

2-7-4.les maçonneries de pierres de taille……...41

2-7-5.les maçonneries de moellons……42

2-7-6.maçonnerie de pierre brute hourdée……42

2-7-7.le mur banché……43

2-7-8.murs de cailloux à bain de mortier……44

2-7-9.murs en galets……45

2-7-10.épaisseur et élancement des murs……45

2-8.l'architecture rurale traditionnelle……47

2-8-1.chaines……47

2-8-1-1.chaine d'angle……..49

2-8-2.jambe……...49

2-8-3.chainages……49

2-8-3-1.chainage en pierre……50

2-8-3-2.chainage en pierre et mortier……...50

2-8-3-3.chainage en bois……...50

2-8-4.corniches……..51

2-8-4-1.corniche en plâtre……51

2-8-4-2.corniche en mortier……52

2-8-4-3.corniche en brique……..53

2-8-4-4.corniche en tuile dite génoise……..53

2-8-4-5.corniche en pierre……54

2-8-5.linteaux et encadrements de baies……..55

2-8-5-1.linteaux et appuis……56

2-8-5-2.jambages et encadrements……..57

CHAPITRE3 :la rèparation

3-1.principes généraux……59

3-1-1.connaissance et adaptation au contexte technologique du lieu……59

3-1-2.considération globale des répercussions de l'intervention……...59

3-1-3.clarté de l'approche mécanique et structurelle……59

3-1-4.singularité des interventions portant sur des bâtiments d'une valeur patrimoniale particulière……...60

SOMMAIRE

3-2.interventions sur les murs et les piliers……60

3-2-1.remplacement physique sur la partie endommagée…….60

3-2-2.reprise de fissures……..61

3-2-3.injections……62

3-2-4.rejointoiements……..63

3-2-5.enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé…….63

3-2-6.pose de tirants……...64

3-2-7.contreforts…….65

3-2-8.chainage…….66

3-2-9.taxidermies avec des barres d'acier…….66

3-2-10.collage des pierres……..67

3-2-11.remodelage des pierres……..68

3-2-12.remplacement des pierres……..69

3-2-13.rèparation des fissures……71

3-2-13-1.prescriptions particulières de rèparation des fissures supérieurs à 10mm pour les murs en maçonneries…….72

-pour les fissures verticales……...72

-agrafage du mur……72

-gainage……..73

-pour les fissures inclinées…….74

-pour les fissures à l'intersection des murs……...75

3-2-14.comment retenir un mur bombé…….76

3-2-15.l'injection d'un coulis de ciment……77

3-2-16.la réfection partielle……78

3-2-17.la reconstruction d'un mur……79

3-3.renforcement des structures traditionnelles algériennes au séisme……80

SOMMAIRE

CHAPITRE4 :présentation des matériaux et les techniques expérimentales utilisées

4-1.introduction……84

4-2.matériaux utilisèes……85

4-2-1.provenance des matériaux……..85

4-2-2.caractéristiques des matériaux……85

4-2-2-1.la pierre……85

a-caractéristiques géométriques……85

b-caractéristiques physiques……85

c-caractéristiques mécaniques……...86

4-2-2-2.mortier……86

4-2-3.caractéristiques des sables utilisèes……87

4-2-3-1.l'analyse granulométrique……87

4-2-3-2.équivalent de sable……88

4-2-3-3.la masse volumique……88

-la masse volumique absolue……..88

-la masse volumique apparente……..88

4-2-3-4.module de finnesse……89

4-2-4.le ciment……..89

4-2-5.l'eau……89

4-3.essai sur le mortier……89

4-3-1.résistance mécanique……..89

4-3-1-1.fabrication des éprouvettes……89

4-3-1-2.essai de flexion……90

4-3-1-3.essai de compression……90

4-4.programme des essais sur les murets……91

4-4-1.introduction……91

4-4-2.matériel utilisé……91

4-4-3.méthodologie de confection des murets……..91

4-4-4.renforcement des murets…….94

4-5.essai de compression diagonale…….97

4-5-1.principe de l'essai……97

4-5-2.dispositif d'essai……..97

4-5-3.paramètres expérimentaux…….98

4-5-3-1.contrainte de cisaillement diagonale……98

4-5-3-2.déplacement latéral et ductilité……98

CHAPITRE5 :résultats et interprétations

5-1.introduction……100

5-2.résultats expérimentaux sur les matériaux……101

5-2-1.la pierre……101

5-2-1-1.caractéristiques mécanique……..101

5-2-1-2.caractéristique physique……..101

5-2-1-3.caractéristique géométrique…….101

5-2-2.les sables……..101

5-2-2-1.l'analyse granulométrique……...101

5-2-2-2.l'équivalent de sable…….104

5-2-2-3.la masse volumique……..106

5-2-3.résultats sur le mortier à l'état durci……...106

5-3.résultats expérimentaux sur les murets……..108

5-3-1.comportement des murets témoins……..108

5-3-2.comportement de mur MD1 renforcée en plaque d'agrafage suivant les deux directions de diagonale……110

5-3-3.comportement de mur MJ1 renforcée par un plaque d'agrafage suivant les joints horizontaux et verticaux……111

5-3-4.comportement de mur MB1 renforcée par un plaque d'agrafage au dessus du mur.111

5-3-5.comportement de mur MJ2 renforcée par un plaque d'agrafage suivant les joints horizontaux et verticaux…….112

5-3-6.comportement de mur MD2 renforcée par un plaque d'agrafage suivant un seul direction de diagonale…….113

5-3-7.comportement de mur MB2 renforcée par un plaque d'agrafage à l'intérieur du joint horizontal……114

5-4.conclusion…….114

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE1

Tableau1-1.valeurs de f_{xk1} pour un plan de rupture parallèle aux lits de pose suivant la norme XP P10 202(DTU,1985)…….16

Tableau1-2.valeurs de f_{xk2} pour un plan de rupture perpendiculaire aux lits de pose suivant la norme XP P10 202(DTU ,1985)…….17

CHAPITRE2

Tableau 2-1.dureté(classification générale) [de vigan (2003),p.759]……29

Tableau2-2.dureté des calcaires[Bajeux(2013 a),chap.10,p16]…….29

Tableau2-3.résistance à la compression et à la traction [d'après socotec(2009),p.2]……..32

Tableau 2-4.caractéristiques principales des pierres calcaires les plus courantes en façade

[Virolleaud (2011),p.175]……33

CHAPITRE4

Tableau4-1.la composition de $1m^3$ de mortier……86

CHAPITRE5

Tableau5-1.contrainte de rupture de carotte de pierre……101

Tableau5-2.la masse volumique de pierre……..101

Tableau 5-3.analyse granulométrique de sable concassée (0/3)……102

Tableau5-4.analyse granulométrique de sable de hassi-bahbah+sable concassée……104

Tableau5-5.résultat de l'équivalent de sable de hassi bahbah……105

Tableau5-6.résultat de l'équivalent de sable pour les deux……105

Tableau5-7.nature et qualité de sable en fonction de (ESV et ESP)……..106

Tableau5-8.résultats en compression et en traction par flexion sur des éprouvettes 4x4x16 réalisés en mortier de ciment……..106

Tableau5-9.les huits murets……107

SOMMAIRE

ملخص

لقد أنجزت في بعض الدول عدة دراسات حول رد فعل المنشآت الحجرية الحاملة في طاقتها القصوى .كان هذا النمط من البناء مستعملا بكثرة في بلادنا قبل ظهور الخراسانة .ثم همش بشكل يكاد أن يكون تاما في أيامنا.

في إطار هذا العمل وجهنا اهتمامنا نحو الدراسة التجريبية للجدران التي يستعمل في بنائها الحجارة غير المدعومة والمدعومة بألياف حديدية مسطحة بوضعيات مختلفة ثم اختبارها تحت ضغط وحيد المحور إلى غاية الانهيار.

نحاول من خلال هذا العمل أن نظهر تأثير التعزيز على سلوك المنشآت الحجرية والبحث عن أفضل شكل للتعزيزات

الكلمات المفتاحية: الحجارة، ضغط، تعزيزات البناء، الحائط، ألياف حديدية مسطحة، القص، تمزق

RESUME

Diverses études sur le comportement des structures en maçonneries porteuse à l'état ultime ont été réalisées par certains pays ,ce mode de construction à été très utilisé avant l'avènement du bèton,cependant il est complètement marginalisé de nos jours.

Dans le cadre de ce travail ,nous nous intéressons à l'étude expérimentale de panneaux de maçonnerie en pierre naturelle non renforcée et des panneaux renforcée par des plaques d'agrafages plats avec plusieurs dispositif testés sous chargement uni axial jusqu'à la rupture.

Nous tenterons de montrer l'influence de renforcement sur le comportement des structures en maçonneries étudiées est chercher le meilleur dispositif pour le renforcement.

Mots-clès :pierre,compression,renforcement,maçonnerie,murets,plaquesd'agrafageplats, cisaillement, rupture.

ABSTRACT

Various studies on the behavior of the structures in carrying masonry in an ultimate state were carried out all over the world .in our country ,this method of construction was very much used before the advent of the concrete ,however it is completely marginalized nowadays.

Within the frame work of this work ,we are interested in the experimental study of panels of stones unreinforced and reinforced panels by flat staple plates with several device tested under uniaxial loading until the rupture.

We try to show the influence of reinforcement on the behavior of the studied masonry structures is look for the best system for reinforcement.

Key words:stone,compression,reinforcements,masonry,walls,flat staple plates, shear ,rupture.

Introduction générale

L'utilisation de la maçonnerie dans la construction des bâtiments est une pratique généralisée dans de nombreux pays. Dans les pays du tiers monde, la plupart des maisons de campagne et dans certains quartiers défavorisés des villes sont construites en maçonnerie porteuse.

Les expériences désastreuses des séismes tel que, celui qui s'est produit à EL-ASNAM (1980) en ALGERIE, à COLINGA (1982) en CALIFORNIE, à POPAYAM (1983) en COLOMBIE, au MEXIQUE (1986) et tout récemment au CAIRE (1997) en EGYPTE, en GRECE, en TURQUIE (1999) et à AIN-TEMOUCHENT (1999) en ALGERIE, témoignent de la nécessité de réglementer la construction en maçonnerie, qui est réalisée généralement sans contrôle.

La maçonnerie présente un comportement très complexe, ceci est du essentiellement à l'hétérogénéité des matériaux et des techniques presque artisanales associées à sa production, qui en font un matériau très variable, difficile à normaliser.

La plupart des règlements existants simplifient le comportement de la maçonnerie dans le but de fournir des critères pratiques pour l'analyse et le calcul des structures. Ces critères comportent, en général, l'utilisation des modèles linéaires qui considèrent la maçonnerie comme un matériau homogène. Ils sont proposés sur la base de propriétés mécaniques déterminées au moyen d'essais simples sur des petits murs ou des prismes, ce qui reste insuffisant pour décrire le comportement mécanique d'une structure réelle.

Les études analytiques et expérimentales sur le comportement non-linéaire de la maçonnerie ne sont pas nombreuses. La plupart des travaux publiés proposent des modèles simplifiés qui sont incapables de représenter tous les mécanismes de rupture, caractéristique de la maçonnerie, spécialement ceux associés aux DECOLLEMENT, GLISSEMENT et FROTTEMENT.

C'est pourquoi l'objectif de notre travail est de faire des essais expérimentaux, sur des murs en maçonnerie en utilisant des matériaux locaux. Ces essais tiendront compte des caractéristiques d'hétérogénéité de la maçonnerie et les différents mécanismes de rupture, précités.

Notre étude est composé de cinq chapitre :

Chapitre1 :comportement des murs en maçonnerie

Chapitre2 :présentation de :pierre, joint, mortier, les types de maçonneries, l'architecture rurale traditionnelle

Chapitre3 : la rèparation

Chapitre4 : présentation des matériaux et les techniques expérimentales utilisées

Chapitre 5 : résultats et interprétations

Chapitre 1 :comportement des murs en maçonneries

1-1-introduction :

Il est nécessaire de souligner que la notion de la maçonnerie n'est pas comprise de la même façon par tous les auteurs ,certains déterminent cette résistance d'éprouvettes de hauteur d'étage ,d'autres utilisent de petites éprouvettes .**[1]**

Dans le premier cas ,la résistance obtenue est la résistance du mur ,qui est directement utilisable puisque elle intègre l'influence de l'élancement .

Dans le second cas ,on obtient la résistance du matériau qui l'on doit connaitre si l'on veut utiliser les méthodes théoriques à l'aide desquelles on introduira l'influence de l'excentricité et de l'élancement ,ces méthodes sont établies dans l'hypothèse de la connaissance de la résistance à la compression simple du matériau homogène .

Sur ce dernier point ,on peut noter que ,pour des murs de maçonnerie ,certains essais montrent que l'influence des facteurs structurels (élancement et excentricité) peut dépendre non seulement de la loi de comportement ,seule caractéristiques par laquelle les propriétés mécaniques du matériau interviennent dans les formules (et qui est suffisante dans le cas des matériaux(homogène),mais aussi d'autres facteurs tels que : l'effet de succion ,la qualité de la mise en œuvre ,..

Dans ce chapitre nous présentons :

-facteurs influents sur la résistance de la maçonneries

-comportement de la maçonneries à la compression, à la traction, vis-à-vis à la charge concentrèe,à la flexion,sous charges diagonale,au cisaillement

1-2-Facteurs influents sur la résistance de la maçonnerie :

Mode d'essai en compression :

Dans le cas de la résistance à la compression des produits en maçonnerie et en particulier les produits en béton cellulaire ,il est connue que des produits du même matériau mais de dimensions différentes ont des résistances différents alors que les murs construits avec ces produits développent des résistances mécaniques très proches ,par souci de simplification et pour éviter la confusion dans l'exploitation des résultats d'essais de facteurs de forme est introduit **.[1]**

Une des origines de l'existence des facteurs de forme réside sans doute dans les conditions expérimentales de mesure de résistance à l'écrasement ,en particulier ,les contraintes induites par les déformations gênées par le frettage des plateaux de la presse ,ou effets de bord,sont d'autant plus importantes que les produits testés sont moins élancés .

Selon ALKINSON (9) ,la diminution de la contrainte de rupture due à la réduction de l'effet de frettage est de l'ordre de 15% pour les blocs de béton et de l'ordre de 10% pour les briques pleines de terre cuite .

Sous l'effet du frettage, l'éprouvette est soumise à un état de contraintes triaxial ,on peut subdiviser l'éprouvette en trois zones :

Au niveau de la médiane :

L'état de contrainte est uni axial ;les fissures se propagent parallèlement à la direction des contraintes principales .

Au niveau des zones extrêmes :

L'état de contrainte est triaxial ;les fissures changent de direction.

Effet de la mise en œuvre :

Comme pour les autres matériaux de construction ,la maçonnerie est affecté également par la qualité de la mise en œuvre ,dans certains cas celle-ci est négligée et à conduit à adopter des coefficients de sécurité très grand dans les règlements qui ne tiennent pas compte des facteurs impliquée et de la possibilité d'optimiser la résistance mécanique .

Effet de la succion :

Pour assurer une résistance optimale à la compression ,il est nécessaire de limiter le départ de l'eau du mortier vers les blocs ,au moment du contact ,le diamètre moyenne des capillaires des blocs secs ou très faiblement imprègnes d'eau ,est en général ,inferieur à celui des capillaires des joints de mortier saturés d'eau ,il en résulte un mouvement d'eau dans le sens joint de mortier-bloc du à l'existence d'une pression motice résultent de la différence entre succion des blocs et la rétention du mortier (11).(12).

La vitesse de succion décroit rapidement au fur et à mesure que les capillaires des blocs s'imprègnent et que le diamètre moyen des capillaires du mortier diminue avec le progression de l'hydratation ,on peut s'attendre donc à des modifications de la cinétique d'hydratation du mortier et par conséquent à la diminution de la résistance mécanique en cas d'hydratation insuffisante .

Le départ de l'eau provoque également une regidification du mortier ce qui augmente son seuil de cisaillement en pendant ainsi son élasticité ,l'effet de ce phénomène est encore plus important dans le cas de chargement excentré

La solution la plus utilisé pour limiter ce phénomène consiste à mouiller les blocs avant le montage ,mais les blocs saturés d'eau développent une faible adhérence avec le mortier ,l'utilisation de retenteurs d'eau dans le mortier à tendance à limiter sensiblement ce phénomène .

Qualité d'exécution des joints :

Un nombre important de défauts peuvent provenir d'une mauvaise exécution ds joints ,plusieurs études ont été menées pour étudier ce facteur ,la comparaison de leurs résultats n'est pas possible puisqu'elles ont portés sur des blocs et des mortiers de type et des caractéristiques différents ,néanmoins il ressort de leurs conclusion que :

-la qualité d'exécution des joints verticaux n'affecte pas sensiblement la résistance à la compression par contre elle n'est pas négligeable dans le cas de charge horizontale .

-l'épaisseur excessive de joint horizontal à tendance à réduire sensiblement la résistances des maçonneries .

1-3-Comportement de la maçonnerie en compression axiale :

1-3-1-Introduction :

Les essais de compression axiale permettent d'évaluer les caractéristiques mécaniques et physiques des prismes ou des panneaux de maçonnerie.[2]

1-3-2-Comportement en compression uni axiale de la maçonnerie :

1-3-2-1Compression de la maçonnerie dans la direction normale de joint de mortier :

La résistance à la compression de la maçonnerie dans la direction normale aux joints de mortiers a été toujours considérée comme la propriété du matériau la plus pertinente, au moins jusqu'à l'introduction récente des méthodes numériques pour les structures en maçonnerie.[2]

Un essai a été fréquemment utilisé pour obtenir cette résistance en compression uniaxiale est celui sur prismes (figure 1.1.a), mais l'utilisation de ce type des spécimens recommandée par la norme américaine ASTM E 447 présente des résultats légèrement différents à ceux proposées par les recommandations de l'essai RILEM qui préconise de mesurer la résistance à la compression dans la direction normale aux joints de mortier présentant des joints de mortier horizontaux et des joints verticaux.

Le montage de cet essai est plus proche de la réalité, mais demande des mises en œuvre, installations et exécution de l'essai assez compliquée et nécessite des appareils adéquats.

Il est accepté communément que la résistance en compression uniaxiale réelle de la maçonnerie dans la direction normale aux joints de mortier peut être obtenue à partir de l'essai RILEM (figure 1.1.b)

Une compression uniaxiale dans la maçonnerie conduit à un état de compression triaxial dans le mortier et une compression bi axial avec traction dans les briques. Les fissures verticales apparaissent dans les unités le long de la ligne centrale du spécimen et le long du joint vertical. La résistance croissante conduit à un comportement plus fragile.

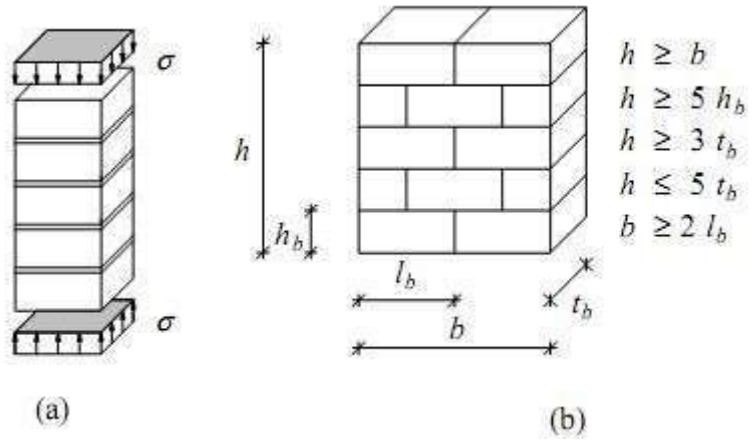


Fig. 1-1 : comportement uni axial de la maçonnerie sous chargement normal aux joints de mortier

(a) Schéma représentatifs pour l'essai sur un prisme
(b) Schéma représentatifs pour l'essai de RILEM

1-3-2-2Compression de maçonnerie dans la direction parallèle aux joints de mortier :

Les essais de compression uni axiaux dans la direction parallèle aux joints de mortier ont reçu sensiblement moins d'attention des chercheurs. Cependant, la maçonnerie représente un matériau anisotrope et la résistance à la compression appliquée suivant les joints horizontaux peut avoir une influence sur la force ultime de rupture.[2]

D'après Fouchal (2006,2007) et Lourenco (1996), le rapport entre les résistances à la compression parallèle et normale au joint de mortier horizontal est compris entre 0.2 et 0.8. Ces résultats ont été observés sur des éprouvettes de maçonneries qui sont constituées par des briques pleines et perforées à base d'argile, de calcium silicate et aussi du béton léger.

1-3-3Comportement en traction uniaxiale de la maçonnerie :

1-3-3-1Traction de la maçonnerie dans la direction normale aux joints de mortiers :

Pour le chargement de traction perpendiculaire aux joints de mortier, la fissuration est généralement causée par une faible résistance à la traction entre le joint de mortier et la brique.[2]

Dans la maçonnerie avec des briques ayant une faible résistance et plus grande résistance de traction entre le joint de mortier et la brique (exemple : briques creuses), les fissures peuvent se produire à cause d'un dépassement de la résistance à la traction dans les briques.

Comme approximation, la résistance à la traction de la maçonnerie dans ce cas peut être égalisée à la résistance à la traction de la brique.

1-3-3-2Traction de la maçonnerie dans la direction parallèle aux joints de mortier :

Pour le chargement de traction parallèle aux joints de mortier un programme complet d'essai a été installé par Backes (1985).

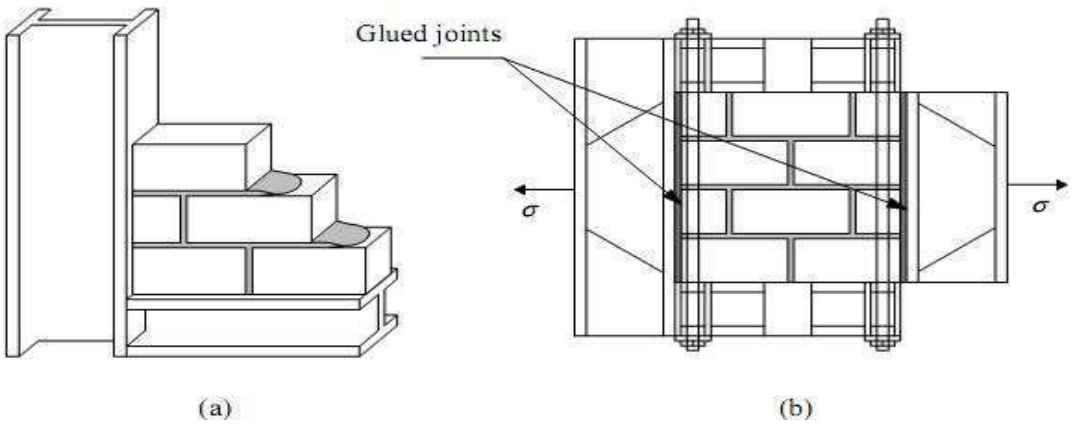


Fig. 1-2 :l'installation de l'essai de résistance à la traction pour la maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier .

Deux différents types de fissurations sont possibles, elles dépendent de la résistance relative des joints de mortier et des briques (figure 1.3.).

Le premier type de fissuration prend une forme d'escaliers suivant les joints verticaux et horizontaux. Le deuxième type de fissuration se produit presque verticalement par rapport aux briques et aux joints de mortier horizontaux.

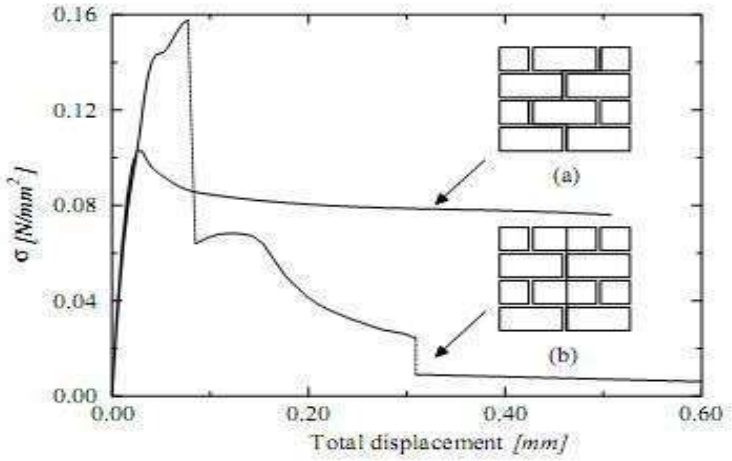


Fig. 1-3 :diagramme typique contraintes –déplacements pour l'essai de résistance à la traction dans une maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier.

1-3-4Comportement bi axial de la maçonnerie :

Le comportement constitutif de la maçonnerie sous états bi axiaux de contraintes ne peut pas être complètement décrit du comportement constitutif sous conditions du chargement uniaxials. L'influence de l'état de contraintes bi axial a été étudié pour atteindre une valeur maximale dans le but de fournir une enveloppe bi axiale de la contraintes qui ne peut être décrite uniquement qu'à partir des contraintes principales, parce que la maçonnerie est un matériau anisotrope. Par conséquent, l'enveloppe de résistance bi axiale de la maçonnerie doit être décrite à partir des vecteurs des contraintes dans un ensemble fixé de matériau ou, à partir des contraintes principales et l'angle de rotation entre les contraintes principales et les axes du matériau.[2]

Des essais ont été effectués par Page (1981) et (1983) sur des briques pleines en argile avec une échelle de 1/2. L'orientation des contraintes principales par rapport aux axes du matériau et le rapport des contraintes principales ont considérablement influencé le mode de fissuration et la résistance, ces résultats sont présentés dans la (figure 1.4).

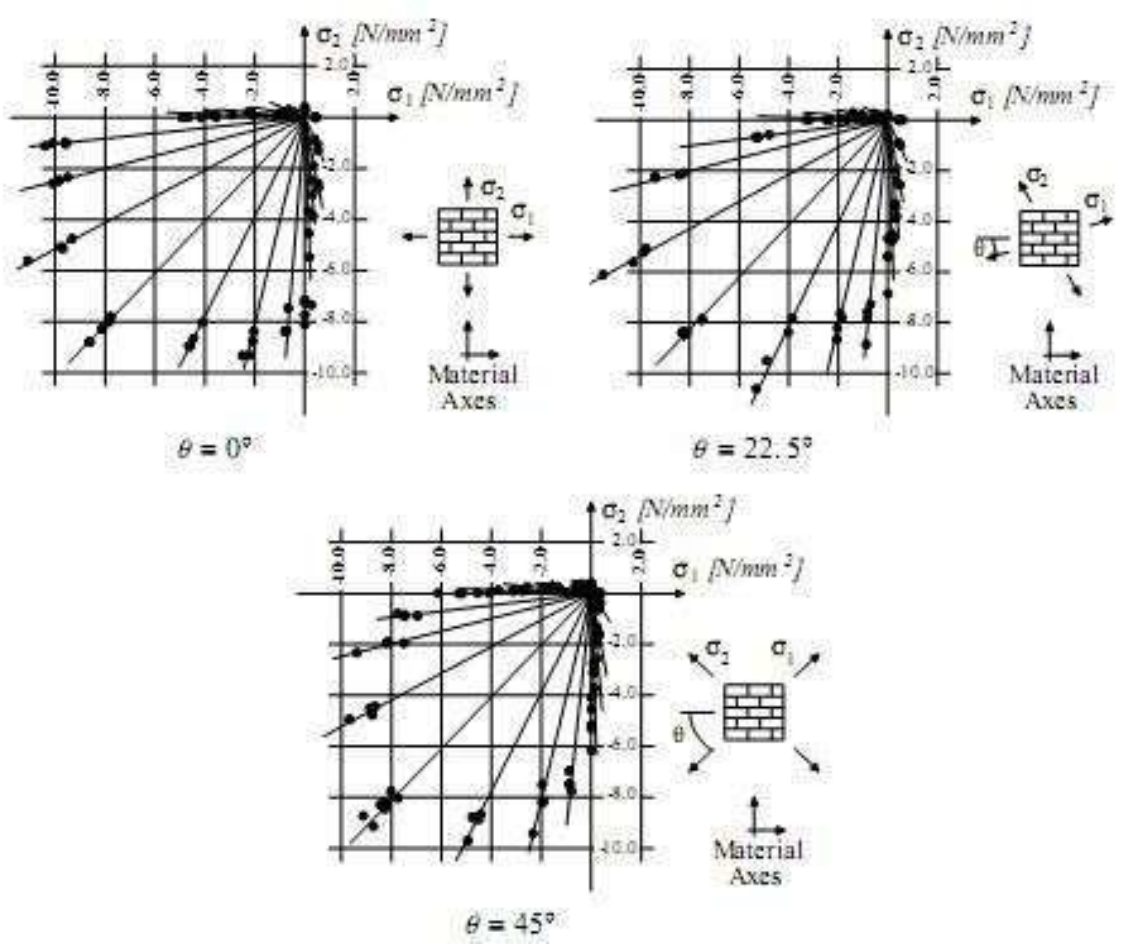


Fig. 1-4 :comportement bi axial de la maçonnerie

Pour la traction uni axiale, la rupture se fait par le glissement et la fissuration des joints de mortier horizontaux et verticaux. L'influence de la résistance à la tension latérale sur la résistance à la traction n'est pas connue parce qu'aucun résultat expérimental n'est disponible. La contrainte de compression latérale diminue la résistance à la traction qui peut être expliquée par l'endommagement induit dans le matériau composite, par micro- glissement des joints et la microfissuration des briques.

Dans le cas d'un chargement traction-compression la fissuration survenue par fissuration et glissement des joints seuls ou dans un mécanisme combiné qui implique les briques et des joints. Pour la compression bi axiale la fissuration s'est typiquement produite par la rupture du modèle à mi-épaisseur dans le plan parallèle aux surfaces libres indépendamment de l'orientation de contraintes principales.

Pour le rapport des contraintes principales, l'orientation joue un rôle significatif et la fissuration s'est produite dans un mécanisme combiné impliquant la fissuration des joints

de mortier communs et une rupture latérale. L'augmentation de la résistance à la compression sous compression bi axiale peut être expliquée par le frottement dans les joints et le frottement interne dans les briques et le mortier.[2]

Pour le béton, la fissuration semble être en grande partie indépendante du chemin de chargement ce qui confirme la présence d'un seul mode de fissuration, c.-à-d.une progression continue de la fissure à un micro-niveau.

Actuellement, il n'est pas connu si la fissuration dans la maçonnerie obtenue par des chercheurs est valide pour un chargement non proportionnel, particulièrement parce que différents modes de fissurations peuvent être se produire.

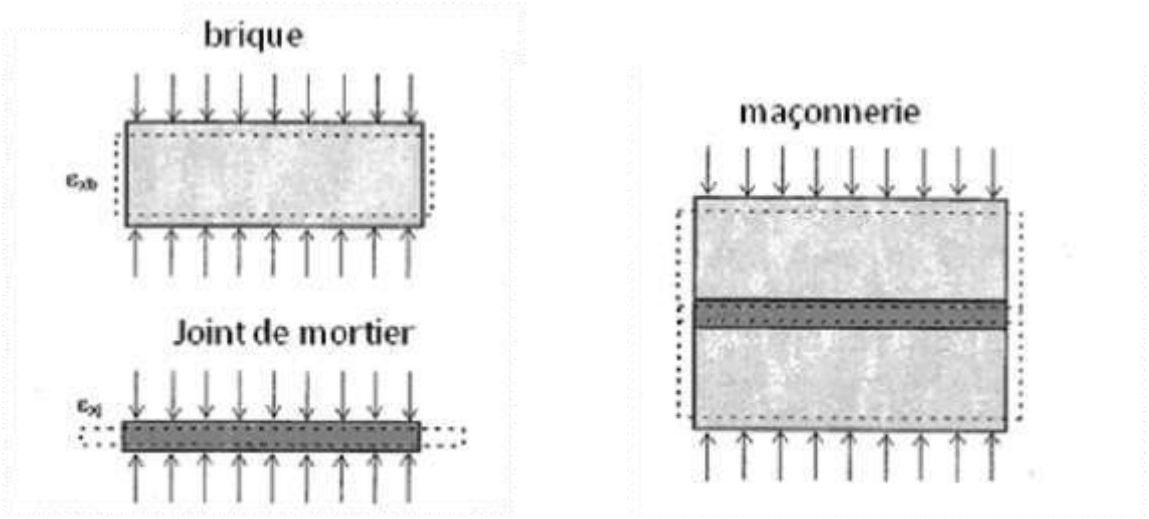
Un autre point c'est que les données expérimentales pour le comportement de la maçonnerie sous chargement bi axial sont rares même si le comportement de la maçonnerie est influencé certainement par l'état bi axial de contraintes. On note encore que la résistance représentée sur la figure 1.4 précédente est tirée à partir certains types limités de maçonneries.

Différentes résistances ainsi que différents modes de fissuration sont susceptibles d'être trouvés pour les différents matériaux, formes et géométrie de briques.

1-3-5Mècanisme de rupture sous compression axiale :

Les structures en maçonnerie présentent un bon comportement à la compression. Elles ont toujours été utilisées comme murs porteurs, poteaux ou structures en arcs, et cela depuis plusieurs milliers d'années.[2]

Les murs en maçonnerie chargés axialement dans la direction perpendiculaire aux joints de mortiers ont toujours observé des comportements linéaires pour de faibles chargements. Aussitôt que la charge est augmentée, le matériau devient non linéaire et des fissures verticales apparaissent à des niveaux de chargements inférieurs à la capacité portante du mur. Le mur est ainsi divisé en plusieurs colonnes, jusqu'à ce que le système n'est plus en mesure de supporter les charges qui sont appliquées, devient instable, et la rupture apparait. Ce type de rupture est dû à l'interaction entre les unités de briques et les joints de mortier, résultant des différentes déformations. Quand un assemblage de maçonnerie est soumis à la compression, les briques et le mortier subissent des déformations latérales, mais les deux matériaux ont des propriétés différentes. En général le mortier a un faible module d'élasticité, et un coefficient de Poisson plus important que ceux des briques. Ainsi les déformations latérales dans le mortier seront plus importantes que celles des briques.



(a) Comportement individuel εxj›εxb (b) comportement assemblage εxj =εxb

Fig. 1-5 :comportement individuel et de l'assemblage des briques et du mortier en compression.

A l'équilibre de l'assemblage, les déformations latérales deviennent égales à cause des contraintes de frottement et d'adhésion entre les briques et le mortier. Cet effet induit des contraintes de tension et de compression dans les deux matériaux. De cet état de contraintes, les deux matériaux se trouvent dans un état triaxial des contraintes.

