F

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Dr. Yahia Farès de MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL OPTION CONSTRUCTION ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Projet de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master II

Option : construction et matériaux

THEME

ETUDE DE RENFORCEMENTS DU COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT D'UN MUR EN MAÇONNERIE

Présenté par :
MAKHLOUF Moussa

Encadré par :
Mr.BOUKSANI Omar

Promotion 2016



Remerciements

je voudrais d'abord remercier dieu, avant toute autre personne, de m'avoir donné courage, santé, volonté, et surtout force afin de pouvoir réaliser ce modeste travail dans des meilleures conditions.

j'aimerais manifester ma gratitude pour la patience, le soutien et l'aide précieuse à mon promoteur Mr BOUKSANI.

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

Je remercie très spécialement l'équipe de BET et laboratoire mezaad road pour leur amitié, leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Je tenais à remercier vivement toutes personnes ayant contribué à la réalisation de ce précieux travail.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.



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

Je dédie 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 ma femme qui a sut m'accorder le temps et surtout la patience*
- *A mes chers Haroune et Hala.*
- *A mes frères, et ma soeur pour leur encouragement*
- *Tous les mombres de ma famille*
- *A mes Ami(e)s que j'aime tant, pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.*
- *Tout ceux qui ont contribué à ma formation durant mon cursus, et ceux qui m'ont encouragée et m'ont aidée à surmonter positivement.*

MAKHLOUFMOUSSA ✍

RESUME

Diverses études sur le comportement des structures en maçonnerie porteuse à l'état ultime ont été réalisées de par le monde. Dans notre pays, ce mode de construction a été très utilisé avant l'avènement du béton, 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 briques perforé de terre cuite non renforcé et des panneaux renforcés par un tissu de fibre de carbone avec plusieurs dispositif testés sous chargement uniaxial jusqu'à la rupture.

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

Mots-Clés : Brique, Compression, renforcements, Maçonnerie, Murets, fibre de carbone, 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 framework of this work, we are interested in the experimental study of panels of brickwork of terra cotta dig, unreinforced and reinforced panels by a fabric of carbon fiber 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 word Brick, Compression, reinforcements, Masonry, Walls, carbon fiber, shear rupture.

ملخص

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

في إطار هذا العمل وجهنا اهتمامنا نحو الدراسة التجريبية للجدران التي يستعمل في بنائها الأجر المثقب غير المدعومة و المدعومة بنسيج من ألياف الكربون بوضعيات مختلفة تم اختبارها تحت ضغط وحيد المحور إلى غاية الانهيار.

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

الكلمات المفتاحية : الأجر المثقب، ضغط، تعزيزات، البناء، الحائط، ألياف الكربون، القص، تمزق.

TABLE DES MATIERES

RESUME
SOMMAIRE
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES FIGURES
NOMENCLATURE
INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : LES TYPES DE MACONNERIE

I.1. HISTORIQUE ..... - 11 -
I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE MACONNERIE ..... - 13 -
I.2.1 APPAREILLAGE DE LA MACONNERIE : ..... - 13 -
I.2.2 Maçonnerie de pierre naturelle : ..... - 15 -
I.2.3 MAÇONNERIE EN AGGLOMERES DE BETON ..... - 18 -
- Agglomères pleins: ..... - 18 -
- Agglomère creux: ..... - 18 -

I.2.4 MAÇONNERIE EN BRIQUE D'ARGILE CUITE: ..... - 21 -
A Brique pleine : ..... - 21 -
B Brique perforée: ..... - 22 -
C Brique creuse : ..... - 22 -
D Brique monomur ..... - 23 -
I.2.5 MAÇONNERIE EN BRIQUES SILICO – CALCAIRE : ..... - 24 -
I.2.6 LES JOINTS DE MORTIER ..... - 24 -
I.3. CONCLUSION: ..... - 26 -

CHAPITRE II COMPORTEMENT MECANIQUE DES MURS EN MAÇONNERIE

II.I COMPORTEMENT EN COMPRESSION DE LA MAÇONNERIE ..... - 28 -
II.II RESISTANCES AUX CHARGES LATERALES : ..... - 30 -
- Rupture par glissement ..... - 30 -
- Rupture par basculement ..... - 30 -
- Rupture par cisaillement ..... - 30 -

II.III RESISTANCE A LA FLEXION (hors plan) ..... - 31 -
II.IV RESISTANCE DES MURS A LA TRACTION ..... - 32 -
II.V COMPORTEMENT VIS-A-VIS DE LA CHARGE CONCENTREE ..... - 32 -
II.VI CARACTERISATION DE L'INTERFACE ..... - 34 -
II.VII ESTIMATION DE LA RESISTANCE DE CISAILLEMENT PAR LES DIFFERENTS CODES ..... - 37 -
- CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT SUIVANT LA NORME ASTM E 519 - 02 ..... - 37 -
- CALCUL DU CISAILLEMENT SELON EUROCODE 6 ET CNERIB ..... - 38 -
- Vérification de la résistance au cisaillement des murs suivant l'Eurocode 6 ..... - 39 -
- Calcul de la contrainte de cisaillement lors des forces latérales (CNERIB) ..... - 40 -

II.VIII CONCLUSION : ..... - 40 -

CHAPITRE III :ETAT DE L'ART DU RENFORCEMENT ET DE LA REHABILITATION DES MAÇONNERIES

INTODUCTION ..... - 42 -

III.1. CONSOLIDATION A BASE DES BRIQUES ..... - 44 -

III.1.1 Utilisation des briques-liaison ou des moellons-liaison ..... - 44 -

III.1.2 Utilisation des Contreforts ..... - 44 -

III.1.3 Utilisation des potelets en béton armé ..... - 45 -

III.2. CONSOLIDATION A BASE D'ACIER . ..... - 46 -

III.2.1 Les tiges metalliques ..... - 46 -

III.2.2 Utilisation des fers plats pour liaisonner les murs ..... - 46 -

III.2.3 Renforcement par couture d'agrafe de solidarisation ..... - 47 -

III.2.4 Renforcement par barres, câbles ou grillage métallique ..... - 49 -

III.3. CONSOLIDATION A BASE CHIMIQUE: ..... - 50 -

III.3.1 Reparation par colmatage des fissures passives : ..... - 50 -

III.3.2 Reparation des fissures par injection ..... - 51 -

III.4. CONSOLIDATION PAR MATERIAUX COMPOSITES ..... - 52 -

III.4.1 FIBRE POLYMERE RENFORCE (FRP) ..... - 52 -

- Définition ..... - 52 -
- Exemples de collage de FRP bandes ou tissus ..... - 54 -
- Exemple d'insertion de NSM FRP près de la surface ..... - 55 -

III.4.2 Matrice cimentaire renforcée par textiles ..... - 56 -

- Définition ..... - 56 -
- Renforcement par matériaux composite en utilisant une matrice cimentaire ..... - 56 -
- Caractérisation de l'adhérence : ..... - 57 -

III.5. CONCLUSION : ..... - 60 -

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

PARTIE 01 : ..... - 63 -

IV.1.1 APPROCHE EXPERIMENTALE SUR LES MATERIAUX ..... - 63 -

IV.1.1.1 MATERIAUX UTILISES ..... - 63 -

IV.1.1.2 Caractéristiques des matériaux ..... - 63 -

- Brique perforée : ..... - 63 -
- Caractéristiques mécaniques de la brique: ..... - 64 -
- *CARACTERISTIQUES DES SABLES UTILISENT* ..... - 65 -
- LE CIMENT : ..... - 66 -
- Eau : ..... - 66 -
- Mortier ..... - 66 -

IV.I.I.2.5.I COMPOSITION DES MORTIERS ..... - 67 -
IV.I.I.2.5.II ESSAI SUR LES MORTIERS (EN 196-1) ..... - 67 -
IV.1.2 CONSTRUCTION DES MURETS ..... - 70 -
IV.I.II.I CARACTERISTIQUES DES MURETS: ..... - 70 -
IV.I.II.II METHODOLOGIE DE LA CONFECTION DES MURS ..... - 71 -
PARTIE 02 : LES MATERIAUX DE RENFORCEMENT ET LEUR APPLICATION SUR LES MURETS ..... - 73 -
IV.2.1 MATERIAUX DE RENFORCEMENT ..... - 73 -
IV.2.1.1 Fibres de carbone SikaWrap ..... - 73 -
IV.2.1.2 Résine d'imprégnation pour le système SikaWrap ..... - 74 -
IV.2.2 MODE D'APPLICATION DE LA FIBRE DE CARBONE ..... - 75 -
IV.2.2.1 PREPARATION DE LA SURFACE ..... - 75 -
IV.2.2.2 COUPER LE TISSU EN FIBRE DE CARBONE ..... - 75 -
IV.2.2.3 LE MELANGE DES COMPOSANTS DE LA RESINE EPOXY SIKADUR 330 ..... - 75 -
IV.2.3 IMPREGNATION ET APPLICATION DES TISSUS ..... - 76 -
IV.2.4 DIFFERENT DISPOSITIFS DE FIBRE ADOPTE ..... - 76 -
PARTIE 03 : PRESENTATION DES L'ESSAIS : ..... - 79 -
IV.3.1 ESSAI DE COMPRESSION DIAGONALE ..... - 79 -
IV.3.1.1 Présentation du dispositif d'essai ..... - 79 -
IV.3.1.2 Paramètres expérimentaux ..... - 80 -
IV.3.2 ESSAI DE TRACTION SUR LES MATERIAUX DE RENFORCEMENT : ..... - 82 -
IV.3.2.1 Protocole expérimental ..... - 82 -
CONCLUSION : ..... - 83 -

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

PARTIE 01 : RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MATERIAUX ..... - 85 -
V.1.1. Les briques ..... - 85 -
V.1.2. Les sables : ..... - 87 -
V.1.3. Le mortier : ..... - 88 -
V.1.4. La fibre de carbone : ..... - 88 -
PARTIE 02 : RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MURETS : ..... - 89 -
V.2.1. RESULTATS EXPERIMENTAUX ..... - 89 -
V.2.1.1. Comportement de murs non renforcé : ..... - 89 -
V.2.1.2. Comportement des murs renforcés par fibre de carbone ..... - 90 -
V.2.2. L'INFLUENCE DU %DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT DES MURETS ..... - 95 -
V.2.3. CONCLUSION ..... - 97 -

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Les valeurs caractéristiques $fvk0$ suivant l'eurocode 6 et les valeurs trouvent Expérimentalement par MIHA TOMAZEVIC (MIHA, 2008). ..... - 38-

Tableau II.2 valeur de la résistance initiale au cisaillement fvk0 (EN 1996-1-1, 2006) ..... - 42 -

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Comportement d'acier et de FRP classé selon la nature des fibres, [46] .....-56-

Tableau III.2: Caractéristiques mécaniques moyennes des résines époxy [47.....-57-

CHAPITRE I V:

Tableau IV.1: composition de 1m3 du mortier.....-7-

Tableau IV.2: limites de temps pour réalisés l'essai de compression.....-71-

Tableau IV.3: caractéristiques des murets.....-73-

Tableau IV.4: caractéristiques de fibre de carbone.....-76.

Tableau IV.5 : caractéristiques de la Résine.....-77-

CHAPITRE V:

Tableau V.1 caractéristiques physiques des briques.....- 88-

Tableau V.2 : résultats d'essai de compression sur briques.....- 89 -

Tableau V3: résultats des essais sur les sables.....- 90-

Tableau V.4: résultats des essais de compression de mortier.....- 91 -

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de la maçonnerie dans la construction des bâtiments est une pratique généralisée dans de nombreux pays. La maçonnerie peut être utilisée comme un matériau de séparation ou comme un élément porteur.
Le comportement de la maçonnerie vis-à-vis le séisme est moins exploré. En effet, des expériences désastreuses des séismes tel que, celui qui s'est produit à CHLEF (1954 et 1980), en CALIFORNIE (1982), en COLOMBIE (1983), au MEXIQUE (1986) et en EGYPTE (1997), en GRECE, en TURQUIE (1999) et à AIN-TEMOUCHENT (1999), BOUMERDES (2003) ,MIHOUB (2016), témoignent de la nécessité de réglementer la construction en maçonnerie.

A l'état actuel la résistance de la maçonnerie au cisaillement est estimée sur la base de relations techniques déduites des relations expérimentales obtenues à partir des essais sur des murs en vrai grandeur ou prototypes.

L'objectif de notre travail est de réaliser des essais expérimentaux sur des murs en maçonnerie en utilisant des blocs en ≪ brique perforé≫. Les murets renforcés par un tissu de fibre de carbone unidirectionnel selon plusieurs dispositions.

Puis dans un second temps, on essaye d'optimiser la quantité, la forme du renfort et de cibler les régions nécessitant cette ajout de renfort.

Notre travail a été organisé en cinq chapitres :

Chapitre 01 : présente les types de maçonnerie
Chapitre 02 : présente le comportement a la compression, a la traction, à la flexion et au cisaillement.
Chapitre 03 : présente l'état de l'art du renforcement et de la réhabilitation des maçonneries
Chapitre 04 : présente l'étude expérimentale
Chapitre 05 : présente résultats et interprétations

CHAPITRE I

Les types de maçonnerie

Une maçonnerie est un empilage de blocs (pierre, briques terre cuite ou en béton aggloméré etc.) liés entre eux par un liant hydraulique (chaux, ciment, plâtre etc.). On réalise à partir de deux matériaux de caractéristique et de comportement différent un assemblage homogène destiné à vieillir durablement.

I.1. HISTORIQUE

La maçonnerie est l'un des matériaux de construction les plus anciens, les vestiges connus de son utilisation remontant au XIVe siècle av. J.-C. À l'origine constitués de briques d'argile, de pierres et de boue séchée, les ouvrages de maçonnerie évoluent graduellement avec l'apparition des fours à briques, de la taille de la pierre et de la découverte de la chaux.[22]
De simples murs, ces ouvrages prennent, avec le temps, la forme d'arches et de dômes, limités seulement par le savoir des architectes et la technique des maçons. L'évolution de la maçonnerie connaît un sommet à l'époque de la Renaissance, les méthodes et les matériaux changeant à peine pendant les trois siècles suivants. [Christine Beall, 1993]

Utilisant des blocs de pierre, d'argile, certaines de ces structures ont traversées les millénaires, les plus célèbres d'entre elles sont sans aucun doute les pyramides Maya et Egyptienne.[1]



Figure 1.1 Pyramide Maya de Tikal (Guatemala) - Pyramide de Khéops à Gizeh (Egypte),[1]

Quefren, Khéops et Miquerinos sont les trois pyramides les plus célèbres construites en bloc de pierre datant d'approximativement 2600 avant J.C. La plus grande d'entre elles Khéops, culminant à près de 147 m nécessita près de 2,3 millions de blocs de pierre d'un poids moyen de 2,5 tonnes.[1]



Figure 1.2 Cathédrale de Strasbourg Construite en blocs de grès des Vosges[1].

En amérique du nord le dernier exemple d'utilisation traditionnelle de la maçonnerie dans une construction moderne de plusieurs étages est l'édifice Monadnock, érigé à Chicago en 1891, montré sur la (figure 1.3). La résistance latérale de la maçonnerie n'étant attribuable qu'à son poids, selon les codes de 1880 alors eu vigueur, les murs de l'édifice Monadnock atteignent une épaisseur de 2 m à la base de ses 16 étages. par la suite, la maçonnerie acquièrent peu à peu la réputation d'un matériau coûteux et dépassé. Les charpentes en acier ou en béton armé ont remplacé le mur porteur comme système de reprise des charges et conséquemment, la recherche et l'innovation dans le domaine de la maçonnerie *structurale* cesse pratiquement.
La maçonnerie ne disparait pas pour autant du paysage urbain mais est reléguée au rang de matériau de parement, de remplissage ou de partition. [Christine Beall, 1993]

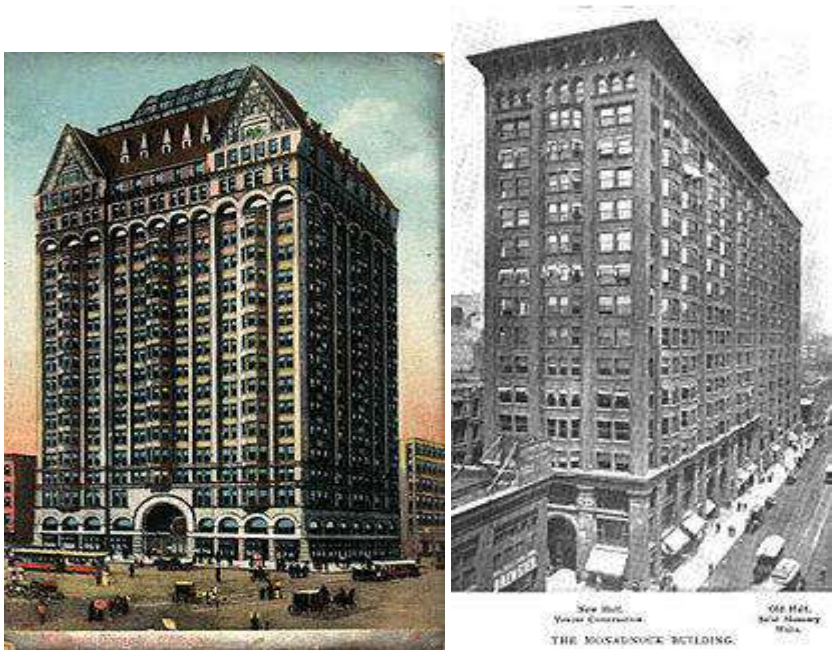


Figure 1.3 Édifice Monadnock [Christine Beall, 1993)

I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE MACONNERIE

Un mur de la maçonnerie est composé de rangées de blocs reliées par le biais d'un liant de mortier. Les blocs se distinguent selon leur forme, leur position et leur composition minérale. Dans cette partie nous présentons les différents types de maçonnerie, leurs modes de fabrication et leurs technologies de construction.

I.2.1 APPAREILLAGE DE LA MACONNERIE :

L'appareillage d'une maçonnerie définit la manière dont les blocs sont assemblés et est, par conséquent, corrélé à la taille de ces derniers, à l'épaisseur des joints et à l'imbrication de l'assemblage. L'appareillage influe fortement sur les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie et sa considération dans toute modélisation du matériau est primordiale.

Une maçonnerie présentant les meilleures caractéristiques mécaniques est constituée de blocs précisément taillés et dont les joints perpendiculaires à l'effort principal de compression forment une assise continue, tandis que ceux qui y sont parallèles sont régulièrement décalés à chaque assise. Une telle maçonnerie présente des joints fins et est dite de pierre de taille (figure 1.4a).

Les maçonneries dites de blocage ou cyclopéennes (figure 1.4b) sont constituées de blocs généralement non taillés, noyés dans une matrice de mortier et présentent de très faibles propriétés mécaniques. Entre ces deux cas extrêmes, tous les appareillages intermédiaires sont possibles.



Figure 1.4 Exemple de maçonnerie :a)pierre de taille ; b) maçonnerie cyclopéenne [22]

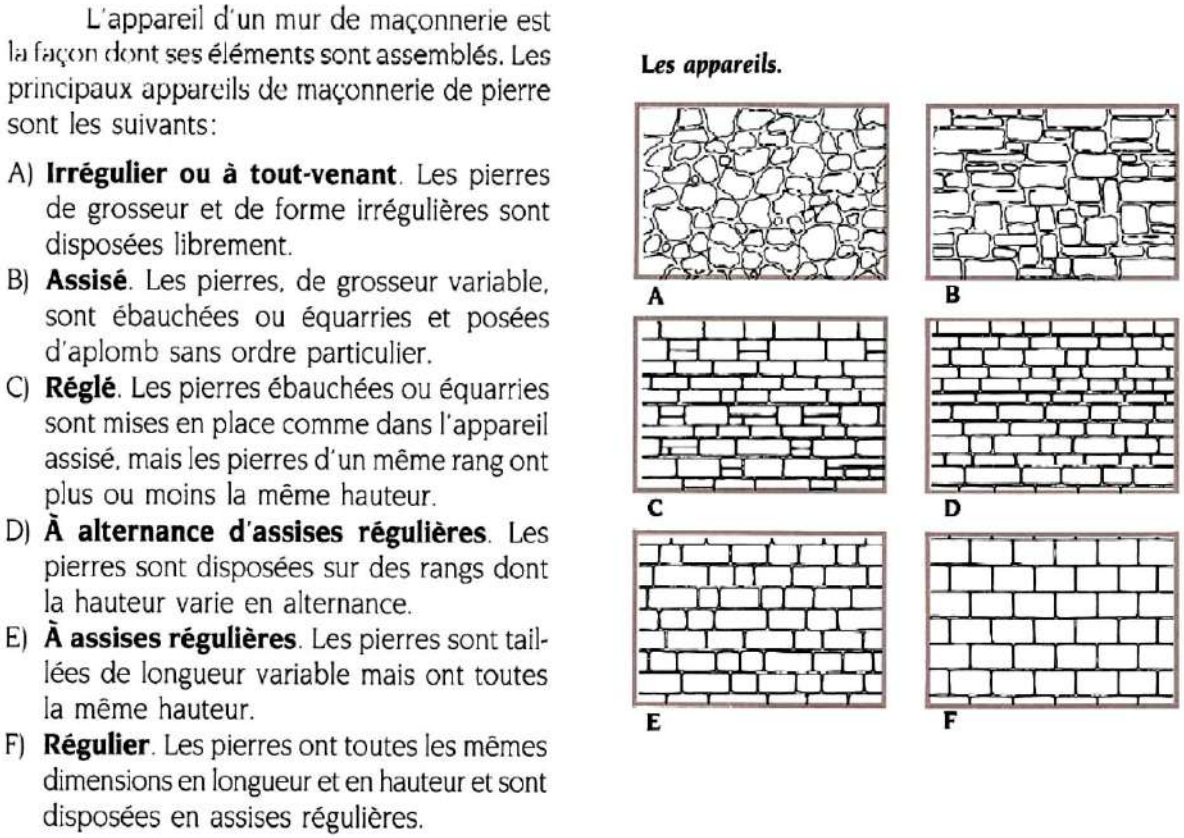
A l'exception des quelques termes communément admis précités, il n'existe à ce jour ni définition, ni terminologie universellement admises pour qualifier l'appareillage d'une maçonnerie.