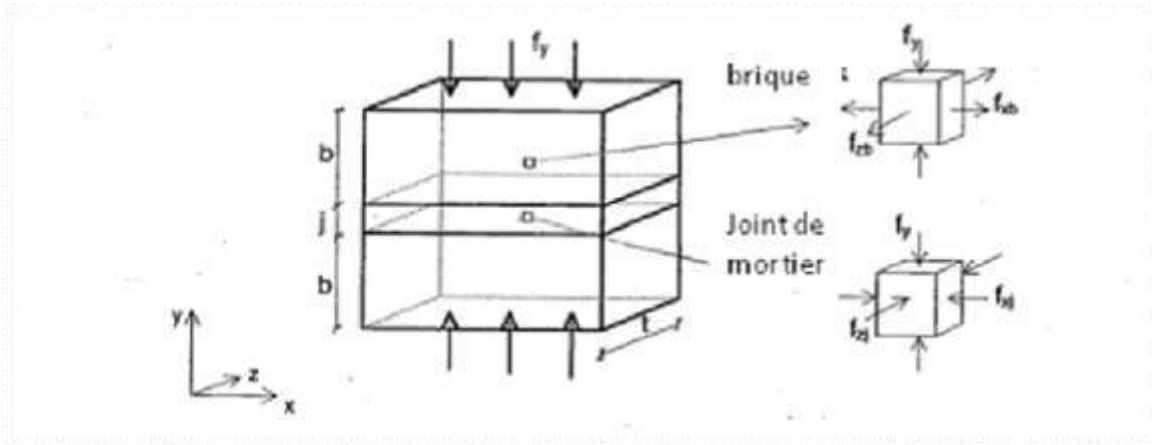


Fig. 1-6 :état des contraintes dans les briques et le joint de mortier

La résistance à la compression du mortier est augmentée grâce à l'effet positif de confinement produit par l'effet triaxial latéral. Cependant, le mortier est capable de supporter des contraintes plus importantes au niveau du joint. Par contre, au niveau des briques, la combinaison de la compression et de la tension latérale diminuent la résistance des briques, et la rupture des briques apparait à des contraintes de compression inférieures que celles obtenues en absence de tension latérale.[2]

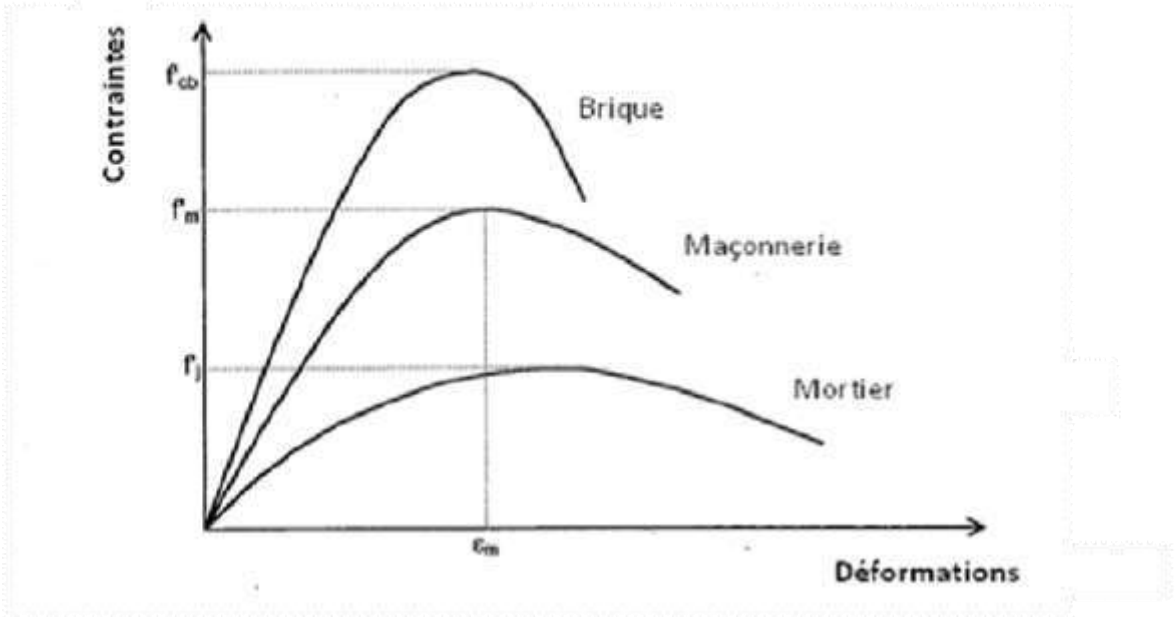


Fig. 1-7 :relations type contrainte-déformation du mortier ,brique et assemblage de briques

La figure 1.7 montre les relations contraintes-déformations type pour le mortier, les briques et les assemblages d'unités de briques. On constate que la résistance à la compression des briques est généralement supérieure à celle du mortier, mais la résistance à la compression des assemblages des unités de briques est inférieure à celle des unités de briques, et supérieure à celle du mortier, puisque le mortier se trouve confinée par un effet triaxial.

1-4-comportement de la maçonnerie vis-à-vis-à la charge concentrée :

Si la majorité des efforts appliqués au droit d'un mur sont uniformes et amenée par le poids de la structure au dessus ,les charges concentrées sont dues aux impacts d'extrémités de poutre ,de linteaux ou arc,etc …[3]

Une maçonnerie peut résister à un chargement concentrée si celle- ci est correctement positionnée et suit une répartition à 45° similaire à celle montrée en figure 1-8

Page et Hendry [page et col,1987]ont étudié expérimentalement et analytiquement la comportement de la maçonnerie sous une charge concentrée ,cette étude à prouvé que les facteurs suivant augmentent la contrainte dans la région soumise à une charge concentrée :

-Le rapport de la section chargé à la longueur du mur .

-la position de la charge le long du mur .

-si la charge se prolonge à travers la pleine largeur du mur ou est limitée à une partie de la largeur .

-si la charge est appliquée par une plaque rigide ou flexible .

-le type et la résistance des matériaux de maçonnerie .

-le rapport de longueur-largeur du mur et de son épaisseur .

La présence du chargement de compression au dessus du mur de maçonnerie .

-l'application des charges multiples .

Page et Hendry [page et col ,1987]ont suggère que pour une charge centrale de bande la longueur utile peut être prise comme longueur réelle mais inférieur à (b+1.2h),ou b est la longueur de l'extrémité chargée du secteur et h est la taille du mur ,ceci est basée sur le concept que la diffusion de la charge sera contenue dans une ligne de 45° à partir du bord du secteur chargé et que l'effort de compression vertical sera relativement uniforme à 0.6 de la taille de mur à partir du haut [3]

Appliquant cette définition de longueur utile à un mur de 2.5m de hauteur portant une poutre de 150 mm dont la largeur signifierait que la longueur du mur à considérer ,cas du chargement central ,serait de 3.15m donnant un rapport de la section chargé de 0.048

La discussion ci –dessus s'applique seulement à la maçonnerie construite avec les unités de maçonnerie pleines ,Kirtshig et Kasten [Kirtshig et col,1979]ont trouvé qu'il n'ya aucune augmentation de contraintes pour les charges concentrées appliqués à l'extrémité d'un mur construit avec des blocs de maçonnerie perforés ,les résultats obtenus par page et col [page et col ,1987] sur les charges concentrées ont prouvé que le mode de rupture pour ce type de chargement se produit dans les fentes des blocs plutôt que par une rupture vertical.

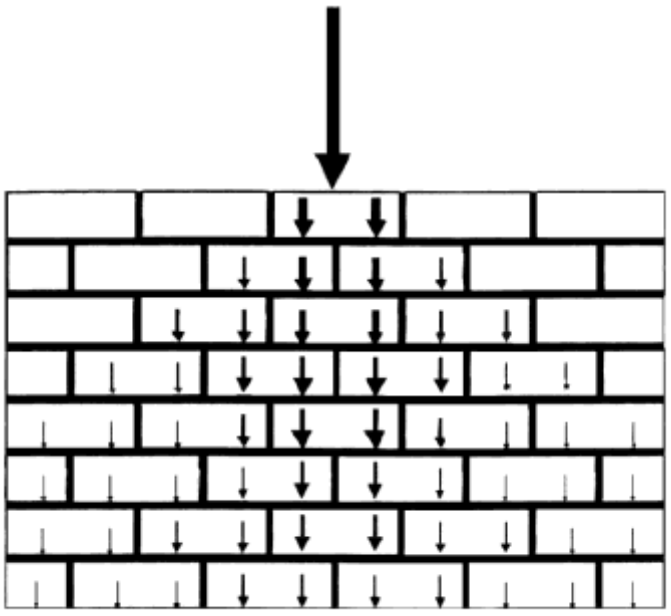


Fig. 1-8 :propagation à 45º de la charge concentrée dans un mur

1-5-comportement en flexion des murs en maçonnerie :

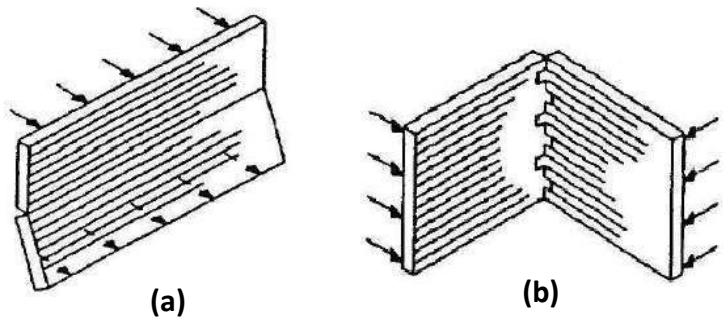
1-5-1-flexion uni axiale :

Le comportement hors plan est essentiellement une conséquence du comportement dans le plan ,en effet ,un exemple simple ,la résistance d'une poutre sous flexion 3 ou 4 points est la conséquence de la résistance à la traction par flexion .normalement ,la résistance à la traction par flexion est plus importante que celle obtenue sous traction directe .[4]

Le comportement non linéaire de maçonneries sous traction directe à été étudié par pluijm (PLUIJM,1997) .il est noté que le comportement hors plan est considère plus fragile que celui dans le plan ,et donc plus difficile à caractériser expérimentalement ;mais aussi numériquement .

La stabilité des murets en maçonnerie de brique ,chargés latéralement dépend de leur résistance à la traction par flexion .cette résistance dépend des facteurs qui conditionnent l'adhésion brique mortier .

Si un mur appuyé horizontalement sur sa barre supérieure et inférieure ,sa résistance latérale dépend de la résistance à la traction par flexion développée à travers le joint .si en plus ,il est appuyé latéralement sa résistance latérale dépend aussi de sa résistance à la traction par flexion développée le long de la direction perpendiculaire au lit de joint (voir figure 1-9) ,cette résistance est généralement trois fois plus grande que celle à travers les joints si l'adhésion (mortier –brique) est bonne .la résistance à la flexion parallèle au lit de joint est conditionnée par la résistance à la traction par flexion des briques ,si l'adhérence est mauvaise ,cette résistance est conditionnée principalement par la résistance au cisaillement développée dans le joint à l'interface brique mortier (PAGE et HENDRY,1987).[4]



(a) :rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits des joints
(b) :rupture le long de la ligne parallèle aux lits des joints
Fig. 1-9 : comportement à la flexion des murs en maçonnerie (NF EN 1996-1-1 ,2006).

En particulier le comportement de la maçonnerie dans la direction de la flexion verticale est très complexe . en effet ,pour la flexion horizontale ,on n'observe qu'un seul mode de rupture ,la ligne de fissure apparait dans les joints d'assises (joints horizontaux) (figure 1-10a).tandis que pour la flexion verticale ,deux modes de rupture ,qui dépendent des résistances relatives des constituants de la maçonnerie ,sont possible.le premier traduit une rupture ou ‹‹ ligne de fissure ›› en adéquation avec une vision homogénéisée du milieu (figure 1-10c) ,l'hétérogénéité du milieu n'est pas mise en exergue .le second se traduit par une ligne de rupture en escalier ,sous forme de zigzag ou forme denté (figure 1-10b) ce second mode traduit clairement la discontuitè du matériau ,l'échelle de la brique constituve rt celle du mortier sont clairement identifiées .pour les murs dont la résistance d'adhérence du mortier est relativement forte par rapport à la résistance des briques constituves ,la ligne de rupture va avoir tendance à apparaitre comme une fissure verticale au travers des briques et des joints verticaux (figure 1-10c) .la rupture de type zigzag alterne la propagation de fissure le long d'un joint vertical puis le long d'un joint d'assise (figure 1-10b).[4]

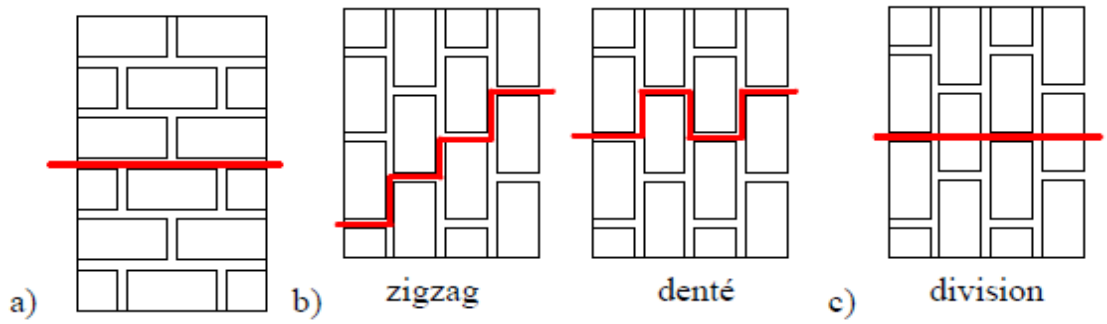


Fig. 1-10 :mode de rupture sous flexion uni-axiale :a)flexion horizontale ;b) flexion verticale zigzag ,denté) ; c) flexion verticale (division) (GAZZOLA,1986)

1-5-2-flexion bi –axiale :

Un mur travaille à la flexion bi-axiale lorsqu'il est en appui sur 3 ou 4 de ses extrémités ou bords (figure 1-11) (DRYDSAKE et coll,1988) ,ou bien lorsqu'il porte sur 2 bords adjacents .le mécanisme de rupture des murs sous flexion bi-axiale est très complexe car sous cette condition de charge ,la distribution du moment de flexion n'est pas monotone ;mais varie à travers le panneau .les modes de rupture caractéristiques dépendent ,des dimensions du panneau ,des conditions aux limites ,ainsi que des résistances relatives des unités (briques ,locs) et joint d'adhésion ou mortier .[4]

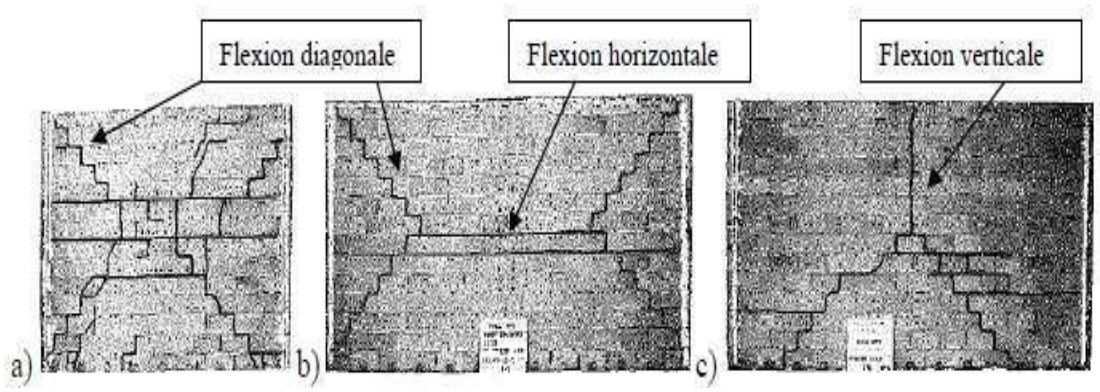


Fig. 1-11 :modes de rupture des murs :a)et b) mur supportés sur 4 bords ;c) mur supportés sur 3 bords (DRYSDALE,1988)

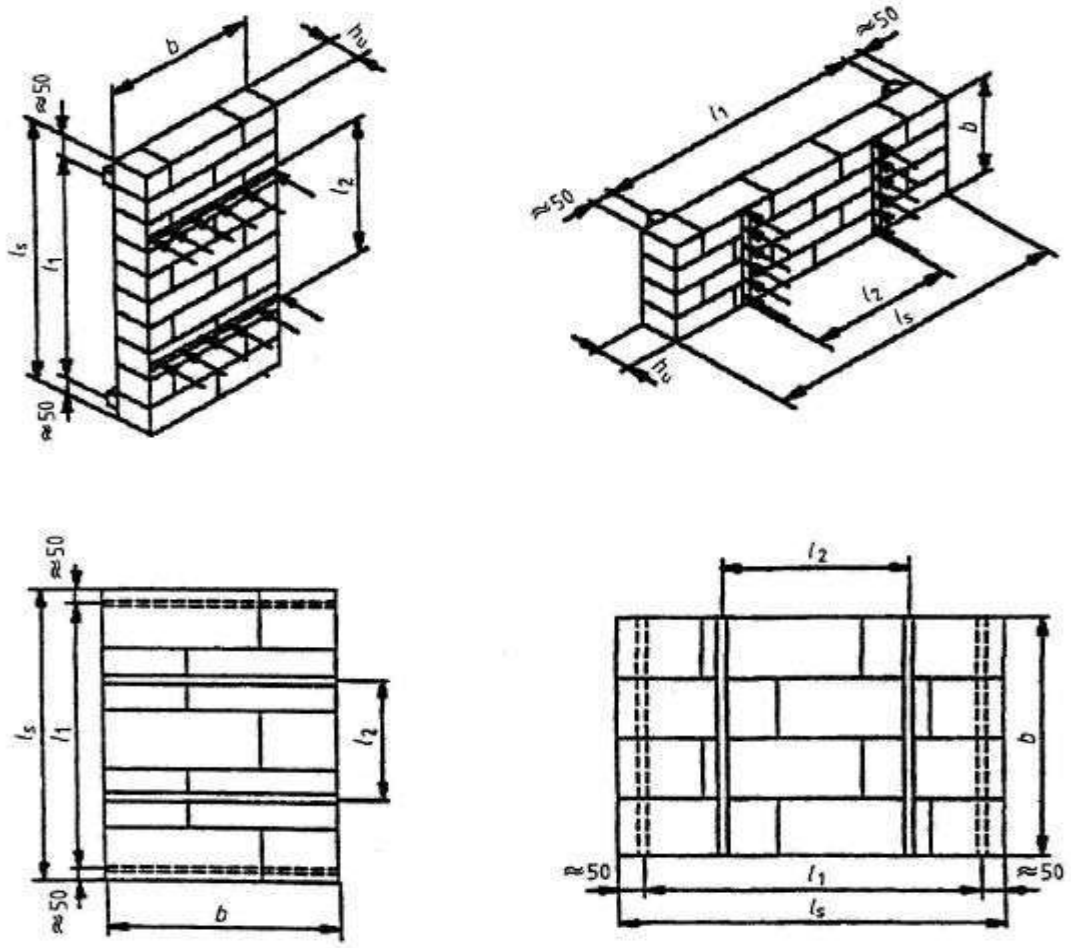
1-5-3-essai de résistance à la flexion suivant l'EUROCODE6 et DTR C2.45 :

1-5-3-1-essai de résistance à la flexion :

Le but de l'essai est la détermination de la résistance en flexion sous l'action des forces appliquées perpendiculairement à son plan suivant DTR.C2-45 :‹‹ conception et calcul des maçonneries ›› (DTR.C2-45,1997). On détermine également la flèche maximale . l'essai consiste à soumettre le plan du muret à un système de charge uniforme au moyen de vérins dotés d'indicateurs de charge (capteurs de force) pour la lecture des forces appliquées . un système de charges verticales peut être utilisé pour voir son influence .dans cet essai on distingue 2 types de flexion (WIELAND,1996) :

-flexion dont la déformée est verticale (appuis horizontaux –voir figure 1-12a).

-flexion dont la déformée est horizontale (appuis verticaux –voir figure 1-12 b).[4]



(a) (b)

(a) :plan de rupture parallèle au lit de pose (flexion horizontale)

(b) :plan de rupture perpendiculaire au lit de pose (flexion verticale)

Fig. 1-12 :test flexion 4 points (EUROCODE 6) (EUROCODE 6,1996).

1-5-3-2-résistance caractéristique à la flexion fxk :

Deux plans de rupture privilégiés sont considères pour déterminer la résistance caractéristique à la flexion f_{xk1} ou f_{xk2} (MARCEL et coll,2009) ;(voir tableau 1-1 et 1-2)[4]

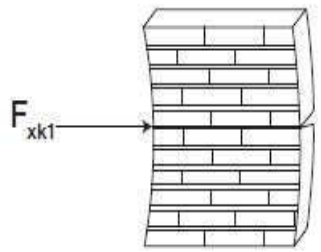
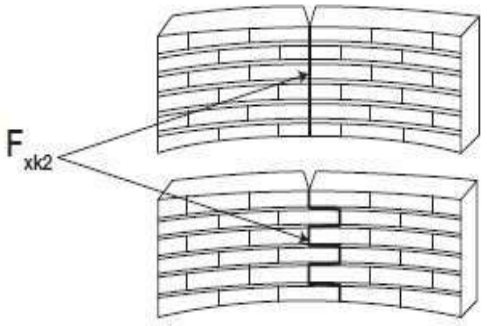
Plan de rupture parallèle au lit de pose	Plan de rupture perpendiculaire au lit de pose
	

Fig. 1-13 :définition des résistances caractéristiques à la flexion (MARCEL et coll,2009)

Tableau 1-1 :valeurs de f_{xk1} pour un plan de rupture parallèle aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU ,1985)

Eléments de maçonnerie	f_{xk1}(N/mm^2)		
	Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces	Mortier allège
	Fm 5N/mm^2 ou 10 N/mm^2		
Terre cuite	0.10	0.15	0.10
Silico-calcaire	0.10	0.20	Non utilisé
Béton de granulats courant ou légers	0.10	0.20	Non utilisé
Béton cellulaire Auto clave	0.10	0.15	0.10
Pierre reconstituée	0.10	Non utilisé	Non utilisé
Pierre naturelle prêtais	0.10	0.15	non utilisé

Tableau 1-2 :valeurs de f_{xk2} pour un plan de rupture perpendiculaire aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU,1985)

Eléments de maçonnerie		f_{xk2} (N/mm^2)		
		Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces	Mortier allège
		Fm 5 N/mm^2 ou 10 N/mm^2		
Terre cuite		0.40	0.15	0.10
Silico-calcaire		0.40	0.30	Non utilisé
Béton de granulats Courant ou légers		0.40	0.30	Non utilisé
Béton Cellulaire autoclave	ρ‹400 Kg/mm^2	0.20	0.20	0.15
	$\rho \geq 400$ Kg/mm^2	0.40	0.30	0.15
Pierre reconstituée		0.40	Non utilisé	Non utilisé
Pierre naturelle prêtais		0.40	0.15	Non utilisé

1-6-comportement de la maçonnerie sous charge de cisaillement et sous charges diagonales :

D'un point de vue pratique ,il s'avère nécessaire de fixer un critère pour définir la résistance d'un mur en maçonnerie sous charges latérale .de nombreuses normes proposent le calcul de cette résistance sur la base d'une contrainte de cisaillement ‹‹ nominale ›› qui pourrait être déterminée expérimentalement [Lafuente ,1990] .[3]

Différents types d'essais ont été proposés pour déterminer d'une manière simple et pratique la contrainte de cisaillement :

-les essais de cisaillement caractérisent le mécanisme du type coulomb au niveau des joints (figure 1-14)

-les essais sur petits murs soumis à une traction diagonale (figure 1-15).

1-6-1-essais de cisaillement :

L'essai le plus simple à exécuter et à contrôler en laboratoire pour caractériser le comportement de la maçonnerie sous charges de cisaillement est celui montré sur la figure 1-14d . en ce qui concerne les autres types d'essais ,il à été constaté expérimentalement l'apparition d'efforts de flexion qui modifient les conditions de cisaillement recherchées.[3]

Le modèle dont il est question est constituée d'un ensemble de trois blocs de maçonnerie ,ou celui du milieu se trouve coupé en deux .les deux moitiés sont séparées par un joint vertical vide ,d'un 1cm de large .les charges e cisaillement s'appliquent sur cette pièce au milieu ,tandis que les pièces externes peuvent être soumises à l'action de charge verticale .

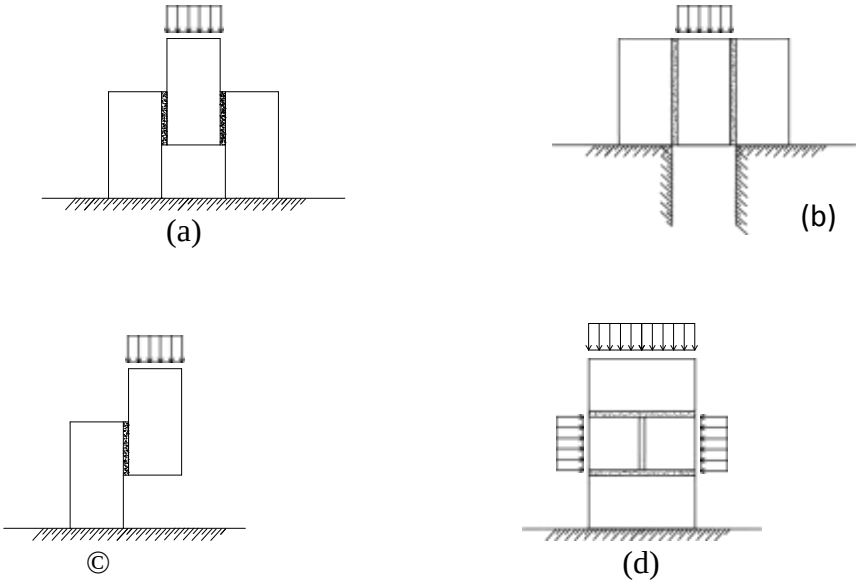


Fig. 1-14 :essais de cisaillement

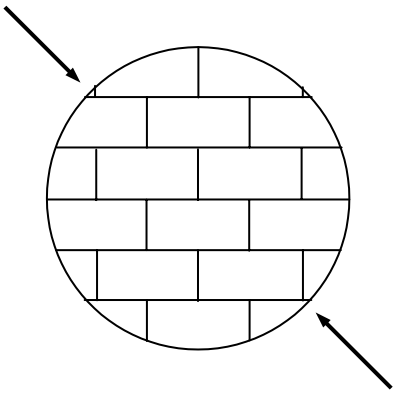


Fig. 1-15 :essais de traction diagonale

Les études de Meli et Reyes [cité par Lafuente ,1990] ,témoignent de l'existence de différents types de comportement à la rupture :

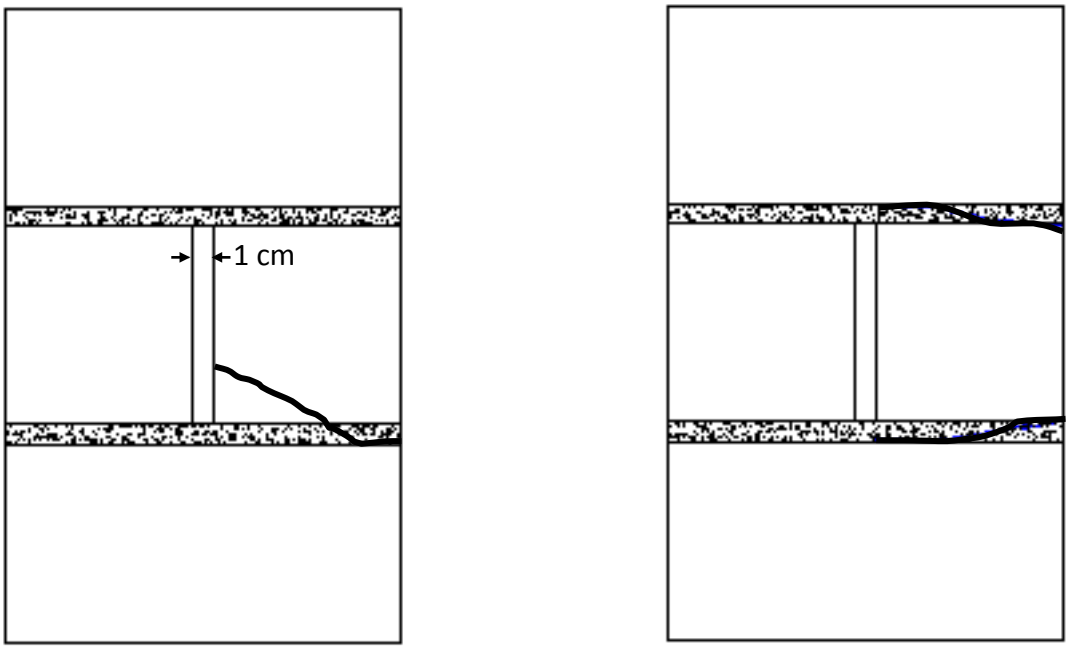
-rupture de la pièce en maçonnerie par cisaillement (figure 1-16a).

-glissement au niveau des joints (rupture par adhérence (figure 1-16b)).

Meli et Reys rapportent aussi quelques cas de fissuration par rupture du mortier .

Ce types d'essais aboutit à l'obtention de courbes telles que celles de la figure 1-17 [Anand ,1985] ,qui permettent la détermination des coefficients d'adhérence et de friction (c et φ) .les coefficients de dispersion sont élèves .

Les références consultés rapportent que dans ce type d'expériences ,la ruine survient soudainement et d'une manière fragile ,ce qui rend impossible d'observer la propagation de la fissure .



(a) (b)

Fig 1-16 :schema de fissuration

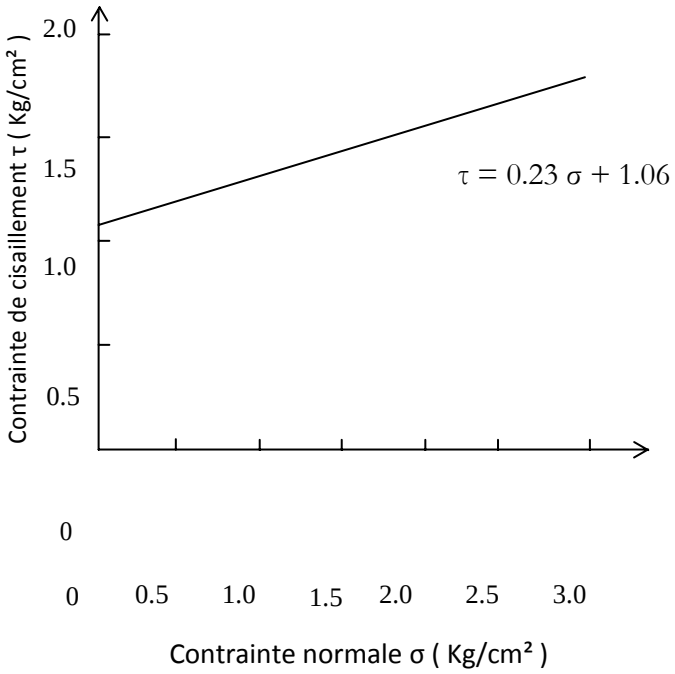


Fig. 1-17 :résistance au cisaillement en fonction de la charge verticale

1-6-2- essai de traction diagonale :

Ce sont les essais les plus répandus pour la détermination de la résistance à la traction de la maçonnerie ,ces expériences sont inspirés de ‹‹ l'essai brésilien ›› (figure 1-18),conçu initialement pour l'évaluation de la résistance du béton .[3]

Johnson et Thompson [Johnson et col ,1967] ,ont décrit les essais réalisés sur des disques en maçonneries soumis à des charges de compression diagonale .les résultats obtenus varient selon la direction des charges par rapport aux joints ,la résistance atteignant un maximum pour des charges perpendiculaires aux joints et un minimum pour des charges parallèles aux joints .

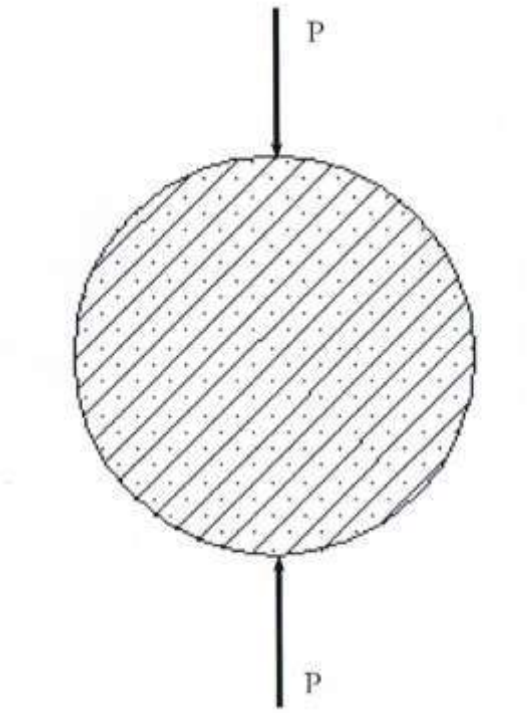


Figure 1-18 : l'essai brésilien

Chapitre 2 :présentation de :pierre,joint,mortier,les types de maçonneries,l'architecture rurale traditionnelle

2-1-Introduction :

Les maçonneries anciennes en pierre font trop souvent l'objet de traitements ponctuels sans suivi ni coordination sur le long terme .il convient donc de mettre sur pied une vèritable méthode de conservation ,ce type de méthodologie ,assez rare ,est d'autant plus nécessaire que de nombreuses techniques innovantes apparaissent pour le traitement des maçonneries anciennes .il est donc utile de les répertorier et de définir dans quelles situations leur utilisation est opportune.[5]

2-2--composition d'un mur

Dans un premier temps ,nous étudierons la composition d'un mur en décrivant la façon dont sont assemblés les différents éléments.[5]

Dans un second temps ,nous détaillerons les cinq composants principaux :la pierre ,le joint et le mortier, les types de maçonneries, l'architecture rurale traditionnelle.

Précisons ,au préalable ,un point de vocabulaire :les pierres prennent en effet des dénominations différentes selon la façon dont elles sont choisies et préparées ,on parle de cailloux ,de moellons (ébauchés ou smillés) ou de pierre de taille .

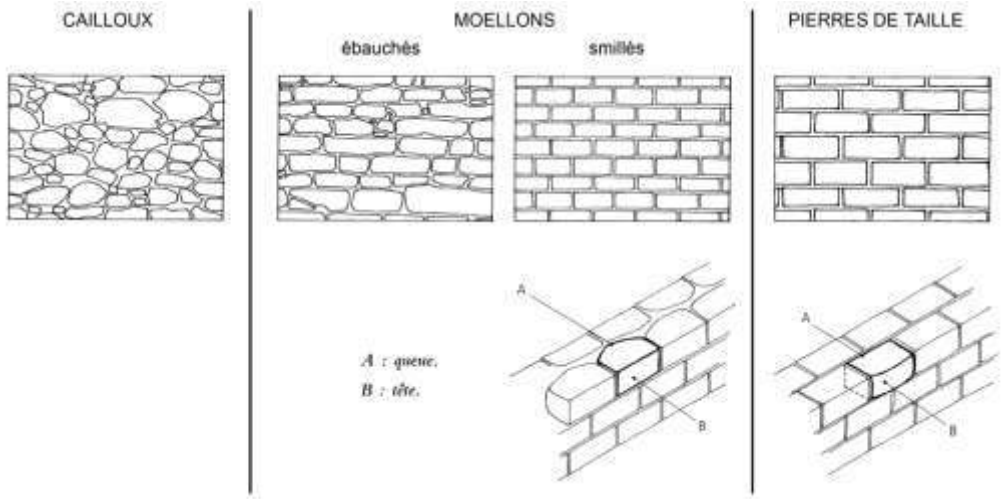


Figure 2-1 :essai de classification entre cailloux,moellons et pierres de taille

2-2-1-Assemblage des composants :

On peut distinguer essentiellement trois types de de murs en maçonnerie :

-les murs d'appareil régulier composés ,dans toute leur épaisseur (simple ou double),de pierres géométriquement taillées

-les murs constitués de deux parements en pierres de taille (ou en moellons) englobant un blocage ,c'est-à-dire une masse de matériaux divers agglomères par des mortiers en chaux ou à base de terre argileuse

-les murs organiques (ou mixtes) dont les arêtes ,les soubassements ,les chainages ,les encadrements de baies sont faits en pierre de taille ,tandis que le reste est constituée de petite maçonnerie ou le liant domine .[5]

2-2-1-1-Murs uniquement constitués de pierres :

Murs à épaisseur simple :

L'appareil peut être règlè (les blocs ont la même largeur en façade) ou alterné .les assises sont régulières (c'est –à-dire de hauteur constante) ou irrégulières …les raffinements sont innombrables .

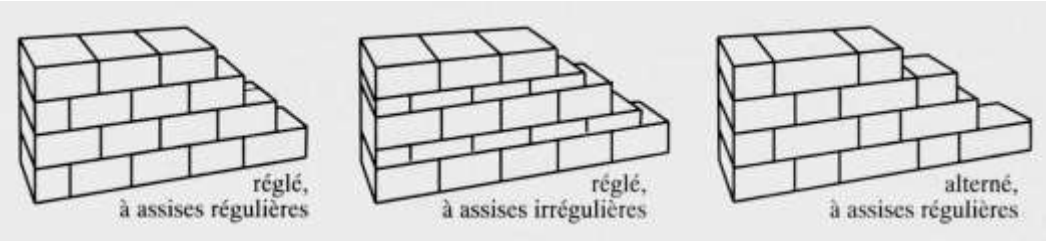


Figure 2-2 :exemple d'appareils à épaisseur simple [de vigan (2003),p80]

Murs à épaisseur double :

La maçonnerie est essentiellement composé de deux types de pierre .le premier type regroupe les pierres dont la profondeur est inférieure à l'épaisseur de la façade ,le second les pierres (plus rare) qui ont un parement visible de chaque cotè du mur .ces pierres traverantes sont appelées parpaings ou boutisses parpaings .

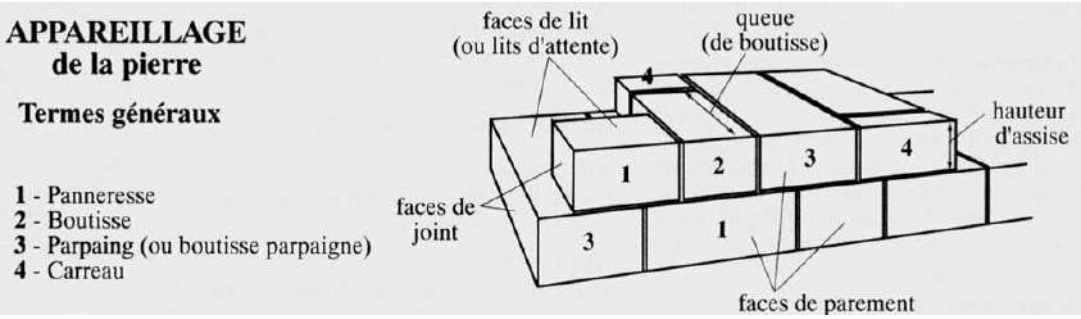


Figure 2-3 : dénomination des pierres selon leur emplacement [de vigan (2003),p80]

2-2-1-2-Murs à deux parements séparés par un blocage :

Le blocage entre les parements est plus ou moins épais et sa composition peut varier .

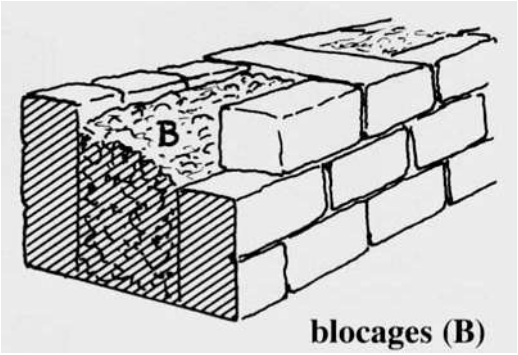


Figure 2-4 :parements séparés par un blocage épais [de vigan (2003) ,p.160]

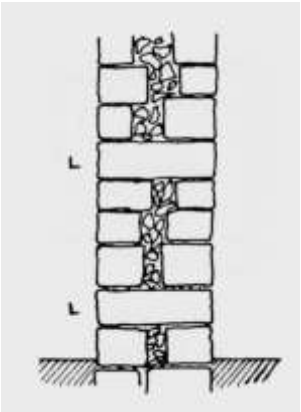


Figure 2-5 :deux parements distincts mais proches, L :liaisonnement par des boutisses parpaings [de vigan (2003) ,p.602]

2-2-1-3-Murs organiques :

Il s'agit de murs qui ont une constitution double .

L'usage de la pierre est restreint à certains assises et à des éléments verticaux qui peuvent être assimilés à des colonnes .le reste est constituée de maçonnerie banchée ou le liant prédomine et assure la cohésion de matériaux divers ,gènèralement de petites tailles (galets ,cailloux).

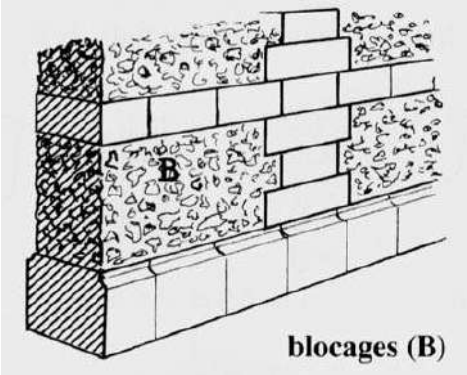


figure 2-6 : murs avec chainage verticaux et horizontaux [de vigan (2003) ,p.160]

2-3-composant 1 :la pierre :

présentation :

le concepteur compose à partir des caractéristiques mais aussi des dimensions du produit .le système constructif en pierre massive dérive directement du module de la carrière .avant tout commencement de projet ,la connaissance du mode d'extraction et de transformation du bloc est nécessaire .c'est grâce à cette connaissance précise que le concepteur adapte son projet à la ressource et à l'outil de production .

2-3-1-géologie et qualité des pierres de construction :

région par région ,pays par pays ,les pierres de construction sont aussi diversifiées que le sont les affleurements géologiques ,en fonction de leur nature ,ces pierres ont des caractéristiques physiques différentes qui les rendent plus ou moins utilisables dans les ouvrages de maçonnerie .[6]

classification des roches :

les pierres utilisés en construction sont classées par la géologie en trois catégories :roches magmatiques ,sédimentaires et métamorphiques .les roches magmatiques ont une origine profonde ,les roches sédimentaires ont une origine superficielle ,et les roches métamorphiques résultent de la transformation des deux premières sous l'action de facteurs physiques ou chimiques .[6]

les roches magmatiques :

les roches magmatiques comprennent les roches plutoniques et les roches volcaniques .les premières résultent du refroidissement lent d'un magma liquide ou pâteux à haute température ,à une certaine profondeur ,sans contact avec l'air et sous pression ;elles ont cristallisé entièrement .les secondes résultent d'un magma qui s'est épanché en surface sous forme de laves ;elles ont laissé échapper des gaz et se sont refroidies rapidement ,ce qui a stoppé brutalement la cristallisation .[6]

les roches plutoniques :

les roches plutoniques sont représentées principalement par les granites ,roches acides.les modes de cristallisation diversifiés et l'importance plus ou moins grande de la pression qui a présidé à leur formation produisent des roches aux caractéristiques variées :les granites peuvent ainsi être très homogènes ou stratifiés (à tel point que l'on peut les confondre ,dans ce dernier cas ,avec des roches métamorphiques ,comme les schistes).

Dans les massifs anciens montagneux ,comme la bretagne ,le contentin ,le massif central ,les vosges ,ou récents ,comme les alpes ou les pyrènes ,les granites sont les matériaux de base de la construction ,mêlés suivant la localisation à des galets ,des schistes ou des basaltes .

Leur densité moyenne est de 2.65 ,s'ils ne comportent pas de dia-clases ,ils sont imperméables . ce sont des roches difficiles à travailler et les moellons sont fréquemment ébauchés plus que parfaitement équarris .les granites sont mécaniquement très résistants et généralement très stables dans le temps lors qu'ils sont mis en œuvre dans un mur .ce sont de médiocres isolants thermiques .

Les roches volcaniques :

Les basaltes sont les roches volcaniques les plus répandus et les plus utilisées .généralement ,leur extraction est simplifiée autour des cheminées de volcans ou ,fissurés par le refroidissement ,ils sont souvent écroulés en éboulis .le refroidissement rapide des basaltes leur à donnée une cristallisation très fine .ce sont des roches imperméables à l'eau ,inaltérables et non gélives .avec une densité supérieure à 3 ,ils donnent une maçonnerie lourde .leur compacité en fait de médiocres isolants thermiques et leur taille est délicate :les murs ont donc rarement moins de 0.80 m d'épaisseur .[6]

Les roches sédimentaires :

Les roches sédimentaires résultent de la longue transformation d'un dépôt dont elles ont souvent conservé les strates et les fossiles .leur formation se fait selon quatre processus :l'usure et l'altération des matériaux qui produisent des particules ,le transport de ces particules par les cours d'eau ,les glaciers et le vent ,la sédimentation ,c'est –à-dire le dépôt de ces particules en couches successives ,et enfin la diagenèse ,qui est le processus de consolidation et de transformation des sédiments en roches sédimentaires .[6]

Ces roches ont des origines très variées : certains sables et certains argiles sont issus de l'altération par l'eau de roches cristallines ,granitiques ou métamorphiques ,alors que la plupart des calcaires sont formés par l'accumulation de squelettes et de coquilles calcaires d'organismes animaux ou végétaux .

Les minéraux des roches sédimentaires ,incolores ,blancs ou jaunâtres ,sont parfois vivement colorés par des pigments comme le Carbonne organique (noir) et les oxydes de fer (verts ,jaunes ,rouges).[6]

Les calcaires :

Parmi les roches sédimentaires ,la catégorie la plus utilisée dans la construction est celles des calcaires ,dont il existe de nombreuses variétés . il ya diverses façons de les décrire et de les classer :selon la structure des roches ,selon le grain (fin à grossier) ,eslon les proportions des deux principaux minéraux carbonatés (calcite et dolomite) ,selon la présence et l'importance de fossiles ,selon le milieu de dépôt (océanique ,lacustre ,fluviatile ,etc) selon la présence et l'importance de matériels sableux ou argileux ,etc .

Les calcaires ordinaires contiennent souvent une certaine proportion d'argile (on parle de calcaire marneux) ,leur perméabilité dépend de leur taux d'argile :plus il est fort ,plus il absorbent par capillarité les eaux des sols et des pluies directes et plus les maçonneries qu'ils permettent de construire sont médiocres :les parements extérieurs doivent être protèges par un corps d'enduit de bonne qualité ,les calcaires purs ou avec un faible taux d'argile donnent de bonnes pierres à bâtir ,peu perméables et dont la densité est de l'ordre de 2.5 .

Les calcaires ,selon leurs propriétés ,peuvent avoir des usages spécifiques dans la construction ,ainsi ,certains calcaires coquilles (formés en grande partie de débris de coquilles) très résistants ont donné des appareils superbes comme ceux du gard ,les tufs calcaires (qui se déposent à l'émergence de certaines sources) ,relativement légers ,ont été utilisés pour la construction de voutes ,les travertains ,de même origine que les tufs calcaires ,sont parfois employés comme pierres de décoration car certains d'entre eux présentent des vacuoles remplis de calcite et ont un beau poli.

Les grès et les meulières :

Le grès est formé de grains de quartz fins liés par un ciment généralement silicieux ou calcaire ;les grès tendres ,perméables et gélifs ,donnent de médiocres maçonneries ;en revanche ,les grès durs et très durs donnent des pierres de qualité à faible perméabilité .

La meulière est une pierre siliceuse qui se développé à l'intérieur d'un calcaire ou d'argiles ,lorsqu'elle est caverneuse ,elle est utilisée comme moellon en construction (notamment en ile de France) car elle est légère ,non gélive et un bon isolant thermique et phonique .

Les roches métamorphiques :

Les roches métamorphiques ont subi à l'état solide des transformations ,des réactions et des déformations sous l'action d'une élévation de température entre 100º c et 700º c et/ou de pression entre 1 et 3 à 4 kbars ,ces roches peuvent être initialement sédimentaires ,magmatiques ,voire déjà métamorphiques .

Il ya cristallisation de nouveaux minéraux et acquisition de textures et de structures spécifiques ,il ya plusieurs types de métamorphisme :la base des strates sédimentaires sous l'action de l'enfouissement (augmentation de la température et de la pression) subit un premier type de métamorphisme sans déformations ;dans les grandes chaines de montagnes ,d'énormes masses rocheuses viennent en recouvrir d'autres qui sont alors soumises à un autre type de métamorphisme avec de fortes déformations tectoniques ;enfin ,lors de l'instrusion d'un magma ,les roches traversés subissent un troisième type de métamorphisme du à la forte élévation de la température .

Les roches métamorphiques donnent de nombreuses pierres à bâtir dont les caractéristiques et l'aspect varient en fonction de la nature des roches originelles ,ainsi ,les argiles se transforment en schistes ,micashistes et gneiss ,les grès engendrent des quartzites ,les roches carbonatées des marbres (très rarement utilisées dans le bâti rural) ,les granites des protogines et des orthogneiss .

Le caractère cristallin de nombreuses roches métamorphiques en fait des matériaux de construction de très faible perméabilité ,même en dalles minces ,lors qu'elles sont homogènes :ainsi ,les micashistes sont posés en plaçant à l'horizontale leurs strates métamorphiques et les schistes ardoisiers donnent les ardoises clivées en plaques minces également suivant leurs strates métamorphiques .

Les gneiss et les quartzites ,roches compactes dont la densité est proche de 3 et la perméabilité faible à très faible ,sont des pierres de construction d'une excellente qualité .[6]

2-3-2-Classification selon le critère de dureté :

On raye la surface de la pierre à l'aide du scléromètre de martens ,la largeur de la rayure obtenue caractérise la dureté superficielle .cette largeur peut aller de 0.5 mm pour les pierres dures jusqu'à 3.5 mm pour les pierres tendres .[5]

La norme NF B 10-30 répartit les pierres en quatorze catégories .plus la pierre est dure et difficile à tailler ,plus le chiffre indiquant sa catégorie est élève .

Ce chiffre est obtenue par la formule suivante :

$I= (V/5435) +(2.91\ \rho)+ (5.14/R-4.59)$

Ou :

P (en tonnes/m^3) est la masse volumique .

R (en mm) :est la dureté superficielle

V en (m/s) est la vitesse de propagation du son dans la pierre .

Certains catégories sont regroupées dans des ensembles plus larges dont les contours peuvent varier d'un type de pierre à l'autre .

Tableau 2-1 :dureté (classification générale) [de Vigan (2003) ,p.759]

Pierre très tendre	Moins de 2
Pierre tendre	Coeff 2-2.5-3-3.5-4
Pierre demi ferme	Coeff 4.5-5-5.5-6-6.5et 7
Pierre ferme	Coeff 7.5 et 8
Pierre dure	Coeff 8.5-9-9.5-10-10.5-11-11.5-12
Pierre très dure	Coeff 13
Pierre extra dure	Coeff 14

Tableau 2-2 :dureté des calcaires [Bajeux (2013 a) ,chap.10,p.16]

tendre	I =0.5 à 3.5
Mi tendre	I= 4 à 5.5
ferme	I= 6 à 7.5
dure	I=8 à 10.5
froide	I=11 à 14

Remarquons que la terminologie est un peu différente pour les pierres calcaires :elles sont qualifiées de froides si leur coefficient de taille est supérieure ou égal à 11.

2-3-3-Caractéristiques physiques des pierres de construction :

Les caractéristiques physiques des pierres donnent des indications sur leur comportement en œuvre et en particulier leur sensibilité à l'eau et au gel ,les caractéristiques principales ont été analysées dès la fin du XVIII^{e} siècle .[6]

La densité :

La densité exprime le rapport du poids au volume ,elle est en général proportionelle à la résistance à la compression ,les roches les plus denses sont aussi celles qui ont le plus médiocre coefficient d'isolation thermique .[6]

La porosité :

La porosité indique la part des vides par rapport au volume apparent ;mais quand ces vides ont un volume important et qu'ils ne sont pas reliés entre eux –c'est le cas de la pierre meulière –porosité ne signifie pas perméabilité ;la présence des vides améliore la performance thermique .

L'absorption :

L'absorption évalue la quantité de liquide dont le matériau sec et plein (homogène) peut être imbibé ,elle est un indicateur de sa gélivité ;l'isolation thermique d'un mur est fortement diminuée quand ses pierres sont imbibées d'eau .

La perméabilité :

La perméabilité caractérise la capacité d'une pierre à être traversée par un liquide ;elle exprime la capacité du matériau à absorber et transporter l'eau par capillarité ;l'élévation par capillarité des eaux des sols décompose pierres et mortiers et diminue l'isolation thermique du mur .

L'homogénéité :

L'homogénéité décrit la régularité et la cohésion des éléments structurels de la pierre ;la pierre est dite pleine lorsqu'elle est homogène ;une pierre hétérogène possède des défauts (ainsi ,des veines minces remplies de matière terreuse ,les ‹‹fils ›› ,absorbent l'humidité et font éclater la pierre) ;le ‹‹bousin ›› correspond à une strate tendre interposée entre deux lits de calcaire ;des ‹‹fissures ›› minces traversent parfois verticalement le banc rocheux .

2-3-4-Caractéristiques mécaniques :

La détermination des caractéristiques mécaniques des pierres de taille peut être complexe ,en raison du manque d'homogénéité de ces matériaux naturels ,comparativement à des matériaux préfabriqués .

Des prélèvements représentatifs par carottage doivent être effectués en laboratoire pour déterminer la structure pétrographique de la pierre .l'idéal est de parvenir à identifier les carrières d'extraction .[5]

Lit et délit :

Certaines pierres (en particulier les roches sédimentaires) sont composés de couches superposées ,ce ne sont donc pas des matériaux istrpes .[5]

Lorsque le lit est disposé horizontalement dans un mur porteur ,la pierre est posée correctement car la charge verticale correspondant au poids de l'édifice s'exerce perpendiculairement aux couches et a tendance à les resserrer .

En revanche ,si le lit est monté dans le plan vertical ,on dit que la pierre est en délit .dans ce

cas ,la capacité porteuse de la pierre est très inférieure car les différentes couches de pierre

vont avoir tendance à se dissocier sous l'effet de la charge appliquée .c'est d'autant plus préjudiciable quand le plan du lit est parallèle au nu de la façade (comme dans la situation de la pierre V2 sur la figure suivante) car les pierres voisines ne peuvent s'opposer au desserrement des lits par contrebutement (contrebutement qui a lieu en revanche dans le cas de la pierre P2 sur la figure suivante).

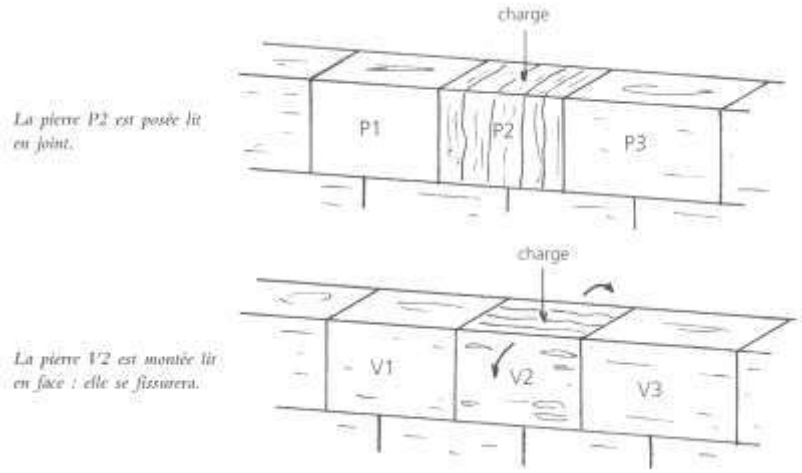


Figure 2-7 :deux types de montages en délit [Laurent (2005),p.15]

Masse volumique :

Cette mesure est exprimée en Kg/m^3.

Masse volumique apparente =(masse du matériau sec /volume apparent).

Le volume apparent est défini par les arrêtés de l'échantillon sans tenir compte des vides intérieurs (pores).

Résistance à la compression :

Cette mesure s'exprime en Kg/cm^2,en Mpa (ou en bar).

La résistance à l'écrasement n'est pas toujours fonction de la densité .

Résistance à la traction :

Ce paramètre n'est utile que dans le cas de pierres destinées à travailler en flexion (linteaux ,consoles ,dalles de balcon …)

Tableau 2-3 :résistance à la compression et à la traction [d'après socotec (2009),p.2]

pierres	**Résistance à la compression simple (rupture) (Mpa)**	**Résistance à la traction simple (rupture) (Mpa)**
Calcaire ordinaire	2à 12	0.5 à 5
Calcaire compact	7 à 40	4 à 15
grès	40 à 100	0.5 à 5
schiste	7 à 60	0 à 10
granit	60 à 180	6 à 15

Vitesse de propagation du son :

Les travaux du CEBTP (centre expérimental de recherche et d'étude du bâtiment et des travaux publics) ont montré que la vitesse de propagation du son dans la pierre est en relation directe avec la résistance à la compression ,plus la vitesse de propagation du son dans la pierre est élevée ,plus la résistance à la compression est grande .

(pierre tendre) 1500 m/s ‹ son ‹ 6200 m/s (pierre dure).[5]

La quantité d'eau contenue dans la pierre n'influence pratiquement pas le résultat obtenu .

2-3-5-Tableau de synthèse pour les pierres calcaires :

Tableau 2-4 :caractéristiques principales des pierres calcaires les plus courantes en façade [Virolleaud (2011),p.175] :

Dureté	N°	Dénomination et origine	Densité (kg/m³)	Rupture à l'écrasement (kg/cm²)
		Pierres calcaires		
Très tendre	1	Tuffeau de Touraine (Indre-et-Loire) Billy (Aisne), banc royal	1 200 à 1 400 1 370 à 1 500	35 à 50 35 à 50
Tendre	2	Vierzy (Aisne) Sireuil (Charente), tendre Saint-Vaast (Oise), banc royal Fontvieille (Bouches-du-Rhône) La Boulaye (Oise), banc royal	1 575 à 1 650 1 600 à 1 725 1 600 1650 à 1 725 1 650 à 1 775	60 à 90 50 à 65 50 à 75 50 à 75 65 à 90
Tendre	3	Méry-sur-Oise, banc franc Saint-Maximin (Oise), roche douce Saint-Même (Charente) Méry-sur-Oise, banc royal Sireuil (Charente), roche ferme Saint-Vaast (Oise), roche douce	1 650 à 1 800 1 650 à 1 775 1 675 à 1 850 1 650 à 1 850 1 700 à 1 850 1 900	65 à 100 75 à 110 50 à 90 75 à 100 65 à 90 90 à 110
Demi-ferme	4	Savonnières (Meuse) Saint-Maximin (Oise), roche demi-ferme Estaillades (Vaucluse) Migné (Vienne)	1 750 à 1 950 1 775 à 1 950 1 900 à 2 000 2 050 à 2 175	80 à 160 110 à 200 130 à 250 125 à 175
Demi-ferme	5	Caen (Calvados) Branvilliers (Meuse), liais Lavoux (Vienne), fin	1 900 à 2 050 1 900 à 2 500 2 050 à 2 200	130 à 300 180 à 250 170 à 250
Ferme	6	Saint-Maximin (Oise), roche ferme Ravières (Yonne) Lérouville (Meuse)	1 950 à 2 250 2 250 à 2 200 2 300 à 2 400	200 à 330 325 à 450 225 à 325
Ferme	7	Larrys (Yonne), roche ferme Chauvigny (Vienne), roche ferme Euville (Meuse), roche ferme	2 150 à 2 300 2 200 à 2 375 2 300 à 2 450	350 à 600 250 à 450 205 à 450
Dure	8	Massangis (Yonne), liais Saint-Maximin (Oise), roche dure Vilhonneur (Charente)	2 250 à 2 350 2 250 à 2 500 2 350 à 2 435	475 à 625 350 à 525 425 à 650
Dure	9	Massangis (Yonne), roche jaune Échaillon (Isère), blanc Larrys (Yonne), sous-moucheté	2 250 à 2 375 2 350 à 2 550 2 350 à 2 500	525 à 700 500 à 850 700 à 950
Dure	10	Larrys (Yonne), moucheté	2 450 à 2 600	900 à 1 100
Froide	11	Villebois (Ain) Arudy (Basses-Pyrénées)	2 325 à 2 675 2 650 à 2 750	750 à 1 250 1 000 à 1 475
Froide	12	Corgoloin (Côte-d'Or) Comblanchien (Côte-d'Or) Hydrequent (Pas-de-Calais)	2 550 à 2 700 2 550 à 2 700 2 650 à 2 750	1 350 à 1 700 1 350 à 1 700 1 450 à 1 600
Froide	13	Hauteville (Ain)	2 600 à 2 800	1 600 à 1 875

2-4-composant 2 :le joint

les matériaux utilisés en maçonnerie se divisent en deux grandes catégories :les matériaux solides (moellons ,pierres ..) que nous venons d'étudier et les matériaux agglutinants (chaux ,ciment ,platre ..).[5]

2-4-1-morphologie des joints :

selon l'épaisseur des joints ,on parle de joints vifs ,maigres ou gras .

dans le premier cas ,les pierres sont posées sans mortier.

Dans les deux autres cas ,les joints sont fins ou larges .[5]

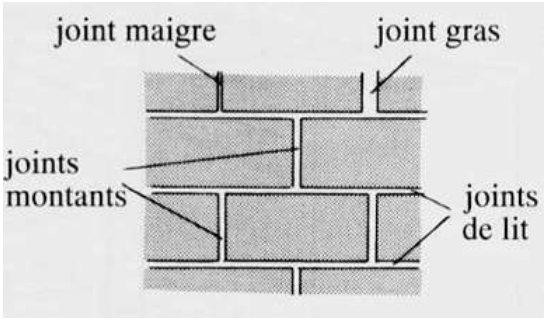


figure 2-8 :dénomination des joints selon leur position et leur épaisseur [de Vigan (2003) ,p.578]

partie apparente des joints :

les joints affleurants sont préconisés dans le cas de pierres tendres qui ont tendance à s'épaufrer .

les joints creux sont possibles avec les pierres dures ,ils permettent de souligner les arrêtés ,ce qui est souvent du meilleur effet ,les joints saillants sont plus fragiles (même lorsqu'ils contiennent du ciment).

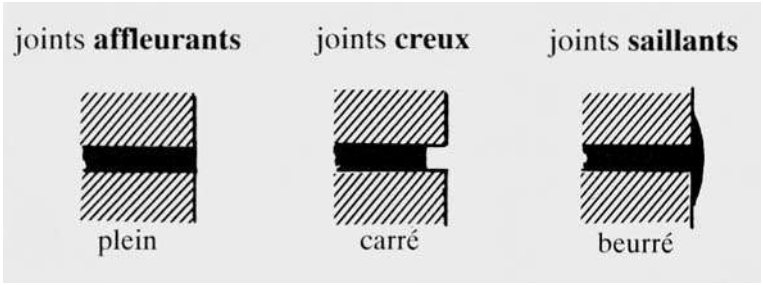


Figure 2-9 :typologie des joints [d'après de Vigan (2003),p.579]

Partie interne des joints :

Lors du hourdage de la maçonnerie ,deux méthodes sont possibles ,selon que l'on décide ,ou non ,de remplir de mortier l'ensemble de l'interstice horizontal entre deux pierres superposés .

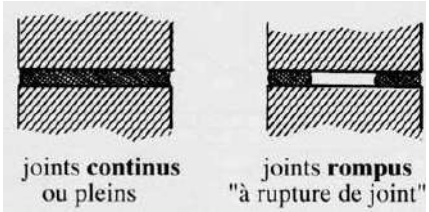


Figure 2-10 :exemples de joints de hourdage [d'après de Vigan (2003),p.578]

2-5-Préparation des mortier :

Les mortiers sont fabriqués en mélangeant un liant (chaux ,plâtre ou ciment) avec des agrégats et de l'eau ,la nature et le dosage de chacun de ces composants influent sur la résistance à l'écrasement des mortiers .[6]

2-5-1-Les différents liants :

L'argile :

L'argile est un liant des constructions en terre ,c'est une roche terreuse sédimentaire compacte et imperméable .[7]

La terre est un mélange des différents éléments :

-des cailloux (20 cm› C› 2 cm)

-des sables grossiers (2 cm› SG› 2 mm)

-des sables fins (2 mm›SF›0.2 mm)

-des limons (siltes)(0.2mm›L›0.02mm)

-des argiles

Du caillou au limon la seul différence est une différence d'échelle .

L'argile elle ,diffère par sa structure en paillette.

L'argile étant le liant ,la terre peut être considéré comme un béton ou comme un mortier suivant la granulométrie des éléments présents .

Les différents états hygrométriques de la terre :

-sèche :état dans laquelle la terre est plus facile à extraire,et à tamiser ,aucune utilisation en l'état.[7]

-humide :c'est l'état du pisé et des BTC ,lorsque le point de proctor est atteint ,on obtient l'optimum de compressibilité .

-plastique :terre apte au façonnage ,fabrication des adobes ,du torchis ,des murs en colombin ,en boules façonnés ,bauge et terre jetées .

-visqueuse :peu d'applications traditionnelles utilisent cet état de la terre ,il est possible de réaliser des murs coulés ,des pavements…mais d'importants problèmes de retrait sont à régler

-liquide :l'état de la terre pour rèaliser les enduits ,dans cet état le séchage entraine de forts retraits .il est donc primordial de doser la granulométrie ou les ajouts de fibres très précisément ,afin de bloquer le retrait de l'argile .

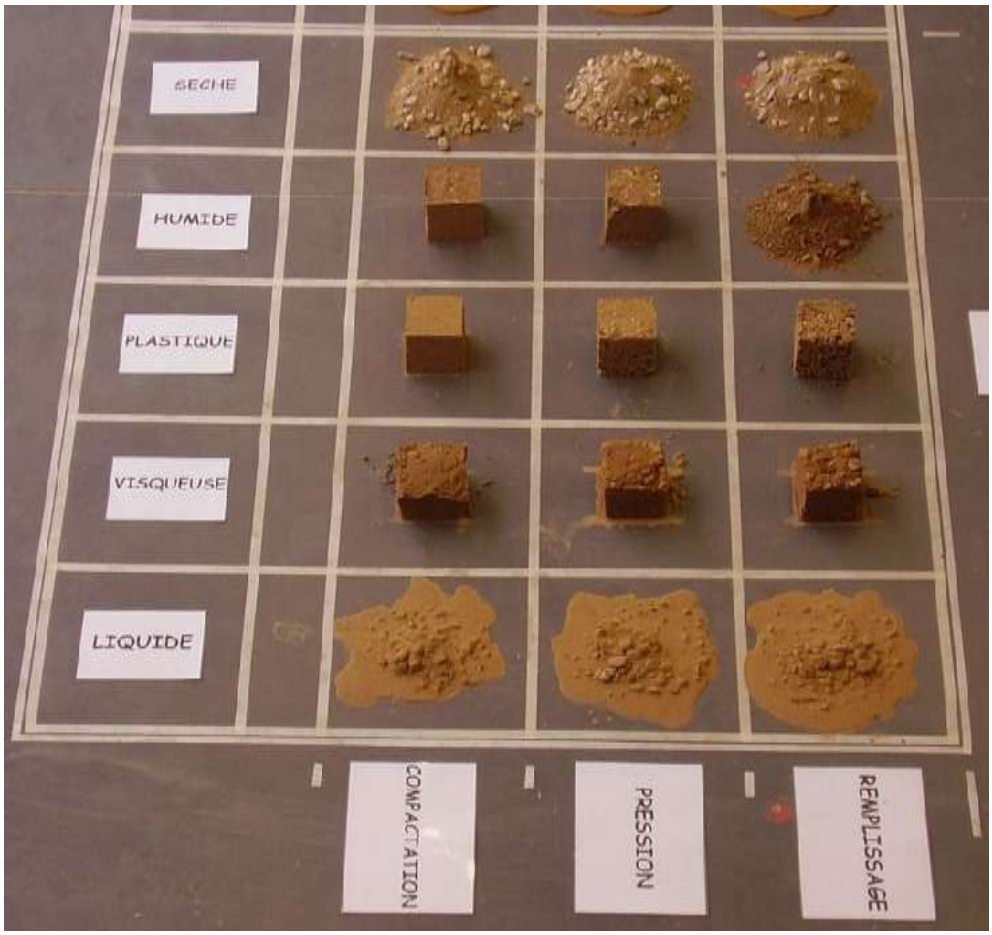


Figure 2-11 :les différents états hygrométriques de la terre

Le plâtre :

Le plâtre est un sel de gypse qui à été déshydraté à 160º ,lors deson humidification le plâtre se retransforme en gypse .[7]

Le plâtre est donc recyclable par cuisson ,de plus son énergie grise est relativement basse .

Le plâtre n'a pas de retrait lors de sa prise ,il peut donc être utilisé pur (c'est le seul des liants traditionnels du bâtiment à avoir cette capacité) ,son léger gonflement lors de la prise en fait un excellent matériau de scellement (sauf pour les éléments métalliques).

Il existe deux catégories de plâtres :

-le plâtre de construction (briqueteur ..)

-le plâtre de finition (plâtre fin ..)

Le gâchage du plâtre influence sur ces caractéristiques :

-plâtre normal 40l d'eau pour 40 Kg

-plâtre léger 35l d'eau pour 40Kg

-plâtre épais 60 l d'eau pour 40 Kg

Plus le plâtre est épais et plus il sera dur .

La chaux :

La chaux est obtenue par calcination de calcaire à une température de 900º ,lors de la calcination la pierre à chaux rejette du gaz carbonique ,elle se transforme en chaux vive ,puis après extinction par immersion en chaux aérienne en pate .

Lorsque la pierre calcaire est pure ,le produit de la calcination est de la chaux aérienne ,lorsque celle –ci contient de l'argile le produit obtenu est de la chaux hydraulique (faisant sa prise en présence d'eau).[7]

Le ciment :

Le ciment est issu de la cuisson d'argile et de calcaire à 1450º.

Il peut être important de différencier les CPA (ciment portland artificielle)et les CPJ (ciment portland composé),les CPA contiennent au maximum 5% d'adjuvants ,les autres peuvent en contenir jusqu'à 40% .

2-6-Le matériel :

1-pointe à tracer ,2-ciseau,3-ciseau,4-gradine,5-gradine,6-boucharde à main ;7-broche,8-brochs,9-chasse,10-grain d'orge,11-ciseau,12-coin éclateur,13-polka,14-taillant ou laie,15-boucharde,16-massette carrée ;17-massette portugaise,18-pince de pose,19-compas,20-équerre.[7]

Ces outils sont ceux de la taille de pierre,pour les autres disciplines de la pierre une massette ,une chasse et un cordeau suffisant.

Outils à manche bois pour la pierre tendre,outils tout en acier pour la pierre dure .