Celle adoptée dans la Recommandation suisse SIA V 178, L'établissement de critères plus précis pour la définition de l'appareillage d'une maçonnerie en vue d'une classification corrélable avec les propriétés mécaniques de la maçonnerie est néanmoins nécessaire. Le premier d'entre eux peut être la quantification du pourcentage relatif de surface apparente des matériaux constitutifs : une importante quantité de mortier

implique des propriétés mécaniques affaiblies en raison de joints épais et d'une mauvaise imbrication des unités.

Un second critère de classification des appareillages peut être définit relativement à la continuité des assises. Il se rattache indirectement à la qualité de la taille des unités.

Les murs d'assemblage régulier possèdent des comportements mécaniques meilleurs que les murs de blocage [1]. Les murs construits sans l'utilisation de mortier s'appellent « murs de pierres sèches ». Ils sont bâtis par le remplissage de pierres de terrain.



L'appareil d'un mur de maçonnerie est la façon dont ses éléments sont assemblés. Les principaux appareils de maçonnerie de pierre sont les suivants:

A) **Irrégulier ou à tout-venant**. Les pierres de grosseur et de forme irrégulières sont disposées librement.
B) **Assisé**. Les pierres, de grosseur variable, sont ébauchées ou équarries et posées d'aplomb sans ordre particulier.
C) **Réglé**. Les pierres ébauchées ou équarries sont mises en place comme dans l'appareil assisé, mais les pierres d'un même rang ont plus ou moins la même hauteur.
D) **À alternance d'assises régulières**. Les pierres sont disposées sur des rangs dont la hauteur varie en alternance.
E) **À assises régulières**. Les pierres sont taillées de longueur variable mais ont toutes la même hauteur.
F) **Régulier**. Les pierres ont toutes les mêmes dimensions en longueur et en hauteur et sont disposées en assises régulières.

Figure I.5: Les principaux appareils de la maçonnerie en pierre. Figure et définitions de la guide technique 6 de la ville de Québec : « La maçonnerie de la pierre » ***[7]***

Deuxièmement, la structuration des murs de la maçonnerie varie selon la composition de l'épaisseur du mur entre ;

- Le mur simple composé d'un seul appareil dans son épaisseur.
- Le mur à double appareil dont la connexion, entre les deux parements, est assurée par des « boutisses » qui traversent la section de mur [2].
- les murs composés en plusieurs couches. La couche de milieu se compose souvent de blocage alors que les couches extérieures sont souvent construites avec des pierres plus taillé [3].

I.2.2 Maçonnerie de pierre naturelle :

La pierre naturelle est un des matériaux les moins consommateurs d'énergie, elle ne subit presque aucune modification entre sa sortie en carrière et sa mise en œuvre sur le chantier. Aussi que la ressource en pierre naturelle est encore très importante et que son cout est équivalent aux autres matériaux de construction, à condition de préférer les ressources locales. Sur le plan esthétique, la pierre se défend également : en fonction de la nature de la roche, il est possible de jouer sur le cote "brut" de la pierre en conservant la trace des coupes de scie ou de travailler des faux joints à la scie pour simuler des dimensions de blocs différentes de ceux réellement poses (voir figure 1.4).



Figure I.6: Pierre naturelle [1]

- **Moellons :**

Les pierres non gélives dites moellons, doivent être d'un poids inferieur a 40kg
Afin de permettre leur manipulation par un seul homme. Les moellons peuvent être bruts de forme irrégulière ou tailles selon l'aspect recherche.
Le moellon brut se présente sous des formes variées. Celles-ci dépendent de la nature de la pierre exploitée, blocs arrondis ou anguleux aux formes diverses pour les pierres dures, grès, granits, calcaires, etc.

- **Jointoiement :**

La largeur des joints, variables dans cette maçonnerie, ne doit pas excéder 4 cm et les espaces plus larges doivent être remplis par des éclats de pierre. Lorsque les joints restent apparents, ils doivent être réalisés de manière à offrir une résistance minimale à l'écoulement de l'eau sur le parement. Les murs ainsi construits peuvent être soit laisses bruts, c'est-à-dire que l'appareil reste visible en parement, soit recouverts d'un crépissage (voir figure 1.7).

- **Epaisseur des murs :**

L'épaisseur des murs dépend des pierres employées mais ne peut être inférieur à 30-40 cm. Les moellons taillent, grossièrement ou non, permettent des réalisations variées dont les caractéristiques générales d'exécution (figure 1.5).

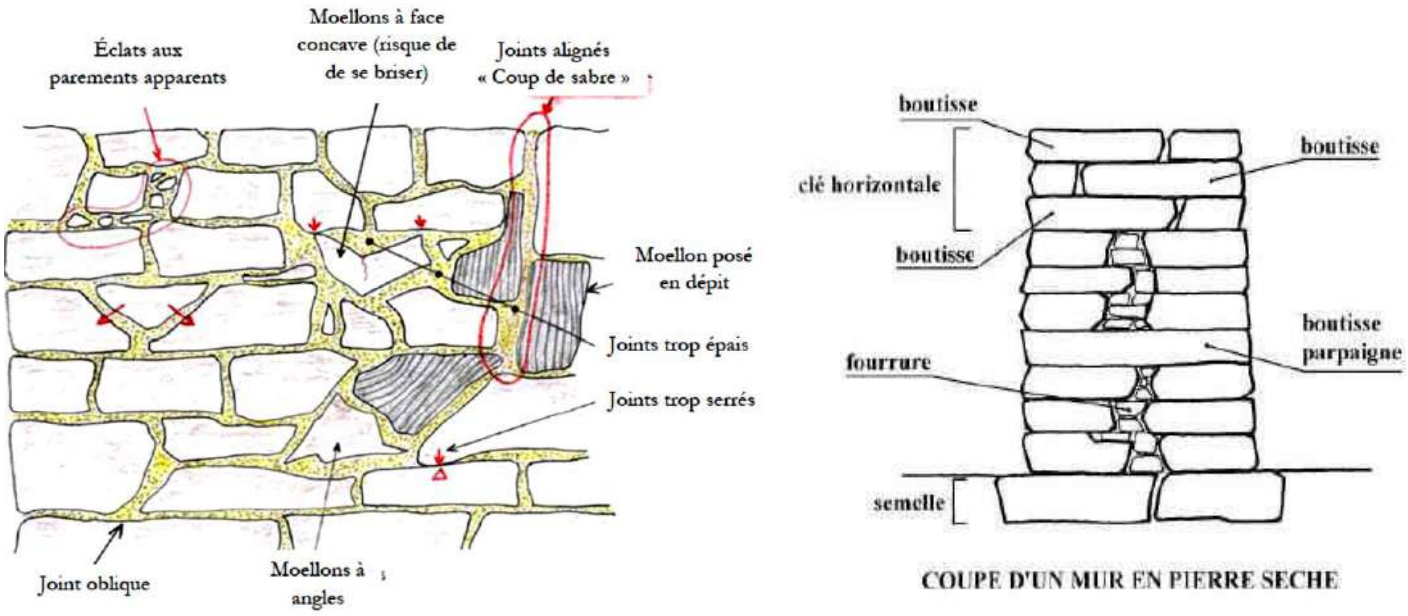


Figure I.7: Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990)

L'utilisation de la pierre occupe une large partie dans les structures anciennes. Les pierres sont classées en trois typologies principales selon la composition minérale de la roche d'origine : pierre calcaire, magmatique, et métaphorique. Les pierres utilisées dans une structure de la maçonnerie doivent avoir une résistance mécanique suffisante, une texture compacte et homogène, et une bonne adhérence avec le mortier.

La position de la pierre dans le mur peut jouer un rôle structurel important. Par exemple, une « boutisse » sert à relier plusieurs couches de murs dans son épaisseur, par conséquent, cela permet d'augmenter la rigidité du mur. Le Tableau I.1 définit quelques mots de vocabulaires utilisés dans la dénomination de la pierre.

Tableau I.2 : Vocabulaire de la pierre dans les structures de la maçonnerie.[5]

Nature de vocabulaire	Le vocabulaire	définition
Face de la pierre selon le contact de la pierre avec les éléments	« parement »	face visible de la pierre
	« lit d'attente »	la face par laquelle l'élément supporte les éléments placés dessus
	« le lit de pose »	la face par laquelle l'élément repose sur les éléments placés en-dessous
	« les faces de joints »	Les faces qui sont en contact avec les autres éléments
Face de la pierre selon la longueur de l'arrêt	« joue»	La face déterminée par les deux plus longs arrêts
	« chant »	La face entouré par l'arrêt le plus long et l'arrêt le plus court.
	« bout »	La face déterminée par les deux plus courts arrêts.
Nom de la pierre	« Boutisse »	Dans le cas où la face visible de la pierre est le « bout » (la face de la surface la plus petite)
	« Carreau »	la face visible est le « joue » (ayant la plus grand surface)
	« panneresse »	le « chant » constitue la face visible

Les pierres se trouvent sous formes variées entre pierres régulières et irrégulières. Les pierres régulières appelées aussi « pierre de taille » sont préférées pour les façades. Leur taille va être d'une dimension de moins de 200 mm pour les petits appareils et plus que 350 mm pour les grands appareils. Alors que les pierres irrégulières se trouvent en moellon équarris avec joints orthogonaux, en pierre ébauchés ou en pierre plate [12]. En plus, les pierres en caillou sont utilisées pour construire « les murs de caillou en bain de mortier ». Ces murs ont des comportements mécaniques faibles à cause de la quantité élevée de mortier dans le mur.

I.2.3 MAÇONNERIE EN AGGLOMERES DE BETON

L'agglomère est un bloc de béton moule fréquemment en forme de parallélépipède creux ou non, constitue d'un mélange de ciment, de sable, de gravillons (4/8) et graviers (8/25). On comptabilise plus de 150 références de blocs de béton différents, en forme comme en composition. Parmi les matériaux de construction dits conventionnels, c'est celui qui a le meilleur rapport qualité / prix. Il fait partie des matériaux lourds (ayant une forte masse thermique). De forme régulière, résistant, peu couteux, le bloc de béton est le composant principal des murs extérieurs. Il peut être utilisé seul, notamment dans la construction de hangars, de murs de clôture, éventuellement recouvert d'un enduit. Sa structure peut être creuse ou pleine selon sa classe de résistance. En effet, plus le bloc de béton aura de charge à supporter, plus sa classe de résistance devra être élevée, et plus il sera lourd.
On distingue deux grandes catégories de blocs :

- **Agglomères pleins:**

On les utilise principalement pour ériger les murs de soubassement. La résistance des blocs pleins, ou même perforés, est supérieur d'autant mieux aux différentes poussées du sol.

- **Agglomère creux:**

On les utilise pour tous les autres types de mur.

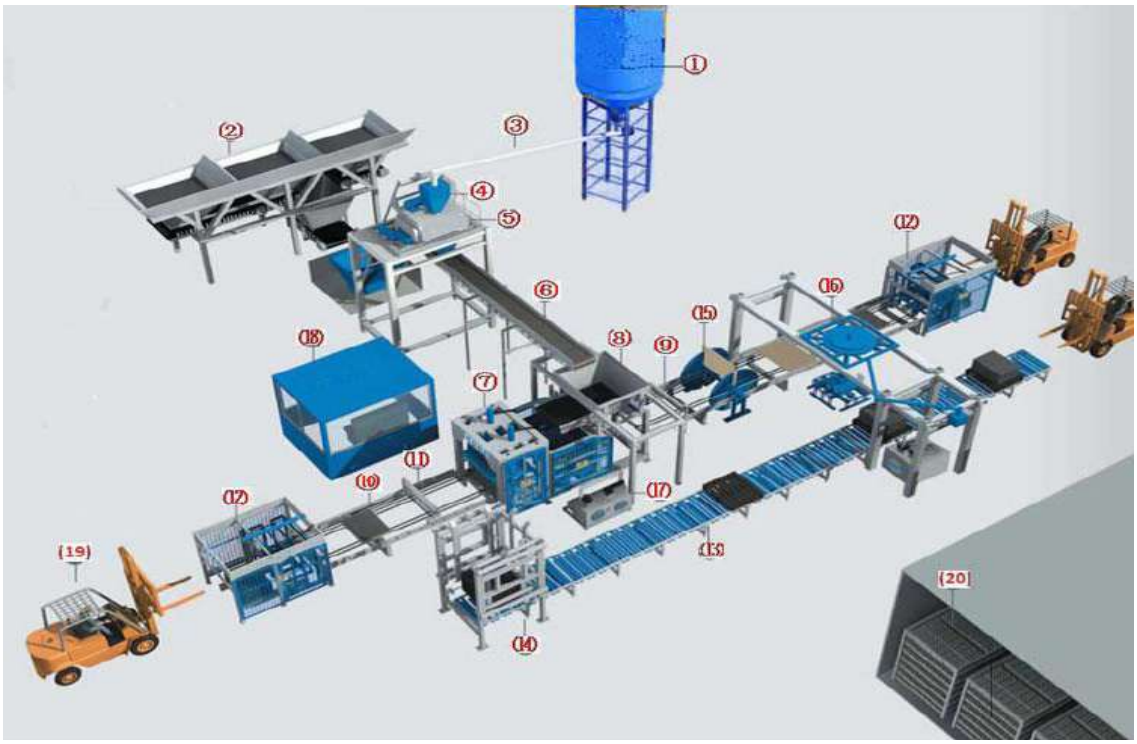


Figure 1.8 Agglomères en béton

Usages	Blocs (CE)	
Tout type de mur	Bloc creux	
Sous-sol enterré, refend, piscine	Bloc plein ou perforé	
Mur de soutènement, piscine	Bloc à bancher	
Jambages, chaînages verticaux, angles	Bloc poteau, feuillures	
About de planchers, cloison séparative	Planelles	
Linteaux, chaînages horizontaux	Bloc chaînages	

Figure 1.9 Les différents types de parpaings (BALANDIER, 1910)

La figure suivante montre le processus de fabrication des blocs de parpaing



1. Silo de ciment	11. Machine à nettoyer les briques
2. Machine de dosage	12. Empileuse
3. Convoyeur à vis	13. Système de livraison de benne à béton
4. Echelle de ciment	14. Ascenseur de palettes et descendeur
5. Centrale à béton	15. Gobelet de palette
6. Bande transporteuse	16. Système de cubes
7. Machine à fabriquer les blocs de béton	17. Unité hydraulique
8. Trémie	18. Système de controle
9. Chargeur de palettes	19. Chariot élévateur
10. Système de convoyeur de blocs	20. Salle de séchage

Figure I.10: Processus de fabrication des blocs en parpaing (QGM, 2014)



Figure I.11: Préparation du mélange ; Machine de fabrication ; Fabrication des blocs ; Séchage et stockage

I.2.4 MAÇONNERIE EN BRIQUE D'ARGILE CUITE:

La brique à maçonner en terre cuite possède de remarquables propriétés de durabilité, de résistance, de stabilité, de régulation de l'humidité et d'inertie thermique; elle contribue donc très activement à un habitat sécurise et sain, éléments essentiels au développement d'une atmosphère agréable.

Grace à ses performances thermiques et phoniques, la brique à maçonner en terre cuite est adoptée par de nombreux systèmes de construction, tels que le traditionnel ≪double mur≫ ou utilisée en combinaison avec des matériaux isolants intérieurs ou périphériques modernes.

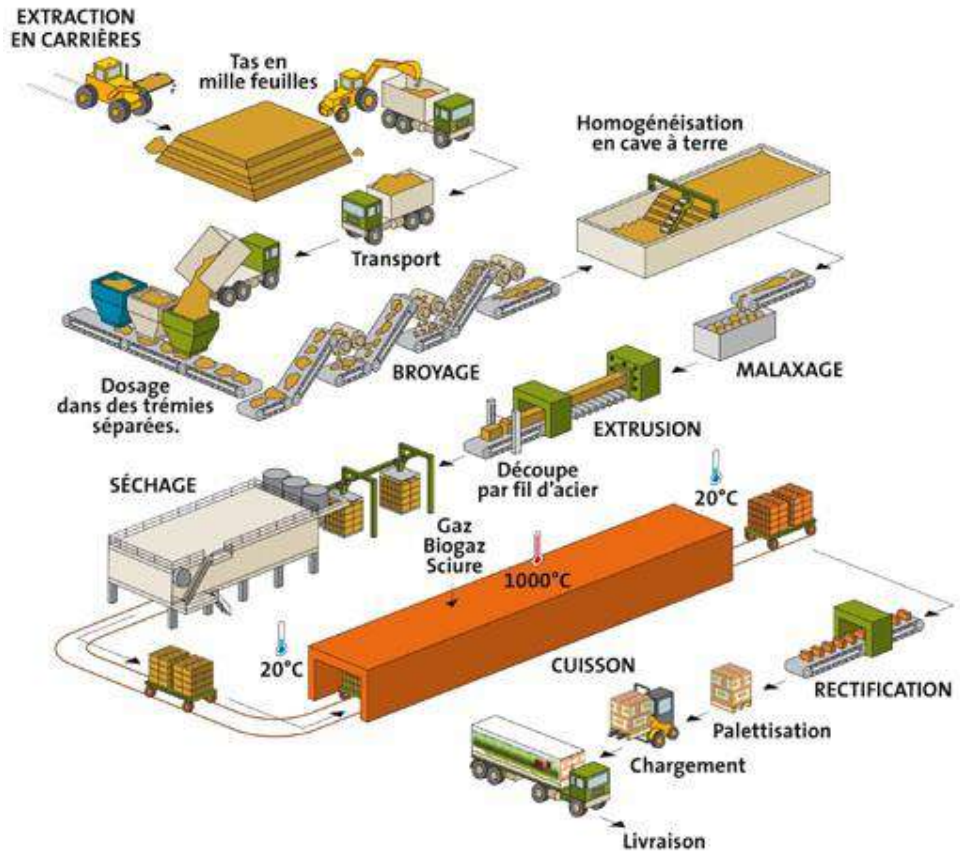


*Figure I.12: processus de fabrication des briques en terre cuite (*www.bouyer-leroux.com)

Il existe quatre types de briques :

- ✓ Briques pleines,
- ✓ Briques perforées,
- ✓ Briques creuses.
- ✓ Brique monomure

A Brique pleine :

La brique pleine possède des faces planes, sans relief. Elle permet de construire des murs porteurs ou des cloisons, et peut être utilisée comme matériau de parement ou être laissée apparente.

Premier type de brique de l'histoire, elle est toujours utilisée, en façade. Elle offre une isolation pratiquement nulle. Elle trouve cependant son application dans la décoration aussi bien extérieure qu'intérieur



Figure I.13: Brique en terre cuite pleine

B Brique perforée:

Brique comportant des alvéoles perpendiculaires au plan de pose. Elle permet de réaliser des murs porteurs ou des cloisons, elle représente une bonne isolation thermique. Elle a été utilisée avec succès pour la réalisation de plusieurs tours, son grand avantage c'est qu'elle offre une excellente résistance à la compression et au cisaillement.

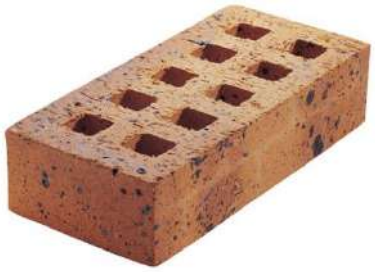


Figure I.14: Brique perforée

C Brique creuse :

Légère et économe en matériau en comparaison a une brique pleine, une brique creuse est conçue pour une variété d'applications dont l'isolation, la ventilation, la construction de façades.

Certaines briques creuses peuvent être remplies et disposer des barres de renforcement pour améliorer la force de tension et de torsion d'une structure.

Une brique creuse est classée en fonction de son usage (structure porteuse, isolation, etc.) Elle peut être conçue pour des murs porteurs, des cloisons intérieures ou des façades. Elle peut avoir une variété de formes, de motifs et de finitions et peut parfois être destinée à l'amélioration de l'isolation ou de la ventilation d'un bâtiment.