Les outils de taille de pierre sont trempés sur 2 à 3cm afin de moins rebondir lors de la frappe contrairement aux outils de maçons .[7]



1-pointe à tracer,2-ciseau,3-ciseau,4-gradin,5-gradin,

6-boucharde à main,7-broche,8-brochs,9-chasse,

10-grain d'orge,11-ciseau,12-coin éclateur,13-polka,

14-taillant ou laie,15-boucharde,16-massette carré,

17-massette portugaise,18-pince de pose,19-compas,

20-équerre

Figure 2-12 :les outils de pierre

2-7-Les types de maçonneries :

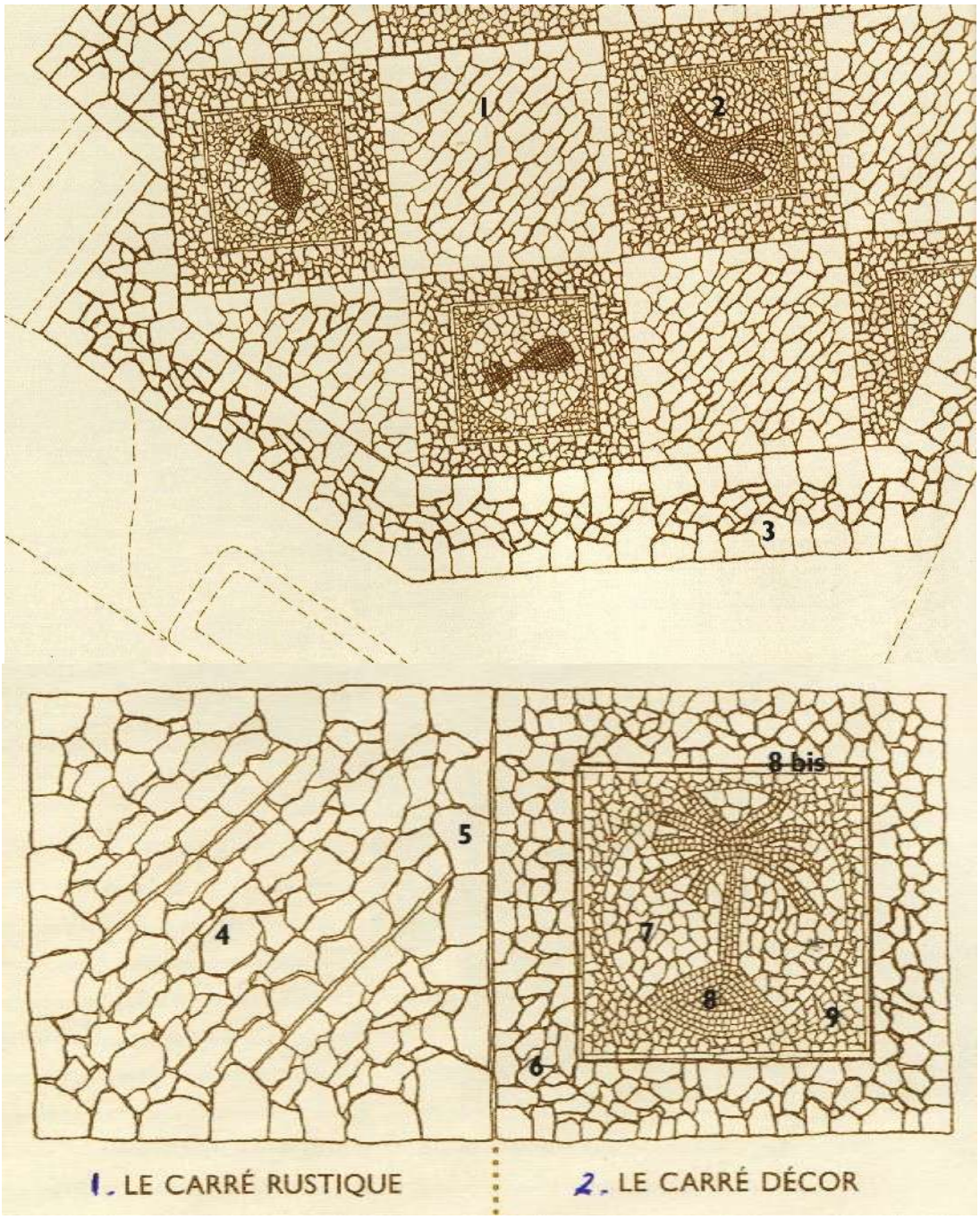
2-7-1-Le callade : est l'art de choisir et d'assembler les pierres pour habiller les ruelles ,places et jardins ,ce sont des sols de pierres brutes locales posés debout sur champs .

Ethymologie :‹‹cal›› vieux français qui veut dire ‹‹pierre›› .

En occitan :‹‹calhau›› que l'on retrouve en français dans ‹‹caillou,calcaire,calanque…›› .

La pose se fait sur terre ,sable ,ou mortier de chaux maigre.

Outils nécessaire :massette,maillet en caoutchouc ,pic têtu ,chasse, truelle, cordeau, règle, madrier, chevron.



1-carré rustique

2-carré décor

3-bandes Conductrices

4-pierres de remplissage

5-conducteurs périphériques

6-contour carré décor

7-intérieur carré décor

8 et 8bis-tesselles

9-ciottolati

1-carré rustique,2-carré décor,3-bandes conductrices,4-pierres de remplissage,5-conducteurs périphériques ;6-contour carré décor,7-intérieur carré décor,8 et 8bis-tesselles,9-ciottolati

Figure 2-13 :le callade[7]

2-7-2-Mur de pierre sèche :

Maçonnerie de pierres plus ou moins appareillés ,sans liaison par un mortier ,sert principalement à l'édification de petits ouvrages (murets ,murs de soutènement)ou pour la réalisation de ‹‹bories›› ,la partie de base d'un mur est la semelle ou socle, assise de gros blocs constituant les fondations du mur lorsque celui-ci est érigé sur un sol en terre .[7]

Cette semelle est toujours plus large que le mur qu'elle est destinée à recevoir ,le décaissement ou tranchée de fondation est une excavation d'une dizaine de centimètres (idéalement sous la terre végétale).

Si les blocs de l'assise sont posé sur chant c'est un hérisson



Figure 2-14 :mur de pierre sèche

2-7-3-Mur de pierre maçonnées :

Les murs de pierres maçonnées sont constituées de pierres et de mortiers de chaux ,les pierres sont montées lit par lit ,les deux parements d'un mur sont reliés régulièrement par des boutisses parpaings ,pierres longues traversant le mur de part en part



Figure 2-15 : un mur de pierres maçonnées[7]

2-7-4-Les maçonneries de pierre de taille :

L'appareillage des maçonneries de pierre de taille est constituée de blocs de granite souvent parfaitement taillés ,ceux-ci sont posés sur leur lit avec pierres traversantes,et maçonnés à joints très serrés ,ou à joints vifs ,les constructions réalisées entièrement en pierre de taille restent une exception ,la plupart du temps ,seule la façade principale –voire un retour de pignon ,sont appareillés de cette façon ,le reste de la construction étant bâtie en moellons .



Figure 2-16 :maçonnerie en pierre de taille[8]

2-7-5-Les maçonneries de moellons :

Elles sont le plus souvent constituées de deux parements reliés par des boutisses parpaingnes ,qui enserrent un remplissage de petites pierres et de terre ,ce type de maçonnerie dite maçonnerie mixte ou maçonnerie de blocage était souvent utilisé pour des raisons économiques ,l'appareillage est à assises régulés soigneusement calées entre elles avec des morceaux de plaquettes ou de tuileau ,ce type de maçonnerie représente l'essentiel des maçonneries sur le pays sud creusois ,on l'appelle ‹‹ limousinerie ››,l'origine de ce nom remonte à la migration des bâtisseurs du limousin dès la fin du XV^{ème} siècle.[8]



Figure 2-17 :maçonneries de moellons

2-7-6-Maçonnerie de pierre brute hourdée :

Les matériaux sont approvisionnés sur place et les moellons sont triés et nettoyés .

Le chantier commence par la réalisation de tranchées et la mise en œuvre de fondations sur le bon sol ,les maçonneries sont montées avec deux parements extérieurs dressés verticalement en rangs plus ou moins régulièrement assisèes.

Un blocage interne est réalisé au fur et à mesure en petites pierres liées à la terre ,avec des liaisonnements par boutisses ou parpaings régulièrement répartis .

La pose des pierres se fait par calage sur un lit de pose épais réalisé avec un mortier de terre argileuse ou de sable ou et de chaux ,les éléments sont disposés à joints verticaux décalés ,avec ou sans calage complémentaire suivant la régularité des pierres.

Les chaines d'angle et les ébrasements des baies sont réalisés avec des pierres taillées sur mesure ,ou parfois des éléments en réemplois ,posés au fil à plomb et au cordeau.

Les maçonneries peuvent être laissées en pierres apparentes ,mais le plus souvent les joints larges et inégaux et le dosage approximatif du mortier nécessite une finition assurée par un enduit de protection et valorisée par des marquages au badigeon de chaux .[9]



Figure 2-18 : mur en pierre brute hourdée

2-7-7-Le mur banché :

La construction traditionnelle fait également appel à des murs ne recourant pas à un appareillage de petits éléments ,comme c'est le cas dans les maçonneries de pierre ou de brique .en fonction de leur mode de mise en œuvre ,on peut les apparenter à des maçonneries

hétérogènes de tout-venant ou à des maçonneries organiques .on peut ainsi citer les murs en pan-de-bois et les murs banchés.

Les murs en pan-de-bois ,dont l'ossature est remplie soit par un mortier de terre stabilisée à la chaux renforcé par un lattis et de la paille (le torchis) ,soit par une maçonnerie non porteuse de brique ou de pierre ,forment des murs organiques.mais ,même lorsque le remplissage est de pierre ,il ne s'agit pas à proprement parler de murs de pierre .[6]

Les murs banchés sont réalisés en coulant un mortier entre deux coffrages appelés banches.le glissement horizontal des banches après la prise permet de réaliser le mur par assises complètes successives .cette technique ,le pisé ,a généralement été réservée aux murs de terre .mais certains murs qui s'apparentent à des murs banchés sont exécutés avec des pierres ,brutes et non taillèes.ce sont des cailloux ou des galets ,noyés dans un bain de mortier .il s'agit en général d'ouvrages rustiques et modestes ,mais les murs de galets ont aussi fait l'objet de mises en œuvre soignées et décoratives .le comportement du mur courant est celui d'un mur homogène.



Figure 2-19 : le mur banché[6]

2-7-8-Murs de cailloux à bain de mortier :

Les pierres sont de simples cailloux montés à bain de mortier ;il s'agit presque d'un béton dont les éléments de 5 à 10 cm de diamètre sont les gros agrégats liés par un mortier de terre stabilisèe.ce type de mur est en général banché ;il est médiocre et perméable ,et son élancement ne permet pas de dépasser deux niveaux pour une épaisseur de 0.50 m .il est généralement protégé par un enduit .

Ces murs banchés ont également été réalisés à bain de mortier de chaux .[6]

2-7-9-Murs en galets :

En général ,ces murs ont été banchés car le mortier adhère mal au parement lisse des galets polis par l'érosion .trois familles de solutions ont été mises en œuvre pour améliorer le ‹‹collage›› :les galets sont cassés en deux parties afin que le mortier adhère au plan de fracture ;les rondeurs opposées des galets superposés sont imbriquées dans le corps du mur et calées par des éclats de pierre ,de terre cuite ou des demi-galets ;un litage des parements est obtenu par l'alternance de groupes de plusieurs lits de galets avec les chainages de quelques lits horizontaux de briques ,de pierres smillées ,etc.[6]

Le plus souvent ,à l'exception des chaines d'angle,des encadrements et des bandeaux horizontaux ,ces murs ont été enduits.mais,en raison de la très mauvaise adhérence des mortiers aux parements polis des galets ,plus rien ne subsiste des enduits d'origine ,tombés depuis longtemps.

Ce matériaux modeste ,mais abondant dans certaines régions ,à souvent été mis en œuvre avec un triple souci d'amélioration de ses performances ,de simplification de sa mise en œuvre et de décoration .

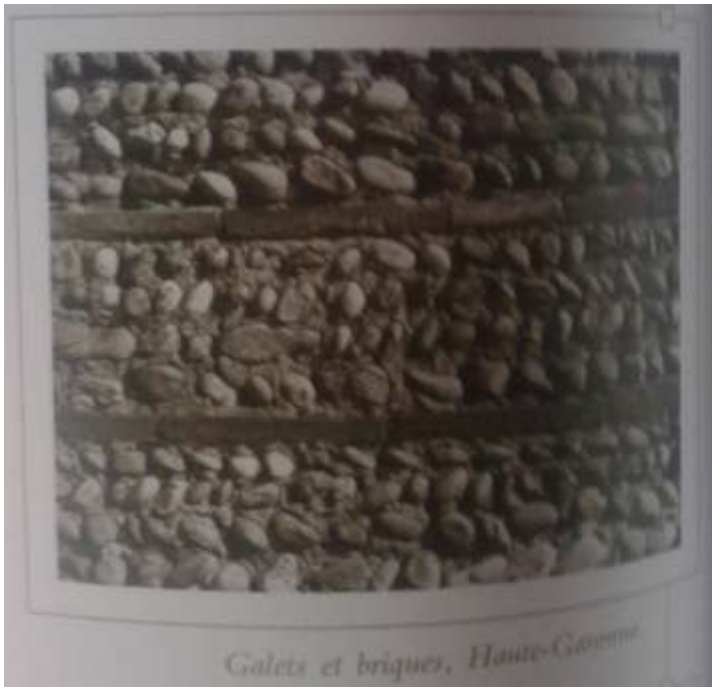


Figure 2-20 : mur en galets

2-7-10-Epaisseur et élancement des murs :

Les murs enterrés des fondations ont ,en règle générale ,une épaisseur de 0.70 à 0.80 m ,ils portent une maçonnerie en élévation épaisse en moyenne de 0.50 m ,réduite parfois à 0.30 m au niveau du comble .[6]

Les murs des façades sont souvent construits avec une épaisseur à la base supérieure à celle du sommet ,cette disposition est économe car elle diminue le volume mis en œuvre ;elle

accroit aussi la capacité d'élancement d'un mur en réduisant son poids propre (celui de l'ensemble des ouvrages du bâtiment) .ce rétrécissement progressif peut être obtenu de deux manière ,la première consiste ,tous les étages ou tous les deux étages ,en un retrait du parement intérieur de quelques centimètres au niveau des planchers ,ce qui améliore aussi leur appui sur le mur dont le parement extérieur est monté verticalement ;dans la seconde méthode ,on donne au parement extérieur une légère inclinaison vers l'intérieur (de 3 à 5 mm par mètre) tandis que le parement intérieur est monté verticalement –on dit alors que le mur a du ‹‹fruit›› .

L'élancement potentiel d'un mur dépend de son épaisseur ,de sa longueur entre les murs en retour et des contraintes qu'il subit :poids propre ,surcharges (poids des personnes ,meubles, réserves) et pressions du vent ,il résulte aussi de sa cohésion interne ,qui est elle-même fonction de son montage technique :nature et forme des pierres utilisées ,manière dont elles sont plus ou moins appareillées ,retrait et résistance du mortier une fois la prise faite .ainsi ,l'élancement des murs ,ou leur capacité à être élevés jusqu'à quatre ,cinq ou six niveaux ,dépend largement du type de maçonnerie qui est mis en œuvre ,et en particulier de la nature du mortier utilisé .en effet ,la qualité du mortier et de l'appareillage ,la présence d'une ossature secondaire (harpes appareillées) ,la réduction du poids propre de la maçonnerie sont des éléments importants qui permettent d'atteindre de plus grandes hauteurs de mur .[6]

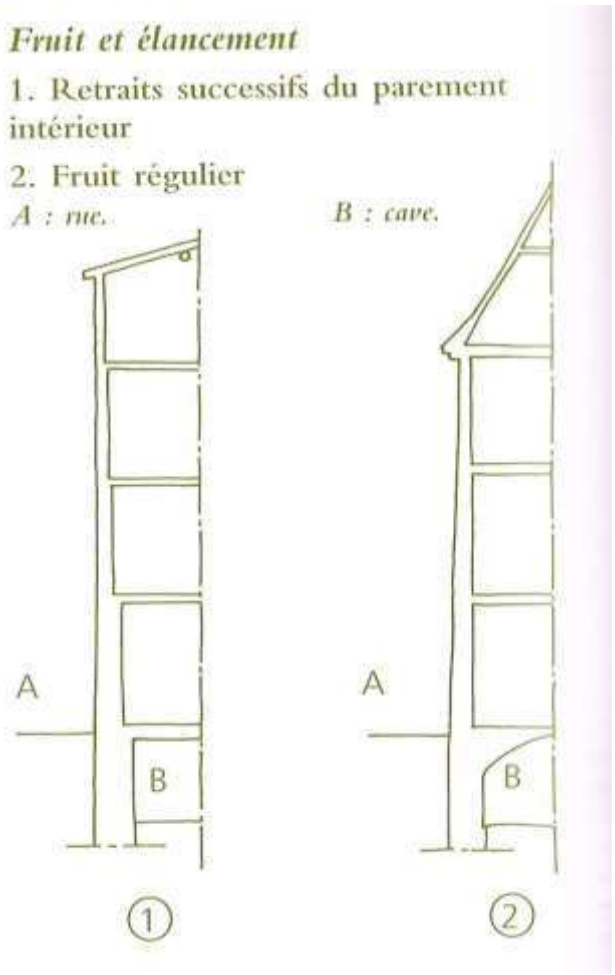


Figure 2-21 : épaisseur et élancement du mur

2-8-L'architecture rurale traditionnelle :

L'architecture rurale traditionnelle constitue l'essentiel des bâtiments .

Caractérisée par sa simplicité et sa sobriété ,elle est régie par des règles de bon sens ,fruit de l'usage et de l'habitude des bâtisseurs ,elle entretient un lien extrêmement étroit avec la nature ,les matériaux sont pris sur le lieu même de la construction ,ou à proximité immédiate ,on la qualifié de vernaculaire .

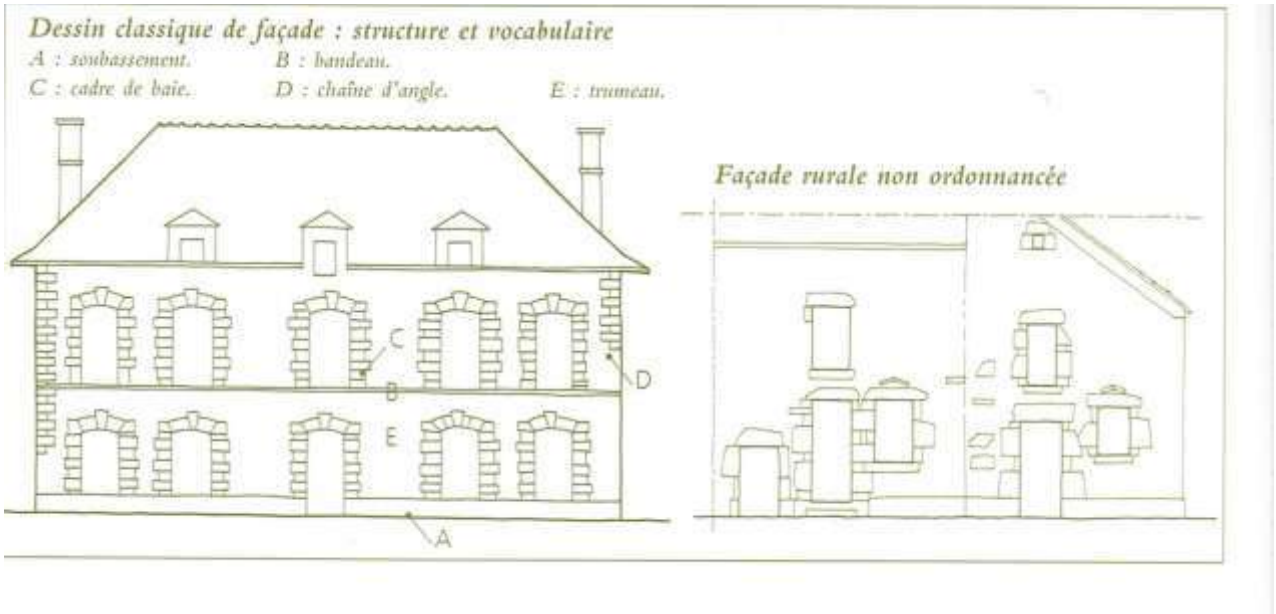


Figure 2-22 :dessin classique de façade :structure et vocabulaire

2-8-1-Chaines :

Le mur de façade est liaisonné avec les murs refends et les murs pignons par des chaines verticales et des chainages horizontaux ,la chaine est une organisation appareillée verticale formée d'éléments plus volumineux et plus longs que le reste de la maçonnerie ,elle forme la rencontre de deux murs en angle, on parle de chaine d'angle lorsqu'elle liaisonne deux murs à leur extrémité (raccordement en ‹‹L››,et de jambe lorsqu'elle liaisonne une façade et un refend (en ‹‹T›› ou deux refends (en ‹‹X››),elles sont réalisées avec un appareillage de moellons solidaires des deux murs, traitées en bossages aux parements dressés et aux arêtes ciselées ,les pierres des chaines et chainages sont taillées dans des roches souvent plus dures que celles des murs ,leurs dimensions sont celles d'un moyen ou gros appareil et elles ne sont pas enduites ,comme le sont le plus souvent les pierres du mur en tout-venant ,il est fréquent ,dans les régions ou les pierres disponibles ne permettent pas facilement la réalisation des chaines et chainages ,que l'on utilise un matériau diffèrent ,comme la risque ,on trouve également de très nombreux exemples de murs de briques chainés au moyen de pierre de taille

Chaine d'angle et jambe sont ici décrites dans le cas de murs avec deux rangées d'éléments .

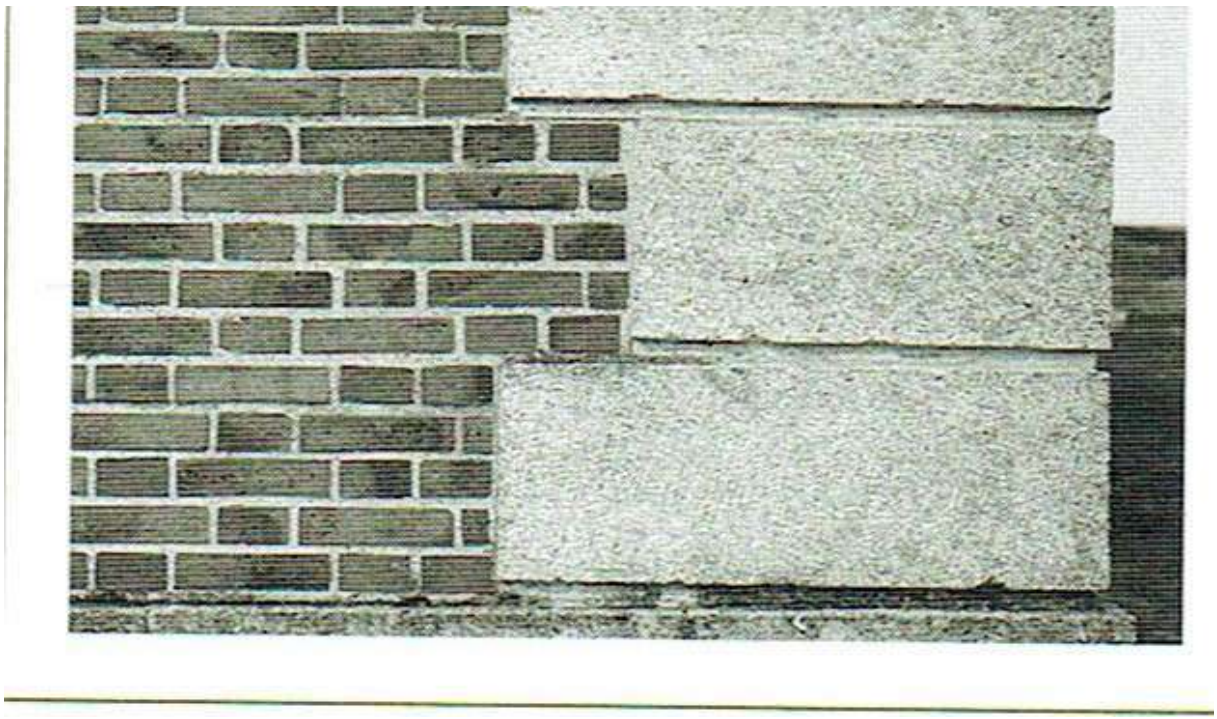


Figure 2-23 :chaine en pierre de taille

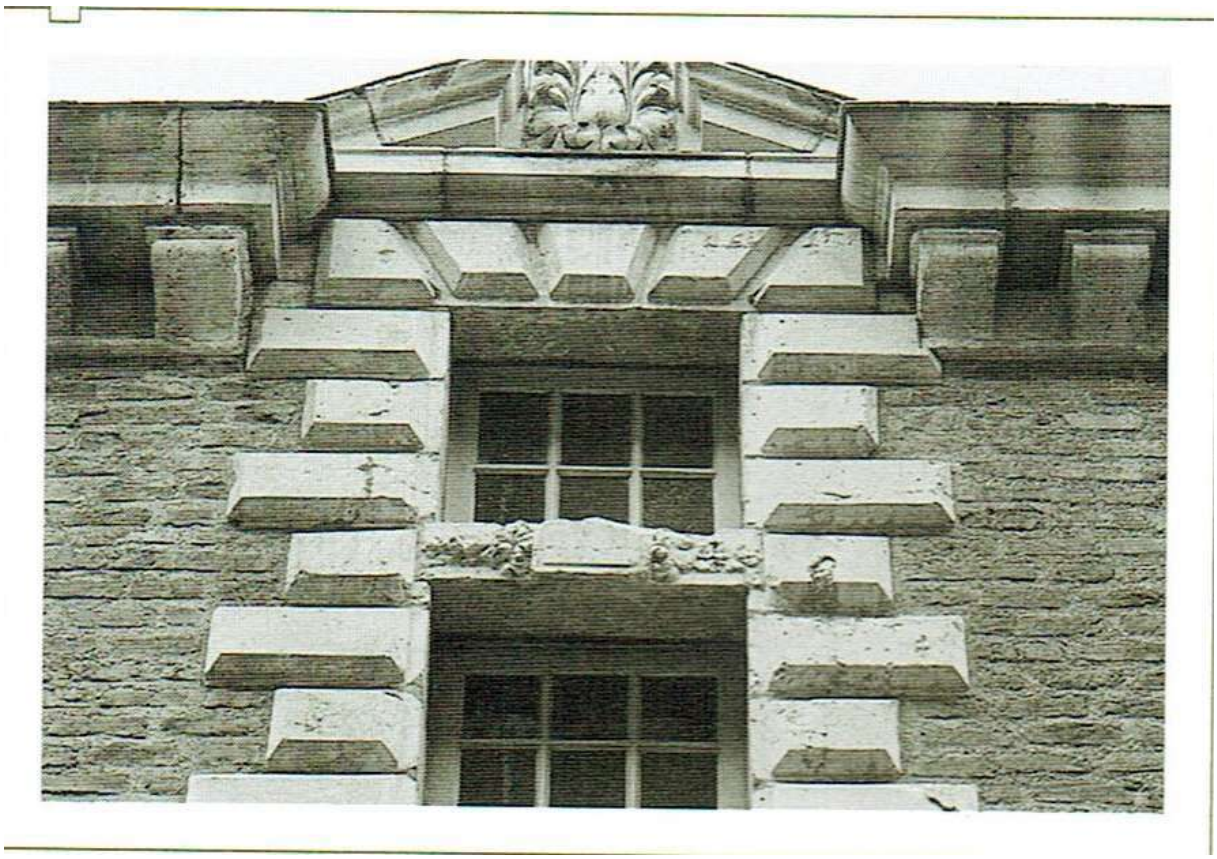


Figure 2-24 :cadre de baie formant une chaine en pierre de taille avec bossages

2-8-1-1-Chaine d'angle :

Une pierre encastrée dans le demi-mur extérieur du mur en retour a une hauteur qui correspond à deux ou trois hauteurs de son lit ,sa longueur de 0.75 m environ est suffisante pour qu'elle soit ancrée dans son mur et qu'elle traverse en boutisse la double rangée d'éléments du mur de façade sur le parement duquel elle apparait ,cette pierre est une harpe ,une pierre encastrée dans le demi-mur extérieur du mur de façade a une longueur de 0.75m environ ;posée sur la harpe inférieure ,elle vient jusqu'au nu extérieur du mur en retour ,au troisième niveau ,les pierres de la chaine d'angle se recroisent comme au premier niveau .

2-8-2-Jambe :

A la jonction entre un mur de refend et une élévation ,une harpe encastrée dans le refend a une longueur suffisante pour pénétrer en boutisse le mur de façade ;au dessus de cette harpe ,une pierre lourde posée dans le demi-mur extérieur de la façade repose sur la harpe issue du refend ;au troisième niveau comme au premier ,la harpe issue du refend repose sur l'assise lourde du mur de la façade.

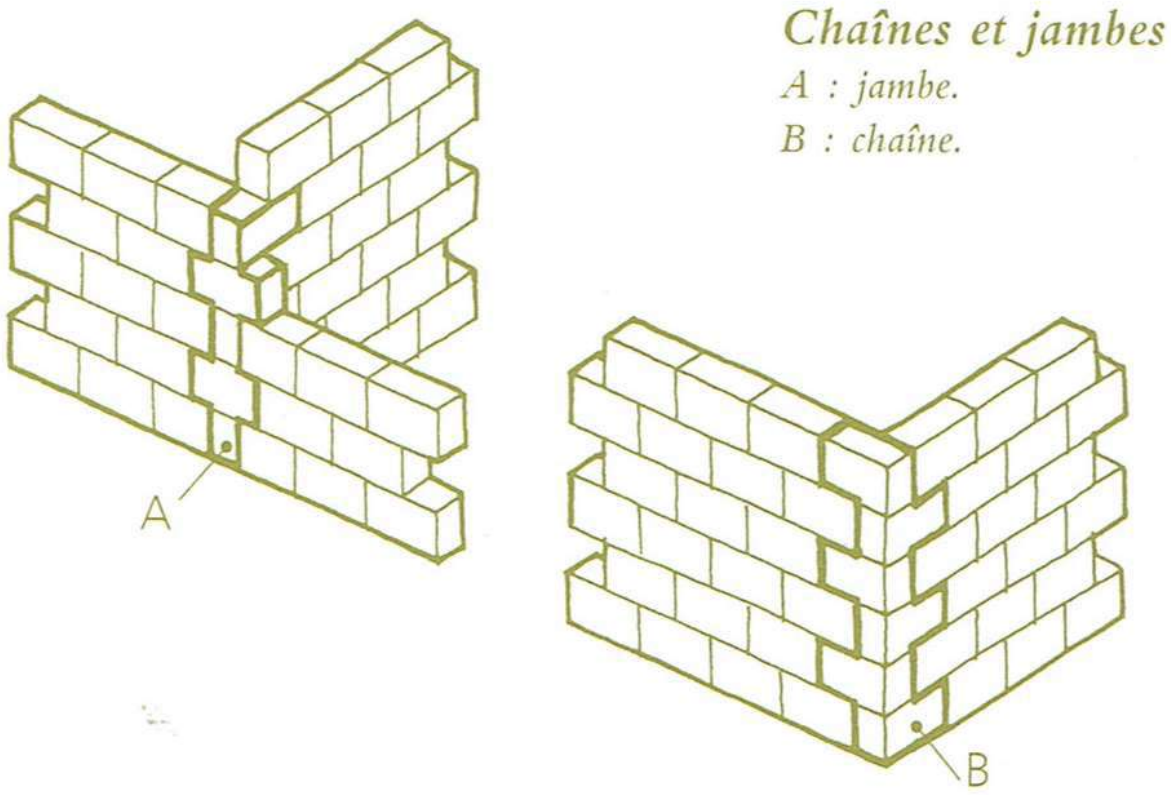


Figure 2-25 :chaines et jambes

2-8-3-Chainages :

Un chainage est un lien horizontal destiné à renforcer la cohésion de la maçonnerie d'une extrémité du mur à l'autre ,il joue un rôle comparable à celui d'un tirant ,il est mis en œuvre au niveau des planchers .

Le chainage visible en façade ,traité comme un bandeau saillant et moulurè,est situé au niveau du plancher haut du rez-de-chaussée ,là ou les ordonnances du rez-de-chaussée et des étages changent d'écriture ,incorporés au demi-mur extérieur ,ceux des autres niveaux apparaissent comme des bandeaux saillants en façade .[6]

2-8-3-1-Chainage en pierre :

Il est bâti avec un seul rang horizontal de pierres incorporées au demi-mur extérieur dont elles constituent un lit ,la longueur de chacune de ces pierres peut atteindre 0.80 m pour une section de 0.20m de haut par 0.30m de large ;ce sont les frottements entre ces longues et lourdes pierres (de l'ordre de 120 Kg chacune) et celles du mur qui donnent au chainage sa résistance à la traction ,la partie saillante de 0.10m sur le nu du mur est en général profilée pour écarter du mur les ruissellements des eaux pluviales :plan incliné d'un glacis sur le saillant de la partie haute et présence d'un larmier creusé dans le saillant bas .

2-8-3-2-Chainage en pierre et mortier :

Ce sont encore des pierres longues qui forment le chainage ,mais leur parement extérieur n'est pas visible ,et le profil du bandeau saillant en mortier de plâtre et chaux est tiré avec un gabarit mouluré .

2-8-3-3-Chainage en bois :

Des pièces de bois longues de 1.50 à 2m pour une section proche d'un carré de 0.12m de coté sont scellées au mortier de plâtre et chaux sur le coté central d'une assise du demi-mur extérieur ,une petite maçonnerie au plâtre et chaux termine le remplissage entre la pièce en bois et le nu extérieur du mur ;des clous à bateau hérissent la pièce en bois et la rendent solidaire de ses mortiers de pose ,les chainages en bois ne sont en général marqués en façade par aucun bandeau saillant .