Figure I.15 Brique creuse

D Brique monomur

Les récentes évolutions techniques ont donné naissance à une brique particulière: le brique monomur.

Beaucoup plus épaisse que les autres briques et transpercée de nombreuses alvéoles elle est utilisée essentiellement en murs extérieurs. Sa capacité à isoler aussi bien phonique ment que thermiquement. Elle se passe d'isolation, ce qui implique de casser pour passer les câbles électrique et la plomberie à l'intérieur.

C'est donc un matériau avec lequel il faut compter mais qui est plus cher qu'une construction en béton, isolation déduite



*Figure I.*16 Brique monomure

I.2.5 MAÇONNERIE EN BRIQUES SILICO - CALCAIRE :

La fabrication des briques silico-calcaires consiste à comprimer un mélange de silice 90% et de la chaux grasse à une pression de 30 MPA et à soumettre ce mélange à un jet de vapeur d'eau sous pression pendant plusieurs heures. Ces briques sont des matériaux de remplissage, la rugosité es surfaces permet l'accrochage des enduits. L'emploi des silico-calcaires légère ou denses donne des résistances à la compression qui peuvent aller respectivement jusqu'au 7 MPa pour des densités de l'ordre de 0,8 et jusqu'à 60 MPa pour les densités d'ordre de 2,2.

Les briques silico-calcaires sont fabriquées avec des produits naturels que sont le sable, la chaux et l'eau, selon le processus suivant :



*Figure I.*17 les composantes des briques silico - calcaire

I.2.6 LES JOINTS DE MORTIER

Les caractéristiques mécaniques du mortier dépendent essentiellement de la phase de préparation (mise en œuvre) et de la phase finale c'est-à-dire après le durcissement.
La première phase est fonction de l'ouvrabilité du mortier. Cette caractéristique est généralement définie par le maçon. On ne peut pas lui donner une signification précise par manque de norme spécifique le concernant. Ce qu'il faut retenir c'est que pendant cette phase, le mortier doit avoir une certaine viscosité, être facile à écarter avec une truelle et impérativement coller sur les surfaces verticales. [9]

Les agents au les adjuvants qui peuvent augmenter l'ouvrabilité du mortier sont la taille des agrégats et la quantité d'eau utilisée pour le malaxage. L'entrainement d'air est un additif qui crée des bulles d'air minuscules dans le mélange. Ces bulles vont aider les ingrédients du mortier à se déplacer plus librement. Par ailleurs, elles vont réduire la résistance du matériau puisque la densité et la surface de liaison entre les unités de maçonnerie vont être naturellement affaiblies. [9]

L'hétérogénéité des constituants du mortier, les phénomènes de prise, de durcissement, de retrait et d'usage donnent à ce matériau une certaine spécificité qui est souvent difficile à prendre en compte dans les calculs. Ces paramètres du mortier sont contrôles par le choix des granulats et des liants et par leurs pourcentages respectifs dans le mélange. Le sable est généralement le granulat employé. Il est inerte dans la réaction chimique d'hydratation, mais participe à la compacité du mortier durci. Dans les constructions modernes, il doit répondre à des exigences de granulométrie pour conférer plus au moins au mortier son homogénéité. Les liants sont de nature variée ce qui leur donne des caractéristiques mécaniques diérèses. Ils sont donc très différents suivant leur conception et leur emploi.

Les mortiers anciens étaient à base de chaux, ils possédaient une très bonne viscosité, mais leur résistance mécanique était faible et leur durcissement lent. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive, est la base du mortier traditionnel rencontré dans les édifices anciens. Pour des raisons de coût, la chaux hydratée sèche est la plus utilisée aujourd'hui.

- La terre argileuse est un type de liant qui a été utilisé dans les constructions traditionnelles. On le reconnait à sa résistance qui est mauvaise avec le temps.
- Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante. Cette dernière a une consistance de départ plus ou moins fluide, se transforme en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

La résistance à la compression du mortier est parfois considérée comme critère principal pour choisir le type de mortier, puisqu'elle est relativement facile à mesurer.
Elle se relie généralement à quelques autres propriétés, comme la résistance à la traction et le pouvoir de rétention d'eau du mortier. La résistance à la compression du mortier dépend en grande partie du contenu du ciment (la chaux et le sable) utilise et du rapport (E/C) eau-ciment. Par exemple, le rapport E/C est égal à 0,5 pour un mortier normal de type (EN 196-1).
Le tableau ci-dessus donne un aperçu des propriétés mécaniques des mortiers.

Tableau 1.2 | Propriétés mécaniques des mortiers suivant leur composition.
D'après [6]

Type de mortier			Résistance en compression(MPa)	
Ciment/chaux /sable	Ciment de maçonnerie /sable	Ciment/sable +adjuvant	Test laboratorie	Test in-situ
1/0.25/3	-	-	16	11
1/0.5/4-4.5	1/2.5-3.5	1/3-4	6.5	4.5
1/1/5-6	1/4-5	1/5-6	3.6	2.5
1/2/8-9	1/5.5-6.5	1/7-8	1.5	1.0

I.3. CONCLUSION:

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue, elle est applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan maçon qui réalise la plupart des constructions pavillonnaires. Elle se caractérise par ses matériaux support ; brique, parpaing, mortier ou chacun d'entre eux présente des avantages, particulièrement le cout de réalisation et la facilite de transport dans les chantiers. Notre intérêt dans cette étude est de prédire le comportement des structures par rapport au cisaillement.

CHAPITRE II COMPORTEMENT MECANIQUE DES MURS EN MAÇONNERIE

Les murs de maçonnerie sont exposés aux chargements verticaux et latéraux dans leur plan.
Tandis que la maçonnerie a une structure non-isotrope, son comportement sous chargement bi-axial et le mode de rupture sont influencés par la direction de charges et les valeurs de chargements appliqués.

II.I COMPORTEMENT EN COMPRESSION DE LA MAÇONNERIE

La plupart des normes conseillent la détermination de la résistance à la compression à partir d'essais sur prismes simples en maçonnerie, composés de 3, 4 ou 5 éléments, soumis à la compression uniaxiale. En général, l'expérience [Page, 1978] a montré que la résistance du prisme est supérieure à celle du mortier et inférieure à celle de la pièce de maçonnerie isolée (figure 2.1). Plusieurs mécanismes de rupture ont été observés : l'écrasement des pièces de maçonnerie, la fissuration verticale due à des contraintes transversales et la rupture soudaine due à l'instabilité des parois internes dans le cas des briques creuses [Lafuente, 1990].

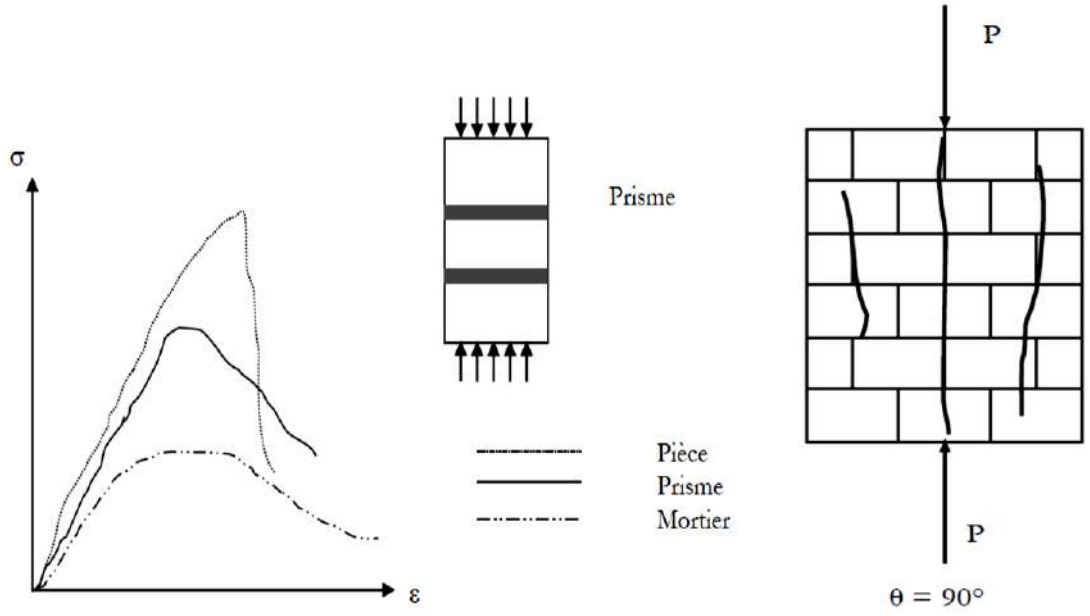


*Figure II.*1 Comportement de prismes en compression

Le mortier, en général est plus flexible que les éléments de maçonnerie, essaie de s'échapper du joint sous la charge verticale, tandis que la pièce, plus rigide, s'oppose à ce mouvement. De ce fait, le mortier est placé dans un état de compression bi axiale et la pièce reste soumise à des contraintes de traction transversales qui diminuent la résistance du prisme. Meli [cité par Lafuente, 1990] a appelé cet effet, étudié aussi en détail par Hilsdorf [cité par Lafuente, 1990] « l'effet joint ».

La résistance en compression de la maçonnerie est influencée par les propriétés mécaniques de la pierre et du mortier, ainsi que par la proportion de joint et l'âge de la structure. L'EN 96 considère que les facteurs qui influencent la résistance en compression sont; le nombre de couches de mortier, la résistance en compression du mortier, la résistance à la traction de la pierre, et la dimension du prisme de la maçonnerie testée [4].

Le comportement en compression de la maçonnerie est étudié avec Zucchini et al. 2006 [10] dans un modèle d'homogénéisation simplifié de comportements de mortier et de blocs.

Zucchini et al considèrent que le comportement de la maçonnerie comprimée dépend essentiellement de la résistance en compression et de traction de blocs. D'ailleurs, pour un mortier de faible résistance, la pierre est soumise, au niveau de joints, à une traction bi-axial qui accompagne la compression verticale de la pierre. En revanche, si le mortier est beaucoup plus résistant et rigide, la pierre est soumise à un état de compression triaxial.

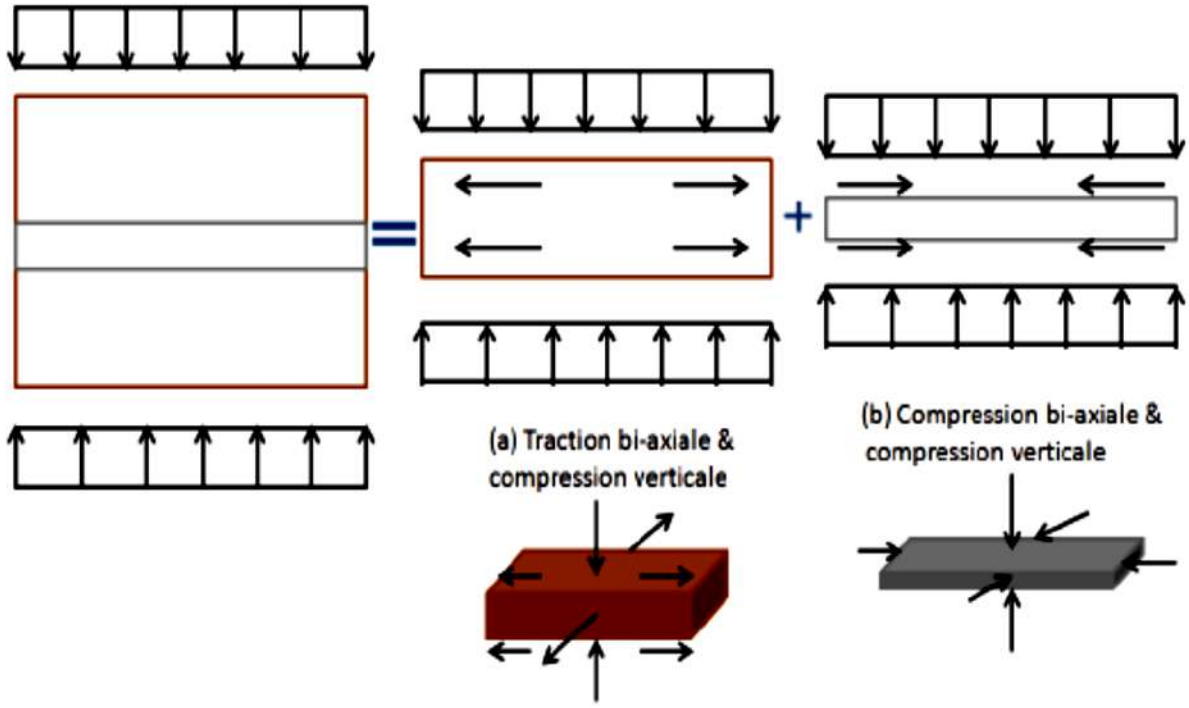


Figure II.2 Etat de contrainte dans une éprouvette prismatique de la maçonnerie, (a) dans les pierres(b) dans le mortier.

II.II RESISTANCES AUX CHARGES LATERALES :

Les charges latérales, telles que celles provenant des séismes et du vent, sont supportées dans les structures en maçonnerie, par des murs. Ceux-ci ont un comportement diffèrent, selon qu'il s'agit de murs isoles ou des murs ossatures en béton-arme, les murs ossatures présentent un comportement plus ductile que les murs isoles, mais ils présentent un réseau de fissuration similaire (figure II.3) :

✓ Rupture par glissement

Ce mode de rupture est causé par l'alternance de l'action sismique où des fissures horizontales apparaissent au niveau du mortier horizontal. Ainsi, des plans de glissements se forment le long de ces fissures. Ce mode de rupture peut se produire pour les niveaux de charge verticale faible ou pour de faibles coefficients de friction. (Figure II.3.a)

✓ Rupture par basculement

Ce mode de rupture est base sur la résistance en compression du coin comprime. Le basculement se produit lorsque la charge ou le déplacement horizontal augmentent, le joint se rompe en traction, et l'effort tranchant est conduit par la maçonnerie en compression. (Figure II.3.b)

✓ Rupture par cisaillement

Ce mode de rupture est causé par la formation et le développement des fissures diagonales. Ces fissures peuvent suivre le joint (forme d'escalier) ou se former à travers les blocs. Le chemin dépend de la résistance relative du mortier par rapport à celle de la brique. (Figure II.3.c)

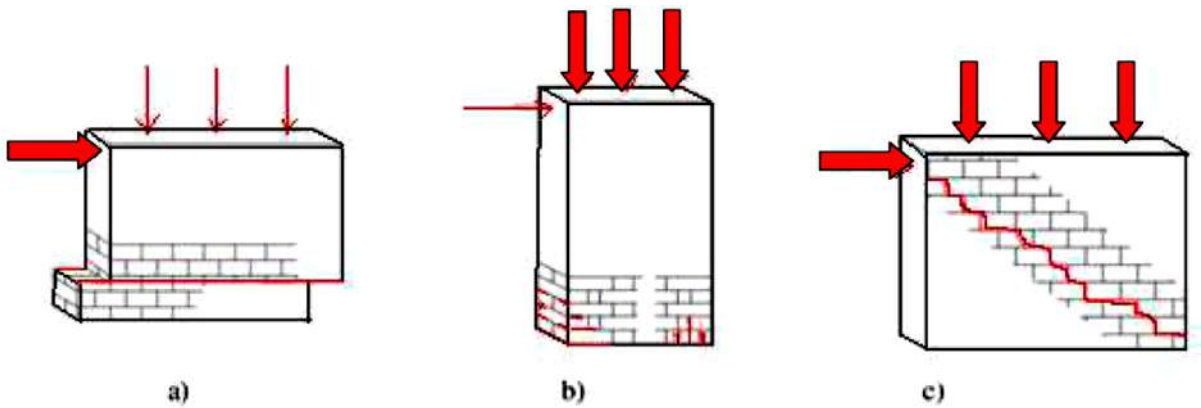


Figure II.3 Comportement des murs remplis de maçonnerie

GHANEM, 2013) ;a) rupture par glissement ;b) rupture par basculement ;c) rupture par cisaillement

II.III RESISTANCE A LA FLEXION (hors plan)

Si un mur est appuyé horizontalement sur sa barre supérieure et inferieur, sa résistance latérale dépend de la résistance à la traction de flexion développée à travers le joint.

Lorsque le mur est appuyé verticalement sur ces deux extrémités (gauche et droite) sa résistance latérale dépend aussi de la résistance à la traction de flexion développée le long de la direction perpendiculaire au lit de joint Cette résistance est généralement trois fois plus grande que celle à travers les joints si l'adhésion (mortier-brique) est bonne.

Aussi, la résistance à la flexion parallèle au lit du joint est conditionnée par la résistance à la traction de flexion des briques, si l'adhésion est mauvaise, cette résistance est conditionnée principalement par la résistance au cisaillement développe dans le joint à l'interface brique-mortier

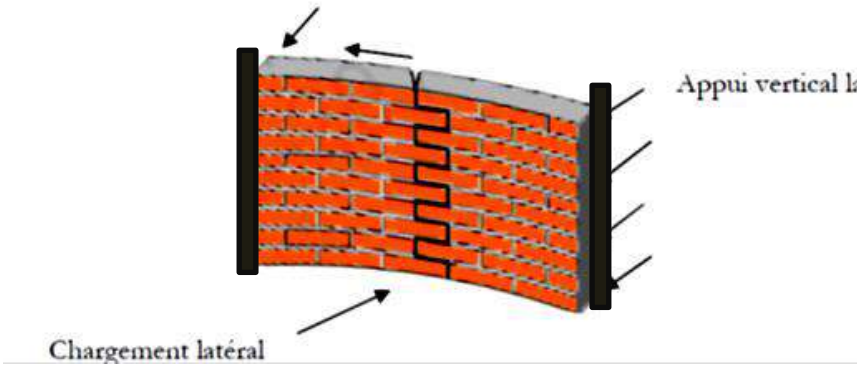


Figure II.4. Rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits (CHERRABI.A, 1990)

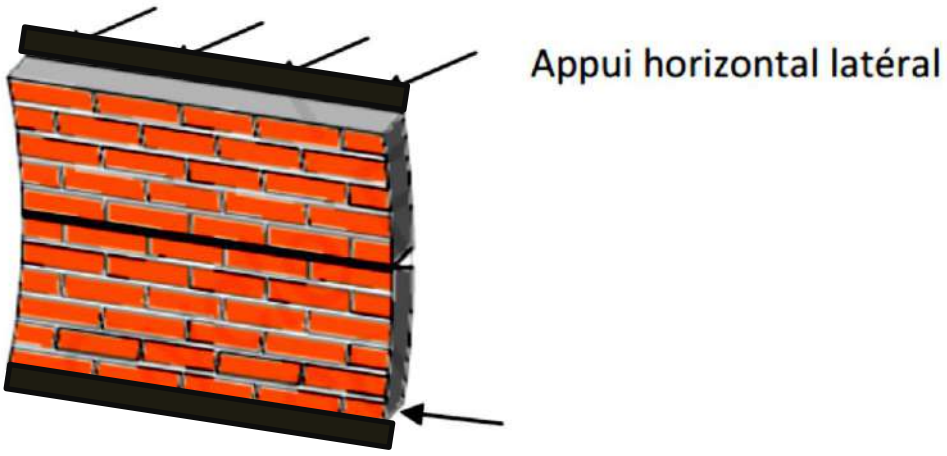


Figure II.5. Rupture le long de la ligne parallèle aux lits des joints(CHERRABI.A, 1990)

II.IV RESISTANCE DES MURS A LA TRACTION

La maçonnerie constitue avec des mortiers traditionnels à une résistance très limitée face aux efforts de traction pure. La résistance a la traction est habituellement prise égale résistance peut être sensiblement améliorée par l'ajout d'adjuvants tels que les polymères ou le latex. Des panneaux de maçonnerie d'un étage ont été fabriques et pourraient être soulevés et transportes sans rupture.

La résistance a la traction horizontale est très rarement mesurée et aucun essai standard n'est disponible d'où l'absence totale de données significatives. L'essai le plus familier étant c travers de la brique (ASTM C952 indiquent que la résistance a la traction directe se situe entre un tiers et deux flexion.