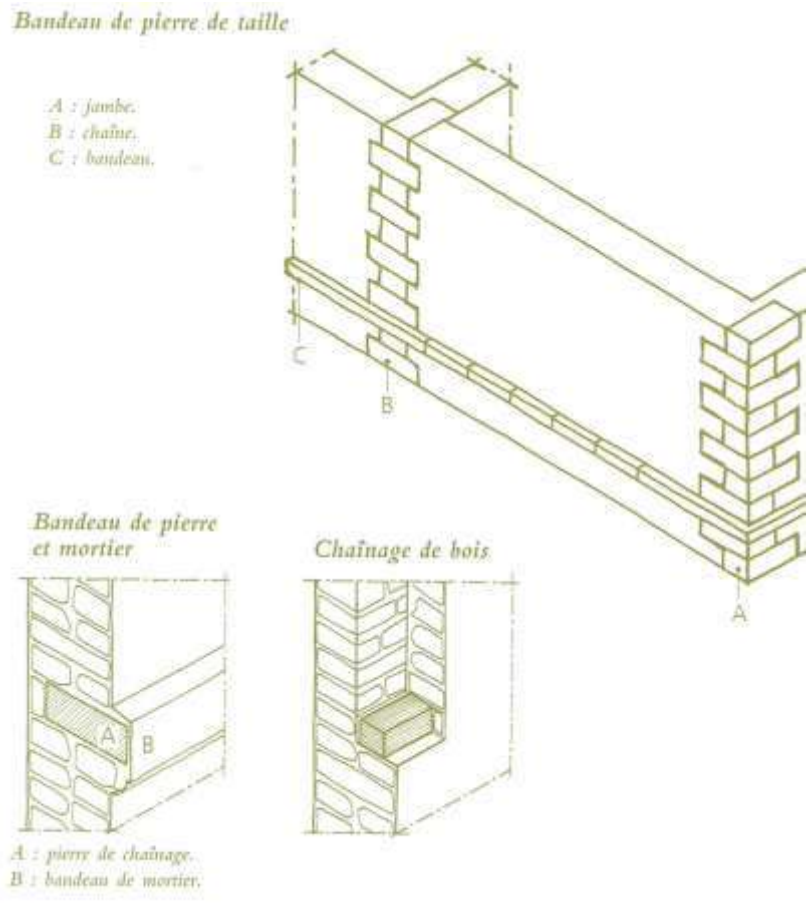


Figure 2-26 :bandeau de pierre de taille

2-8-4-Corniches :

Les corniches portent les dépassements des égouts de toiture par rapport au nu du mur ;elles jouent presque toujours le rôle des chevrons qu'elles remplacent en portant l'avancée des premiers rangs de la couverture au-delà du nu du mur qu'elles protègent contre les ruissellements (les gouttières en zinc ne se généralisent qu'au cours du XX^{e} siècle) ;elles ont également pour fonction de chainer l'arase haute du mur .

La position dominante de la corniche ,plus ou moins mise en valeur par l'ampleur de son volume saillant ,en fait un élément important du décor architectural ;elle est traitée ,suivant les époques et les régions ,avec des formes et des matériaux différents ,son écriture est renforcée quand elle est bâtie avec des matériaux dont la couleur tranche sur celle de la façade .

2-8-4-1-Corniche en plâtre :

Sa seule fonction est d'habiller le dépassement de la toiture dont elle cache les bois ,la panne sablière de la charpente chaine l'arase haute du mur ;la corniche est en général une moulure creuse tracée suivant un arc de cercle de 0.60m environ ;elle est portée par une ossature secondaire en bois ,fixée sur chaque chevron et scellée dans le mur ,portant un lattis sur lequel la moulure est ‹‹tirée ›› en plâtre ou en plâtre et chaux à l'aide d'un gabarit (dont la forme

reproduit en négatif le profil de la moulure),l'utilisation de cette corniche simple ,peu couteuse et essentiellement décorative (encore qu'elle élimine les risques d'installation de nids de guêpes ou de frelons),est notamment une caractéristique forte de l'architecture du pays d'Aix-en-Provence à partir de la fin du XVI^{e} siècle .

Le même profil en gorge est utilisè en Haute-Savoie ,ou la belle facture en bois d'un lattis jointif et peint permet de supprimer l'enduit de corniche .

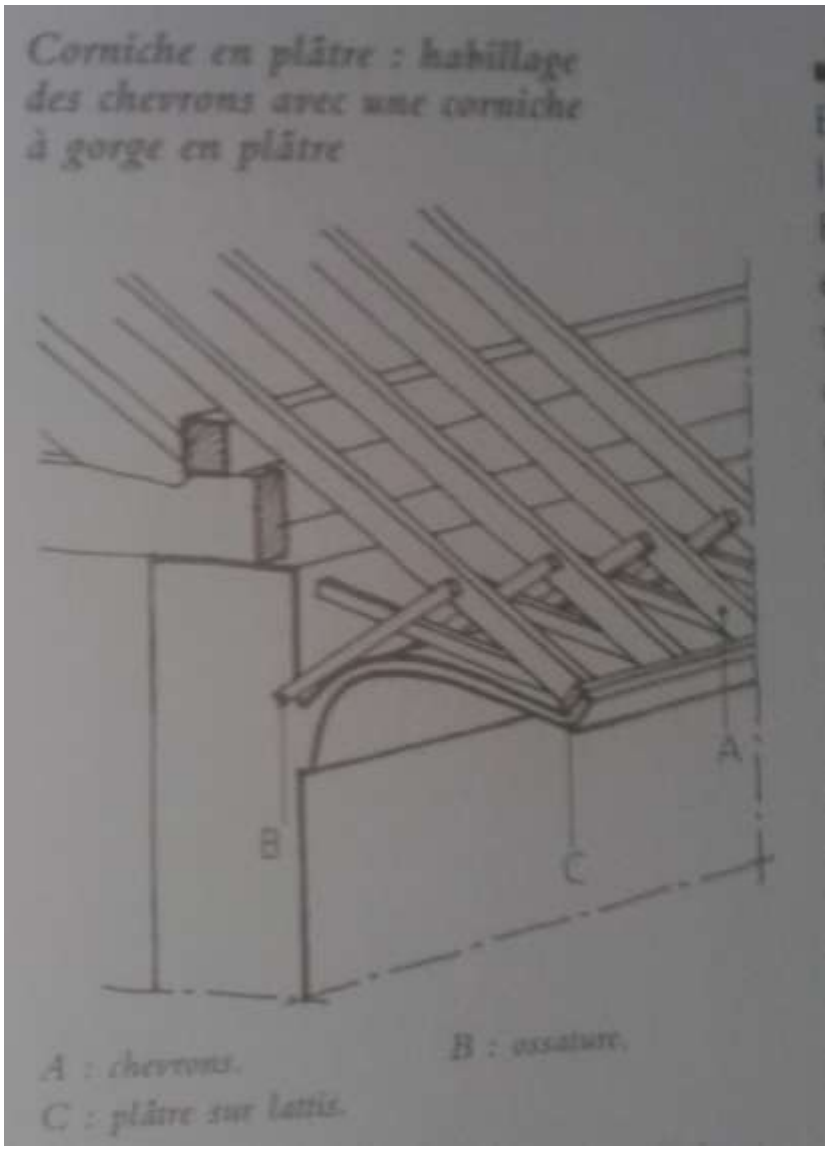


Figure 2-27 : corniche en plâtre

2-8-4-2-Corniche en mortier :

Deux ou trois rangs de moellons montés en encorbellements de portée variable (de 0.20 à 0.30m) forment l'epannelage d'un profil qui est fini avec un mortier .



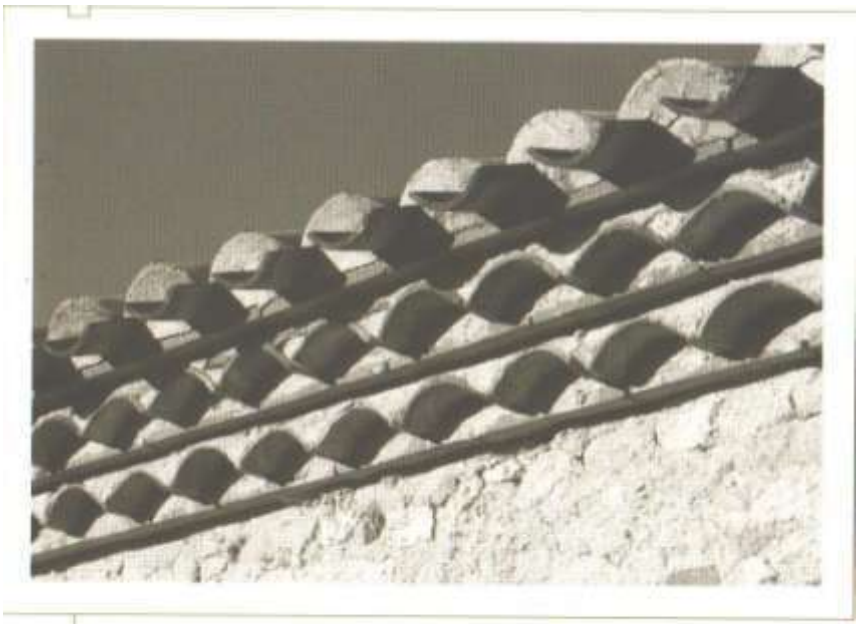
Figure 2-28 :corniche en mortier

2-8-4-3-Corniche en brique :

En Normandie et dans la région de Toulouse mais aussi dans le nord de la France ,on a utilisè la brique posée en encorbellement et dont les parements de terre cuite sont un élément coloré du décor ,la stabilité de cette solution est variable en fonction des dimensions des briques ,dont la longueur doit être suffisante pour former une saillie sur le nu du mur tout en étant encastrée dans son corps, seuls les grands formats de certaines briques toulousaines (28 cm x 28 cm ,28 cm x 42 cm) ont permis de bâtir des corniches stables et saillantes .

2-8-4-4-Corniche en tuile dite génoise :

La plus répandue des corniches en tuile est la génoise ,appareillée avec des tuiles canal dont la longueur ,0.75 m,est suffisante pour exécuter des encorbellements généreux ,cette tradition ,dont l'usage parait s'étendre au bâti rural méditerranéen à partir du milieu du XVIII^{e} siècle ,est fondée sur la flexibilité d'utilisation d'un modèle unique de tuile canal (à l'exception des grandes faitières) avec lequel on couvre une toiture ,on bâtit une corniche ,on canalise les eaux ,etc. Cette corniche ,dite génoise bien qu'il y en ait peu d'exemples dans la région de gènes ,réduit la prise du vent sous les versants des toitures ,suivant l'importance du bâtiment ,elle est bâtie sur un à cinq rangs :le premier est en saillie de 0.15 m par rapport au nu du mur ,le deuxième de 0.15 m par rapport au premier ,etc.les tuiles sont posées en quinconce et de façon que les ailes des tuiles supérieures coïncident avec l'axe des tuiles inférieures ;les rangs sont directement bâtis l'un sur l'autre ,ou bien séparés par une arase de mortier ou par une aire de carreaux en terre cuite .



Corniche en tuiles, génoises, Gaillac, Tarn.

Figure 2-29 :corniche en tuiles,gènoises,gaillac,tarn

2-8-4-5-Corniche en pierre :

Ce sont parfois des pierres plates fichées en alignement horizontal dans le mur ou elles sont tenues par un ou deux rangs superposés de la maçonnerie ;cette corniche ,qui ne porte pas le dépassement de toiture ,est un simple closoir protégeant du vent la sous-face du rampant .

D'autres corniches rurales en pierre sont simplement profilées en biseau ou en courbe ;d'autres encore empruntent parfois aux entablements classiques quelques profils usuels et des éléments particuliers du décor ,comme les denticules .



Figure 2-30 : corniche en pierre ,cotentin

2-8-5-Linteaux et encadrements de baies :

L'encadrement de la baie comprend le linteau ,les jambages du tableau et l'appui de la baie .

Les portes et fenêtres des maçonneries ordinaires les plus modestes sont souvent construites comme de simples interruptions de la maçonnerie ,dans certaines régions ,l'ensemble du cadre de baie est en bois .

Le tableau correspond le plus fréquemment au parement extérieur du mur ,et l'ébrasement au parement intérieur .dans leur configuration la plus modeste ,les jambages du tableau et de l'ébrasement sont lités comme le courant du mur et portent un linteau et un arrière-linteau .ils sont horizontaux ou souvent en arc segment de pierre ,de brique ou de bois à partir du XVII^{e} siècle ,le linteau porte les lits supérieurs de la maçonnerie ,directement ou par l'intermédiaire d'un arc de décharge ou d'une bâtière .

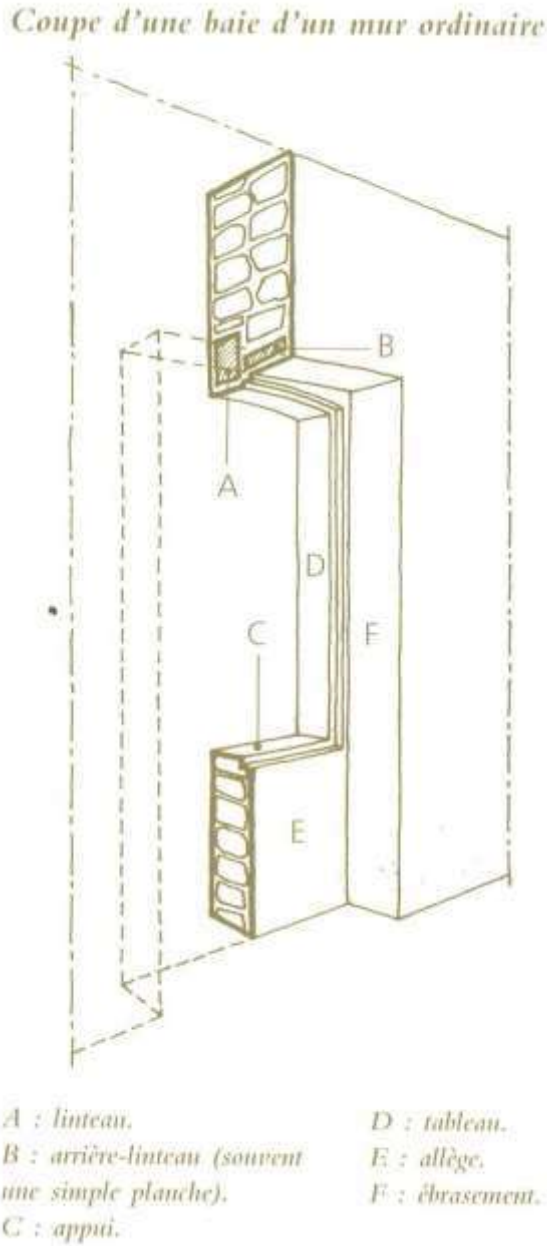


Figure 2-31 : coupe d'une baie d'un mur ordinaire

2-8-5-1-Linteaux et appuis :

Tous les percements ont un linteau qui peut être simple : une pièce de bois ou une pierre monolithe qui franchit la largeur de la baie et porte directement le mur supérieur . le travail du linteau devient organique quand il est surmonté par des arcs de décharge qui reportent les charges supérieurs sur les jambages du tableau ou quand il s'agit d'un arc segment appareillé en pierre ou en brique .

Il est très courant que derrière un linteau appareillé en façade se trouve une simple planche en arrière- linteau



Figure 2-32 : linteau monolithe en calcaire ,bourgogne

2-8-5-2-Jambages et encadrements :

Les jambages du mur composite sont généralement appareillés ,en pierre ou en brique ,et harpés avec la maçonnerie ,ils sont solidaires du parement extérieur du mur ,le tableau intérieur consiste le plus souvent en une simple interruption de la maçonnerie ,mais dans les ouvrages exceptionnels ,il peut également être appareillé et harpé .il arrive ,plus fréquemment dans certaines régions que dans d'autres, que les piédroits du cadre de baie soient monolithes ,lorsqu'ils sont saillants (de 2 à 3 cm),ils participent de l'écriture architecturale de la façade et sont souvent conçus pour servir d'arrêt à l'enduit des parties de maçonnerie courante .

Les appuis protègent l'allège ,qui peut comprendre l'épaisseur totale du mur ou le seul parement extérieur .

Les appuis sont souvent monolithes et saillants pour rejeter les eaux de pluie au-delà du nu de la façade ,mais dans les régions ou peu de pierres longues sont disponibles, ils sont aussi constitués d'assemblages de pierres ou de briques sur chant .

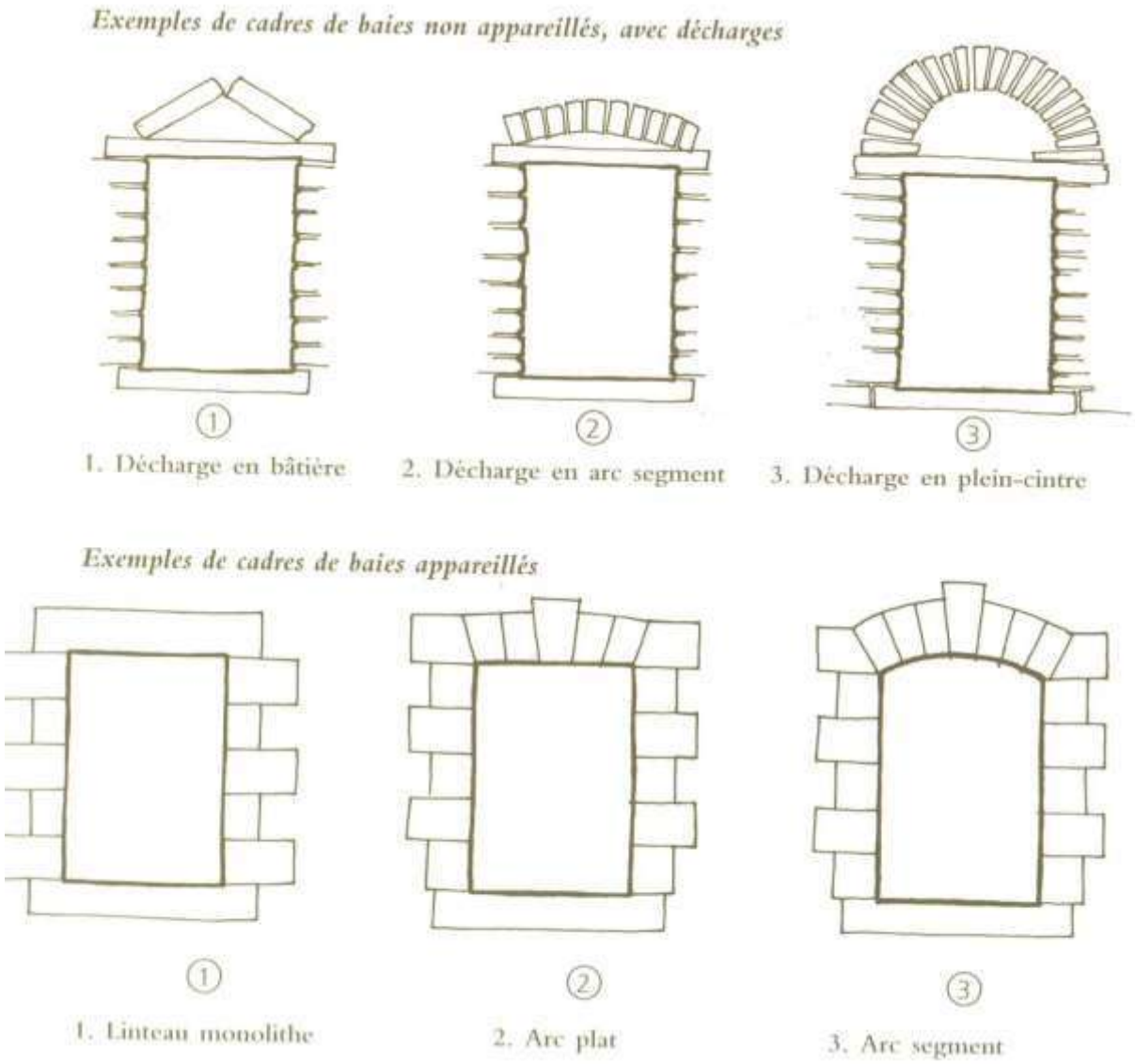


Figure 2-33 : exemples de cadres de baies non appareillés ,avec décharge

Chapitre 3 :la rèparation

3-1-Principes généraux :

Au vu du grand éventail de techniques applicables aux interventions de réhabilitation structurelle des bâtiments de l'architecture traditionnelle méditerranéenne ,il convient d'énoncer quelques principes généraux qui guideront le choix de la technique appropriée en fonction de la situation qui se présentera aussi, avant de passer en revue les procédures et les techniques disponibles ,commencerons –nous par exposer synthétiquement les aspects déterminants de toute intervention ,quel que soit l'objectif ciblé ou la problématique à résoudre.[10]

3-1-1-connaissance et adaptation au contexte technologique du lieu :

la faisabilité de l'application de la technique d'intervention retenue avec les ressources disponibles sur place ,de la manière la plus naturelle possible ,en profitant des connaissances et des savoir-faire des artisans du secteur ,est une priorité essentielle qui se traduira toujours par une réduction des couts de l'intervention ,comparée à d'autres solutions applicables et, probablement ,par une compatibilité plus aisée ,doublée d'une meilleure adaptation aux caractéristiques de techniques constructives d'origine.[10]

3-1-2-considération globale des répercussions de l'intervention :

il ne faut pas oublier que les interventions –quelle que soit la spécifié de leurs objectifs – peuvent avoir des effets complémentaires très divers dont il faudra tenir compte avant de prendre une décision .par exemple ,renforcer un mur extérieur par l'application d'une couche de béton projeté servira aussi à le rendre plus étanche ;ajouter une dalle de compression armée à un plancher renforcera l'isolation acoustique .dans tous les cas ,il faut également examiner les effets négatifs qui lui seront probablement associés ,tels que la modification des espaces par la mise en œuvre des poutres maitresses ou de piliers, l'obligation d'effectuer des travaux d'entretien sur les parties ajoutées ,etc.par conséquent ,il y a lieu de considérer tous les effets dans leurs ensemble ,qu'ils soient favorables ou défavorables .

3-1-3-clarté de l'approche mécanique et structurelle :

dans les travaux de réhabilitation structurelle des bâtiments ,il convient de spécifier clairement l'objectif technique visé par l'intercention proposé .trois approches sont possibles :

1-la restauration de la capacité portante initiale de l'élément à réhabiliter .il s'agit ,de fait ,de ce que nous interprétons habituellement comme étant la rèparation de l'élément endommagé ;

2-l'augmentation de la capacité portante de l'élément sur lequel nous intervenons ,qui équivaut généralement au renfort de l'élément endommagé ;

3-le remplacement fonctionnel de l'élément par un nouvel élément assumant entièrement la capacité portante requise ,sans retirer nécessairement l'élément à réhabiliter.

Bien sur ,le choix de l'approche dépendra des exigences mécaniques requises ainsi que de la capacité à les satisfaire de l'objet de l'intervention .

3-1-4-singularité des interventions portant sur des bâtiments d'une valeur patrimoniale particulière :

quand le bâtiment est un bien culturel d'une valeur patrimoniale particulière ,il convient de penser à d'autres aspects spécifiques qui assureront la préservation au fil du temps de ses caractéristiques d'origine. C'est ainsi que des notions telles que la réversibilité ,qui permettra au besoin d'éliminer les effets d'une intervention ,seront jugées prioritaires dans le choix de la technique à appliquer .par contre ,dans un autre domaine plus essentiel ,il sera admissible ,sans avoir à fournir d'autres arguments pour en justifier la pertinence ,de choisir de restaurer à l'identique ,à condition bien sur que la prestation fonctionnelle de la méthode répondre aux exigences de l'intervention .[10]

3-2-interventions sur les murs et les piliers :

Les matériaux et les appareillages des murs épais d'autrefois ,en pierre et en terre ,sont peu résistants aux tensions de traction et de cisaillement ,précisons aussi que l'eau les fragilise considérablement du fait de la forte perméabilité de la terre et de la plupart des mortiers employés .

Il en ressort quelques règles générales d'intervention sur ces éléments qui ,alliées aux premières règles citées plus haut ,vont conditionner le choix de la technique de rèparation ou de renfort à appliquer dans chaque cas .plus précisément et quelle que soit la technique appliquée ,il faut prendre soin de distribuer de manière homogène les sollicitations introduites ,afin d'éviter dans la mesure du possible des efforts additionnels de traction ou de cisaillement dans le mur.de même ,il y a lieu de ne pas augmenter les efforts de compression ,vu la difficulté à caractériser cet effort par des essais dans la plupart des vieux murs .pour terminer ,il peut être utile de chercher à absorber les efforts dans le plan transversal du mur ,en créant ainsi une résistance capable de le rendre plus robuste et de contenir les poussées .

Nous allons examiner maintenant et commenter les techniques d'intervention qui s'appliquent le plus souvent à ces éléments .[10]

3-2-1-Remplacement physique de la partie endommagée :

Il s'agit de remplacer le matériau de la partie fissurée ,bombée ou menacée par la dégradation et de reconstruire avec le même matériau ou d'autres dont la résistance et la déformabilité seront similaires. Dans les murs ou les piliers en pierre ou en brique ,l'usage veut que l'on reprenne le même matèriau,tandis que dans les murs en terre ,on pourra employer la brique .dans tous les cas ,l'objectif de l'intervention ne peut que prétendre restaurer la capacité portante initiale de l'élément endommagé .

Il est important de ne pas oublier que ce type d'intervention requiert l'élimination préalable de la cause du problème ou au moins la constatation d'un dommage passif au sens où la cause

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



Figure 3-1 :remplacement physique de la partie endommagé

3-2-2-Reprise de fissures :

La méthode consiste à intercaler entre les lèvres de la fissure du mur des éléments plus résistants et plus rigides en guise de sutures ,tels que des agrafes métalliques ,des morceaux de brique, etc.il s'agit de retrouver la continuité perdue du mur endommagè,de sorte que les tensions puissent être de nouveau transmises et distribuées de manière homogène dans la partie lèzardèe.pour que cette méthode soit efficace ,il faut que la fissure soit passive comme nous venons de l'expliquer, c'est-àdire que la cause de son apparition n'agisse plus sur la partie à réparer.

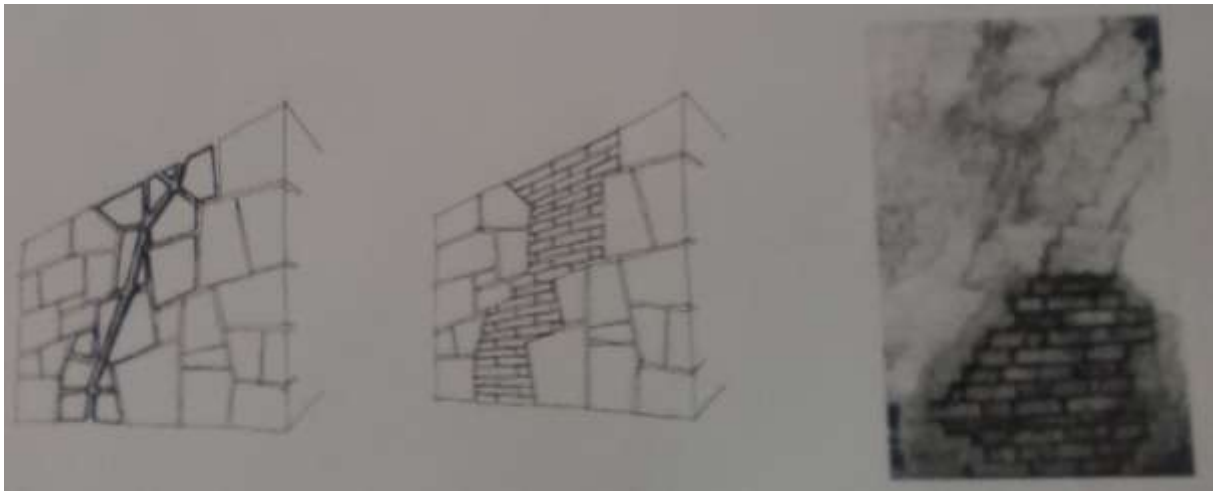


Figure 3-2 :reprise de fissures

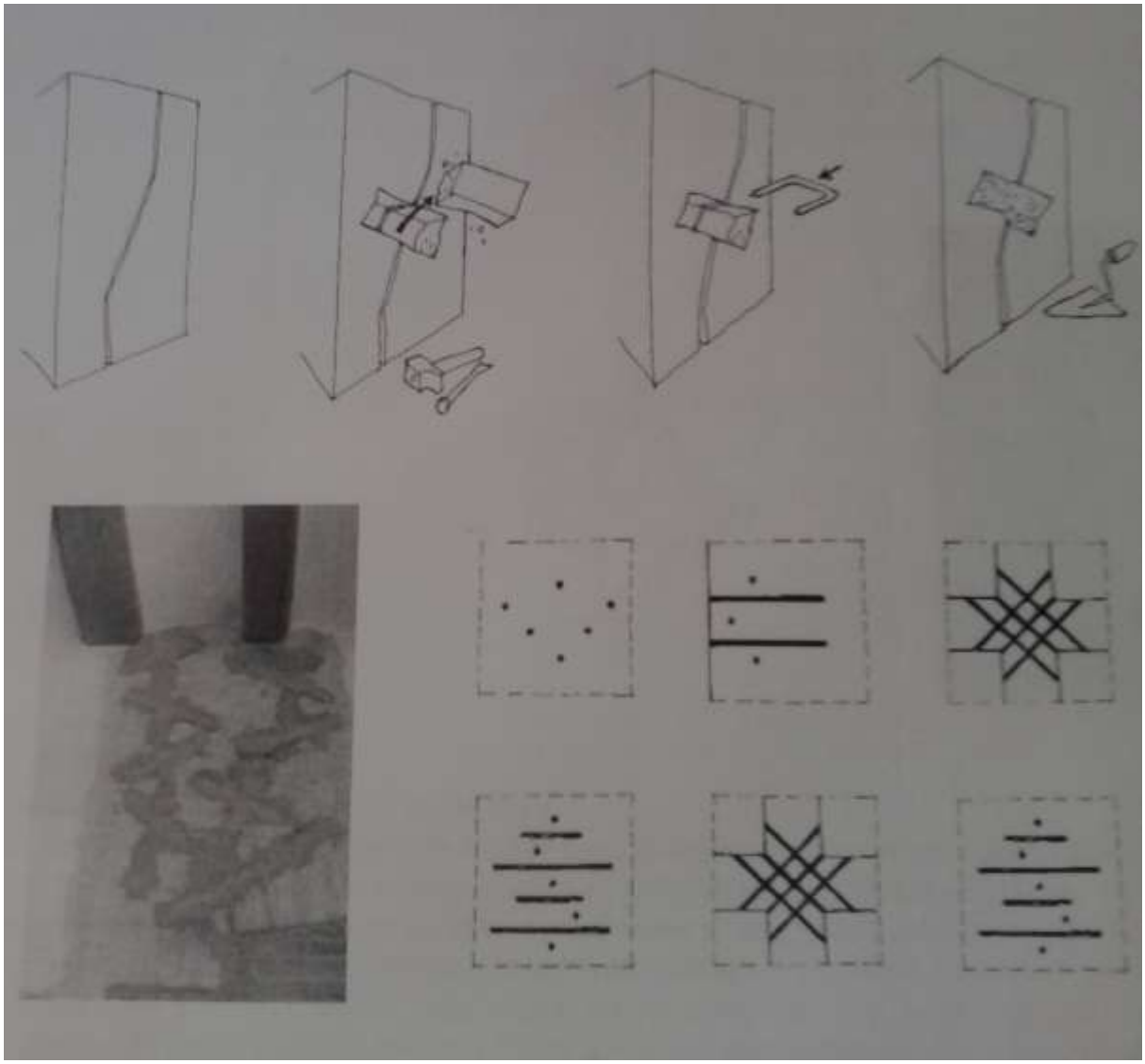


Figure 3-3 :reprise de fissures

3-2-3-Injections :

Il s'agit d'un autre système de rèparation de fissures et de brèches passives ,applicables à des murs en maçonnerie appareillée ou en brique ,qui consiste à introduire un liquide sous pression pour colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure ,en durcissant et en adhérant au support ,ce liquide restitue à l'élément endommagée sa continuité d'origine.les caractéristiques du liquide –généralement à base de composants époxydiques-et la pression d'injection varient en fonction des matériaux du mur et de la taille du trou à reboucher .le scellement superficiel ,préalable à l'injection dans la fissure ou la brèche ,doit être capable de supporter la pression du liquide avant son durcissement.[10]



Figure 3-4 : injections

3-2-4-Rejointoiements :

C’est une procédure de restitution de la résistance initiale applicable aux murs en pierre ou en brique qui consiste à rejointoyer au mortier les parties détériorées par l’érosion ou par les racines de plantes qui ont poussé entre les pierres ,des produits de densité ou de viscosité variables sont introduits par gravité ou par infusion ,en fonction de la technique d’exécution employée .

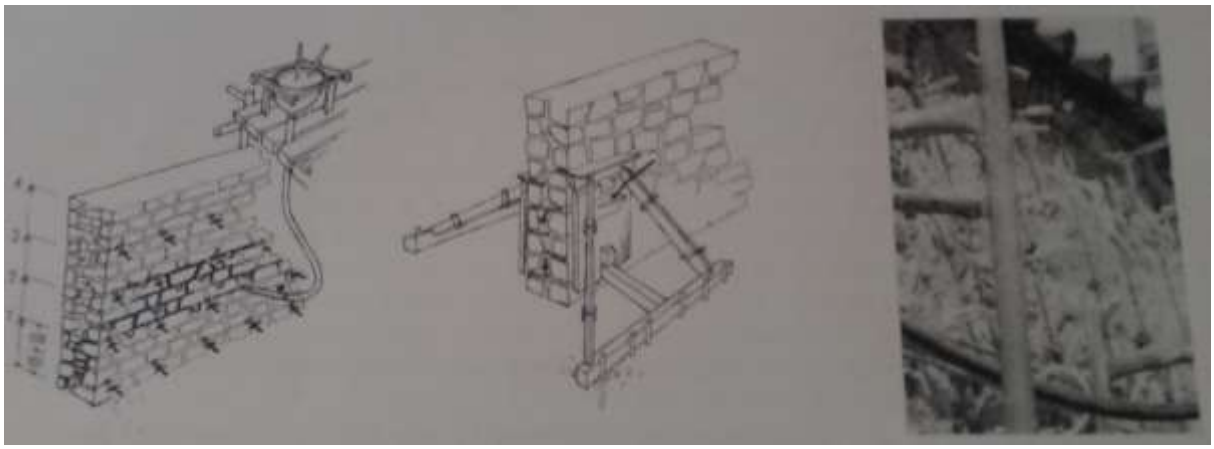


Figure 3-5 :rejointoiements

3-2-5-Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé :

Cette technique consiste à augmenter la section du mur endommagé ou sous dimensionné en incorporant aux parements des épaisseurs de matériau-mortier ou béton-après la pose de

treillis métalliques ,solidaires entre eux dans le mur ,la mise en œuvre du matériau de renfort peut se faire en disposant des coffrages parallèles aux parements et en y coulant ensuite la préparation ,ou bien par simple projection sur les parements avec le treillis déjà en place ou encore par gunitage en choisissant la procédure selon l'épaisseur requise et le supplément de résistance attendu du renfort .cette solution est très polyvalente en ce qu'elle s'adapte à des structures de murs complètes ,à des murs entiers ou à des pans prècis.cette qualité la rend tout spécialement appropriée pour renforcer des bâtiments que les mouvements sismiques auront abimés ,en augmentant la rigidité des parties du bâtiment qui l'exigent et ,au besoin ,celle de l'ensemble du bâti .