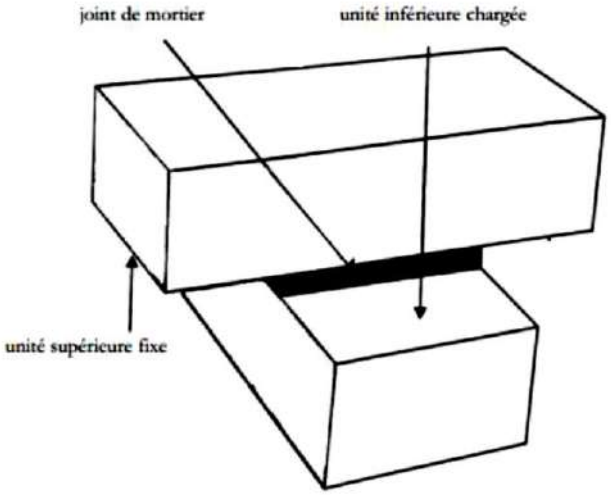


Figure II.6. Résistance à la traction (ASTM, 1072)

II.V COMPORTEMENT VIS-A-VIS DE LA CHARGE CONCENTREE

Si la majorité des efforts appliques au droit d'un mur sont uniformes et amenés par le poids de la structure au-dessus, les charges concentrées, sont dues aux impacts d'extrémités de poutre, de linteaux ou arcs, etc.
Une maçonnerie peut résister a un chargement concentre si celle-ci est correctement positionnée et suit une répartition à 45° similaire à celle montrée en figure 2.24

Page et Hendry (Page et col, 1987) ont étudié expérimentalement et analytiquement le comportement de la maçonnerie sous une charge concentrée. Cette étude a prouvé que les facteurs suivants augmentent la contrainte dans la région soumise à une charge concentrée :

- le rapport de la section chargée a 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 limitee a 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 inferieure a (b +1,2 h), ou b est la longueur de l'extrémité chargée du secteur et h est la taille du mur. Ceci est base sur le concept que la diffusion de la charge sera contenue dans une ligne de 45° à partir du bord du secteur charge et que l'effort de compression vertical sera relativement uniforme a 0,6 de la taille de mur à partir du haut.

Appliquant cette définition de longueur utile à un mur de 2,5 m de hauteur portant une poutre de 150mm dont la largeur signifierait que la longueur du mur a considérer, cas du chargement central, serait de 3,15 m, donnant un rapport de la section chargée de 0,048.

La discussion ci-dessus s'applique seulement a la maçonnerie construite avec les unités de maçonnerie pleines. Kirtschig et Kasten (KIRTICHING.K, et al. 1979) ont trouvé qu'il n'y a aucune augmentation de contrainte pour les charges concentrées appliquées a l'extrémité d'un mur construit avec des blocs de maçonnerie perfores. 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 verticale.

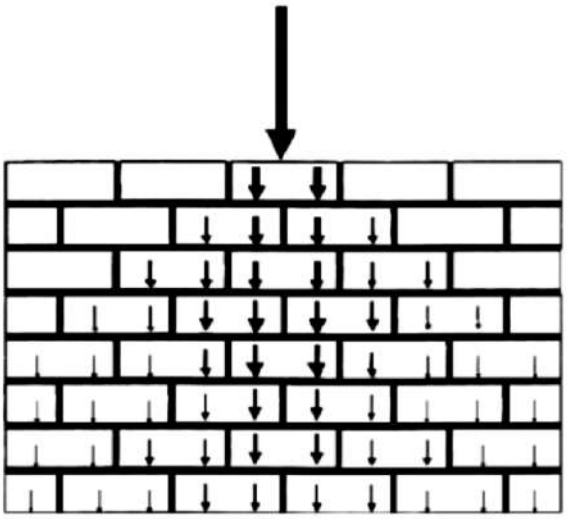


Figure II.7. Propagation de la charge concentrée d'un mur (ASTME519-02, 2002)

II.VI CARACTERISATION DE L'INTERFACE

Les comportements de cisaillement de la maçonnerie peuvent être étudiés par deux types d'essais (essai de cisaillement directe ou indirecte)

1- **Essais de cisaillement indirect : (EN 1052-3)**

Dans Cet Essai l'état de contrainte de cisaillement est obtenue par une application d'une compression simultanée avec une traction le long des diagonales ce qui engendre une rupture par la fissuration le long de la diagonale comprimée.

Généralement, il est réalisé sur des couplets ou de triplet ou de quadruple de briques [15]. Cet essai nous donne les caractéristiques mécaniques du mortier liant de briques.

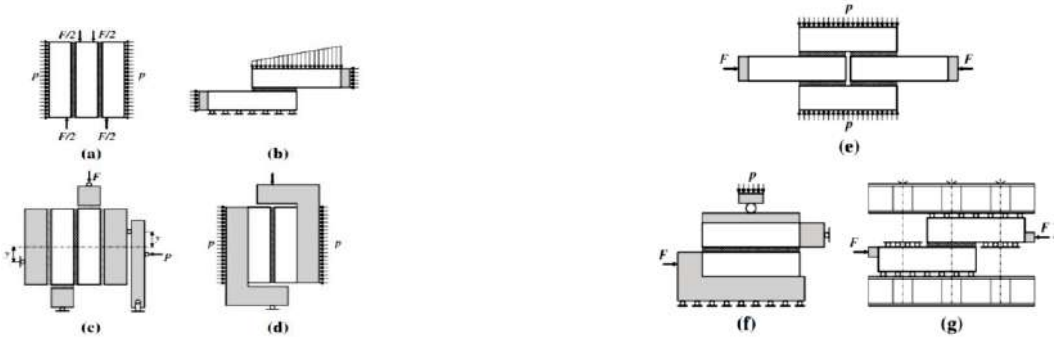


Figure II.8 Cisaillement de la maçonnerie en petit échelle différents arrangement ***[15]***

MIHA (MIHA, 2008) a fait un test sur le comportement du cisaillement, de 3 blocs de briques en terre cuite ont été jointoyé avec un mortier courant ,puis il a placé deux plaques métalliques sous les deux blocs externes et une plaque sur la brique du milieu sépares de 2 petites barres de (ϕ12) ensuite la force a été exercé, comme on peut le voir sur la figure 1.30. Pendant l'essai, il faut veiller à ce que des contraintes de cisaillement pur se développent dans les plans de raccordement entre les blocs et le mortier. Les résultats de f_{vk0}sont présentes dans le tableau 1.4.

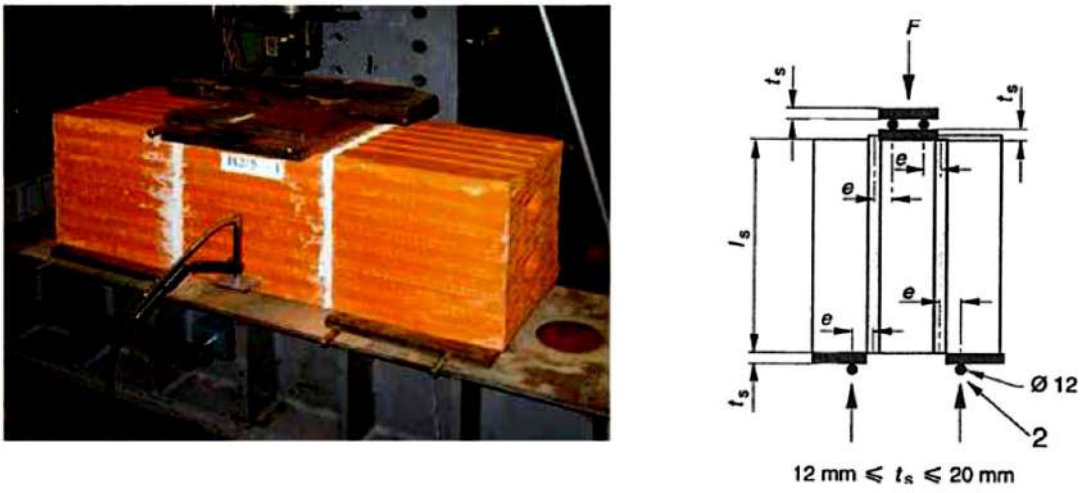


Figure II.9. Test de résistance du cisaillement initiale selon l'ASTM EN 1502-3 (MIHA, 2008)

Tableau 2.1 : Les valeurs caractéristiques f_{vk0}suivant l'eurocode 6 et les valeurs trouvent

Expérimentalement par MIHA TOMAZEVIC (MIHA, 2008).

Unité	charge de compression (KN)	Résistance au cisaillement (Mpa)			
		5MPa		10MPa	
B1	20,7	0,17	0,23	0,19	0,27
B2	13	0,19	0,26	0,21	0,26
B3	14,6	0,16	0,2	0,16	0,2
B4	12,2	0,26	0,31	0,22	0,38
B5	11,5	0,5	0,6	0,55	0,66
B6	30,3	0,28	0,34	0,28	0,33

2- Essais de cisaillement direct (ASTM E 519-02, 2012).

L'essai est développé pour déterminer la résistance au cisaillement des assemblages de maçonnerie. Cet essai peut être réalisé par deux modes de chargement :

Mode 1 : le mur est soumis à une compression verticale et à une force latérale (figure II.10.a). La rupture se produit lorsque la contrainte de traction principale, au centre de poutre, est égale à la résistance à la traction de la maçonnerie. Néanmoins, l'état bi-axial n'est pas facile à mettre en place.

Mode 2 : afin de remédier au problème de mis en place, on peut appliquer une charge de verticale le long de la diagonale, ce qui produit des contraintes équivalentes a une compression bi axiale et un état de contrainte de cisaillement le long des joints (Figure II.10.b.) Cet essai est définit par l'ASTM E 519-02, 2012) [18].



(a) (b)

Figure II.10. Les modes de chargement [21], [22].

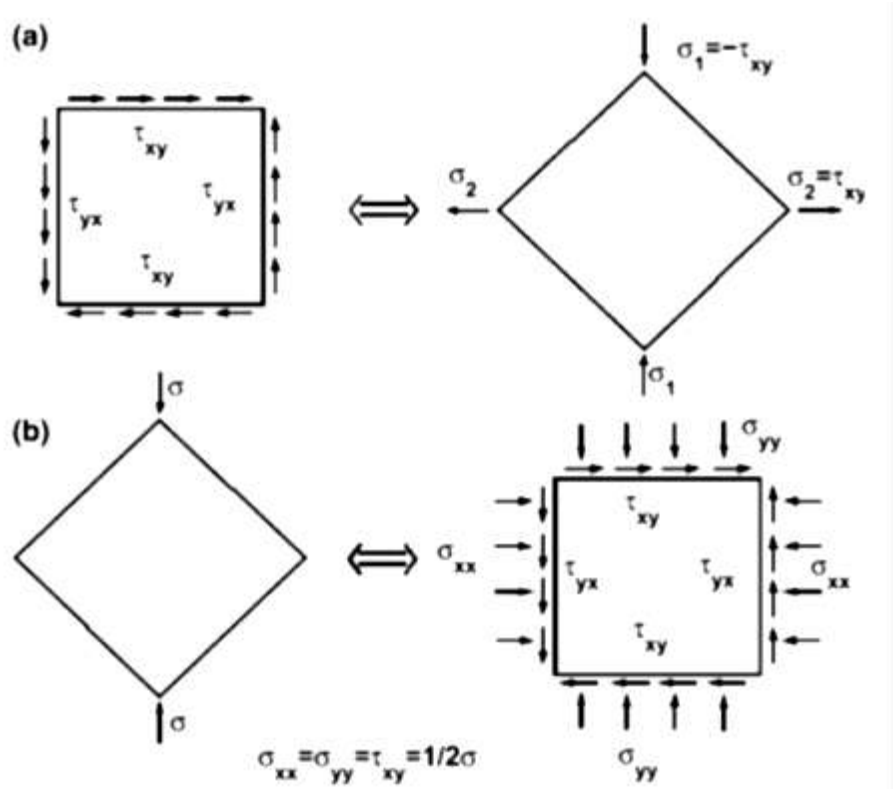
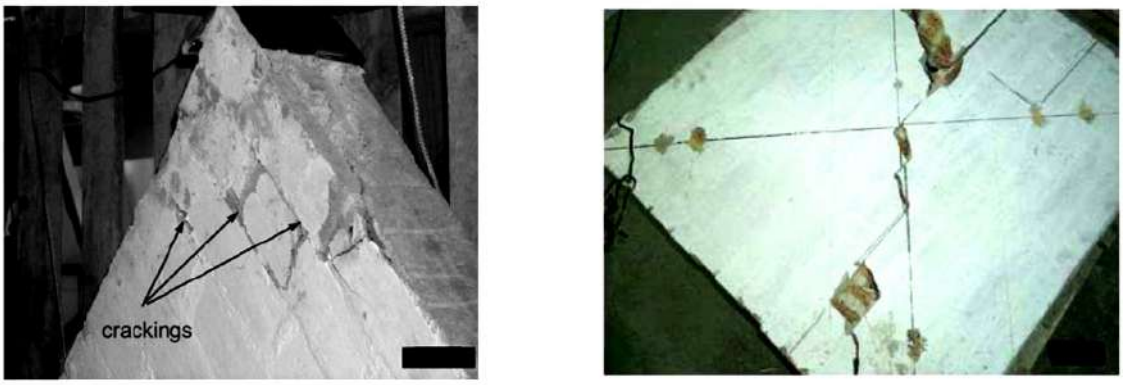


Figure II.11. Dispositif de l'essai (Gabor, 2006)

(a) Panneau carre homogène soumis à la contrainte de cisaillement pur.
(b) L'état de stress génère dans un panneau carre soumis à la compression diagonale.

Gabor et al (Gabor, 2006) ont fait une étude afin de mettre en place la distribution de la contrainte de cisaillement dans un panneau en briques de terre cuite et comment elle peut être générée expérimentalement (voir figure 1.12).

Pour le premier cas Gabor et al ont obtenu une rupture localisée, marque avec un glissement et écrasement au niveau des appuis (Figure II .12a), pour le second panneau ils ont remarqué un ne rupture générale du mur (Figure II.12b).La rupture a été très soudaine sans apparition des fissures sur la surface du mur.
Néanmoins, l'analyse du panneau après rupture révèle que des fissures se propagent le long de la diagonale comprimée et qu'elles étaient présentes dans les joints de mortier et dans les briques.



(a) : Fissuration de la première paroi *(b)*: Fissuration de la deuxième paroi
Figure II.12 : Résultat des essais

II.VII ESTIMATION DE LA RESISTANCE DE CISAILLEMENT PAR LES DIFFERENTS CODES

- **CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT SUIVANT LA NORME ASTM E 519 - 02**

Le calcul de la contrainte de cisaillement τ_{dt} est fait selon l'ASTM 519 – 02.en considérant un état de contrainte isotrope dans le centre du mur

$$\tau_{dt} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}\times A} = 0.707\frac{p_{max}}{A} \qquad (2.1)$$

La surface latérale A est soumise à une charge maximale $Pmax$. La surface A est calculée avec l'Équation I.13 en considérant w, la largeur, h la hauteur et t l'épaisseur du mur.

$$A = \frac{w+h}{2}\times t \qquad (2.2)$$

✓ *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 $\varepsilon_c$et en traction$|\varepsilon_t|$.

$$\gamma = \varepsilon_c + |\varepsilon_t| \qquad (2.3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L_c}{L_c} \quad \text{Et} \quad \varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L_t} \qquad (2.4)$$

Lc, Lt représentent les longueurs des diagonales comprimées et allongées, etΔLc, ΔLt sont les variations des longueurs de ces diagonales respectivement. La ductilité en déformation de cisaillement est défini comme le rapport entre la déformation ultime γu et celle élastiqueγe.

La déformation élastique γe est définie à 70% de la contrainte maximale de ruptureτ_u. La déformation maximale γu est définie à 80% de la contrainte maximaleτ_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 IV.5.*

$$G = \frac{\Delta\tau_e}{\Delta\gamma e} \qquad (2.5)$$

$\Delta\tau_e$ et $\Delta\gamma$e Représentent la contrainte et la déformation élastique, respectivement

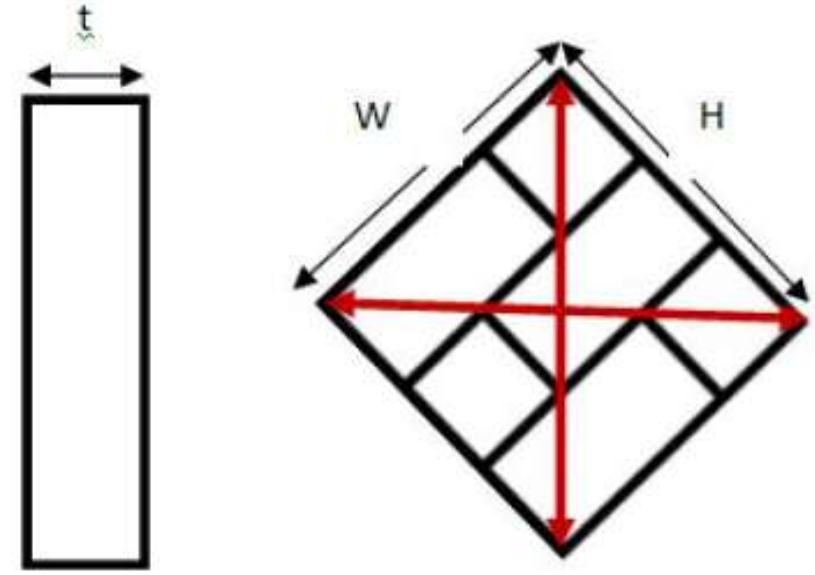


*Figure II.*13 Caractéristiques géométriques des murets

- **CALCUL DU CISAILLEMENT SELON EUROCODE 6 ET CNERIB**

Résistance caractéristique au cisaillement de la maçonnerie non arme

La résistance au cisaillement f_{vk} selon L'EUROCOCE 6 ou τ_0 selon le CNERIB doit être déterminée par des essais sur la maçonnerie conformément a L'EN 1052-3(norme européenne) ou peut être établie à partir d'une évaluation de résultats d'essais fondée sur la relation entre la résistance caractéristique au cisaillement de la maçonnerie non arme, la résistance au cisaillement de la maçonnerie a l'origine f_{vk0} qui être déterminée à partir des EN 1052-3 et 1052-4 ou obtenue à partir du tableau 2.1 pour les mortiers d'usage courant, et la contrainte de compression appliquée.

Lorsque les résultats d'essais ne sont pas disponibles soit pour un projet, il est possible d'estimer la résistance caractéristique au cisaillement de la maçonnerie non armef_{vk}utilisant des mortiers d'usage courant avec des joints de façon qu'ils soient remplis ne soit pas inférieur à la plus faible des valeurs indiquées ci-dessous :

$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_d$ (EUROCODE 6) (2.6)

$\tau_n = Min(\tau_0 + 0.4\ \sigma_g\ \tau_{lim})$ (CNERIB) (2.7)

Ou = 0.065 f_b mais pas inferieur af_{vk0}
Ou = la valeur limite donnée au tableau 2.1 $0.065\ f_b \leqslant f_{vk} \leqslant f_{vk0}$
f_{vk0} : Résistance au cisaillement sous une contrainte de compression nulle déterminée a partir des EN 1052-3 et 1052 -4 ou pour les mortiers d'usage courant ne contenant ni adjuvants ni ajouts Extraite du tableau 2.2.
σ_d:Resistance de compression de calcul perpendiculaire au cisaillement dans la partie d'ouvrage au niveau considère.
f_b: Resistance en compression normalisee des elements de la maconnerie.

Lorsqu'on ne dispose pas de résultats d'essais soit pour un projet spécifique soit dans un cadre national on peut estimer que la résistance au cisaillement caractéristique d'une maçonnerie dont les joints d'about ne sont pas remplis mais dont les faces adjacentes des éléments sont places au contact, ne devrait pas être inferieures a la plus faible des valeurs ci-dessous (EN1052-3, 2006) :

$$f_{vk} = 0.5\, f_{vk0} + 0.4\sigma_d \qquad (2.8)$$

Pour les maçonneries montées a joints interrompus à partir d'éléments hourdées avec deux bandes égales de mortier d'usage courant d'au moins 30 mm de large chacune sur les bords externes des faces de pose d'éléments, on peut estimer que la résistance au cisaillement caractéristique ne sera pas inferieure a la plus faible des valeurs ci-dessous

$$f_{vk} = \frac{g}{t}\, f_{vk0} + 0.4\sigma_d$$

Ou = 0.05 f_b mais pas inferieure a f_{vk0}.
Ou = 0.7 fois la valeur limite donnée au tableau 2.3.
Ou f_{vk0}, σ_d, f_b sont tels que definis auparavant.
Ou g : Largeur totale des deux bandes de mortier.
t : Epaisseur du mur

Tableau 2.3 valeur de la résistance initiale au cisaillement f_{vk0} (EN 1996-1-1, 2006)

Élément de maçonnerie	***fvko*(MPa)**		
	Mortier d'usage courant	**Mortier de joints minces 0.5≤ t ≤3 mm**	**Mortier allégé**
Terre cuite	0,3	0,3	0,15
	0,2		
	0,1		
Silico-calcaire	0,3	0,4	
	0,15		
	0,1		
Béton de granulat	0,2	0,3	
Béton cellulaire autoclavé	0,15		

-
- **Vérification de la résistance au cisaillement des murs suivant l'Eurocode 6**

En condition d'état-limite ultime, l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$v_{sd} \leq v_{Rd} \qquad \text{.....(2.9)}$$

Ou :
v_{sd}: Effort tranchant de calcul du mur ;
v_{Rd}: Résistance au cisaillement de calcul du mur.

Une autre méthode de calcul simplifiée pour la conception des murs de contreventement des Bâtiments ne comportant pas plus de trois étages.

La résistance de calcul au cisaillement v_{sd} peut être déterminée comme suit :

Si tous les joints verticaux de la maçonnerie sont remplis de mortier :

$$V_{RD} = \frac{1}{\delta_M}(t \times l_c \times f_{vk0} + 0.4\, N_{sd}) \qquad (2.10)$$

V_{RD} Devant être compris entre

$$\frac{1}{\delta_M} \times t \times l_c \times f_{vk0} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\delta_M} \times t \times l_c \times 0.065 f_b \qquad (2.11)$$

Si les joints verticaux de la maçonnerie ne sont pas remplis de mortier :

$$V_{RD} = \frac{1}{\delta_M}(0.5\, t \times l_c \times f_{vk0} + 0.4\, N_{sd}) \qquad (2.12)$$

V_{RD} Devant être compris entre

$$\frac{1}{\delta_M} \times t \times l_c \times f_{vk0} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\delta_M} \times t \times l_c \times 0.045 f_b \qquad (2.13)$$

Ou :
l_c: Longueur de la partie comprimée du mur, en supposant une répartition linéaire de la Contrainte,
t: Epaisseur de la paroi intérieure du mur,
N_{sd}: Charge verticale de calcul,
δ_M: Coefficient partiel de sécurité du matériau.

- **Calcul de la contrainte de cisaillement lors des forces latérales (CNERIB)**

La contrainte de cisaillement est donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{Q.S_m}{I_m.d} \qquad (2.14)$$

Q : Effort tranchant dans le mur exprime en MN ,
S_m : Moment statique de la section transversale du mur exprimée en m3
I_m : Moment d'inertie de la section transversale exprime en m4
d : Epaisseur du mur exprime en m.
S_m et I_m sont a determines pour la partie comprimee de la section transversale du mur en cas de fissuration de celui-ci.

II.VIII CONCLUSION :

L'analyse bibliographique nous a permet de constater que le comportement des maçonneries est en fonction de types de chargement des conditions d'appui et des propriétés des briques et des joint de mortier.

CHAPITRE III :ETAT DE L'ART DU RENFORCEMENT ET DE LA REHABILITATION DES MAÇONNERIES

INTODUCTION

La rupture dans un élément de structure provoque un problème de transmission de charges, ce qui influence la rigidité de la structure. Le renforcement des structures doit trouver une solution aux problèmes de structure. L'intervention dans une structure a l'objectif d'augmenter la résistance d'un élément structurel endommagé et d'assurer sa stabilité et sa rigidité.

Dans la littérature, les études de renforcement de la maçonnerie, traitent ce sujet expérimentalement. Les études expérimentales visent à tracer l'effet de l'application de techniques de renforcement en variant les matériaux de renfort et leur quantité, ainsi que les zones renforcés.

Ce chapitre représente quelques techniques de renforcement de la maçonnerie .

Dans le renforcement traditionnel de structure de maçonnerie, des matériaux et des techniques traditionnels ont était souvent utilisées pour renforcer la structure existante. La structure de maçonnerie contient des éléments qui aident à redistribuer les charges dans les zones de concentration de contraintes dans les murs.

Par exemple, les ouvertures sont renforcées avec des chaînages verticaux qui sont reliées avec un arc de décharge. L'arc de décharge permet de distribuer les charges verticales vers les côtés de l'ouverture. Les ouvertures sont aussi renforcées avec des éléments tels que le linteau (composé d'un seul morceau de pierre) et la plate-bande (qui se compose de plusieurs morceaux de pierre).

Le linteau peut être accompagné par un arc de décharge pour limiter les charges sur le linteau. L'utilisation du linteau ou de plate-bande nécessite d'avoir des sommiers très résistants sur les côtés.

Si le mur est épais, une baie de fenêtre ou de portes s'effectue en faisant des portions de voûtes appelées les arrières voussures (*Figure III.1.)* Les arrières voussures sont de forme d'arc et leur intersection avec la face arrière du mur prend la forme d'un arc ou d'une droite.

Les ouvertures ont été bouchées dans les murs traditionnels pour les renforcer dans le cas d'une faiblesse dans l'arc de décharge.



Figure III.1: Renforcement des ouvertures par (a) arc de décharge
(b) arrières voussures plate-bande

De plus, l'intersection entre deux murs s'établie avec un chaînage d'angle qui assure la rigidité de la connexion. Le chaînage d'angle subit des forces de tractions qui viennent des murs connectés et il travaille comme un tirant. Dans le cas d'un manque de stabilité dans la maçonnerie, le renforcement se fait en construisant des sous structures tel que les contreforts. L'objectif de construire un contrefort est de diminuer la déformation latérale de la structure. Les contreforts prennent la forme d'escalier de contrefort, arc de contrefort, ou mur de contrefort.

D'une autre côté, l'utilisation des tirants dans les murs vise à relier deux murs opposés subissant un écartement. Cette technique est utilisée dans les zones de tremblement de terre ou d'effondrement de sol. A l'extrémité de chaque tirant, il existe des pièces métalliques appelées ancres ou clef, elles représentent les appuis des tirants.

Le bois était utilisé dans le renforcement des murs pour réduire le déplacement latéral et les déformations hors plan. Des planchers en bois ont été fixés sur la surface du mur dans la direction des diagonales. Le bois a été aussi utilisé pour renforcer les planchers par des poutres.

III.1. CONSOLIDATION A BASE DES BRIQUES

III.1.1 Utilisation des briques-liaison ou des moellons-liaison

Elle consiste à placer des briques-liaison ou des moellons-liaison, qui seront communs aux deux murs (Fig.III.2), Ces liaisons seront effectuées environ tous les 70 cm avec des pièces de même texture, caractéristiques mécaniques et caractéristiques physico-chimiques composition densité et capillarité [24]. Scellée au mortier époxydique, la fissure ou le vide sera remplie de mortier injecté, défini en fonction du vide à remplir et de la nature minéralogique des matériaux utilisés (mortier de blocage et de rejointoiement) avec une pression appropriée pour ne pas accroitre les désordres de la structure [25]



Figure III.2: Renforcement par des briques, liaison commune aux deux murs

III.1.2 Utilisation des 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 voûtes, 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. (Fig.III.3),



Figure III.3: Renforcement par des des Contreforts

III.1.3 Utilisation des potelets en béton armé

Pour la répartion des fissures inclinees transversales ,l'injection seule, ne suffit plus et la realisation de potelets en beton arme s'impose ,disposés plus ou moins à équidistance afin d'assurer et de restituer sa rigidité aux murs. le procédé consistera à dégager des briques ou des moellons sur une largeur de 15 à 20 cm le long d'un tracé vertical sur une profondeur de 10 à 15 cm en prenant soin d'assurer un chainage horizontal en haut et en bas alternativement. La cheminée ainsi crée sera remplie de béton armé. Dans le cas de difficulté dans la réalisation des potelets, on préconisera des chainages de part et d'autre de la maçonnerie à des distantes équidistantes [34]

III.2. CONSOLIDATION A BASE D'ACIER .

III.2.1 Les tiges metalliques

Le procédé consiste à placer une tige métallique réglable avec un système de boulonnage à l'extérieur qui traverse l'édifice et « retient » l'écartement du mur extérieur. Le scellement du tirant se fera par boulonnage sur une plaque métallique prenant une forme allant du simple au plus complexe (Fig.III.4) ; Ce dernier est déposé de façon à ne pas perturber la circulation et le bon usage des différentes pièces du bâtiment, on veillera à le placer près des planchers bas ou hauts. Utilisée pour l'ancrage des façades ou encore pour unir des murs aux planchers ou à d'autres murs, très efficace dans l'amélioration entre les éléments du bâti. Néanmoins, la pose de ces derniers ancrés dans le mur lorsqu'ils traversent des locaux habités par clef visibles en façades est souvent le Siège de condensation abondante qui les oxyde à leur sortie de l'enduit extérieur, le témoin en est la marque d'une auréole d'oxyde de fer. Pour cela avant leur pose il faudra les traiter par le biais de produit hydrofuge et les gainer.



Figure III.4: Différents types d'ancres de façade

III.2.2 Utilisation des fers plats pour liaisonner les murs

Cette méthode consiste à réaliser des liaisons avec des fers plats. Ces fers plats avec une tête plate assez large (une brique et demi environ formant un T) seront encastrés en liaison dans les deux murs de façon à ce que la tige plate (plat métallique) scelle les deux parties de la fissure environ de 30 cm de paf et d'autre de cette dernière (Fig. III.5).

Le nombre et la distance d'ancrage sera définie en fonction de l'état et du type d'éléments constituants les parements des murs, mais cette distance varie en moyenne de 50 à 70 cm La fissure sera ensuite réparée en procédant à la pose de treillis métallique galvanisé réaliser sur environ 1 m de par et d'autre de la fissure[26] , solidarisé entre eux au mur[27]par des tiges de liaison (50 à 60 cm), sur chaque face, scellés et recouverts d'un enduit [28] , (mortier et grillage armé).

Ces interventions sont basées sur l'analyse des traits constructifs propres aux constructions anciennes

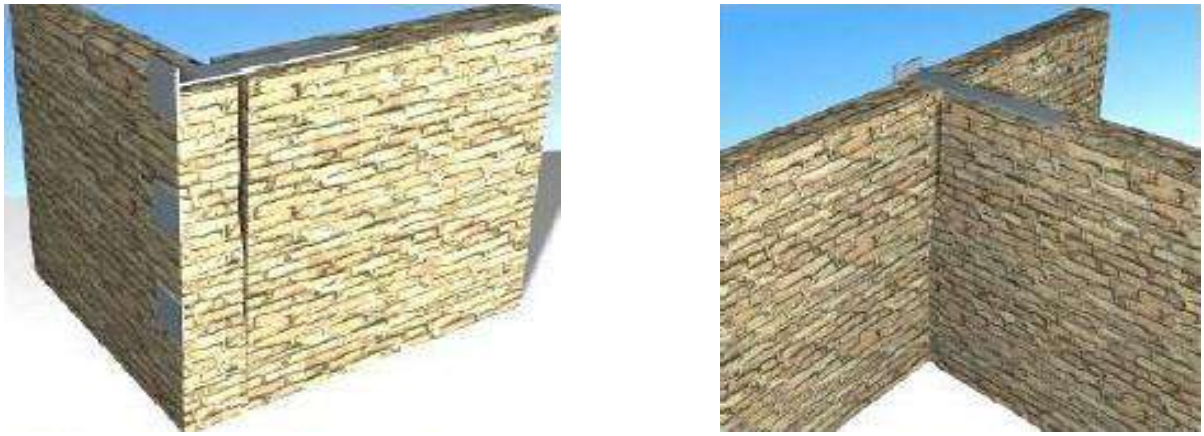


Figure III.5: Renforcement des deux murs par des fers plat en T

III.2.3 Renforcement par couture d'agrafe de solidarisation

Le Principe consiste à reconstituer la solidarité longitudinale du mur afin de lui restituer sa résistance et retrouve sa continuité. La technique réparatrice efficace dans le cas de fissures passives à I 'intérieur ou à I 'extérieur du parement [28] dans les joints verticaux du mur après décroutage refouillage et nettoyage de ces derniers, placés tous les 25cm en raison de 10 à 20 épingles [28] (Fig. III.6).

Par niveau, la réussite de cette opération consiste à suivre les étapes suivantes:

A. Affouiller à cœur les joints verticaux susceptibles de recevoir les épingles en débarrassant les parements de part et d'autre du coup de sabre des traces de mortier sur 70 cm, de poussières et de salissures ;



Figure III.6: renforcement des deux murs par couture d'agrafe de solidarisation

B. Choisir les joints verticaux d'ancrage opposés dans l'une et l'autre maçonnerie à une distance de 2, 3, ou 4 pierres du coup de sabre, environ à 30 cm de l'axe du coup de sabre et procéder au percement [28]
C. Placer les épingles au rythme d'une par assise et tenant compte d'un décalage dans leur ancrage d'au moins une pierre par rangée horizontale ;
D. Dégarnir les joints des pierres chevauchées par les épingles sur une largeur dépassant d'environ 30 cm les ancrages des épingles,
E. Scellement de l'épingle ancrée de façon à ce que le corps des épingles se trouve de 1 à 2 cm du parement en question (enrobage des aciers) avec un mortier sans retrait (ex de type clavex) [28]
F. La partie préparée du mur ainsi que les épingles (auparavant protégées) sont fouettées après avoir préalablement mouillé le parement avec un enduit (au mortier de chaux riche en liant hydraulique ou plâtre)

Le renforcement par des épingles (Fig 3.6) pourrai se limiter au (1/3 de la hauteur d'étage) à chaque niveau de plancher; le coup de sabre au niveau du rez de chaussé ne sera pas renforcer, afin d'éviter la condensation des remontées des eaux phréatiques sur l'enduit et les épingles, ce dernier sera rebouché par un mortier de gâché au sable tamisé [29].

La reprise des fissures pourra s'effectuer également par des éléments rigides et résistants tels des agrafes métalliques (Fig. III.6) qui viendront remplacer la partie lézardée afin d'éviter les techniques de reconstruction de ce dernier. Ou encore par un procédé qui consiste en un système de plusieurs baffes d'acier inoxydable, une sorte de chaussette (qui épouse la forme la section Interne du mur) et une injection, à la différence du système d'ancrage des épingles. Les baffes d'acier sont introduites dans les « chaussettes on insère les deux éléments dans le mur et ensuite on entame l'injection du mortier d'ancrage avec une pression n'excédant pas les 2 bars, jusqu'à ce que le produit sorte du trou[30], Ceci pour résoudre le problème d'ancrage longitudinal puis viennent les ancrages de consolidation afin de coudre les deux éléments du mur [31].

Cependant si les briques et les moellons sont endommagés le long de cette fissure, la méthode réparatrice consiste à dégager les briques et les moellons sur une largeur de 15 à 20 cm de part et d'autre de la fissure et de les remplacer en utilisant d'autres pièces de même (gram, couleur, caractéristiques mécaniques pour le renforcement de la structure, et caractéristiques physico -chimiques composition, densité et capillarité, lors des réparations de parement [32].

Ces opérations seront effectuées en humidifiant les maçonneries par injection d'eau. Procéder aussi au remplissage du cœur de maçonneries désorganisées en mortier de chaux afin d'en assurer une meilleure cohésion [32]. Des baffes d'aciers enrobées en U seront ancrées dans le parement intérieur afin d'en assurer la liaison dans les deux directions [32]

III.2.4 **Renforcement par barres, câbles ou grillage métallique**

Le renforcement de la maçonnerie dans les joints s'effectue avec des techniques et des matériaux différents ; barres, câbles ou grillage métallique Valluzzi et al. 2005 [37], Borri et al, 2011, [38].

L'application du renforcement dans les joints permet d'endommager dans une moindre mesure la surface de la structure et de protéger le renfort des conditions environnementales.

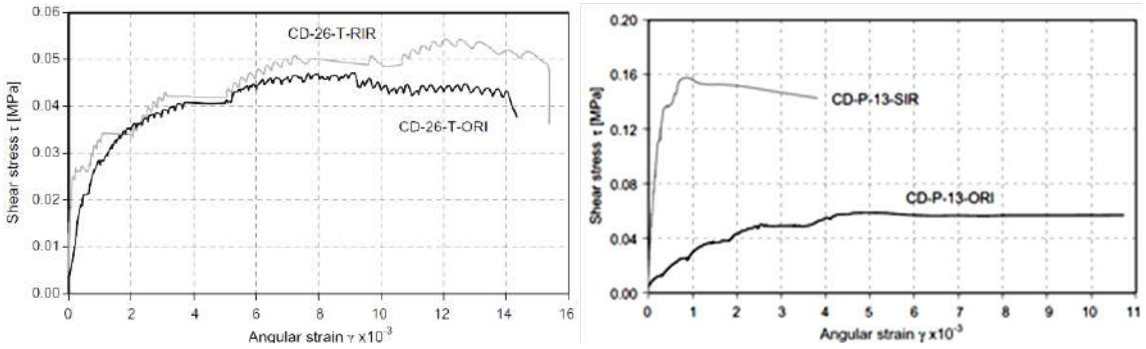
De plus, le renfort est confiné dans les joints, ce qui augmente l'adhésion entre l'élément-renfort et améliore l'efficacité du renforcement.

Le remplacement du mortier de surface dans le joint, nécessite d'enlever une épaisseur de 2-6 cm de l'ancien mortier. Ensuite, il est nécessaire de nettoyer et humidifier la surface traitée.

Enfin, il faut injecter le nouveau mortier. Le mortier de chaux hydraulique est favorisé pour les structures anciennes [39]. Corradi et al, 2008 [39] ont testés en compression diagonale des murs de maçonnerie ayant des joints irréguliers.

Le remplacement du mortier a augmenté la rigidité élastique, mais n'a pas augmenté significativement la résistance au cisaillement (*Figure III.7.a)*.

Alors que, l'application de cette technique accompagnée avec des barres traversant la section du mur a donné une augmentation de la rigidité et de la résistance au cisaillement [39] (*Figure III.7.b)*.

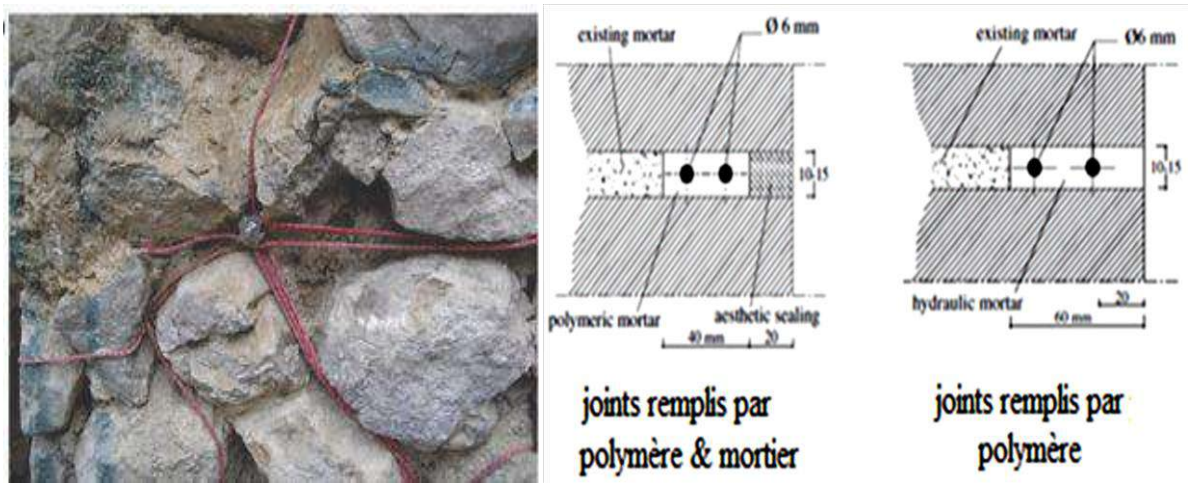


(a) augmentation de la rigidité

(b) Augmentation de la résistance Au cisaillement et de la rigidité

Figure III.7:Comportement de cisaillement des murs renforcés avec remplacement de 2 à6 cm de mortier des joints : (a) sans utilisation des barres transversales (b) avec utilisation des barres transversales ***[39]***

Le renforcement des murs composés de plusieurs couches dans l'épaisseur se réalise par l'injection d'un matériau remplissant à partir de la couche intérieure. Cette technique utilisée par Oliviera et al 2004 [40] peut être accompagnée d'un renforcement par des barres traversant la section. Ce renforcement vise à réduire le



(a) Technique de « Reticolatus» *(b) Détails de la section de joint*

Figure III.8: Renforcement des joints de mortier de la maçonnerie (a) avec cordes d'UHMWPE ***[38]*** *b) avec barres d'acier* ***[37]***

III.3. CONSOLIDATION A BASE CHIMIQUE:

III.3.1 Reparation par colmatage des fissures passives :

La technique réparatrice efficace dans le cas de fissures passives (causes de leurs apparitions prises en charges ou stabilisées) consistera à un simple rebouchage de ces dernières avec un mortier à prise lente chaux aérienne et sable tamisé ou présentant les même caractéristiques que celui qui existe dans le mur[34] . (Figure III.9).

Lorsque la fissure est plus profonde on procède à I 'injection de coulis de ciment liquide sous basse pression de l'ordre de 1 ,5 kg évitant les fuites et cela en appliquant un mortier de chaux ou plâtre afin de reboucher provisoirement les fissures superficielles et les parties dégarnies.

Ces opérations seront effectuées en prenant le soin d'humidifier les maçonneries. Procédé aussi préconisé dans le remplissage du cœur de maçonneries désorganisées en mortier de chaux afin d'en assurer une meilleure cohésion .

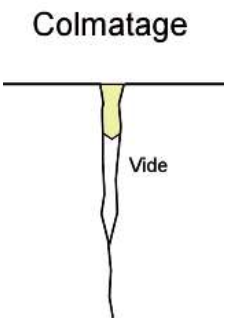


Figure III.9: Reparation par colmatage des fissures passives

III.3.2 Reparation des fissures par injection

Opération qui consiste à insérer dans les fissures un produit plus ou moins liquide, sous faible pression d'injection de 0.05 à 0.3 KG/cm^2 [33] permettant de créer une liaison mécanique et / ou une étanchéité entre les parties disjointes des parements du mur; de façon à colmater le vide entre les lèvres de la fissure; en durcissant ce liquide adhèrera au support en restituant à l'élément endommagé sa continuité d'origine. (Figure III.10).