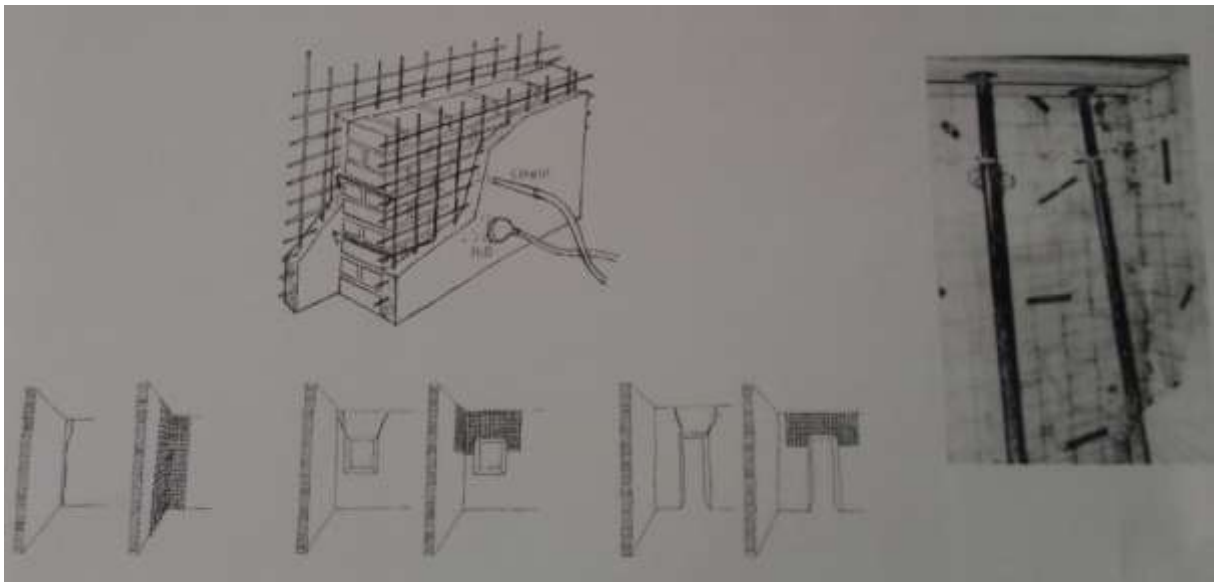


Figure 3-6 :enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé

3-2-6-Pose de tirants :

La pose de tirants dans les structures murales vise généralement à freiner l'effondrement des murs ou leurs déformations progressives transversalement à leur plan ,cette méthode consiste à disposer des éléments linéaires qui vont exercer des tractions ,appelés tirants, ces éléments sont constitués en principe d'un câble d'acier et fixés à deux murs opposés par des pièces spécifiques d'ancrage qui évitent l'évolution de leur écartement et la perte subséquente de leur capacité résistante ,il convient de prévoir que l'un des deux éléments d'ancrage ,au moins ,admettra le réglage périodique de la tension pour compenser les effets de l'allongement éventuel du tirant.

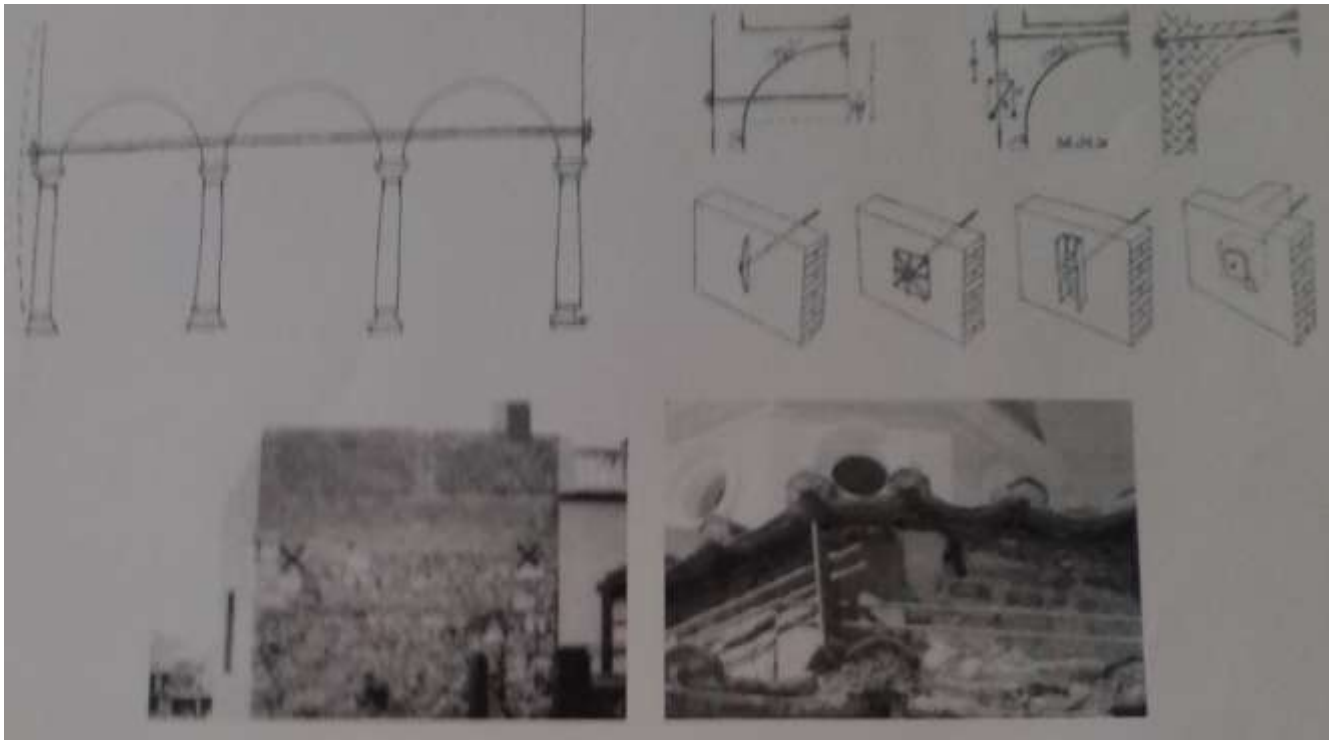


figure 3-7 :pose de tirants

3-2-7-Contreforts :

Leur fonction équivaut à celle des tirants et il est pratiquement obligatoire de les appliquer lorsque le bâtiment ne dispose pas d'éléments suffisamment rigides ,capables d'absorber les tensions ponctuelles créées aux points d'ancrage des tirants .dans ces cas ,l'absorption des poussées des voutes ,des arcs ou de tout autre élément qui introduirait des sollicitations inclinées dans les murs ,peut être confiée aux contreforts, car ils sont capables de transmettre ces actions au terrain à travers leur section ,dans la conception et le calcul du contrefort, il faut tenir compte de la forte limitation de l'assise requise par le nouveau contrefort pour fonctionner correctement.[10]

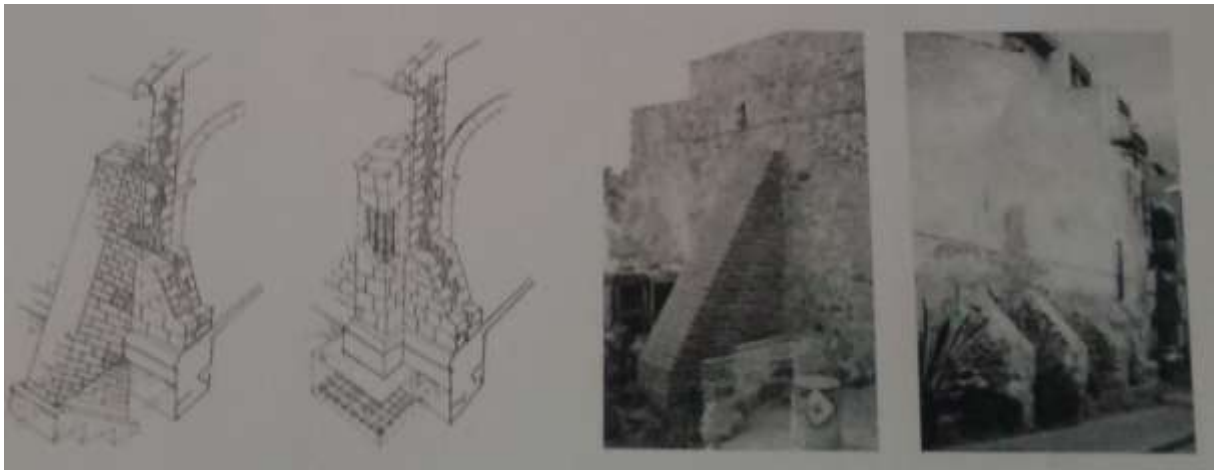


Figure 3-8 : contreforts

3-2-8-Chainage :

La disposition de ceintures ou de courroies sur le pourtour de murs structurants fermés ,montés avec un appareillage en brique ,d'un bâtiment ou sur ses piliers en pierre ou en brique ,pour les rendre plus robustes et augmenter leur résistance ,est un système ancien que l'on retrouve dans de nombreux édifices historiques bien connus, tels que le colisée romain ou les clochers italiens du moyen âge .le fer et l'acier sont les matériaux employés depuis longtemps pour fabriquer ces éléments ,plus récemment ,les bandes en fibre de carbone remplissent la même fonction dans certaines situations,nèanmoins,il est nécessaire de considérer les effets du matériau qui adhèrera à l'élément renforcé.

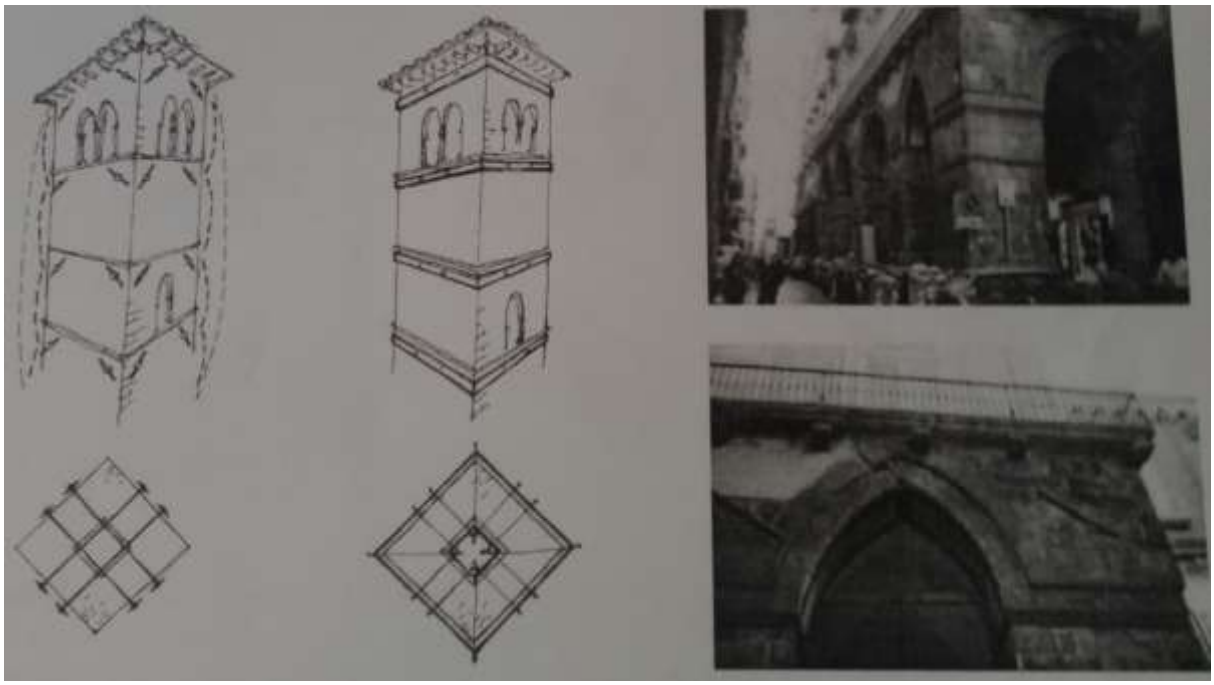


Figure 3-9 : chainage

3-2-9-Taxidermies avec des barres d'acier :

C’est un système de renfort intégral ,applicable aux murs en pierre ou en brique ,qui consiste à mettre en œuvre des armatures en acier à l’intérieur du mur ,embouties dans des perforations atteignant parfois quelques mètres de longueur ,de sorte à créer de véritables structures secondaires de barres à l’intérieur des murs ,pour augmenter leur capacité de résistance globale ou créer des zones plus rigides ,capables de distribuer de manière homogène les sollicitations descendantes, le contact entre les barres d’acier et le matériau dont le mur est constitué se fera au moyen d’un produit adhérant ,généralement à base époxydique .

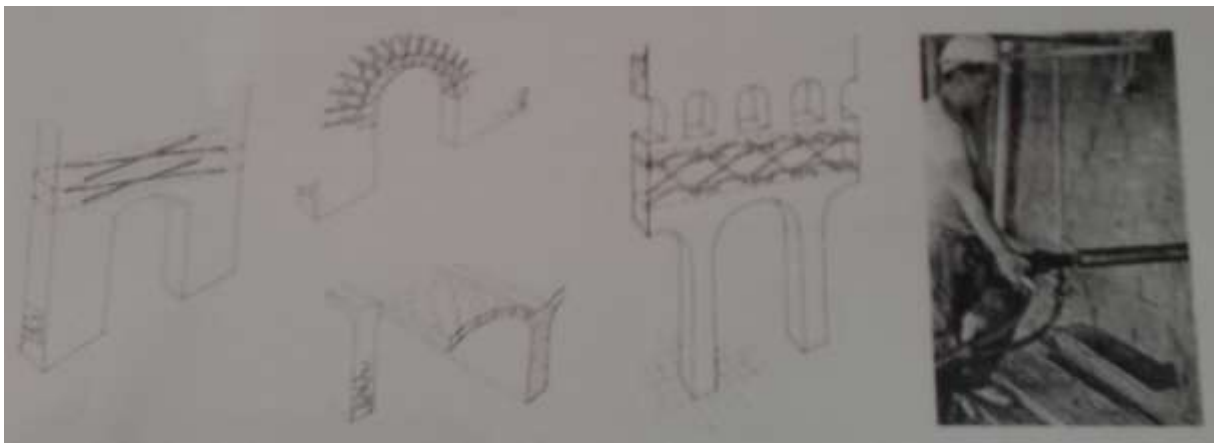


Figure 3-10 : taxidermies avec des barres d’acier

3-2-10-Collage des pierres :

On peut recoller les pierres cassées lors qu’il s’agit d’éléments d’ornementation qu’il serait trop couteux de remplacer ,par exemple les linteaux ou les éléments d’une corniche ,on utilise à cet effet un mélange de résine –époxy liquide et de poussière de pierre ,la résine est une sorte de colle transparente ,de teinte jaunâtre ,à laquelle on ajoute un catalyseur .la poussière de pierre naturelle donne au mélange la même couleur que la pierre à coller ,il est possible de recoller la pierre en place par injection du mélange ;si les éléments sont disloqués ou si la fissure est trop large ,on procède ainsi :

a)installer ,au besoin ,un support temporaire (étai) au-dessus de la pierre ,s’il s’agit d’un élément structural

b)retirer la pierre cassée ,nettoyer ,à l’aide d’une brosse à crins durs ,les deux faces à recoller et y pratiquer des petites encoches au ciseau ,pour une meilleure adhérence ,s’il s’agit d’un élément structural ,poser des petites tiges d’armature ,généralement en acier inoxydable.[11]

c)lorsque les surfaces sont sèches ,mélanger la résine et la poussière de pierre pour obtenir une pate consistante et homogène ,appliquer le mélange sur une des deux faces de l'élément et replacer les deux morceaux ensemble ,nettoyer immédiatement l'excès de colle .

d)laisser durcir la colle en gardant la pièce à l'abri pendant quelques jours.

e)réintégrer l'élément au mur selon la méthode décrite plus loin pour le remplacement des pierres .

3-2-11-remodelage des pierres :

on entreprend le remodelage des éléments décoratifs sculptés lorsqu'ils ne sont pas trop détériorés ,dans certains cas ,il est préférable de les remplacer par de nouvelles pierres du même modèle ,le remodelage peut être réalisé avec un mortier composé de ciment portland ,de poussière de pierre naturelle et d'eau ,le travail est exécuté comme suit :

a)gratter la surface et enlever au ciseau les parties détériorées pour atteindre la couche de pierre saine .

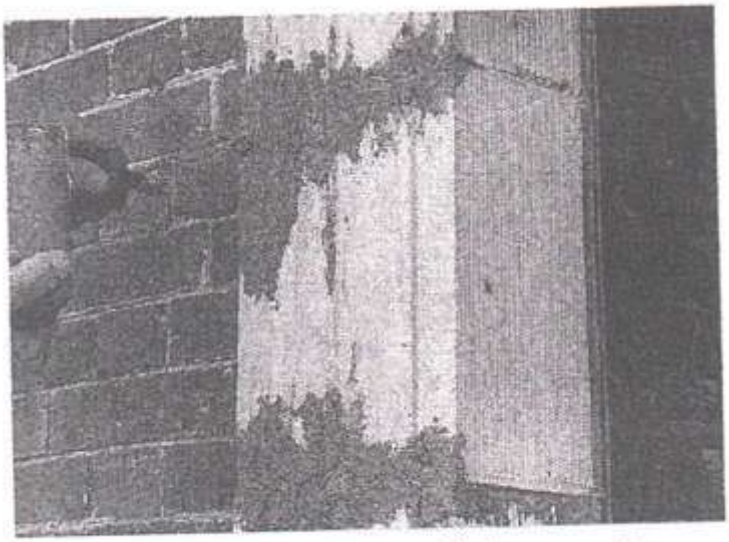
b)installer ,au besoin ,un treillis métallique compatible avec le produit de remodelage.

c)appliquer le mortier en plusieurs couches successives comme pour le rejointoiement en donnant à chaque couche le profil de l'ornement .la dernière couche est appliquée au moins une journée après le durcissement de la précédente et elle est texturée comme les autres pierres de la façade .

La réparation d'un chambranle de pierre.



A) *Surface grattée et nettoyée*



B) Application d'un mortier en plusieurs couches



C) Finition

Figure 3-11 : remodelage des pierres

3-2-12-Remplacement des pierres :

Lorsqu'on remplace une pierre ,il est important que le matériau choisi soit de même nature et de même finition que la pierre d'origine ,voici la méthode à suivre :

a)installer un étai ,au besoin ,avant de démonter l'élément ,évider les joints, retirer la pierre et nettoyer la cavité en prenant soin de ne pas abimer les pierres adjacentes.[11]

b)vérifier l’ajustement du nouvel élément en le plaçant dans la cavité sans mortier et corriger ses dimensions au besoin ,mouiller toutes les faces de la cavité et les recouvrir d’une généreuse couche de mortier.

c)mettre en place le nouvel élément et l’aligner sur les autres pierres à l’aide d’un maillet de caoutchouc ;s’il est trop enfoncé ,il faudra le retirer et ajouter du mortier ,façonner les joints selon le profil des joints existants .

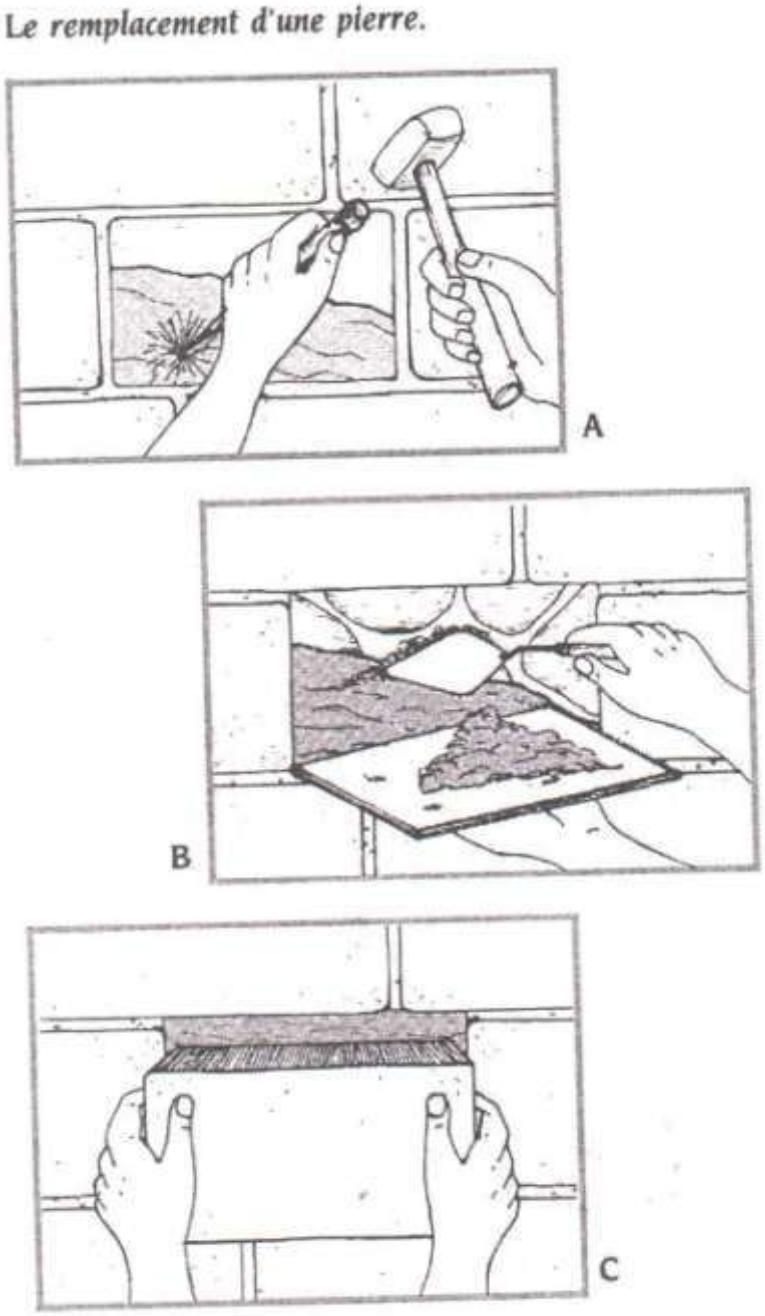


Figure 3-12 : remplacement des pierres

3-2-13-Rèparation des fissures :

Lorsque l'évolution d'une fissure est arrètèe,on peut procéder à sa rèparation de la façon suivante :

a)à l'aide d'un ciseau ,enlever toutes les parties friables ou détériorées de la maçonnerie de chaque coté de la fissure ;nettoyer les résidus avec une brosse dure ,si la largeur de la fissure

excède 25 mm (1po),percer des petits trous dans la pierre saine pour améliorer l'adhérence ;si la fissure est très large, y enfoncer un treillis à une profondeur de 12 mm(1/2po).

b)préparer un coulis de ciment de couleur semblable aux éléments du mur ;on obtient la couleur désirée en ajoutant de la poussière de pierre au mélange ,construire un petit coffrage étanche en bois ou en plastique et remplir la fissure de ciment ,au moyen d'un entonnoir ;au besoin ,prolonger le coffrage au fur et à mesure qu'on remplit la fissure ,attendre que le ciment durcisse suffisamment .enlever le coffrage ,nettoyer le surplus de coulis et exécuter la finition de surface à l'aide d'une truelle ,d'une brosse ou d'un fer à joints .

certaines fissures apparaissant au-dessus des portes ou des fenêtres dans un mur de maçonnerie peuvent indiquer une faiblesse du linteau qui surmonte l'ouverture ,dans ce cas ,il faut le démonter en ayant ,au préalable ,installé un étai ,on peut alors recoller le linteau s'il est cassé et poser une cornière d'acier bien appuyée de chaque coté de l'ouverture ,le linteau est ensuite réinstallé sur cette cornière qui absorbe ainsi une partie des charges ,en tout dernier lieu ,on procède à la rèparation de la fissure de la façon décrite ci-dessus.[11]

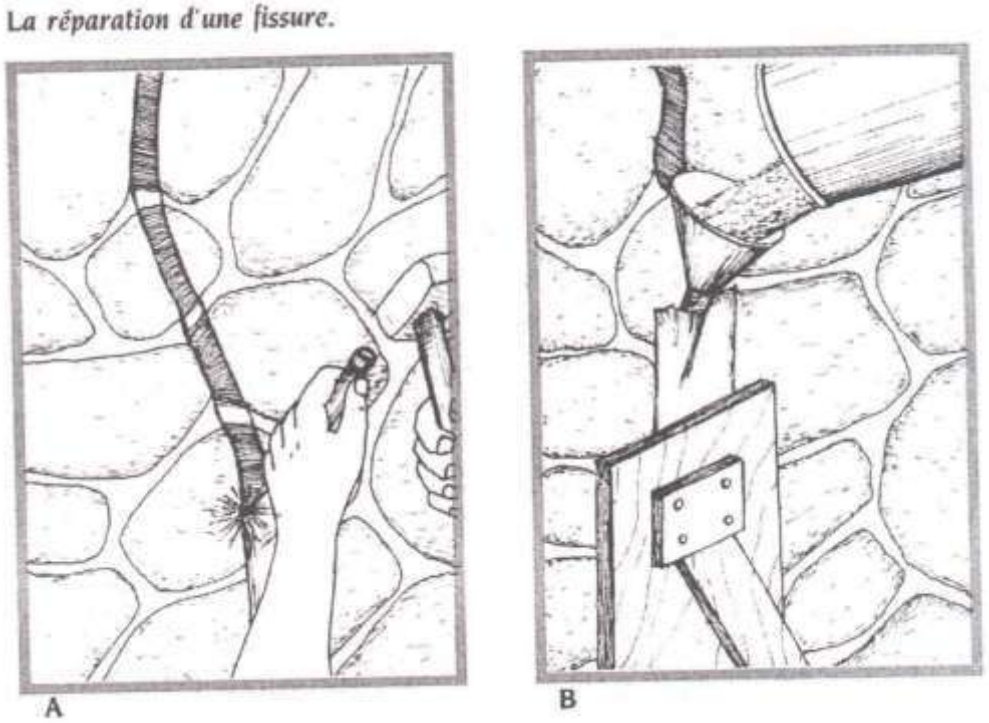


Figure 3-13 : rèparation des fissures

3-2-13-1-Prescriptions particulières de rèparation des fissures supérieures à 10mm pour les murs en maçonneries :

Si la largeur des fissures dépasse 10mm et si les briques ou les moellons sont endommagés le long de cette fissure ,l'injection seule n'est plus efficace :[12]

Pour les fissures verticales :

Agrafage du mur :

On peut restituer à une section fissurée sa résistance à la traction en posant des cavaliers ,un peut à la manière dont on coud du tissu[SID 69],[BER 10].

Cette opération consiste à dégager les briques ou les moellons sur une largeur de 15 à 20cm de part et d'autre de la fissure et de les remplacer soit par d'autres en utilisant un mortier très riche en ciment ,soit par du béton avec des fers ronds ou avec des fers plats en forme de U [CGS2 92]

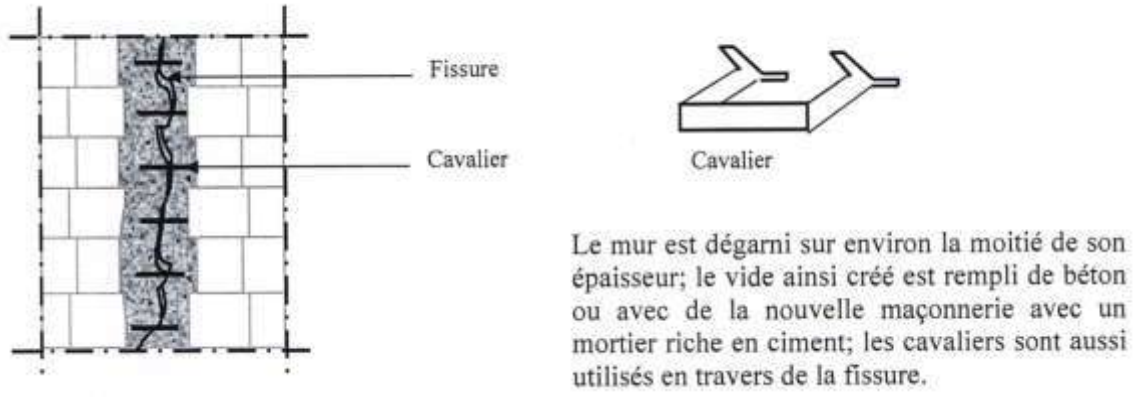


Figure 3-14 : rèparation de fissure verticale à l'aide des cavaliers

Gainage :

Le procédé consiste à réparer les murs fissurés en utilisant des gaines en béton armé qui permettent d'augmenter la rigidité du système de contreventement de l'ouvrage

Il est préférable de gainer le mur sur les deux faces avec des liaisons ;un treillis soudé est placé de part et d'autre de la fissure ,maintenu par des étriers (tout en exécutant un perçage au niveau des murs afin de placer les étriers)

Le béton de la gaine est mise en œuvre par projection .l'épaisseur de la gaine est de 3 à 4cm pour la maçonnerie en brique simple et de 8cm ou plus pour la maçonnerie lourde[CGS2 92]

Pour les ouvrages relativement petits ,il n'est pas nécessaire de gainer le mur sur toute sa surface .il suffit de gainer certaines parties choisis minutieusement[12]

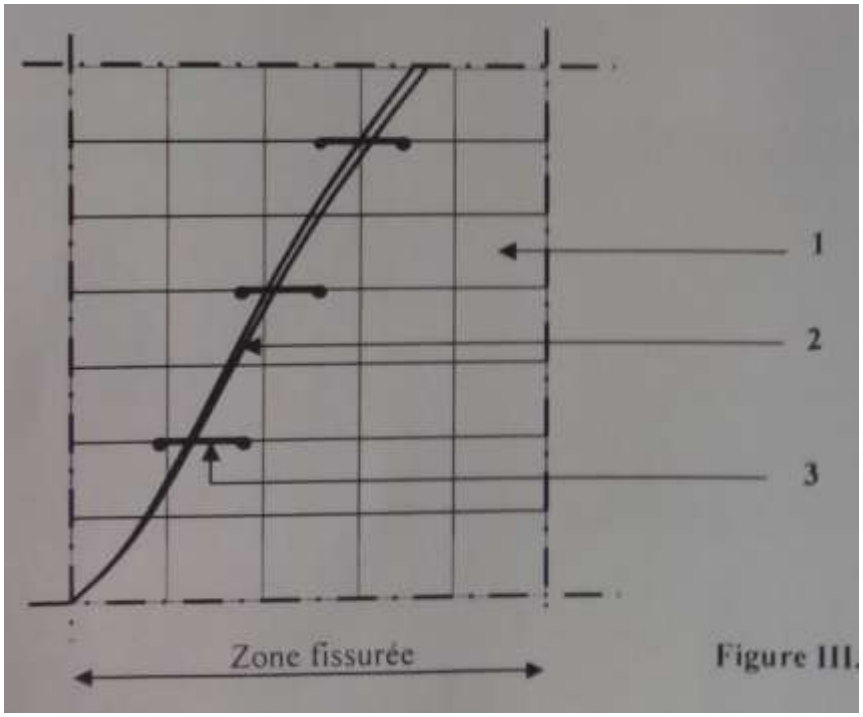


Figure 3-15-a :gainage du mur fissuré

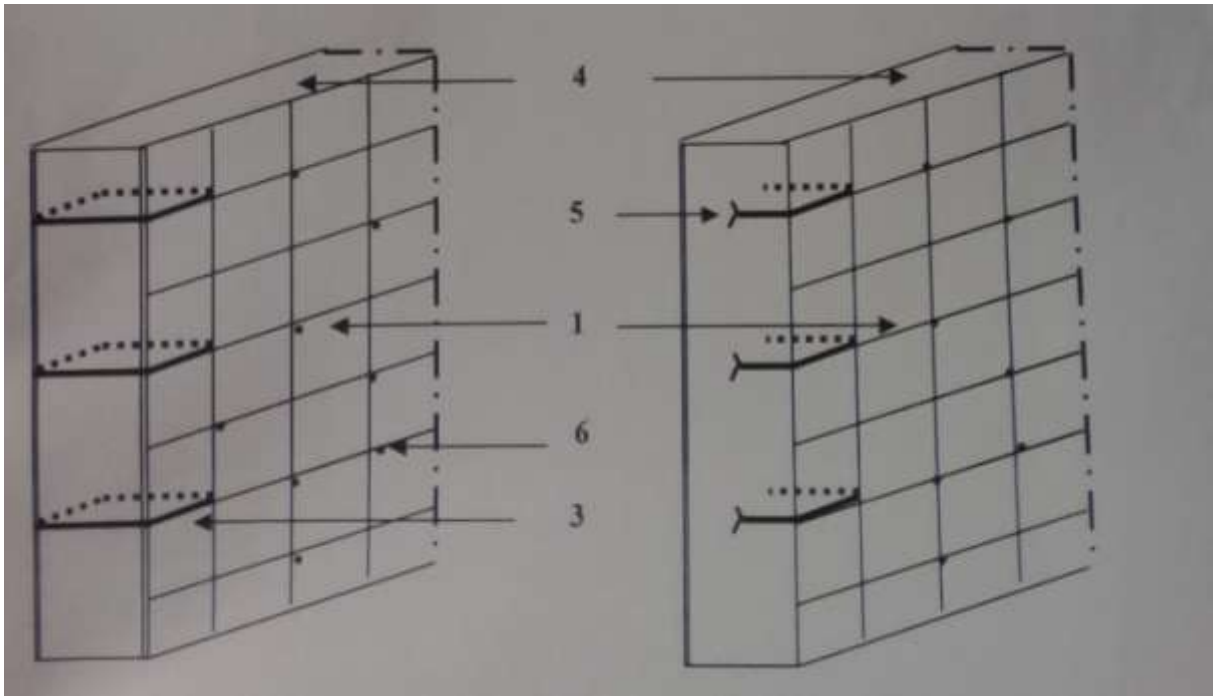


Figure 3-15-b :gainage du mur fissuré sur les deux faces et sur une face

1-treillis soudé,2-fissure,3-étrier,4-mur fissuré,5-agrafage avec fer plats,6-clouage du treillis soudé

Pour les fissures inclinées :

Dans le cas des fissures inclinées ,l'injection seule n'est pas suffisante et il faudrait procéder à la réalisation de potelets en béton armé en plusieurs endroits pour rigidifier le mur

Pour cela il faut dégager des briques ou les moellons sur une largeur de 15 à 20cm le long d'un tracé vertical ,sur une profondeur de 10 à 15cm .la cheminée ainsi crée est remplie de béton armé .si la réalisation des potelets est difficile ou impossible ,il est possible de réaliser des chainages apparents de part et d'autre du mur[CGS2 92]

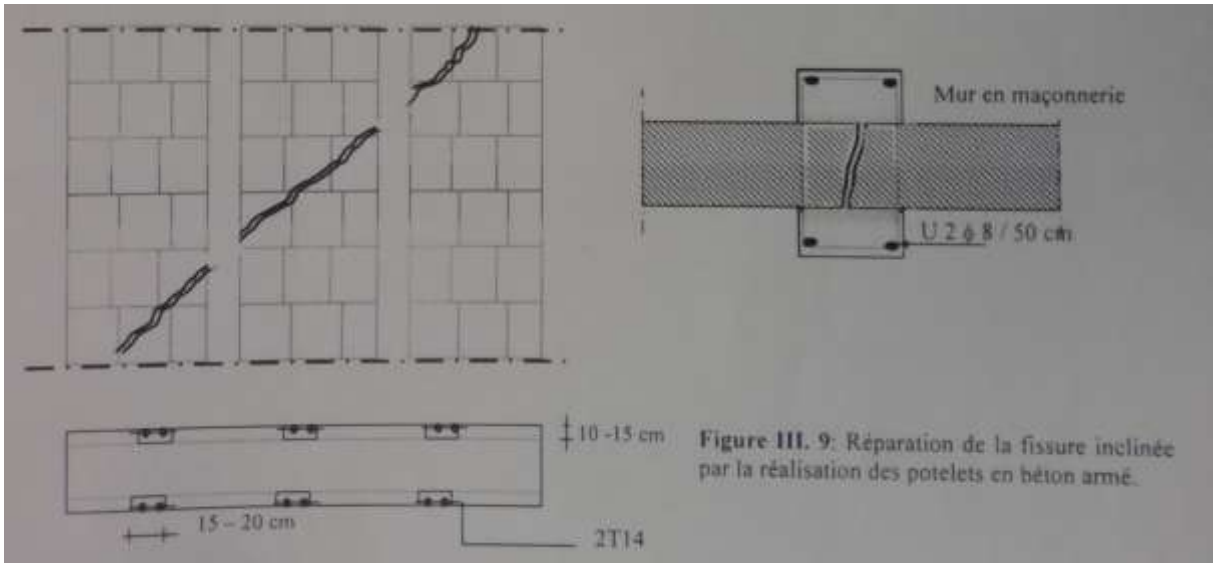


Figure III. 9: Réparation de la fissure inclinée par la réalisation des potelets en béton armé.