Les caractéristiques du produit sont à base de composants époxydiques mais le critère de choix est tributaire des éléments suivants

- Géométrie des fissures (largeur, profondeur, tracé.) ;
- Etat des supports ;
- Présence d'eau (humidité) ;
- Contraintes imposé à l'ouvrage ;
- Elle est surtout un facteur en rapport avec-l 'accessibilité à la fissure;-environnement climatique ;-délai de remise en service ;
- Des caractéristiques des produits existant sur le marché.

Les différentes étapes de l'injection sont les suivantes [34] :

A. Les zones concernées par la ou les fissures seront dépoussiérées ou au cas dénudées de l'enduit, les fissures nettoyées au jet d'eau avec un solvant compatible ou à l'air comprimé;
B. Suivant la fissure, percer des trous suivant l'axe de la fissure, distants de 30 à 60 cm ;
C. Sur une profondeur d'environ 5 cm introduire dans les trous, les injecteurs et les sceller avec du mortier ;
D. Colmater les fissures sur toute leur longueur avec du mortier avant injection de façon a supporté la pression du liquide avant son durcissement ;
E. injecter le mortier fluide qui sera défini en fonction du vide à remplir et de la nature minéralogique des matériaux utilisés (mortier blocage et de rejointoiement) avec une pression approprié pour ne pas accroitre les désordres de la structure.

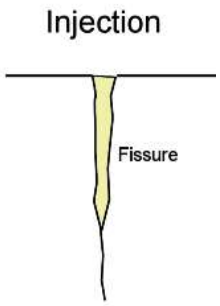


Figure III.10: Reparation des fissures par injection

III.4. CONSOLIDATION PAR MATERIAUX COMPOSITES

L'utilisation des matériaux composites a évolué depuis les années 1960-1970 [42]. Un matériau composite est constitué d'un renfort et d'une matrice. L'efficacité du renforcement par composite est influencé par les propriétés mécaniques de la fibre et de la matrice, la résistance de l'interface fibre-matrice, la quantité de fibre dans le composite et l'orientation des fibres dans le composite.

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages par rapport à l'acier en tant que matériau ductile et non-corrosif. Ils possèdent une bonne résistance spécifique σ_t/ρ et elle dispose d'une grande facilité d'application. Cependant, les inconvénients de l'utilisation de matériaux composites viennent de leur faible résistance au feu et le fluage [43].

III.4.1 FIBRE POLYMERE RENFORCE (FRP)

- **Définition**

Les FRP « fiber reinforced polymer » représentent de fibres à haute résistance imprégnés par une matrice polymérique (époxy, polyester, …). Les fibres de FRP utilisées dans le renforcement en génie civil sont des fibres en carbone (CFRP), verre (GFRP), et aramide (AFRP).

Le FRP utilisé pour le renforcement des structures se trouve sous forme de tissus, de composite en lamelle ou en barre. L'application de tissus de FRP s'effectue par collage sur la surface extérieure .

Les tissus sont secs ou pré-imprégnées par une matrice polymérique. Alors que les lamelles sont des plaques rigides préfabriquées qui s'installent par collage avec une résine chargée époxy [45].

Les lamelles offrent la possibilité de s'appliquer par collage sur la surface extérieure EB « externally bonded » ou dans l'élément par la technique NSM [44]. Les barres de FRP s'appliquent dans les éléments par encrage dans la pierre ou par la technique NSM [44] qui seront utilisés dans cette étude.

La (*Figure III.11)* représente un mur renforcé par collage de tissus de CFRP sur la surface extérieur [44]. Les barres de FRP peuvent avoir une surface sablée, déformée ou lisse. La rugosité de la surface des barres influence le comportement d'adhésion entre la barre et l'adhésive. La (*Figure III.11)* représente quelques formes de barres et de lamelles de FRP.

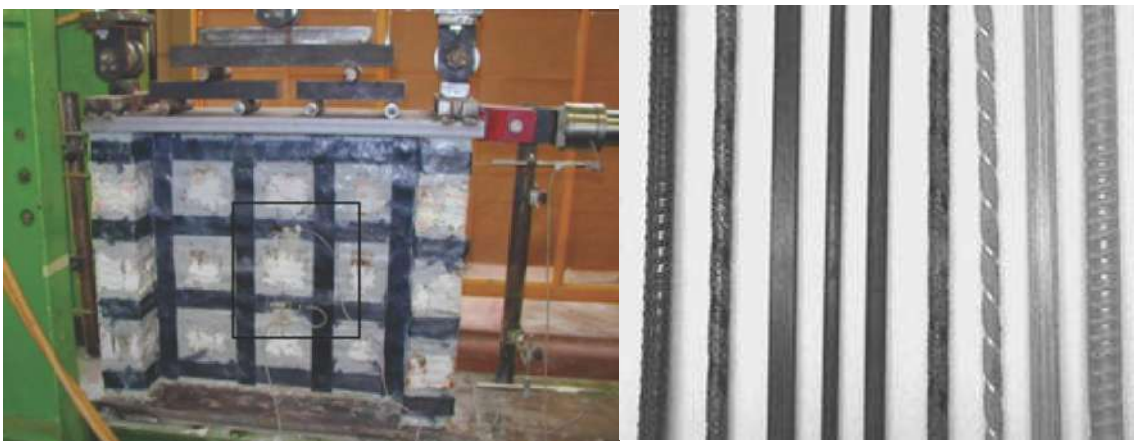


Figure III.11.a: Renforcement avec bandes de CFRP : Essai de comportement de cisaillement cyclique du mur renforcé ***[45].***

Figure III.8.b: Formes de quelques barres, et de lamelles de FRP utilisées dans le renforcement NSM ***[44].***

La résistance des fibres et de la résine, le taux de volume de fibre et de résine dans le FRP, l'orientation des fibres sont des paramètres qui influencent la propriété de barres de FRP. Les propriétés de FRP sont classées selon la nature de fibres et comparées avec les comportements de l'acier dans le Tableau III.1. Les valeurs du Tableau III.1 sont présentées dans le travail de Fukuyama, 1999 et Secondin, 2003 [46].

Tableau III.1 : Comportement d'acier et de FRP classé selon la nature des fibres, [46]

	Acier	Fibre			
		Aramide	Carbone	Glass	GC-Hybrid
Volume de fibre axiale (%)	-	43-69	43-66	40-68	40
Diamètre (mm)	-	3.0-21.8	3.0-40.0	2.4-19.4	7.1-23.8
Densité (g/cm³)	7.8	1.2-1.5	1.3-1.6	1.5-2.0	1.7
Résistance à la traction (MPa)	483-690	1300-1830	780-1800	590-1130	530
Module de Young (GPa)	200	42-78	73-210	30-49	37
Déformation élastique (%)	0.14-0.25	N/A	N/A	N/A	N/A
Déformation ultimes (%)	0.6-0.12	0.5-1.7	1.2-3.1	1.9-4.4	1.4

Le choix de la matrice polymère doit offrir la possibilité que le FRP ait une déformation maximale aussi importante que la déformation ultime des fibres [46]. Le Tableau III.2 représente des valeurs moyennes qui caractérisent des résines époxy

utilisées dans les structures de génie civil et présentées dans le travail de Nguyen, 2008[47]

*Tableau III.2: Caractéristiques mécaniques moyennes des résines époxy **[47]***

Propriétés	Valeurs moyennes
Résistance à la traction	20 à 90 MPa
Allongement à rupture en traction	1 à 3 %
Module d'élasticité en traction	3 à 10 GPa selon le taux de charges
Résistance en compression	140 à 150 MPa

La technique NSM FRP consiste à insérer des barres de composites (ou des lamelles) dans une rainure effectuée sur la surface de l'élément et de coller le renfort avec la structure en utilisant un adhésif (époxy, polyester, mélange de mortier et époxy …). La position des barres dans la rainure permet au renfort d'être confiné des trois côtés. Par conséquent, le risque de décollement est réduit par rapport au collage de FRP sur une face extérieure. Cette technique de renforcement a été étudiée par plusieurs auteurs pour le renforcement au cisaillement et à la flexion.

Cette technique de renforcement de NSM a été aussi étudiée avec Ismail et al 2011 [48] qui ont testé des murs renforcés avec barres d'acier et sous charges de cisaillement par l'essai en compression diagonale.

- **Exemples de collage de FRP bandes ou tissus**

La capacité d'allongement des fibres de verre est plus importante que celle de fibres de carbone. Alors qu'en termes de résistance et de rigidité, les FRP de fibres de carbone sont plus résistantes à la traction Tableau III.1.

Les résultats expérimentaux obtenus avec Kalali et al, 2012 [49] montrent que le renforcement avec des bandes de GFRP en plusieurs configurations a donné une augmentation de la ductilité des murs de maçonnerie testées en compression diagonale.

L'augmentation de ductilité va de 61.07% à 479.3 % par rapport au mur de référence.

De plus, le collage de FRP sur la surface extérieur du mur s'effectue avec des bandes, ou sur toute la surface du l'élément, Mosallam et al, 2011 [50].

L'influence de la direction des fibres sur le comportement de cisaillement des murs de la maçonnerie avait été étudiée par Santa-Maria, 2004 [51]. Les murs sont soumis à des compressions diagonales et renforcés par des lamelles de CFRP [51]. Les résultats montrent que le renforcement diagonal a plus augmenté la résistance que le renforcement horizontale.

L'augmentation de la résistance apportée avec le renforcement diagonale s'élève à 70% par rapport à la résistance du mur non renforcé. En plus, le

renforcement diagonal a augmenté la rigidité élastique du mur. En revanche, le renforcement horizontal n'a pas d'influence sur la rigidité axiale.

Ainsi, Valluzzi et al [52] ont étudié le renforcement des murs de maçonnerie en variant la direction du renforcement en bandes diagonale et maillage orthogonale. Les fibres utilisées varient de la fibre de carbone, de verre, ou de Polyvinyal-alcohol dont les modules élastiques sont 230, 65, 29 GPa, respectivement. Les résultats montrent que la configuration diagonale est plus efficace que le maillage pour augmenter la résistance au cisaillement.

En plus, le renforcement avec les fibres de FRP les moins rigides a été le plus efficace pour augmenter la résistance ultime et la rigidité des murs.

- **Exemple d'insertion de NSM FRP près de la surface**

Le renforcement des murs de maçonnerie avec une technique de NSM FRP a été étudié par Marshall et al, 2002[53], Tinazzi et al 2000 [54], et Silva et al 2006 [55] pour un chargement monotone dans le plan du mur.

Turco et al 2006 [56] ont étudié des murs de maçonnerie en blocs de béton. Les murs sont renforcés dans les joints horizontaux d'un seul côté par NSM GFRP. Les murs sont soumis à une charge de compression diagonale. Turco et al, 2006 trouvent que malgré le module élastique faible des GFRP, l'utilisation des barres en fibre de verre dans le renforcement de la maçonnerie donne une bonne performance par rapport aux comportements obtenus par le renforcement avec CFRP.

En plus, l'utilisation de barres de section circulaire est plus adaptée pour le renforcement de cisaillement alors que la section rectangulaire des barres est préférée pour le renforcement de flexion.

Le renforcement par NSM FRP est utilisé pour les murs soumis aux chargements de cisaillement cyclique avec Konthesingha et al 2013 [57], et Li et al 2005 [58].

Konthesingha et al 2013 [57] ont étudiée l'application du renforcement NSM CFRP sur des murs demaçonnerie endommagés. Les FRP utilisés sont des lamelles appliquées selon trois schémas différents ; renforcement horizontal d'un seul côté, renforcement horizontal de deux côtés et renforcement horizontal & vertical de deux côtés du mur. Les résultats montrent que la résistance maximale des murs renforcés n'a notamment pas augmentée mais que la capacité à se déformer est améliorée. De plus, le mur renforcé avec la configuration horizontale & verticale a la meilleure performance en résistance, déformation et dissipation de l'énergie.

III.4.2 Matrice cimentaire renforcée par textiles

- **Définition**

La matrice cimentaire et le béton présentent un comportement non ductile à la traction, accompagnée d'une résistance à la traction relativement faible. Le renforcement avec des fibres courtes d'acier a été développé en 1990 [59]. Les fibres d'acier ont été utilisées dans le renforcement du béton. Le taux volumique de fibre utilisé dans le béton est de 1 à 5 %.

Par la suite, les fibres d'acier sont remplacées par des fibres de carbone. L'utilisation de fibre de carbone dans le béton a donné une résistance importante en flexion et a augmenté la durabilité par rapport à celle du béton fibré par fibres d'acier [84].

De plus, le TRC est un composite (matrice-textile) qui représente l'utilisation d'une matrice minérale (cimentaire, céramique) renforcée par textiles techniques (verre, carbone, acier, polypropylène, nylon). La matrice est composée de mortier de granulométrie fine, entre 1- 2 mm.

Le nombre de couches de textile peut aller jusqu'à 6 [60]. Barhum et al, 2012 [61] étudient le comportement mécanique en traction des plaques à matrice cimentaire renforcées par textile et fibres courtes de verre.

L'utilisation de la fibre courte dans la matrice de TRC a augmenté la résistance à la traction de TRC avec un nombre de micro fissures plus élevé par rapport au TRC sans fibre courte dans la matrice. Silva et al, 2011 [62] ont étudiés l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement de traction de TRC de fibre de verre bi-axial. Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de déformation de $5S^{-1}$ à $50S^{-1}$ a été accompagnée avec une augmentation de la résistance à la traction de TRC et de l'énergie de rupture, alors que les déformations maximales ont diminuées. En revanche, l'augmentation de la vitesse de chargement de 0.0001 S^{-1}jusqu'à 0.1 S^{-1} a donné une augmentation de la résistance à la traction du TRC, de la déformation maximale, de l'énergie de rupture, et de la résistance de fissuration de la matrice.

- **Renforcement par matériaux composite en utilisant une matrice cimentaire**

L'utilisation de la matrice cimentaire renforcée par textiles a été étudiée pour le renforcement des structures en maçonnerie et en béton sous différents cas de chargement.

Les études de l'utilisation du TRC dans le renforcement du béton armé se présente dans le confinement des colonnes pour résister aux charges de compression [63] et de torsion [65], le renforcement des poutres et des dalles en cisaillement et en flexion, respectivement [64].

Grâce à la rigidité axiale élevée des fibres de carbone par rapport à celle des fibres de verre, les fibres de carbones sont préférées aux fibres de verre-AR pour le confinent des colonnes soumis en compression [63]. En plus, le renforcement de poutre

en cisaillement est étudié sur des poutres de section rectangulaire et T. Les fibres en verre sont orientées à ±45° par rapport de l'axe de poutre. Les résultats montrent que contrairement à la poutre de section rectangulaire U, la forme d'ancrage a une influence sur l'augmentation de la résistance de la poutre de section T. En effet, l'utilisation de 3 ou 4 couches de TRC dans les poutres de section T nécessite un ancrage mécanique car l'ancrage du à l'adhérence n'est plus suffisant [64].

Le renforcement des murs de maçonnerie soumis aux charges de cisaillement cycliques a été étudié par Papanicolaou et al 2011 [66]. Les fibres des textiles sont en ; Carbone, basalte, fibre de verre imprégné de bitume, fibre de polyester imprégné de bitume, Polypropylène. Les fibres sont imprégnées par plusieurs types de matrice ; mortier, mortier fibré, mortier mélangé avec de la résine, et résine époxydique. Papanicolaou et al trouvent que le renforcement par TRC donne une augmentation de (15-30%) de la déformation maximale par rapport à celle du mur non renforcé. En plus, l'utilisation de TRC dans le renforcement produit une capacité de déformation du mur 15-30% plus que la capacité de déformation obtenue avec le renforcement avec FRP. En revanche, le renforcement avec TRC est moins efficace que le renforcement avec FRP pour augmenter la résistance au cisaillement.

Parisi et al, 2013 [67] ont étudié les murs de maçonnerie soumis à la compression diagonale. Les murs sont renforcés par FRP préfabriqué et appliqué sur la surface du mur par une matrice non-organique. Le renforcement est appliqué en trois configurations ; renforcement d'un seul côté avec FRP, renforcement de deux côtés avec FRP, et renforcement d'un seul côté de mur avec FRP accompagné par des barres d'ancrages qui traversent la section.

Le renforcement d'un seul côté du mur donne une augmentation d'un facteur de 1.15 de la résistance au cisaillement par rapport à la résistance du mur non renforcé. En plus ce facteur d'augmentation de la résistance à une valeur de 2.1 dans le cas du renforcement de deux côtés, et 1.34 dans le cas de renforcement d'un seul côté accompagné de l'utilisation de l'ancrage. De plus, l'existence de l'ancrage offre une augmentation de la ductilité plus importante par rapport aux autres configurations de renforcement.

- **Caractérisation de l'adhérence :**

La caractérisation des joints collés est importante à réaliser lors de l'utilisation de matériaux composites dans le renforcement de la structure. La mesure de la distribution de contrainte de cisaillement tout au long des joints collés permet de calculer la longueur effective de collage à l'élément. En effet, la longueur effective de collage représente la longueur de collage minimale demandée pour le développement de la force d'adhésion maximale, Kashyape et al, 2012 [68].

Plusieurs essais permettent de déterminer la résistance de l'adhésion entre le béton et le matériau composite, Nguyen, 2008 [47]. Les essais se distinguent par la forme de l'éprouvette, le chargement et le support.

Les modes de rupture sont définis selon la localisation de la fissure ; rupture cohésive dans l'adhésif, rupture cohésive dans la structure, et rupture adhésive [47]. *(Figure III.12)*

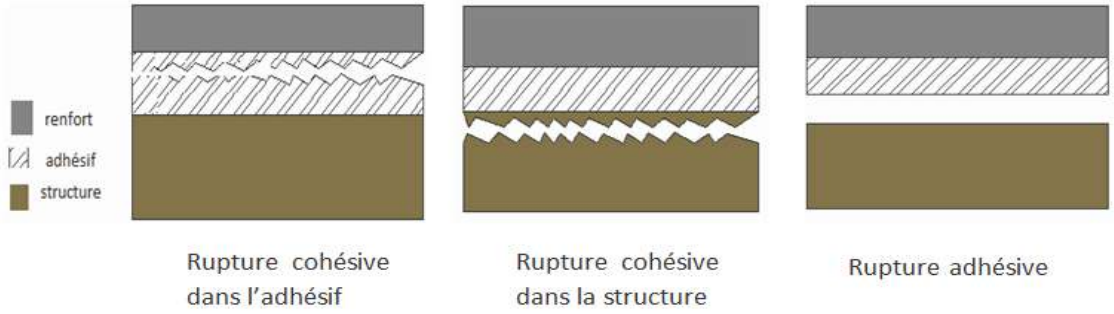


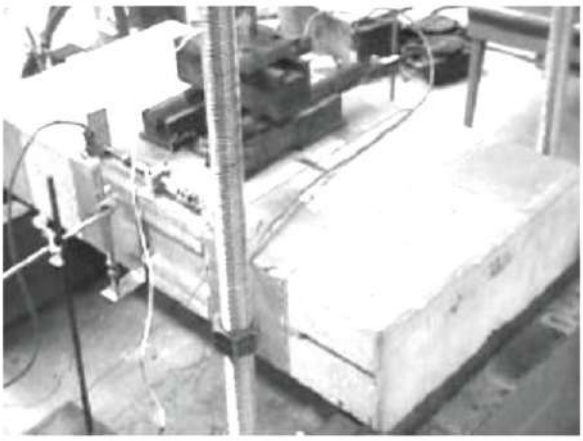
Figure III.12: Modes de rupture du joint collé

Dans la maçonnerie, la résistance d'adhésion entre le composite et la maçonnerie a été étudiée en plusieurs essais dans la littérature :

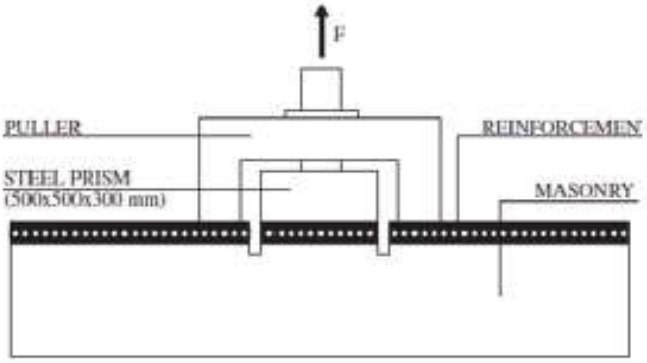
1. Essai de flexion 4 points effectué sur un petit mur de maçonnerie renforcé par NSM FRP, Lorenzis, et al. 2000 [69]. *(Figure III.13a)*
2. Essai de Pull-off qui consiste à appliquer des forces de traction sur la surface du joint collée. En effet, les charges sont directement appliquées sur le renfort qui les transmet à l'adhésif [70]. *(Figure III.13b)*
3. Essai de pull-out qui consiste à appliquer force de traction axiale sur le renfort FRP fixé sur une éprouvette prismatique de maçonnerie, Petersen, 2009 [14], Kashyap et al. 2012 [68]. *(Figure III.13c)*
4. Essai de push-out sur des éprouvettes de maçonnerie composés de trois pierres et renforcés par collage de bandes de FRP sur la surface extérieure. Les charges appliquées sur la maçonnerie tendent à cisailler les joints et le renforcement aussi, Ehsani et al. 1997 [72], Luccioni et al. 2010 [71]. *(Figure III.13d)*
5. Essai de traction directe de la maçonnerie renforcé par TRC sau niveau de la surface. *(Figure III.13e)*

Les forces de traction sont appliquées sur la maçonnerie qui se déplace par rapport au renfort, Carozzi et al. 2014 [73], D'Ambrisi et al. 2013[74].

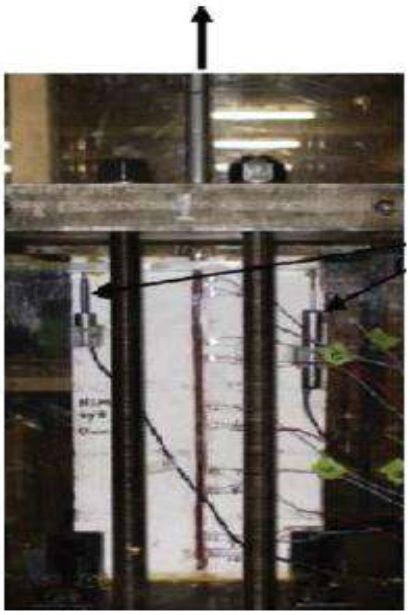
La (Figure III.13) représente quelques essais qui varient en fonction des cas de charges et de matériaux composites testés. Kashyap et al. 2012 [68] considèrent que l'essai de Pull-out donne une résistance d'adhésion moins élevé que celle donnée par l'essai de flexion. Kashyap et al [68] expliquent que l'essai de flexion permet une meilleure distribution des fissures et des moments de flexion le long de l'éprouvette, ce qui permet aux charges d'augmenter avant la rupture finale.



(a) Flexion à 4 points ***[69]***



(b)Pull-off ***[70]***



(c) Pull-out ***[68]***



(d) Triplet test ***[71]***



(e) traction directe ***[73]***

Figure III.13: Essais de la détermination de la résistance d'adhésion entre le renfort et la maçonnerie.

III.5. CONCLUSION :

Les ouvrages historiques de maçonnerie subissent des endommagements du matériau et de la structure. Les méthodologies d'intervention dans les structures nécessitent la caractérisation des comportements mécaniques de la maçonnerie. De plus, les murs en maçonnerie représentent un élément d'une structure important. Les murs de maçonnerie se distinguent par les matériaux de construction ainsi que par la structuration du mur. Ces particularités nécessitent une analyse du comportement mécanique à plusieurs échelles, dont les objectifs seront l'observation des phénomènes se manifestant au niveau des matériaux constituant (pierre, mortier) et de leurs interactions au niveau de l'interface joint de mortier / pierre. Par ailleurs, l'état de sollicitation complexe et multiaxial nécessitera une analyse expérimentale mettant en œuvre différentes essais élémentaires (traction, compression, cisaillement)

Dans cette étude expérimentale, Le comportement en cisaillement des murs en maçonnerie non renforcées sera étudié à l'échelle globale sur des murs composés de plusieurs rangées de brique.

La réalisation des essais sur les murettes a l'objectif de déterminer les modes de ruptures correspondants aux chargements (cisaillement), ainsi que des paramètres globaux de résistance et de rigidité des murs.

Par ailleurs, des solutions de renforcement seront étudiées. Le renforcement de la maçonnerie en utilisant Les matériaux composites.

Les techniques d'application de renforcement choisies sont ; le collage d'un textile de fibre de carbone sur la surface du mur en utilisant Sikadur®-330.

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION :

Ce chapitre présente le comportement en cisaillement des murs en maçonnerie. Les murs composés de six rangées de brique assemblées par mortier, sont étudiés sans et avec renforcement.

Le dimensionnement des structures en maçonnerie nécessite une bonne compréhension du composite brique-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.

Notre étude concerne des murs en maçonnerie avec brique perforée.

Nous avons utilisé une seule type de mortier de jointement (mortier à base de ciment), l'épaisseur du joint de mortier utilisé est de 5 mm

Ce chapitre est divisé en trois parités principales :

1- LES MATERIAUX UTILISE ET LE MODE DE CONSTRUCTION DES MURETS
2- LES MATERIAUX DE RENFORCEMENT ET LEURS APPLICATION SUR LES MURETTES
3- ESSAI DE COMPRESSION DIAGONALE

PARTIE 01 :

IV.1.1 APPROCHE EXPERIMENTALE SUR LES MATERIAUX

La caractérisation de matériaux permet de définir des paramètres mécaniques de la maçonnerie et du renfort. Par exemple, la résistance en compression et de traction de la maçonnerie, le module élastique, la cohésion, le coefficient de frottement, la résistance à la traction du renfort ainsi que la résistance d'adhésion entre la maçonnerie et le renfort.

IV.1.1.1 MATERIAUX UTILISES

Dans notre étude on a utilisé des matériaux locaux fréquemment utilisés dans les chantiers algériens, Pour la construction des murets en maçonnerie on a besoin de préparer les matériaux suivants :

- Brique perforé
- Sable
- Ciment
- Eau

IV.1.1.2 Caractéristiques des matériaux

- **Brique perforée :**

La Brique perforée utilisé a été confectionnée dans une briqueter de setif de forme parallélépipédique rectangle constitué de terre argileuse crue, L'argile est souvent dégraissée par du sable, et comme dimension on a Longueur x Largeur x Hauteur (en mm) 220 x 105 x 55 cm (*Figure IV.1)*

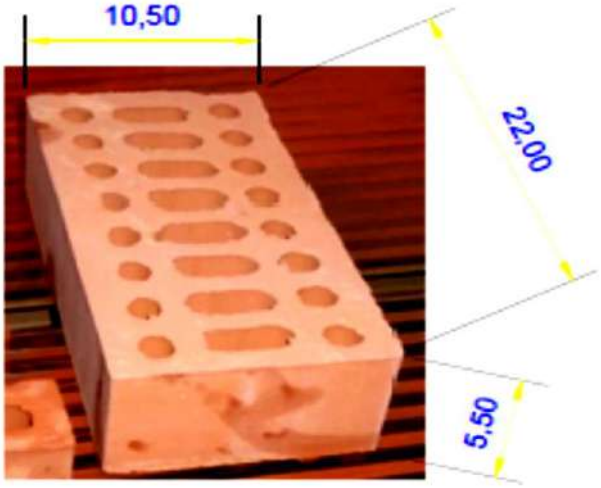


Figure IV.1: les dimensions des briques utilisés dans cette étude

- **Caractéristiques mécaniques de la brique:**

Afin de caractériser la contrainte ultime en compression, les briques sont testées dans les trois directions caractéristiques (voir figure *IV.3*), sans mesure du déplacement ou déformation, uniquement pour caractériser la contrainte à la rupture.



Figure IV.3: briques en compression selon les trois directions.

La résistance en MPA est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_n} \times 10 \qquad \text{(IV.2)}$$

σ_b : Résistance a la compression (MPa).

F_b : Charge maximale de rupture en (KN).

S_n : Section nette moyenne du bloc (mm2).

- ***CARACTERISTIQUES DES SABLES UTILISENT***

Nous avons utilisé deux types de sable :

a- Sable jaune SIDI-DAY YAZID
b- Sable concasse 0/3 MOKOURNO

Pour déterminer les caractéristiques des sables on a fait les essais suivants :

- EQUIVALENT DE SABLE : **Selon la norme NFP 18-598**
- GRANULOMETRIE : **Selon la norme NF P18-560**
- MASSE VOLUMIQUE : **Selon la norme NF P18-554 ; 18-555**
- MODULE DE FINESSE : **Selon la norme NF P 18-101**

➢ ***EQUIVALENT DE SABLE***

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable . Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d' « essai d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, d' « essai d'équivalent de sable »

➢ ***GRANULOMETRIE***

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des tailles d'une collection d'éléments finis de matière naturelle ou fractionnée. L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la collection. La distribution granulométrique est la représentation sous forme de tables, de nombres ou de graphiques, des résultats expérimentaux de l'analyse granulométrique. On associe parfois à l'analyse granulométrique l'analyse de la distribution statistique de la forme des grains, il s'agit de la granulomorphie

➢ ***MASSE VOLUMIQUE***

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

➢ ***MODULE DE FINESSE***

Le module de finesse (Mf) d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés (exprimée en pourcentage) des fraction granulaires obtenues sur les tamis de modules : 23 - 26 - 29 - 32 - 35 - 38 - 41 - 44 - 47 - 50 (respectivement des tamis de la série 0,16 mm - 0,315 mm - 0,63 mm - 1,25 mm - 2,5 mm - 5 mm - 10 mm - 20 mm - 40 mm et 80 mm).

Les résultats des essais au niveau du laboratoire réalisés sur les deux sables sont présentés en détails dans le chapitre V.

- **LE CIMENT :**

Le ciment utilisé est de type *MATINE CPJ – CEM II/B 42,5 R NA 442* est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce 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 eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises 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 silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194.

- **Eau :**

L'eau utilisée dans la composition du mortier est celle du robinet de la commune de « BERROUAGHIA».

- **Mortier**

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et de sable avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Techniquement parlant c'est une colle

Nous avons utilisé un mortier en ciment (1/4)* : c'est le plus utilisé actuellement.
* : (1/4) : 1 volume de ciment dans 4 volumes de sable

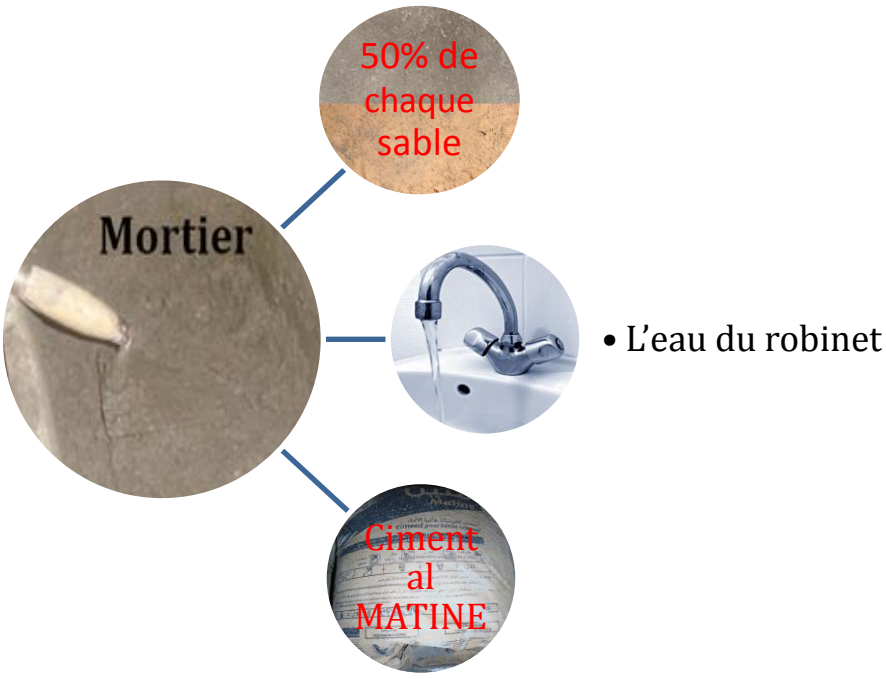


Figure IV.4 les composants de mortiers de ciment

IV.I.I.2.5.I COMPOSITION DES MORTIERS

Nous avons fait des essais sur le mortier utilisé pour le besoin de cette étude ; ceci pour obtenir la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour avoir une bonne ouvrabilité du mortier.

Le tableau suivant (*IV.4*) présente le dosage de liant mélangé dans 1 m3 du mortier.

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

Tableau IV.1: composition de 1m3 du mortier

Nature du mortier	Ciment		Sable	E/C
Mortier (1/4)	350(kg)	1 Volume	4 Volumes	0.95

IV.I.I.2.5.II ESSAI SUR LES MORTIERS (EN 196-1)

L'objectif de cet essai est d'étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Equipement nécessaires pour l'essai :

- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés éprouvettes ≪ 4×4×16 ≫ voir figure (*IV.5*)
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s ± 10N/s.



Figure IV.5: Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier

Conduite de l'essai *:*

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal prépare comme indique (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Apres quoi le moule est arase, recouvert d'une plaque de verre et entrepose dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 C° ± 1 C° jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.2: limites de temps pour réalisés l'essai de compression

Age	24h	48h	72h	7j	28j
Précision	± 15min	± 30min	± 45min	± 2h	± 8h

Résistance à la flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (4.7)

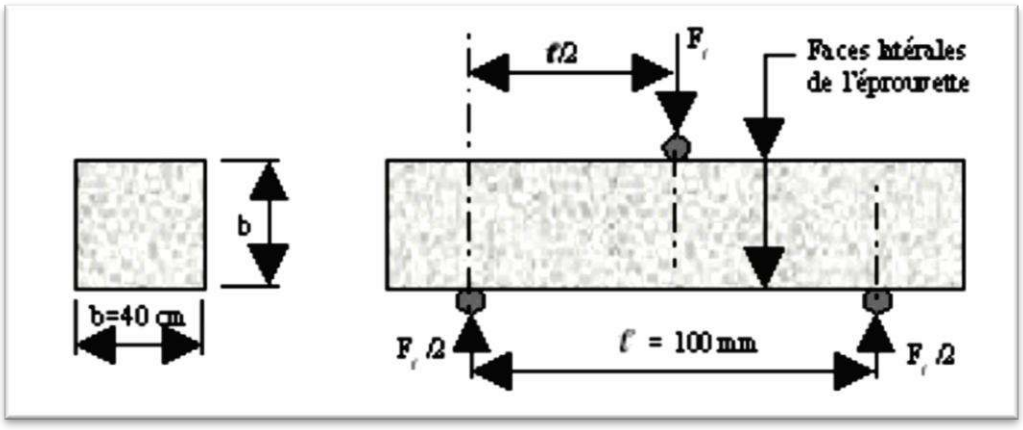


Figure IV.6: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (VENUAT, 1989).

Si Ff est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut Ff l/4 et la contrainte de traction correspondante sur la face inferieure de l'éprouvette est :

$$Rf = \frac{1.5\ Ff.l}{b^3} \qquad (4.1)$$

Cette contrainte est appelé la résistance a la flexion. Compte tenu des dimensions b et l, Si Ff est exprimée en (N), cette résistance sera exprimée en (MPa)

$$Rf = 0.234.\ Nf \qquad (4.2)$$

Résistance à la compression

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en Compression comme indique sur la figure 3.8. Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$Rc = \frac{Fc}{b^2} \qquad (4.3)$$

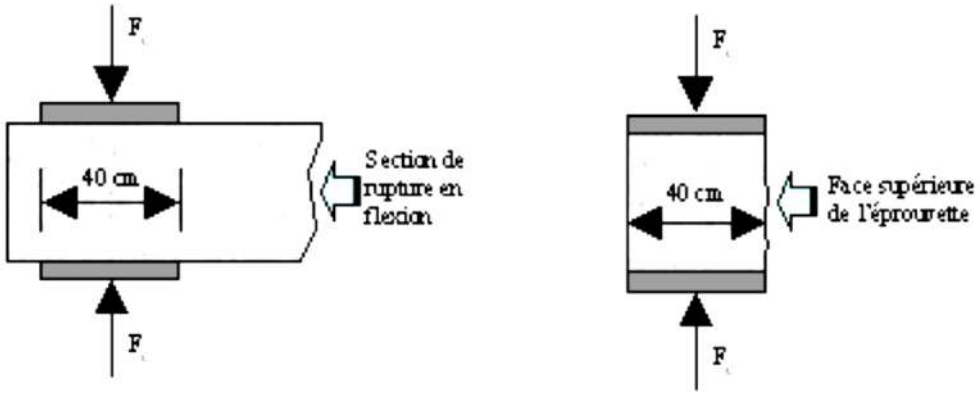


Figure IV.7: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. (Michael, 1989)

IV.1.2 CONSTRUCTION DES MURETS

Notre étude concerne la réalisation de huit panneaux en maçonnerie construits en briques perforés, ces briques sont jointées par un mortier ¼ d'une épaisseur de 5mm, les panneaux fabriques sont soumis à un chargement de compression diagonal, sur des murets renforcés et des murets sans renforcement. *(Figure IV.11)*

IV.I.II.I CARACTERISTIQUES DES MURETS:

Les murets utiliser dans cette étude ont comme dimension « 105x370x360 mm» : ils sont composés par six rangés alternées, les paire des rangés sont construits avec quatre brique (70 x 105 x 54mm) et deux demi brique (35 x x105 x 54mm) aux extrémités. Tandis que, les rangés impaires sont fabriqués avec cinq briques (70 x 105 x 54mm).(Figure IV.8).

Tableau IV.3: caractéristiques des murets

Brique	Mortier	joint horizontal	Joint vertical	Nombre de murs avec renforcement	Nombre de murs sans renforcement	Nombre total des murs
70*55*105	1/ 4	0,5mm	0,5mm	7	1	8

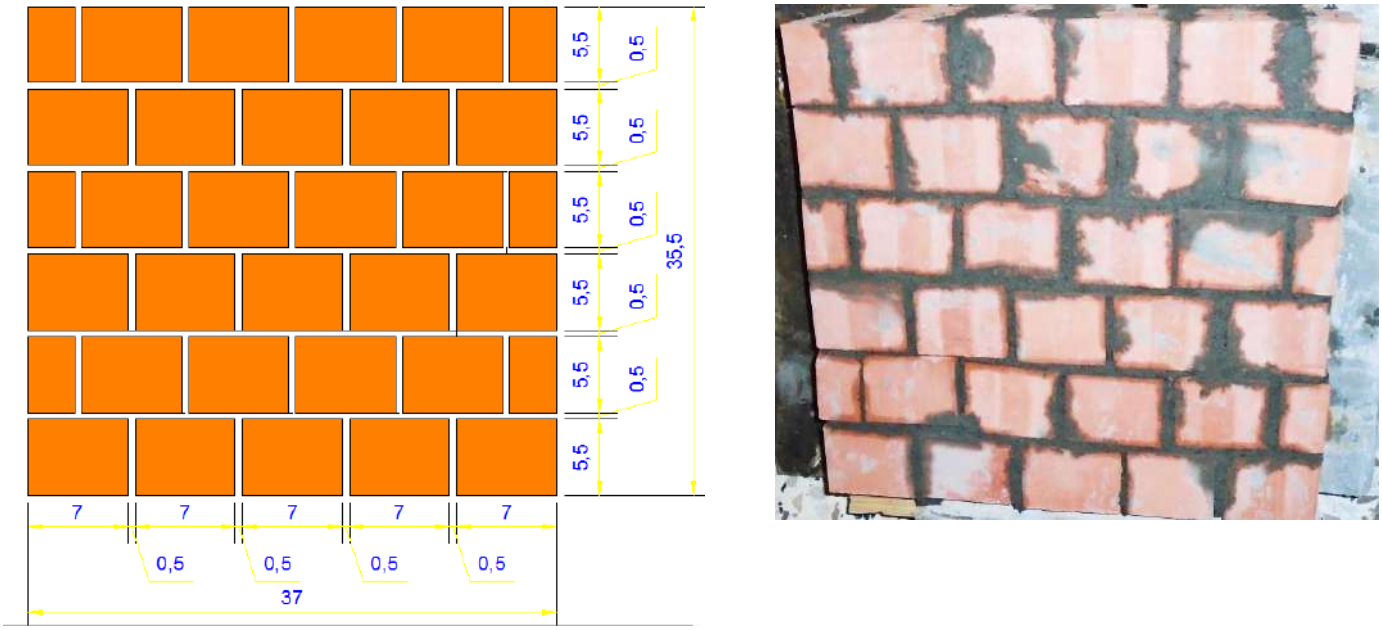


Figure IV.8: Dimensions des murets en brique

IV.I.II.II METHODOLOGIE DE LA CONFECTION DES MURS

Un dispositif a été conçu pour la réalisation des murets afin de respecter la planéité, Les opérations suivantes sont :

- Mouiller les blocs dans tous les côtes afin d'éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie.
- Etaler le mortier suivant l'épaisseur et à l'aide des gabarits fixant la dimension



Figure IV.9: cinquième rangé du mur



Figure IV.10: Les huit muets

Pour notre étude on a divisé chaque brique en trois éléments égaux (figure III.11)





Figure IV.11: division des briques

IV.2.1 MATERIAUX DE RENFORCEMENT

IV.2.1.1 Fibres de carbone SikaWrap

Dans cette étude on a utilisé pour le renforcement des murettes un Tissu de fibres de carbone de type SikaWrap®-230 C, unidirectionnel (Orientation de la fibre 0°), composé de fibres de carbone noires (99% du poids par unité de surface) et de fibres blanches thermoplastiques (1% du poids par unité de surface)