Figure 3-16 : rèparation de la fissure inclinée par la réalisation des potelets en béton armé

Pour les fissures à l'intersection des murs :

Comme les murs en maçonneries sont mal liaisonnés ,il résulte de larges fissures verticales ou des séparations totale qui éliminent les effets d'interaction .en prenant en considération la faiblesse des constructions en maçonneries ,les procédures de rèparation doivent être combinées avec celles de rigidification des intersections :

-le premier procédé de rigidification des intersections consiste à réaliser des liaisons avec des fers plats ,la fissure est ensuite réparée en utilisant un treillis soudé ,sur chaque face ,scellé aux deux murs et recouvert d'un enduit de ciment [BER 10]

-le deuxième procédé consiste à placer des briques-liaison ou des moellons-liaison communes aux deux murs tous les 70cm environ avec un mortier très riche en ciment .la fissure est colmatée avec un mortier en ciment

-le troisième procédé consiste à renforcer les murs au niveau des intersections par la réalisation de chainages en béton armé[12]

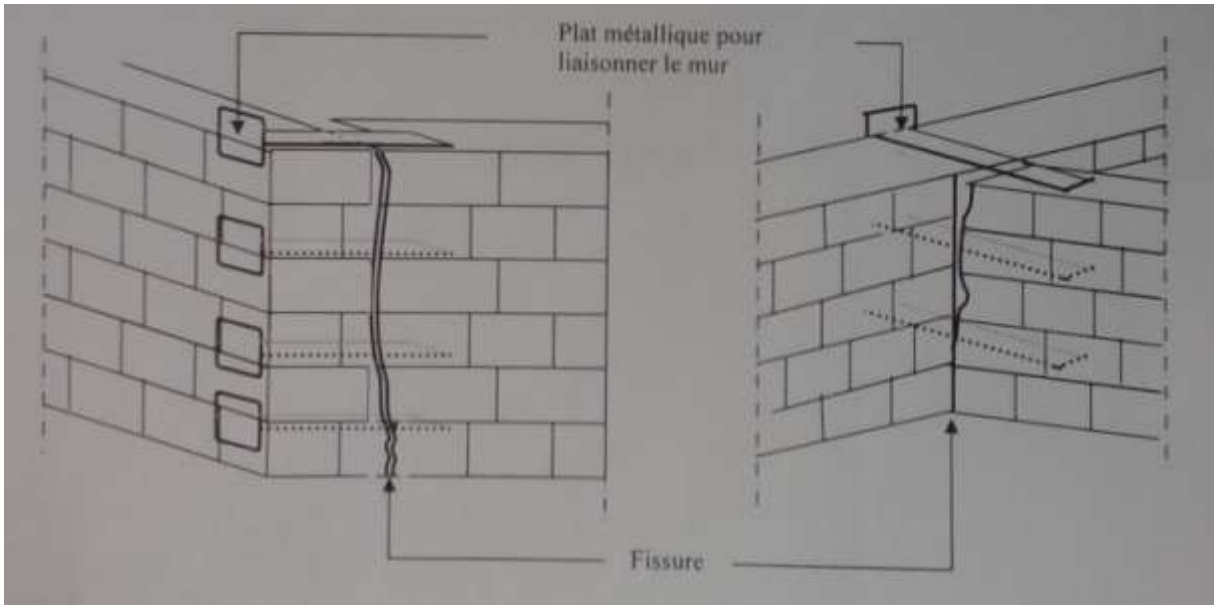


Figure 3-17 : rèparation des fissures à l'intersection des murs par l'utilisation des fers plats

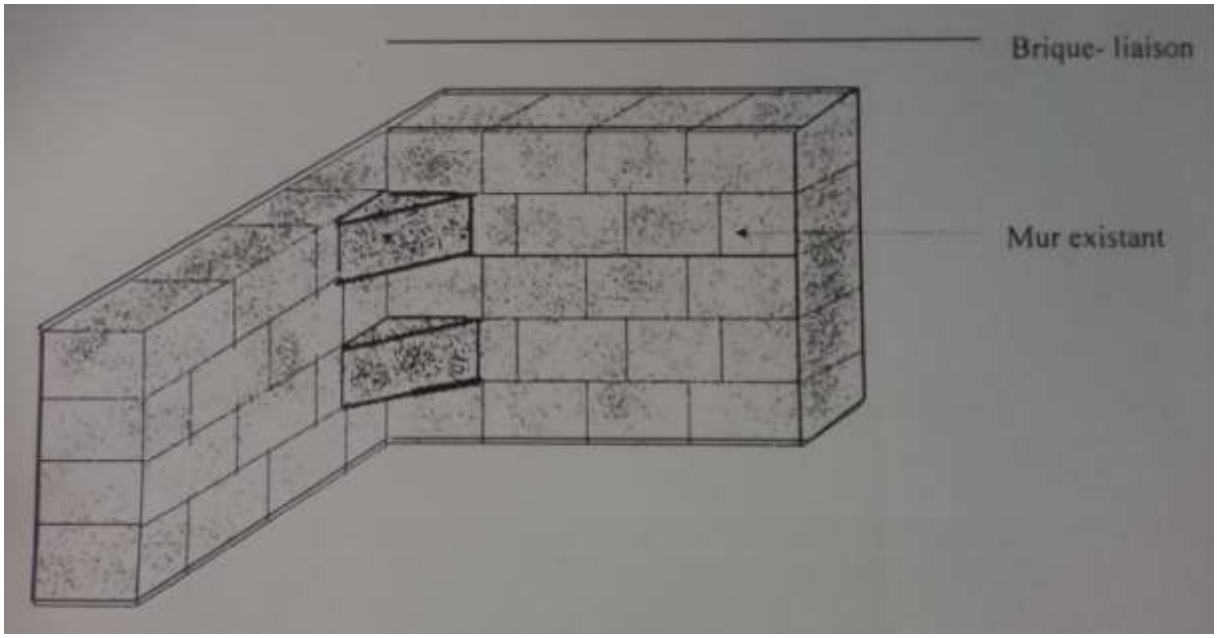
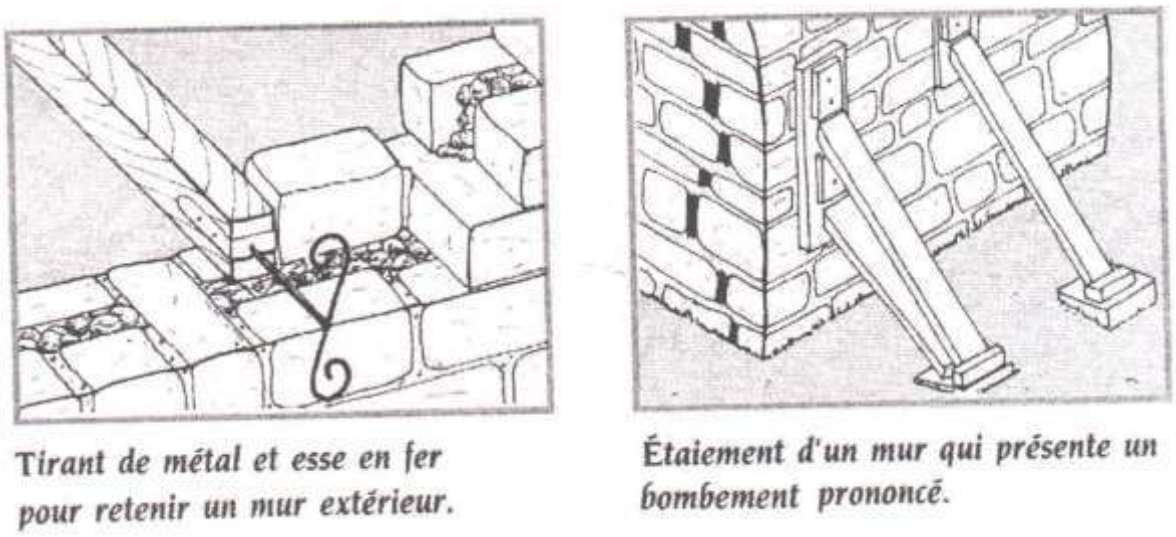


Figure 3-18 : rigidification des intersections des murs par l'utilisation des briques

3-2-14-Comment retenir un mur bombé :

On peut parfois arrêter le déversement d'un mur en le retenant à chaque étage par des tiges de métal ,ces tirants sont fixés aux poutres ou aux solives des planchers ,traversent la maçonnerie et la retiennent par des esses ou des plaques de métal ,cette solution peut toutefois entrainer d'autres problèmes ,étant donné l'ouverture pratiquée dans le mur (infiltration ,condensation)et la présence de métal sur la pierre (rouille).si un mur est atteint sur toute sa hauteur ou s'il risque de s'effondrer ,il faudra envisager sa réfection complète ou l'injection d'un coulis de ciment ;dans ce cas ,il est prudent de l'étayer temporairement avec des pièces de bois ou de métal appuyées au sol .[11]



Tirant de métal et esse en fer pour retenir un mur extérieur.

Étaiement d'un mur qui présente un bombement prononcé.

Figure 3-19 : retenir un mur bombé

3-2-15-L'injection d'un coulis de ciment :

Un mur qui présente une déformation comme le bombement ou le déversement peut parfois être stabilisé par l'injection d'un coulis de ciment ,cette opération permet de consolider le massif du mur en comblant les vides du blocage tout en gardant intactes les parois internes et externes ,elle exige cependant la plus grande prudence et doit être exécutée par une main-d'œuvre spécialisée et supervisée par des professionnels .

Voici les étapes à suivre :

a)il faut d'abord rejointoyer toute la maçonnerie suivant la méthode décrite précédemment .

b)au besoin ,les pierres trop détériorées sont remplacées (voir la réfection partielle d'un mur).

c)pendant le rejointoiement ,on introduit dans les joints des boyaux de plastique de 12 mm(1/2 po)de diamètre ,jusqu'au centre du mur ;les boyaux sont insérés par paires à tous les mètres carrées (4 pi^2).

d)en commençant par le bas du mur ,on procède ensuite à l'injection du coulis ,à l'aide d'une pompe à injection branchée sur un des deux boyaux jumulès ;l'autre boyau doit être bouché dès que le coulis y refoule.

Le coulis est composé de ciment portland ,d'eau et d'un additif qui en augmente la fluidité ;on peut aussi ajouter un agent expansif au mélange ,durant l'injection ,il faut effectuer un contrôle régulier de la qualité du coulis ,de la pression d'injection et des quantités de coulis injectées ,cette opération ,quoique complexe ,est préférable à la reconstruction du mur ,puis qu'elle n'affecte pas l'intégrité architecturale du bâtiment .[11]

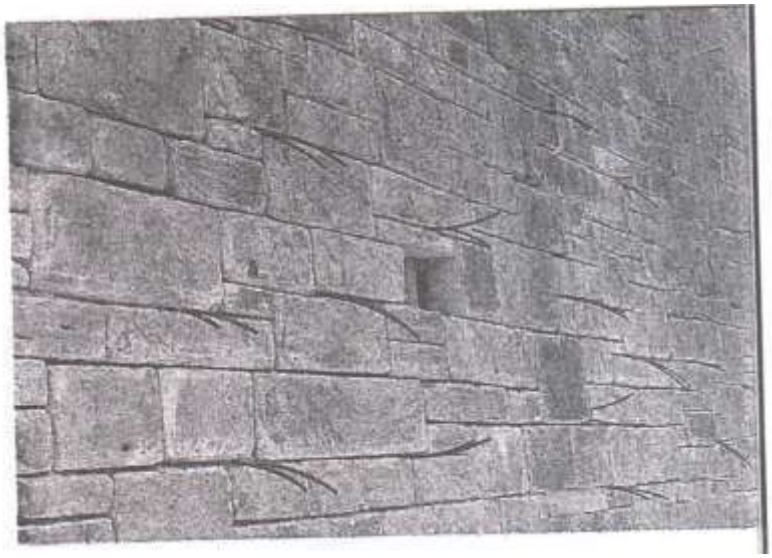
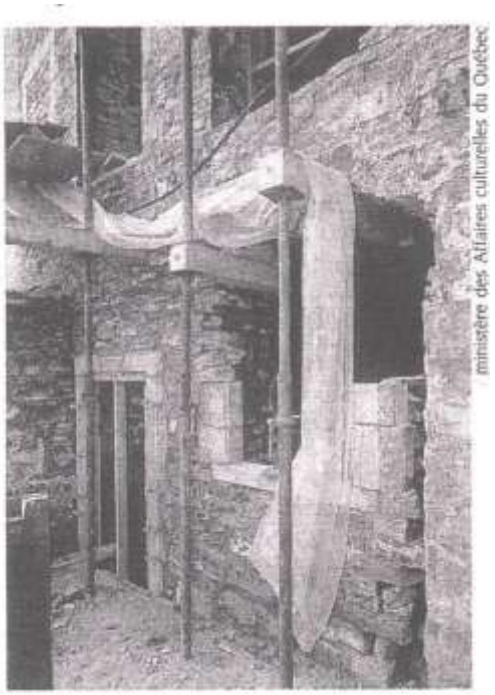


Figure 3-20 : injection d'un coulis de ciment

3-2-16-La réfection partielle :

Les dégradations ou les déformations des murs sont souvent localisées ,dans ce cas ,il est préférable d'entreprendre la réfection partielle du mur plutôt que de le reconstruire au complet .il est en effet possible de démonter et de refaire le mur par petites sections ,en respectant l'assemblage des pierres pour éviter son effondrement ,il sera parfois nécessaire d'étayer le mur pour supporter les pierres au-dessus de la section à refaire ,si le mur est porteur ,on doit installer d'autres étais pour supporter la charpente qui s'appuie sur la section à refaire .

La réfection s'effectue selon la même progression que le démantèlement ,par petites sections ,il faut alors assurer un bon liaisonnement des pierres entre elles pour obtenir un assemblage solidaire ,on peut réutiliser les pierres existantes lorsqu'elles sont saines ,si on utilise des pierres neuves ,elles doivent être de même nature et de même finition que les pierres d'origine



Étaiement pour réfection partielle d'un mur.

Figure 3-21 : la réfection partielle

3-2-17-La reconstruction d'un mur :

Dans le cas où l'ensemble d'un mur est détérioré ou déformé et qu'il est impossible de le consolider par l'injection d'un coulis de ciment ,il faut se résoudre à le démanteler et à le reconstruire ,si ce mur est porteur ,on doit préalablement étayer toute la structure du bâtiment ,l'étaiement est constitué de poutres et de colonnes réglables en acier ou en bois qui doivent supporter les charges des planchers dont les solives s'appuient sur le mur à démonter.

Selon l'assemblage du mur et les problèmes qui l'affectent ,on procèdera à la réfection de tout le massif ou à celle du parement extérieur ,cette dernière opération s'anère moins complexe si la portion de mur qui reste en place (blocage et parement intérieur) peut supporter son propre poids et celui du bâtiment ;on évite ainsi d'étayer la structure .

Il est parfois possible de réutiliser les pierres existantes si elles sont saines ,le démantèlement doit alors se faire délicatement ;on numérote les pierres ,au besoin ,pour les réinstaller dans leur position initiale ,si on utilise de nouvelles pierres ,elles seront de même nature et de même finition que les pierres d'origine .dans tous les cas ,il faut assurer le liaisonnement du parement avec les pierres du blocage à l'aide d'ancrages ou de tiges d'armature distribuées en plusieurs points du mur .[11]



Figure 3-22 : la reconstruction d'un mur

3-3-Renforcement des structures traditionnelles algériennes au séisme :

Les éléments principaux devant résister lors d'un séisme ,sont les contreventements et les planchers solidaires aux murs porteurs ,en fait l'unité structurelle de la construction doit être assurée par le bâtiment en tant qu'entité.

Les charges agissant sur les éléments de structure sont :les charges permanentes, les surcharges ,les charges climatiques ,et les charges sismiques.

La réaction a ces sollicitations doit être de résister à la rupture et de ne pas se déformer.

Les éléments structurants résistants au séisme et ainsi aux efforts de cisaillements de sens horizontal sont :

-les murs porteurs de maçonnerie.

-les colonnes en pierre brique ou en marbre

-les arcs et voutes.

Le choix utilisé dans la construction de type traditionnel est déjà avantagé car basé principalement sur le patio et la symétrie ;créant ainsi l'excentrement entre le centre de gravité et le point d'application de l'effort sismique ou centre de torsion.

Ce qui est prévu en règle générale dans la conception originale des constructions traditionnelles ,ce ne sont que deux niveaux de masse sur le sol (le rez de chaussée et l'étage),ainsi lorsque pour diverses raisons économique et sociales ,des extensions sont entreprises ,augmentant les masses et par conséquent les charges vers le bas ,particulièrement sur le rez de chaussée ,la qualité des fondations et celles des matériaux des murs porteurs ne sont pas prévues pour assurer une résistances à de telles charges.

On rencontre souvent des écrasements et des éventrements de mur porteurs engendrant des affaissements sous l'action horizontale du séisme.

Les structures traditionnelles en Algérie se composent d'éléments verticaux que sont les murs porteurs de plus de 45 cm d'épaisseur ,qui sont généralement mixtes (2à3 rangées de briques pleines et une rangée de pierres sèches ou moellons),les colonnes en pierre ,en briques ou en marbres ainsi que les murs de refends servant de contreventement ;et des éléments horizontaux servant de chainage tels que les tronc d'arbres de tuya de diverses dimensions variant de 2 à 3 mètre 50 de longueur et enfin les deux directions reliant les arcs en briques pleines ,formant un ensemble ‹‹structurel›› solidaire.

Depuis les premiers séismes du 20ème siècle un certain nombre de techniques ont été appliquées se résumant principalement à un chainage ,solidarisant planchers et murs porteurs avec des tirants en acier réglable ,technique très efficace mais peu utilisée à l'heure actuelle.

Ce procédé a été généralisé dans toutes les constructions et édifices publics à l'époque coloniale.

Lors du séisme d'EL ASNAM(dénommée chlef aujourd'hui) l'on s'est rendu compte de la nécessité de reprendre les joints des murs porteurs en injectant du lait de ciment et de d'utiliser un enduit à base de chaux et sur un grillage de solins ,et de chemiser les maçonneries d'angles quand les croisements ne sont pas fait suivant les règles de la construction .

Lors des dernier travaux de consolidation des structures pour tous les ouvrages en restauration ,on a opté ,dans la plupart des cas ,pour la conservation de la structure traditionnelle avec ses éléments en bois et on a rajouté une seconde rangée en profilé métallique afin de solidariser le tout et créant ainsi un nouveau plancher en béton mousse plus léger et surtout résistant aux efforts horizontaux.

Toutes les jambes de forces en bois ,nécessaires à la stabilité et rigidité des arcs au niveau des patios ,des galeries et des chambres en T ont été remplacés par des tubes en acier rond et recouvert (habillé) en bois .

La difficulté première est de trouver des maçons et autres artisans maitrisant encore toute les techniques de maintien en équilibre de la construction et l'intervention de façon chirurgicale sur le bâti ancien.[10]





Figure 3-23 : renforcement des structures traditionnelles algériennes au séisme

Chapitre 4 :présentation des matériaux et les techniques expérimentales utilisées

4-1-Introduction :

Le dimensionnement des structures en maçonneries nécessite une bonne compréhension du composite brique-mortier ou pierre-mortier sous l'effet de différents types de charges ,les murs en maçonneries sont les murs porteurs dans leurs plans où ces murs sont fréquemment conçus pour résister aux efforts horizontaux de cisaillement et aux pressions latérales dues au vent et aussi la résistance à la compression qui est un facteur prédominant dont il faut prendre en compte .

Dans ce chapitre nous présentons :

-les matériaux utilisés.

-méthodologie de confection des murets et les types d'agrafages .

-essai de compression diagonale

Partie1 :

4-2-Matériaux utilisès :

4-2-1-provenance des matériaux :

Le sable utilisé est de sable de bahbah,le ciment est un ciment portland composé (MATINE CPJ-CEMII/ B 42.5 R) ,les pierres naturelles sont de deux types ;pierres naturelles bleues et pierres naturelles jaunes commercialisé à CHEFA-WILAYA DE BLIDA .

4-2-2-caractéristiques des matériaux :

4-2-2-1-la pierre :

a)Caractéristiques géométriques :

les panneaux sont confectionnés à partir des pierres naturelles ,dont les caractéristiques géométriques sont différents .



a)la pierre jaune b) la pierre bleue

Figure 4-1 : la pierre utilisé

b) caractéristiques physique :

la masse volumique des éléments est déterminée par la méthode géométrique .

les mesures sont effectuées sur six blocs .

la masse volumique d'un pierre ρ (kg/m^3) :

$$\rho = M/V \qquad (4\text{-}1)$$

où :

ρ : masse volumique apparente.

M : masse des pierres .

V : volume net des pierres .

c) caractéristiques mécaniques :

des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur six pierres jusqu'à la rupture ,nous avons surfacer les pierres dans le sens de chargement ,la résistance en MPa est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma b = (Fb/Sn) .10 \qquad (4\text{-}2)$$

où :

σb : résistance à la compression en (MPa)

Fb : charge maximale de rupture en (KN)

Sn : section nette moyenne de la pierre en (cm^2)



Figure4-2 :essai de compression sur une carotte de pierre bleue et jaune

4-2-2-2-mortier :

Nous avons testés notre mortier de jointoiement au niveau de laboratoire de HALL TECHNOLOGIQUE de université de MEDEA avant de confectionner les murets pour avoir un bonne mortier de jointoiement .

La quantité d'eau de gâchage est obtenue par une consistance normale.

Le tableau suivant présente le dosage de liant dans 1 m^3 de mortier.

Tableau 4-1 : la composition de 1 m^3 de mortier

Nature de mortier	ciment	sable	E/C
Mortier de ciment (1/4)	350 kg (1 volume)	4 volumes	0.5

4-2-3-Caractéristiques des sables utilisès :

Nous avons utilisès deux types de sables :

-sable jaune de HASSI BAHBAH

-sable concassée 0/3

Les essais qui sont effectuées au niveau du laboratoire sont :

-l'analyse granulométrique

-l'équivalent de sable

-la masse volumique

-module de finesse

4-2-3-1-L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon ,elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm ,à l'exclusion des fillers .



Figure 4-3 : les différents tamis

4-2-3-2-Equivalent de sable :

Cet essai ,utilisè de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers,il s'agit de déceler la présence d'éléments fins dans un sable ,et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique ,essai simple et rapide ;matériel peu fragile .aisément réalisable au laboratoire à la carrière ou au chantier.

4-2-3-3-La masse volumique :

Cet essai a pour but de permettre de connaitre la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de béton .ce paramètre permet ,en particulier ,de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue ρs est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides entre les grains .

La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente ρ est la masse d'un matériau par unité de volume total y compris les vides entre les grains.

La masse volumique s'exprime en t/m^3, kg/dm^3 ,ou bien g/cm^3

4-2-3-4-Module de finesse :

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse Mf .celui –ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulès,ramenès à l'unité ,pour les tamis d'ouverture (exprimée en mm) 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5.ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de composition des bétons .

Plus le module Mf est faible et plus le sable est riche en éléments fins ,un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 plus.

La norme AFNOR indique : 1.8 ‹ Mf ‹ 3.2.

4-2-4-Le ciment :

Le ciment utilisè est de type MATINE CPJ-CEMII/B 42.5 R NA 442,est un ciment de haute résistance initiale et finale ,résultant de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkèrisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Le ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO2) à caractère acide ,on trouve également l'alumine (Al2O3) et le fer (Fe2O3) ,ils sont rendus aptes à réagir entre 1300 et 1500°C ,en présence d'eau au lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicate-de calcium hydratés.

4-2-5-L'eau :

L'eau utilisé dans la composition de mortier est l'eau de robinet de commune de SIDI-NADJI d'el BERROUGHIA.

4-3-Essais sur le mortiers :

4-3-1-Résistance mécanique :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvette de mortier normal.dans un tel mortier la seule variable est la nature du liant hydraulique ;la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

La résistance dite résistance normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours .c'est cette résistance qui définit la classe vraie du ciment .la classe commerciale ,celle qui est indiquée par le fabriquant ,peut s'éloigner notablement de cette classe vrai.

4-3-1-1-Fabrication des éprouvettes :

Avec le mortier normal préparé ,on remplit un moule 4x4x16.le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60

chocs à chaque fois.après 24 h de début du malaxage ,ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à 20° C jusqu'au moment de l'essai de rupture.

4-3-1-2-Essai de flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure suivante .

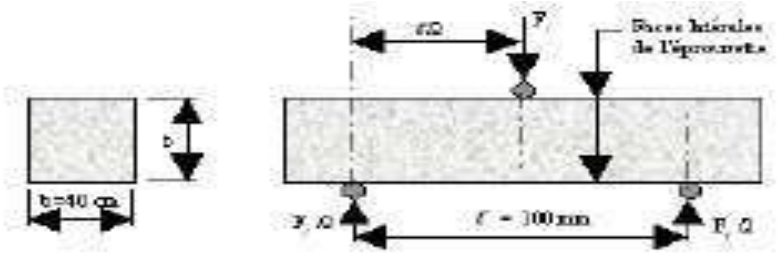


Figure 4-4 : essai de traction par flexion

4-3-1-3-Essai de compression :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure suivante.

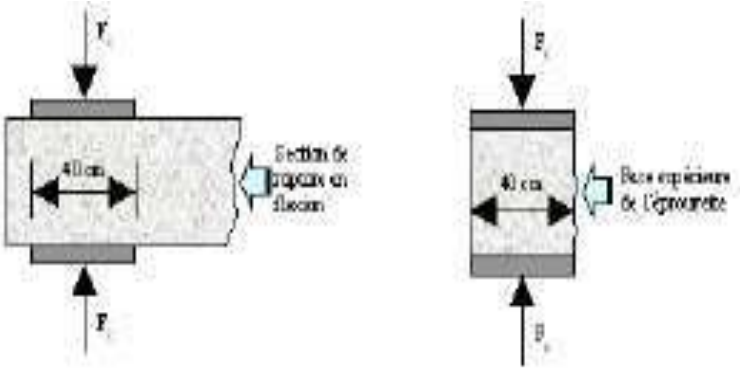


Figure 4-5 : essai de compression

Partie 2 :

4-4-Programme des essais sur les murets :

4-4-1-Introduction :

Notre étude concerne les panneaux de maçonnerie en pierre naturelle ,jointoyées par un mortier de type (1/4) d'épaisseur 1cm ,ces panneaux ont des dimensions de 45x45cm,et sont soumis à un essai de compression diagonale au centre de CNERIB.

4-4-2-Matériel utilisée :

Le matériel utilisè pour la confection des dix panneaux est :truelles,auge,fil à plomb, mètre, niveau, maillet et transpalette.



Figure 4-6 : matériel utilisé

4-4-3-Méthodologie de la confection des murets :

Un dispositif à été réalisé pour la confection des murets,afin de respecter la planéité.



Figure 4-7 : portique de confection des murets

-les étapes de confection des murets sont :

1-tailler préalablement les pierres ,pour éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie.

2-placer le fil avant la disposition des pierres en maçonnerie.

3-étaler le mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide de différents gabarits fixant ainsi les dimensions du joint.

4-vérifier la planéité du mur avec la règle en bois et le fil à plomb.

5-après 24h ,effectuer un surfaçage .

6-les murets sont ensuite transportée et stockés.

7-l'écrasement est effectuée ,après 28 jours



Figure 4-8 : opération de taille de la pierre



Figure 4-9 : vérification de la planéité du mur avec la règle en bois



Figure 4-10 : opération de surfaçage

4-4-4-Renforcement des murets :

Les murets sont renforcée par des plaques en acier plats dans différentes dispositions



Figure 4-11 : muret renforcée dans les deux directions de diagonale



Figure 4-12 : muret renforcée dans un seul sens de diagonale



Figure 4-13 : muret renforcée suivant les joints horizontaux et verticaux



Figure 4-14 : muret renforcée au milieu à l'intérieur du joint

Partie 3 :

4-5-Essai de compression diagonale :

L'essai de compression diagonale est défini par la norme Italienne (UNI) ,L'ASTM,les recommandations RILEM et la norme européenne EC6.cet essai a comme objectif d'étudier les comportements globaux en compression-cisaillement des murs carrés en maçonnerie soumis aux charges de compression dans la direction de la diagonale du mur

4-5-1-principe de l'essai :

Les efforts sont transmis par des sabots de transmissions,des plaquettes d'appui assurent une meilleure distribution des efforts sans aucune excentricité

La mesure de pression ,faite à l'aide d'un capteur de pression ,permet de déterminer la charge appliquée par le vérin

La mesure des déplacements est effectuée à l'aide d'un capteur de déplacement qui est installé au-dessus du muret

L'ensemble des données ,forces et déplacements ,sont enregistrées automatiquement par un système d'acquisition des données .ces derniers nous ont permis de tracer les courbes contraintes-déformations

La sollicitation est exercée suivant des paliers de pression d'une valeur de 1KN/s jusqu'à la rupture

4-5-2-Dispositif d'essai :

Une presse pilotée par ordinateur a été utilisée pour la réalisation des essais ,comprenant :

-un portique de 1mx0.7m

-un vèrin de 300KN

-un système hydraulique

-un système d'acquisition des données

-sabots de transmissions des charges

-capteur de déplacement

-un ordinateur Pentium II

-un logiciel pour le traitement des données



Figure 4-15 : essai de compression diagonale

4-5-3-Paramètres expérimentaux :

4-5-3-1-Contrainte de cisaillement diagonale :

La résistance de cisaillement est calculée selon l'état de contrainte dans le centre du mur ;isotrope ou anisotrope.

Le calcul de la contrainte de cisaillement τ_{dt} est fait selon l'ASTM[51] en considérant un état de contrainte isotrope dans le centre du mur :

$$\tau_{dt}=(P_{max}/\sqrt{2}A) = 0.707(P_{max}/A) \qquad (4\text{-}3)$$

la surface latérale A est soumise à une charge maximale P_{max} .la surface A est calculée avec l'Equation 4-4 en considérant w ,la largeur,h la hauteur et t l'épaisseur du mur

$$A= (w+h)/2x(t) \qquad (4\text{-}4)$$

4-5-3-2-Déplacement latéral et ductilité :

Le module de cisaillement G et la ductilité μ_y représentent deux paramètres correspondant à la réponse du mur en déplacement .ces deux paramètres nécessitent la mesure du déplacement latéral élastique et maximale.

La déformation totale γ est la somme de la valeur absolue de la déformation en compression ε_c et en traction $|\varepsilon_t|$

$$\tau_{dt}=\varepsilon_c+|\varepsilon_t| \qquad (4\text{-}5)$$

$\varepsilon_c= \Delta L_c/L_c$ $\varepsilon_t= \Delta L_t/L_t$

L_c,L_t représentent les longueurs des diagonales comprimées et allongées ,et ΔL_c,ΔL_t sont les variations des longueurs de ces diagonales respectivement .la ductilité en déformation de cisaillement est défini comme le rapport entre la déformation ultime γ_u et celle élastique γ_e .

$$\mu_y = \gamma_u/\gamma_e \qquad (4\text{-}6)$$

la déformation élastique γ_e est définie à 70% de la contrainte maximale de rupture τ_u .la déformation maximale γ_u est définie à 80% de la contrainte maximale τ_u dans le cas d'une pente descendante (adoucissement) de la courbe contrainte-déplacement .en revanche ,le déplacement maximal représente la déformation à la rupture pour une pente montante de la courbe contrainte-déformation (durcissement).

Le module de cisaillement G est calculé dans la zone de contrainte élastique $\Delta\tau_e$ avec l'équation 4-7

$$G= \Delta\tau_e/\Delta\gamma_e \qquad (4\text{-}7)$$

$\Delta\tau_e$ et $\Delta\gamma_e$ représentent la contrainte et la déformation élastique ,respectivement

Chapitre5 :résultats et interprétations

5-1-Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différents murets renforcées par systèmes d'agrafage différents sous sollicitation de compression diagonale.nous montrons l'influence de chaque type de renforcement sur le comportement de compression diagonale.

Partie 1 :

5-2-Résultats expérimentaux sur les matériaux

5-2-1-La pierre

5-2-1-1-Caractéristiques mécanique

Les résultats des essais sur la pierre permet de présenter le tableau suivant :

La pierre	Contrainte de rupture (Mpa)	Contrainte moyenne(Mpa)
jaune	50 38 32	40 
bleue	38 29 29	32 

Tableau 5-1 : contrainte de rupture de carotte de pierre

5-2-1-2-Caractéristique physique

Les résultats effectuées sur des carottes en pierre permet de présenter le tableau suivant :

La pierre	ρ(Kg/mm^3)	ρmoy(Kg/mm^3)
jaune	$3.38x10^{-6}$ $3.80x10^{-6}$ $3.69x10^{-6}$	$3.62x10^{-6}$
bleue	$4.5x10^{-6}$ $4.3x10^{-6}$ $3.9x10^{-6}$	$4.23x10^{-6}$

Tableau 5-2 : la masse volumique de pierre

5-2-1-3-Caractéristiques géométrique

La pierre utilisée pour notre étude est caractérisée par des caractéristique géométrique différentes

5-2-2-Les sables

5-2-2-1-L'analyse granulométrique

Le tableau suivant présente le résultat d'analyse granulométrique sur le sable concassée (0/3) :

Tamis(mm)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés(%)	Tamisats cumulés(%)
5	7.2	0.72	99.28
4	42	4.2	95.8
3.15	130.7	13.07	86.93
2	349.7	34.97	65.03
1.25	531.7	53.17	46.83
1	596.5	59.65	40.35
0.8	664	66.4	33.6
0.63	710.9	71.09	28.91
0.5	763.6	76.36	23.64
0.315	838.1	83.81	16.19
0.16	925.7	92.57	7.43
0.08	997.7	99.77	0.23
fond	998.4	99.84	0.16

Tableau 5-3 : analyse granulométrique de sable concassée (0/3)

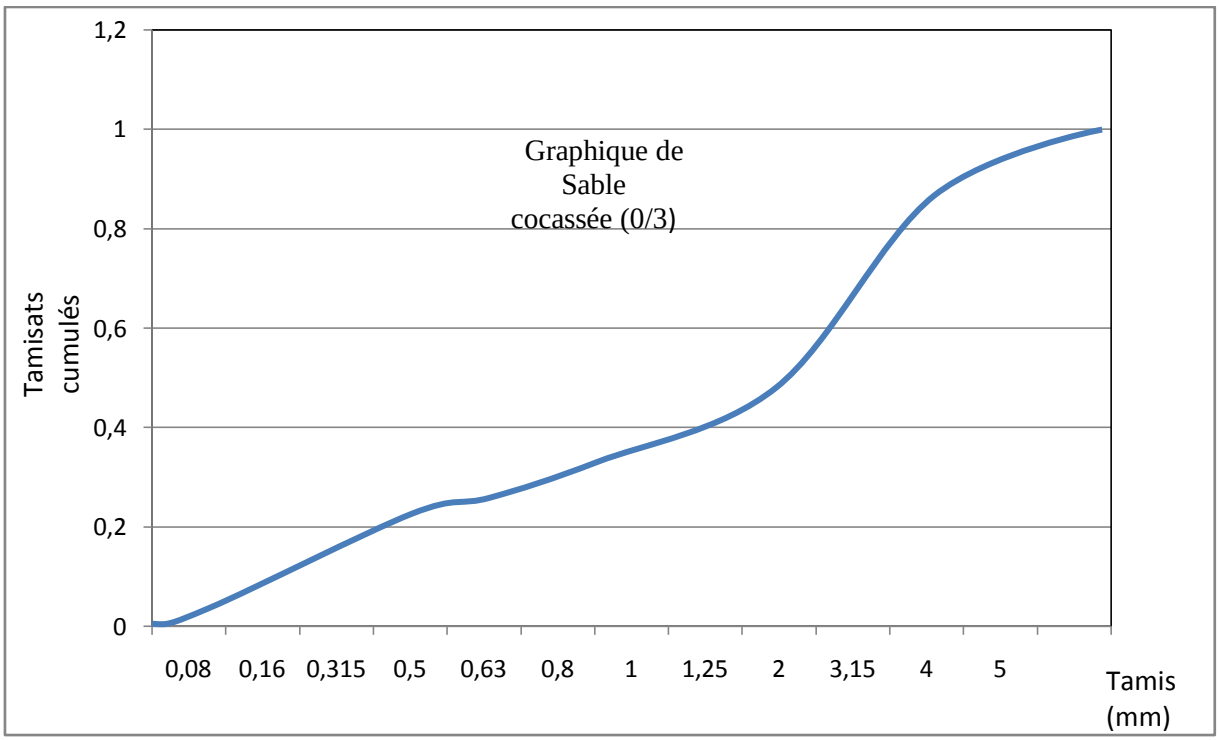


Figure 5-1 :courbe d'analyse granulométrique de sable concassée (0/3)

MF=1/100Σ refus cumulés en % des tamis{0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5}

MF=3.2

Le module de finesse est engendrée entre {2.8et3.3} :donc le sable est un peu grossier,il donnera des résistances élevés mais moins maniable

Sable N°2 :(sable de HASSI-BAHBAH +sable concassée(0/3)) :

Correction de sable :

On pourra utiliser la règle d'abrams :

Supposons par exemple que l'on dispose d'un sable fin S1 de module de finesse MF1 et que l'on désire y ajouter un sable concassée S2 de module de finesse MF2 afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait MF ;les proprtions des deux sable composant devront être les suivants :

Pourcentage du sable de hassi-bahbah S1 :

S1=(MF-MF1)/(MF1-MF2)=35%

Pourcentage du sable concassée (0/3) S2 :

S2=(MF-MF2)/(MF1-MF2)=65%

Avec :

S1 :le sable fin

S2 :le sable concassée

MF=2.5(la norme de module de finesse pour un sable corrigée)

MF1 :le module de finesse de sable fin

MF2 :le module de finesse de sable concassée

Donc,on a :

S1=(2.5-0.95)/(0.95-3.2)

Proprtion du sable :S1=0.35=35%

S2=(2.5-3.2)/(0.95-3.2)

Proprtion du sable S2=0.65=65%

Alors on va faire le mélange d'après ces pourcentages

Tamis(mm)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés(%)	Tamisats cumulés(%)
5	5.6	0.56	99.44
4	30.5	3.05	96.95
3.15	89.4	8.94	91.06
2	231.9	23.19	76.881
1.25	337.5	33.75	66.25
1	376.4	37.64	62.36
0.8	418.6	41.82	58.14
0.63	441.8	44.18	55.82
0.50	472	47.2	52.8
0.315	550	55	45
0.16	886.9	88.68	11.32
0.08	990.4	99.04	0.96
fond	992.1	99.71	0.79

Tableau 5-4 :analyse granulométrique de sable de hassi bahbah+sable concassée

Module de finesse :

MF=1/100Σ refus cumulés en % des tamis{0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5}

MF=2.4

Classification :

Le module de finesse est engendrée entre {2.2et2.8},donc un sable préférentiel

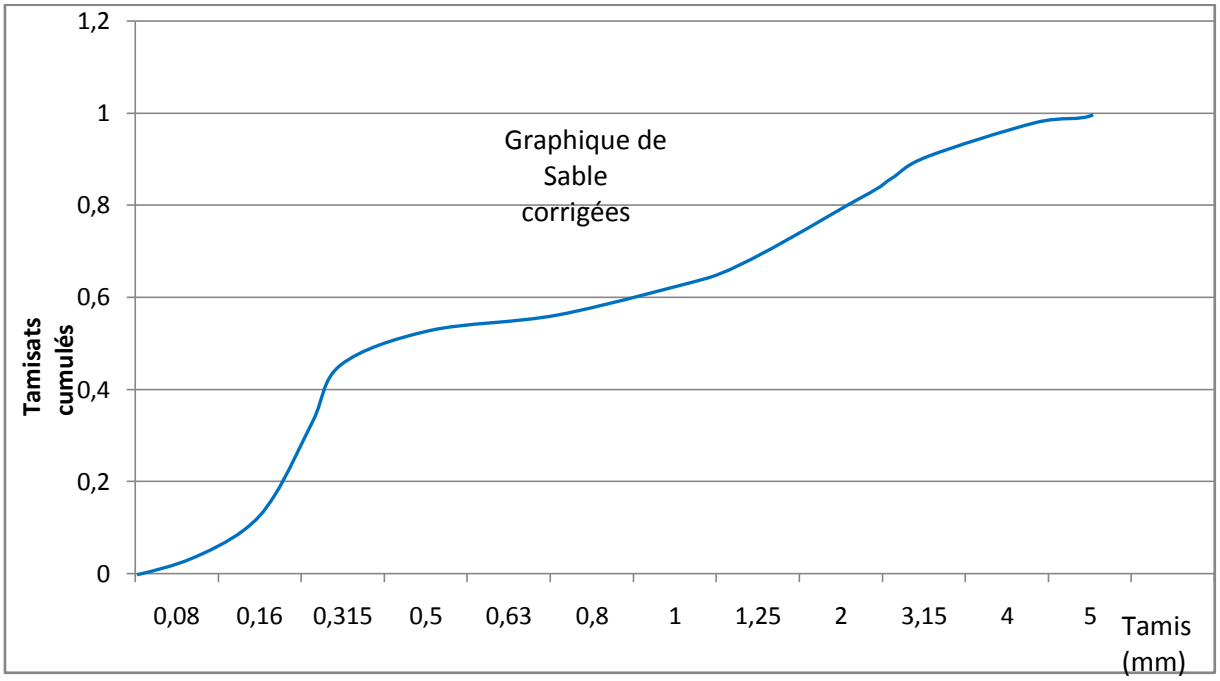


Figure 5-2 : courbe d'analyse granulométrique de sable corrigée

5-2-2-2-L'équivalent de sable

Résultat d'équivalent de sable de hassi bahbah :

Sable de hassi bahbah	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Hauteur de la colonne(H1)	9.65	10
Hauteur de sable à vue(H2)	7.7	7.75
Hauteur au piston(H2')	7	6.99
ESV(%)	77.38	77.50
ESP(%)	70.35	70
ESV moyenne	77.40	
ESP moyenne	70.17	
classification	75≤ESV<85 et 70≤ESP<80	

Tableau 5-5 : résultat de l'équivalent de sable de hassi bahbah

Observation :

Le sable est propre

Résultat de l'équivalent de sable pour les deux :

Origine de sable	ES(%)	
	ESV	ESP
Sable concassée(0/3)	91	86
Sable de hassi bahbah	77.40	70.17

Tableau 5-6 : résultat de l'équivalent de sable pour les deux

ESV à vue en (%)	ESP en (%)	Nature et qualité du sable
ESV<65	ES<60	Sable argileux
65≤ESV<75	60≤ES<70	Sable lègerment argileux
75≤ESV<85	70≤ES<80	Sable propre
ESV≥85	ES≥80	Sable très propre

Tableau 5-7 :nature et qualité du sable en fonction de (ESV et ESP)

Observation :

Le sable de hassi bahbah est propre

Le sable concassée (0/3)est très propre

5-2-2-3-La masse volumique

La masse volumique apparente de sable de hassi bahbah est :4685.6g/l

La masse volumique absolue est :2.63g/l

5-2-3-Résultats sur le mortier à l'état durci

Les résultats des essais effectuées sur des éprouvettes de 4x4x16 permet de présenter le tableau suivant :

Spécimens 7j	Flexion R_f (Mpa)	Compression σc (Mpa)	Spécimens 28j	Flexion R_f (Mpa)	Compression σc (Mpa)
1	2.03	13.48	1	5.04	24.56
2	2.60	13.91	2	4.79	20.53
3	3.78	14.97	3	3.78	24.20
4	2.14	14.50	4	3.85	22.37
5	2.28	14.60	5	4.21	23.55
6	2.97	14.76	6	3.95	23.69
moyenne	2.63	14.37	moyenne	4.27	23.15

Tableau 5-8 :résultats en compression et en traction par flexion sur des éprouvettes 4x4x16 réalisés en mortier de ciment

Partie 2 :

Introduction

Dans ce partie nous avons présenter les résultats de huits murets (deux murets témoins et six murets renforcées par des plaques d'agrafages plats selon différents dispositions,les murets sont soumis à sollicitation de compression diagonale

renforcement	témoins	Suivant les diagonales	Suivant les joints	au milieu et au dessus du mur
Murets M1	MT1 	MD1 	MJ1 	MB1 
Murets M2	MT2 	MD2 	MJ2 	MB2 

Tableau 5-9 :les huits murets

5-3-Résultats expérimentaux sur les murets

5-3-1-Comportement des murets témoins



Figure 5-3 :Mode de rupture de MT1

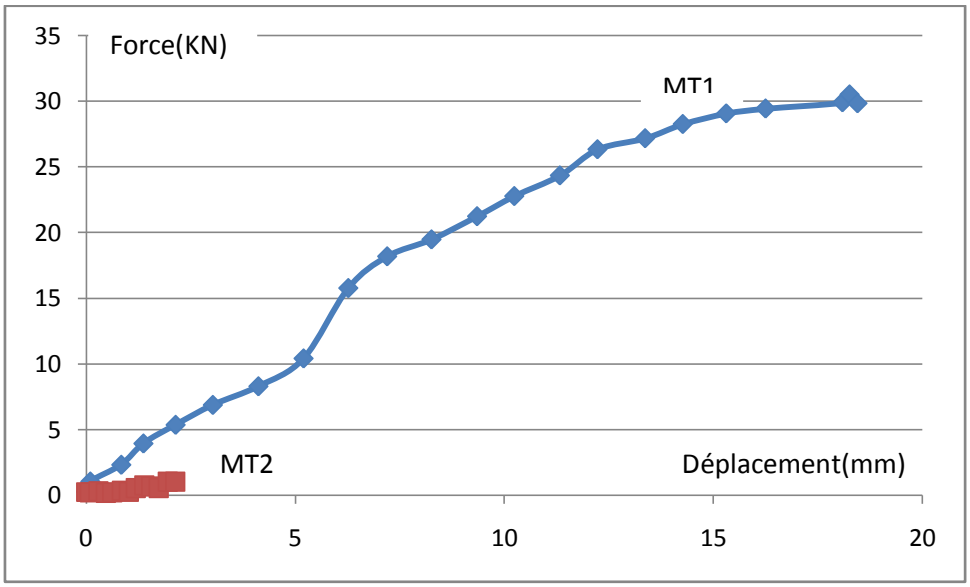


Figure 5-4 :courbe de force(KN) en fonction de déplacement(mm) de MT1et MT2

Pour ces murets la résistance d'adhérence du mortier est relativement faible par rapport à la résistance des pierres constituves ,la ligne de rupture va avoir tendance à apparaitre comme une fissure verticale au travers des joints et de pierre.

La fissuration se fait de manière instantanée dans les deux matériaux ,ce qui précise que le comportement est fragile,la rupture de type zigzag alterne la propagation de fissure le long d'un joint vertical puis le long d'un joint d'assise

La force maximale de rupture de MT1 est égale 30.58 KN ,avec un déplacement maximal de 18.56mm,la contrainte de cisaillement de ce mur est égale a 0.5Mpa ,le déplacement élastique est égale à 18.2

MT1 est caractérisée par une ductilité de 15% et module de cisaillement de 16.9Mpa

La force maximale de rupture de MT2 est égale à 1.05 avec un déplacement maximal de 2.19mm,ce qui conduit à une contrainte de cisaillement de 0.0016Mpa,le déplacement élastique de ce mur est égale à 1.3mm

MT2 à une ductilité de 13% et module de cisaillement de 5.65Mpa

5-3-2-Comportement de mur MD1 renforcée en plaques d'agrafage suivant les deux directions de diagonale

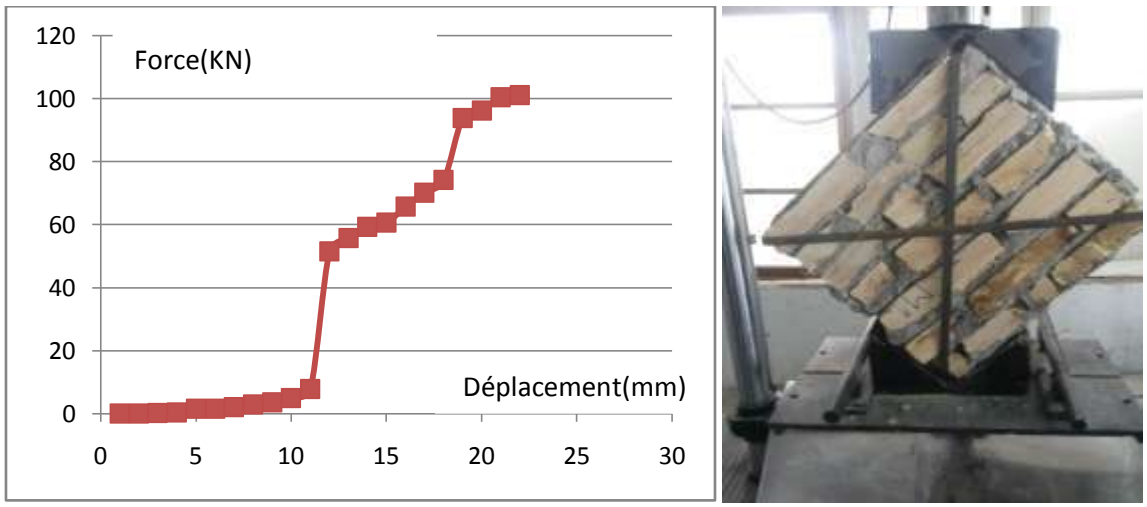


Figure 5-6 :courbe de force(KN) en fonction de déplacement (mm) de MD1

Le mur MD1 à une résistance plus grand par rapport au murets temoins,cela signifie que les plaques de renforcement joue un role plus important sous sollicitation de compression diagonale,les plaques de renforcement empêche la fissure suivant la diagonale

On remarque une fissure au milieu du mur suivant le joint horizontal à cause de traction latérale du mur

La force maximale de rupture de MD1 est égale à 101.39 KN ,avec un déplacement maximal de 22.56mm,ce qui produit un contrainte de cisaillement maximal de 1.59 Mpa,le déplacement élastique de ce mur est égale à 17.56mm

La ductilité de ce mur est égale à 86%,avec une module de cisaillement de 41.02Mpa

5-3-3-Comportement de mur MJ1 renforcée par un plaque d'agrafage suivant les joints horizontaux et verticaux

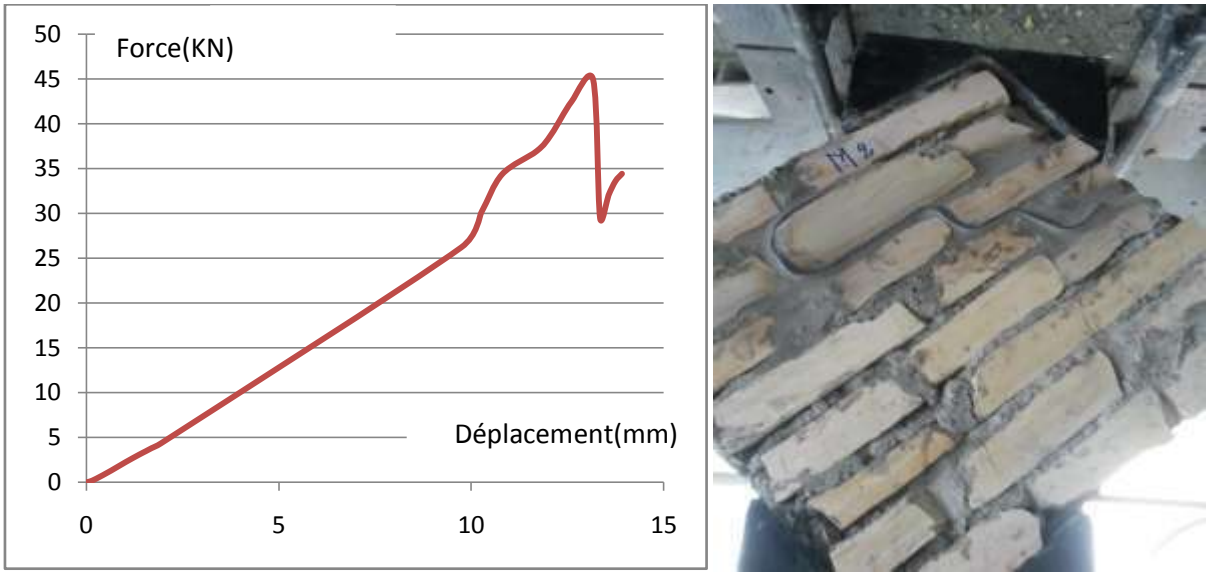


Figure 5-7 :courbe de force(KN) en fonction de déplacement(mm) de MJ1

On observe dans ce mur une fissure verticale de faible ouverture au dessus de plaque au niveau des pierres et joints de mortier,cela signifie que il existe une meilleur adhérence entre le joint et la plaque

La force maximale de rupture de ce mur est égale à 45.21KN,avec un déplacement maximal de 13.91mm ,ce qui produit une contrainte de cisaillement maximale de 0.71Mpa

La ductilité de MJ1 est égale à 11.8%,le module de cisaillement est égale à 32.3Mpa

5-3-4-Comportement de mur MB1 renforcée par un plaque d'agrafage au dessus du mur

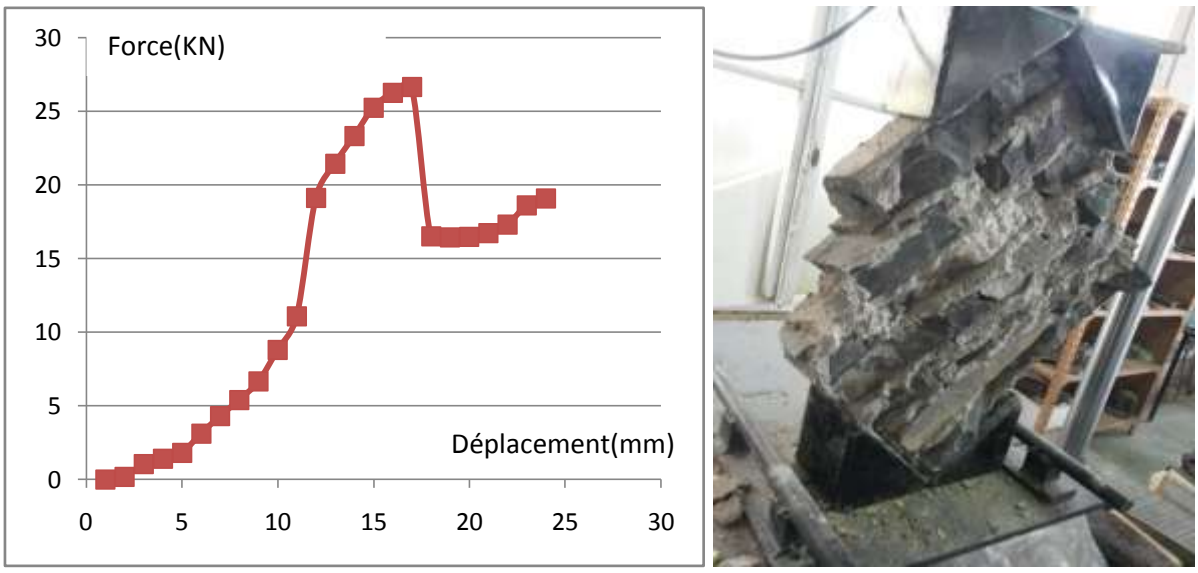


Figure 5-8 :courbe de force (KN) en fonction de déplacement(mm) de MB1

On observe une fissure suivant les joints horizontaux et verticaux dans le coté gauche de la plaque ,ce qui implique que la plaque empêche la fissuration vertical de mur,il y'a une meilleur adhérence entre la plaque et le mur

La force maximale de rupture de MB1est égale à 26.69 KN ,avec un déplacement maximal de 24.3mm ,ce qui conduit à une contrainte de cisaillement maximal de 0.42Mpa ,le déplacement élastique est égale à 11.4mm

La ductilité de MB1 est égale à 10.7%,avec un module de cisaillement de 16.4Mpa

5-3-5-Comportement de mur MJ2 renforcée par un plaque d'agrafage suivant les joints horizontaux et verticaux

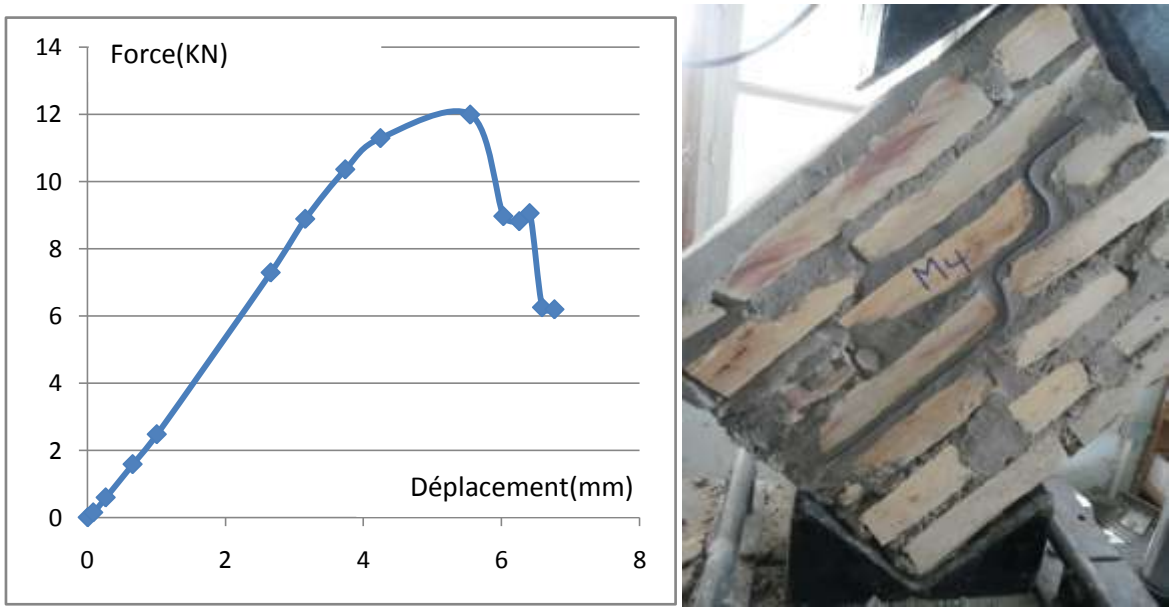


Figure 5-9 :courbe de force (KN) en fonction de déplacement(mm) de MJ2

On observe une fissuration au niveau de la plaque et le joint de mortier,ce qui implique que il y'a une mauvaise adhérence entre la plaque et le joint de mortier,il y'a un glissement de la plaque (plaque lisse)

La force de rupture maximale de MJ2 est 13.31KN ,avec un déplacement maximal de 6.91mm ,ce qui produit une contrainte de cisaillement maximale de 0.2Mpa ,le déplacement élastique est égale à 2.6mm

La ductilité de MJ2 est égale à 14.2%,avec un module de cisaillement de 35.8Mpa

5-3-6-Comportement de mur MD2 renforcée par un plaque d'agrafage suivant un seul direction de diagonale

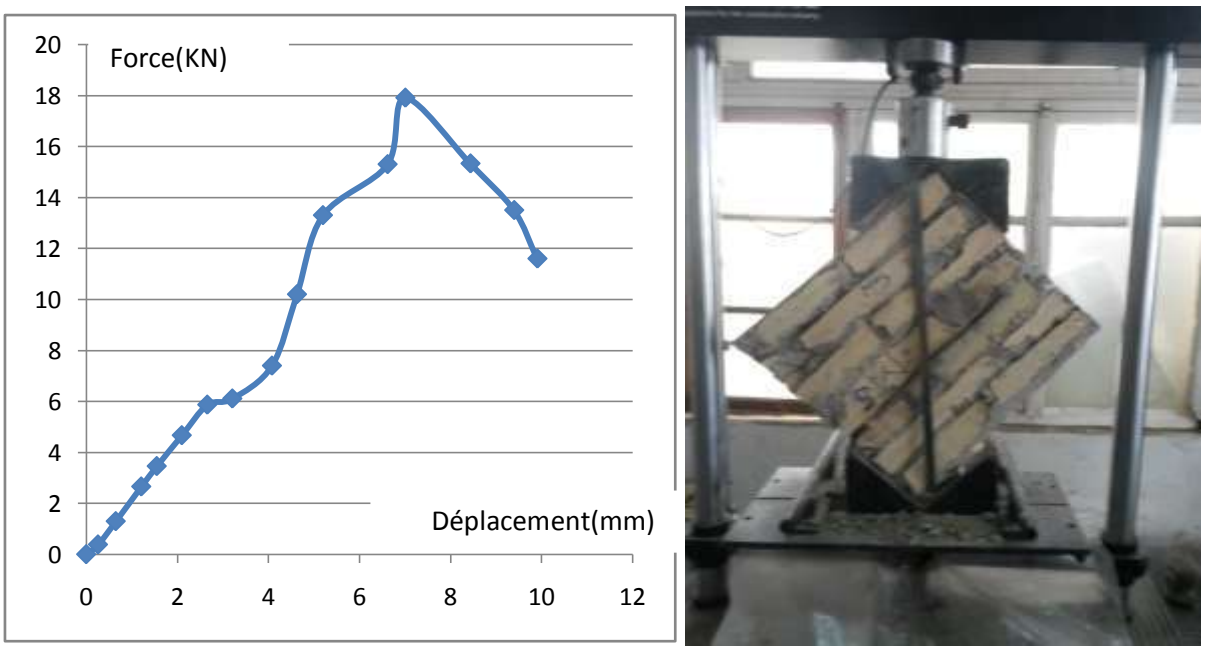


Figure 5-10 :courbe de force(KN) en fonction de déplacement(mm) de MD2

On observe dans ce mur une fissuration perpendiculaires à la sollicitation de compression diagonale,et une flambement de la plaque au milieu

La force de rupture maximale de MD2 est égale à 17.91KN ,avec un déplacement maximal de 9.91mm,la contrainte de cisaillement maximal est égale à 0.23Mpa

La ductilité de MD2 est égale à 10.8%,avec un module de cisaillement de 25.6Mpa

5-3-7-Comportement de mur MB2 renforcée par un plaque d'agrafage à l'intérieur du joint horizontal

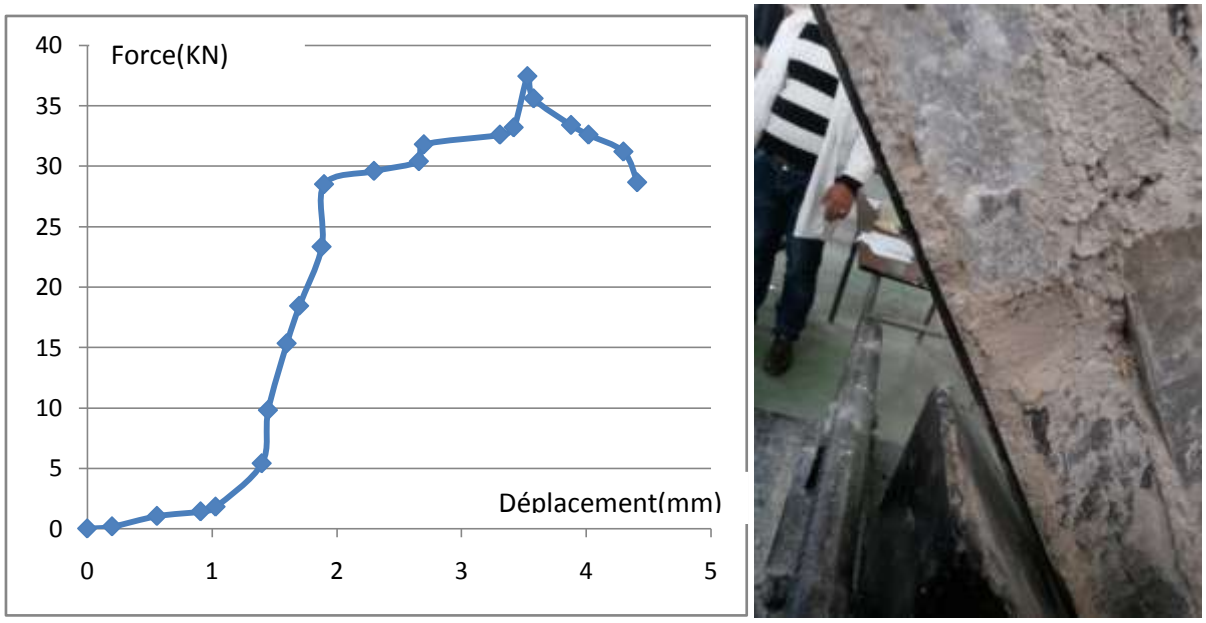


Figure 5-11 :courbe de force (KN) en fonction de déplacement(mm) de MB2

On remarque dans ce mur une fissuration continue entre la plaque de renforcement et le joint de mortier ,ce qui implique que il y'a une mauvaise adhésion mortier-plaque

La force de rupture maximale de MB2 est égale à 37.44KN,avec un déplacement maximale de 4.41mm,ce qui produit une contrainte de cisaillement maximale de 0.58Mpa ,le déplacement élastique est égale à 1.95mm

La ductilité de ce mur est égale à 9.6%,avec un module de cisaillement de 13.44Mpa

5-4-Conclusion

Les murets ayant été assemblés par nous ,nous supposerons donc qu'un mauvais assemblage (affutage ou utilisation de trop de mortier) est responsable de ces résultats contradictoires

Vu le peu d'essais que nous avons effectuées par rapport à la norme ,les résultats obtenus de la compression diagonale des murets ne sont pas ceux qu'on attendait.

Les explications pourrait être :

-une mauvaise fabrication du mortier et de sa mise en œuvre entrainant une mauvaise adhésion mortier-pierre

-une mauvaise affutage ou rectification des faces .

-des matériaux qui ne sont pas totalement identiques du point de vue de :l'homogénéité ,la porosité,les fissures préexistantes et une non verticalité du mur

Conclusion générale

La plupart des bâtiments en Algérie sont réalisés en portique poteau-poutre avec des murs en maçonnerie de remplissage. Lors de la justification des efforts sismiques, la contribution des panneaux en maçonnerie n'est pas prise en considération. Or, leur influence sur la rigidité et la résistance de l'ossature du bâtiment n'est pas négligeable.

Ce travail de fin d'études a eu pour objectif de répondre au questionnement principal : «comment le chargement de cisaillement influe-t-il sur le comportement de la maçonnerie en pierre naturelle

Commençons par analyser et vérifier les hypothèses que nous avons préconisées pour guider notre projet :

- Première hypothèse : « le cisaillement des murets en pierre naturelle est impacté par la nature du joint ». Le programme expérimental adopté, a permis de tester un mortier de jointoiement , mortier à base de ciment (1/4)

- Deuxième hypothèse : « l'épaisseur du joint influe sur le comportement de la maçonnerie ».

Pour notre programme expérimental réalisé au CENTRE DE CNERIB, nous avons considérés les deux aspects : la nature et l'épaisseur du joint en même temps. Les résultats obtenus ont montré que, plus le joint utilisé est résistant et l'épaisseur est importante, et plus la résistance au cisaillement de l'ensemble augmente. Paradoxalement, quand le joint est de moindre résistance, plus ductile et l'épaisseur est la plus faible, la résistance de l'ensemble est élevée.

Aussi, nous avons montré sur les murets que l'agrafage augmente la résistance au cisaillement d'une manière non négligeable, d'environ 20 à 40%. Ce qui demande à être validé encore par d'autres essais.

Recommandations pour les nouvelles études

- Étude de l'influence du confinement de la maçonnerie sur son comportement au chargement en diagonal,
- Étude du comportement de la maçonnerie sous chargement latéral et bi axial,
- Étudier l'incidence du renforcement de la maçonnerie à l'aide d'armatures, sous sollicitation de cisaillement,
- Identifier des modèles de prédiction du comportement de la maçonnerie en faisant une simulation numérique sur la base de l'ensemble des résultats des programmes expérimentaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1.Mourad Lateb,calcul de la capacité portante des murs en maçonneries de petits éléments sous charges verticales ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES 28 mars 1995

2.Nawel Mezigheche comportement des remplissage dans les structures sous différentes sollicitations :cas de la maçonnerie UNIVERSITE DE ANNABA 2010

3.Farid Brahim houti comportement des structures en maçonneries sous sollicitation uniaxiale UNIVERSITE DE TLEMCEN 03 novembre 2002

4.BENCHERIF Mohamed+HADJI Zakarya étude du comportement de la maçonnerie sous sollicitation de flexion UNIVERSITE DE TLEMCEN juin 2015

5.Frédéric MAGNEN ,proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en maçonnerie de pierre,PARIS,2 juillet 2013

6.Jean Coignet,Laurent Coignet, livre maçonnerie de pierre Matériaux et techniques ,désordres et interventions 2007

7.Matthieu Beth ,Module Maçonnerie 2006

8.Renée NICOUX,Sènateur-Maire Felletin, Présidente du pays sud creusois,Restaurer,Rèhabiliter,Renover sur le pays sud creusois

9.Laurence TOULET ,TECHNIQUES ET MATERIAUX MUR EN PIERRE BRUTE HOURDEE ,juillet 2011

10.César DIAZ GOMEZ.Docteur architecte.la réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle mèditerranèenne,UNIVERSITE polytechnique de catalogne Espagne

11.la maçonnerie de pierre .Guide technique6.la ville de Québec .Dépôt légale :2 trimestre 1989 .ISBN 2-920860-30-5

12.Dr .OUZZA KHEIRA .REHABILITATION DES STRUCTURES .UNIVERSITE des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF U.S.T.O .2014-2015