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant IV.4

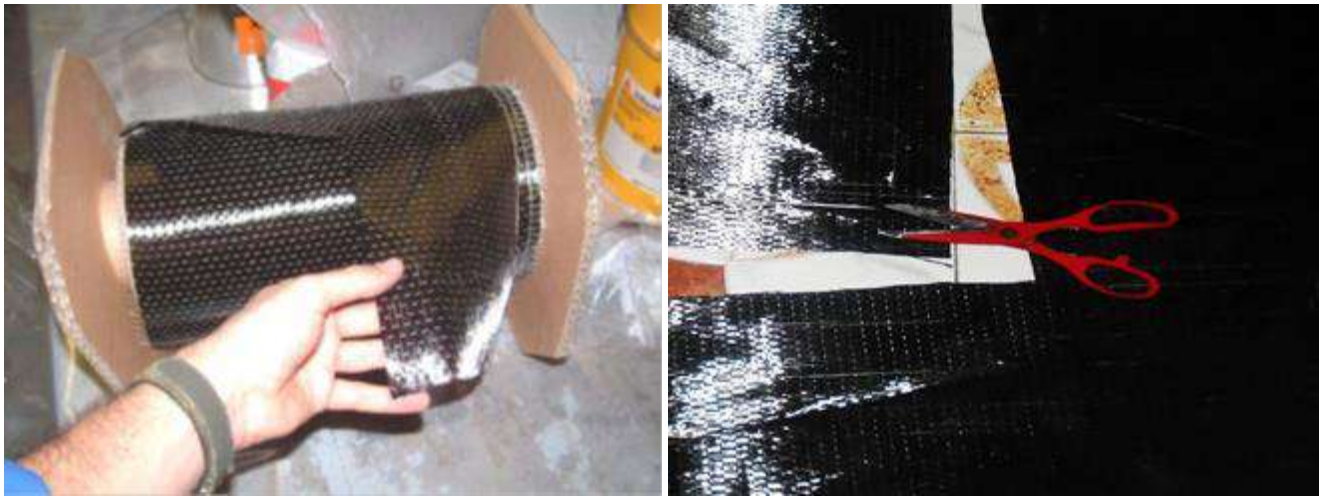


Figure IV.12: Tissu en fibre de carbone

Tableau IV.4: caractéristiques de fibre de carbone

LARGEUR DU TISSU	**300 / 600 mm**
LONGUEUR DU TISSUE/ ROULEAU	≥ 50 m
POIDS	235 g/m² ± 10 g/m²
ÉPAISSEUR DU TISSU	0,129 mm (basé sur la teneur en fibres)
DENSITÉ (FIBRE)	1,82 g/cm³
MODULE D'ELASTICITE VALEUR MINIMALE	230 kN/mm²
RESISTANCE A LA TRACTION VALEUR MINIMALE	4000 N/mm²
ALLONGEMENT A LA RUPTURE	1,70%

IV.2.1.2 Résine d'imprégnation pour le système SikaWrap

Sikadur® 330 est une résine époxyde de collage/d'imprégnation utilisée pour les tissus de renforcement de structures de la gamme SikaWrap cette résine est constitué à deux composants, 100% de matières solides, résistant à l'humidité, à haut module d'élasticité et haute résistance.

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant III.10

Tableau IV.5 : caractéristiques de la Résine

COLORIS	Composant A	Blanc
	Composant B	Gris
	Composant A+B	Gris clair (consistance crémeuse)
CONSERVATION		2 ans dans son emballage
RAPPORT DE MALAXAGE		Par volume 3,68:1 Par poids 4:1
VISCOSITE		Environ 500 cps
RESISTANCE A LA TRACTION ASTM D638		30 N / mm2 (7 jours à + 23 ° C)
MODULE EN TRACTION ASTM D638		4800 N/mm2
ALLONGEMENT A LA RUPTURE		0.9% (7 days at +23°C)



Figure IV.13: Sikadur-330

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Les caractéristiques techniques de TFC SikaWrap et de la Résine d'imprégnation Sikadur ® 330 sont résumées dans les tableaux suivants III.6 et III.7 respectivement

IV.2.2 MODE D'APPLICATION DE LA FIBRE DE CARBONE

IV.2.2.1 PREPARATION DE LA SURFACE

Pour obtenir de meilleurs résultats, le support doit être sec, Débarrassé le support de toutes traces de poussière, corps étrangers, revêtements et matériaux désagrégés ou autres matériaux susceptibles d' empêcher l' adhérence.

IV.2.2.2 COUPER LE TISSU EN FIBRE DE CARBONE

Le tissu se coupe manuellement en utilisant un ciseau pour couper les tapisseries. Les coupes sont faites conformément à la géométrie de renforcement adopté et les caractéristiques d'orientation des fibres.

IV.2.2.3 LE MELANGE DES COMPOSANTS DE LA RESINE EPOXY SIKADUR 330

Pré mélanger chacun des composants. Puis mélanger tout l'ensemble, verser le composant B dans le contenant du composant A. Mélanger entièrement pendant 5 minutes au moyen d'une perceuse électrique à pales réglée à faible vitesse (400 - 600 tr/min) jusqu'à ce que le tout soit homogène.



Figure IV.14 : composants A et B de la résine époxy bi-composants 4: 1

IV.2.3 IMPREGNATION ET APPLICATION DES TISSUS

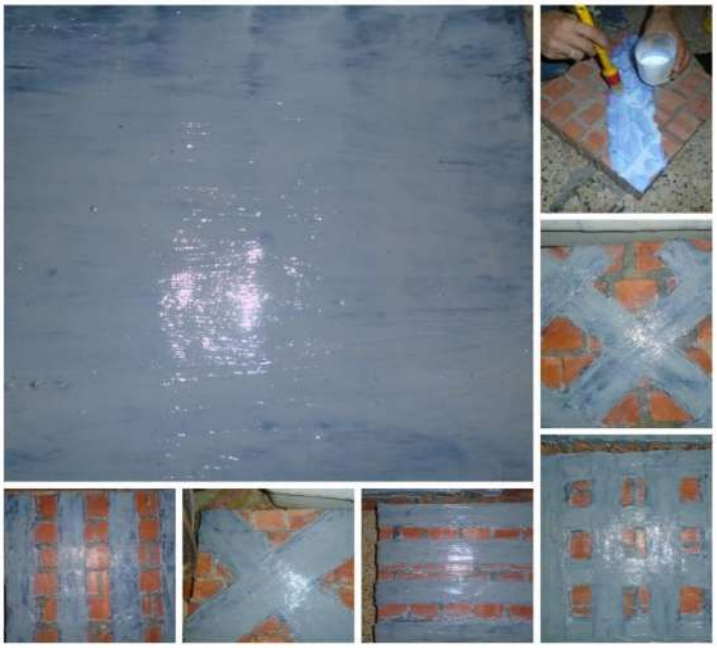


Figure IV.15: Mise en place et l'intégration de tissu de fibres de carbone et de résine époxy de 1: 4

IV.2.4 DIFFERENT DISPOSITIFS DE FIBRE ADOPTE

Sept dispositifs des fibres de carbones type Sika wrap ont été adoptés pour renforcé les murets, avec des bandes de 50 mm et 100 mm de large. Le tissu coupé sur mesure à l'aide d'un ciseau. (Figure IV.16)

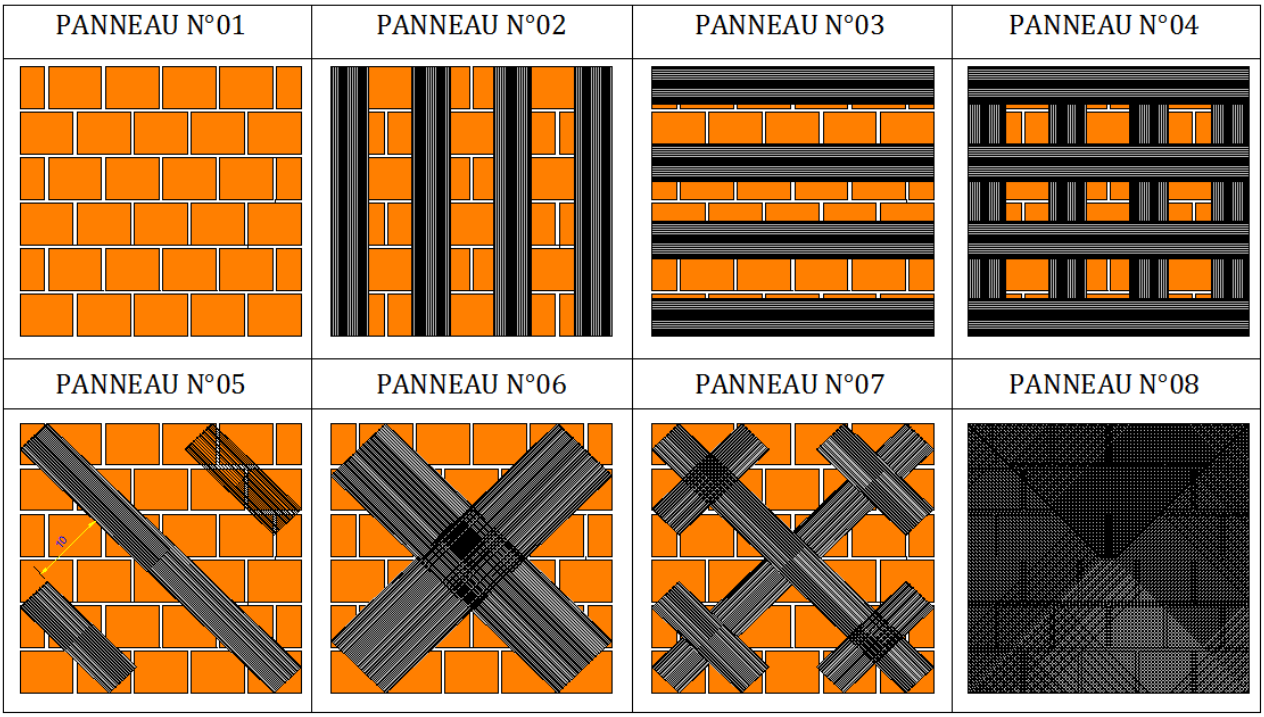


Figure IV.16: les différents dispositifs de renforcement

PANNEAU 01 (M1-NR-Réf):

Ce panneau de référence représenté le mur non renforcé et s'appelle M1-NR-Réf

PANNEAU 02 (M2-RFC-V):

Dans ce mode de renforcement les bandes de tissu de carbone sont placées verticalement aux joints horizontaux, de 50mm de largeur espacées entre elles de 56mm

Surface des fibres	**pourcentage**
710 cm2	54%

PANNEAU 03 (M3-RFC-H):

Dans ce dispositif on a met le renforcement parallèle aux joints horizontaux des panneaux par des bandes de 50mm de largeur espacées entre elles de 52mm

Surface des fibres	**pourcentage**
740 cm2	56%

PANNEAU 04 (M4-RFC-VH):

Dans ce dispositif on a met le renforcement dans les deux directions verticale et horizontale par des bandes de 50mm de largeur espacées entre elles de 56mm et 52mm respectivement.

Surface des fibres	**pourcentage**
1050 cm2	80%

PANNEAU 05 (M5-RFC-45°):

Dans ce dispositif on a met le renforcement incliné de 45° par des bandes de 50mm de largeur.

Surface des fibres	**pourcentage**
331.32 cm2	25%

PANNEAU 06 (M6-RFC-X):

Dans ce dispositif on a met le renforcement incliné de 45° dans les deux directions par des bandes de 100mm de largeur.

Surface des fibres	**pourcentage**
528 cm2	63%

PANNEAU 07(M7-RFC-2X):

Dans ce dispositif on a met le renforcement incliné de 45° dans les deux directions par des bandes de 50mm de largeur espacées entre elles de 100mm

Surface des fibres	**pourcentage**
663 cm2	50%

PANNEAU 08 (M8-RFC-PL):

Dans ce dispositif on a met le renforcement dans les deux directions sur tout la surface de mur.

Surface des fibres	**pourcentage**
1313 cm2	100%

PARTIE 03 : PRESENTATION DES L'ESSAIS :

IV.3.1 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 EC 6. 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.

IV.3.1.1 Présentation du dispositif d'essai

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

- Un portique de 1.0 m x 0.70 m ;
- Un vérin de 300 KN de capacité ;(et autre machine de 100KN)
- Un système hydraulique ;
- Un système d'acquisition des données,
- Sabots (semelles) de transmission des charges ;
- Capteur de déplacement vertical ;
- Capteur de déplacement horizontal ;
- Un logiciel pour le traitement des données.

Les murs sont munis sur les extrémités d'une diagonale de deux supports métalliques ayant la forme d'un angle présentée dans la Figure III.17. La longueur de l'angle vaut un sixième de la hauteur du mur pour pouvoir transmettre les charges de compression selon Gabor et al, 2006.



Figure IV.17: Presse pilotée par ordinateur pour d'essai, Angle de transmission de charges, Mise en place les murets dans la presse.CNERIB

L'observation comprend des paramètres tels que la contrainte de cisaillement, le module de rigidité, et le module d'élasticité. La charge est appliquée à l'aide du vérin hydraulique qui est placé en dessous de la cellule de charge.

Le chargement est appliqué par le biais d'un vérin hydraulique de capacité de 300KN. La vitesse de chargement est de 2mm/min. L'ensemble des données, forces et déplacements, sont enregistrés automatiquement par un système d'acquisition des données. Les déplacements horizontaux sont détermines manuellement par un capteur de déplacement. La mesure de pression, faite à l'aide d'un capteur de pression, permet de déterminer la charge appliquée par le vérin.

IV.3.1.2 Paramètres expérimentaux

✓ *Contrainte de cisaillement diagonale*

La résistance au cisaillement est calculée selon l'état de contrainte dans le centre du mur ; isotrope ou anisotrope. Les deux états de contraintes sont présentés dans la figure IV.4.

Le calcul de la contrainte de cisaillement τ_{dt} est fait selon l'ASTM 519 – 02.en considérant un état de contrainte isotrope dans le centre du mur

$$\tau_{dt} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}\times A} = 0.707\,\frac{p_{max}}{A} \qquad (4.1)$$

La surface latérale A est soumise à une charge maximale $Pmax$. La surface A est calculée avec l'Équation IV.2 en considérant **w**, la largeur, **h** la hauteur et **t** l'épaisseur du mur.

$$A = \frac{w+h}{2}\times t \qquad (4.2)$$

✓ *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 $\varepsilon_c$et en traction$|\varepsilon_t|$.

$$\gamma = \varepsilon_c + |\varepsilon_t| \qquad (4.3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L_c}{L_c} \quad \text{Et} \quad \varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L_t} \qquad (4.4)$$

Lc, Lt représentent les longueurs des diagonales comprimées et allongées, etΔLc, ΔLt sont les variations des longueurs de ces diagonales respectivement. La ductilité en déformation de cisaillement est défini comme le rapport entre la déformation ultime γu et celle élastiqueγe.

La déformation élastique γe est définie à 70% de la contrainte maximale de ruptureτ_u. La déformation maximale γu est définie à 80% de la contrainte maximaleτ_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).

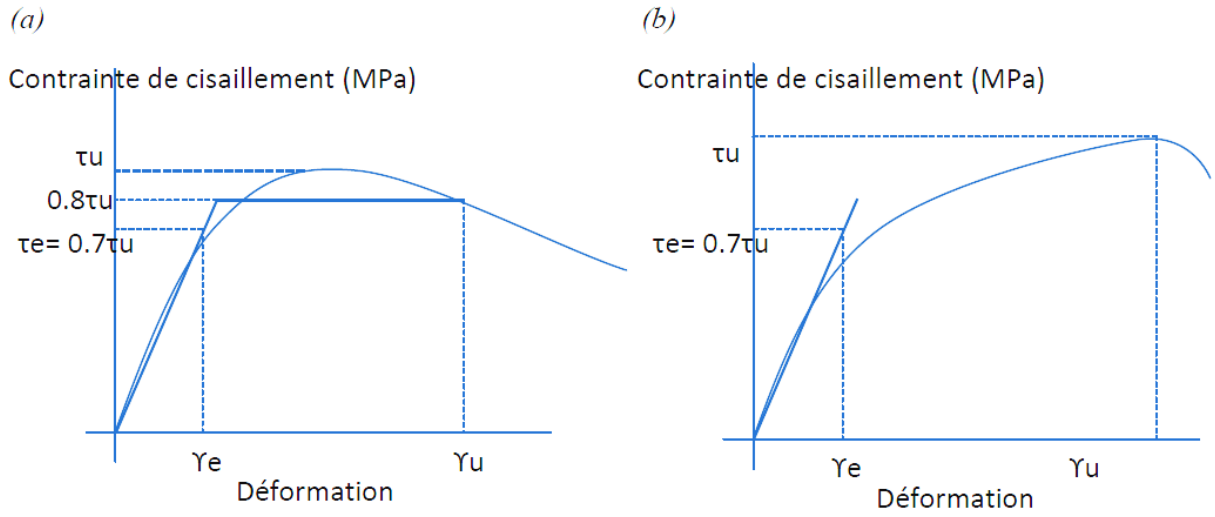


Figure IV.18 Courbe de comportement (a) adoucissement, (b) durcissement

$$\mu_y = \frac{\gamma_u}{\gamma_e} \qquad (4.8)$$

Le module de cisaillement G est calculé dans la zone de contrainte élastique $\Delta\tau_e$ avec l’*Équation IV.5.*

$$G = \frac{\Delta\tau_e}{\Delta\gamma e} \qquad (4.9)$$

$\Delta\tau_e$ et $\Delta\gamma e$ Représentent la contrainte et la déformation élastique, respectivement

IV.3.2 ESSAI DE TRACTION SUR LES MATERIAUX DE RENFORCEMENT :

Le matériau étudié est un composite stratifié unidirectionnel de fibre de carbone et résine époxy. 14 couches unidirectionnelles de préimprégné de carbone [13] ont été empilées, conduisant à une épaisseur finale de composite de 2 mm, L'empilement a été placé en autoclave à 125°C pendant 90 minutes sous une pression de 2 bars. La plaque obtenue a été découpée selon la norme ISO 527-5 [13]. Trois directions de fibres ont été obtenues avec la découpe de la plaque (0°, 45° et 90°) par rapport à l'axe de sollicitation de l'éprouvette. Les essais dans les axes permettront de capter la réponse des fibres (purement élastique fragile) alors que les essais hors-axes (à 90° et 45°) intégreront plus ou moins la réponse de la résine (visco-élastique fragile).
Les dimensions finales sont présentées sur la Figure 1. Les talons des éprouvettes ont été fabriqués à partir de fibre verre et résine époxy à +/-45°.

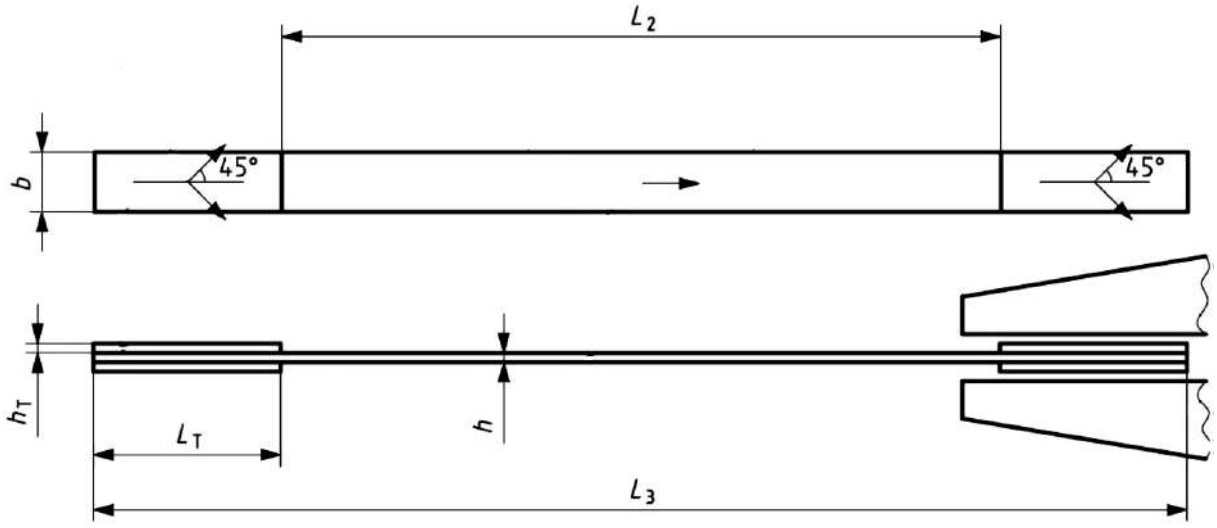


Figure IV.19: Eprouvette de traction. La largeur ***b*** *est de 25 mm, la longueur totale* $\boldsymbol{L_3}$ *est de 250 mm, la longueur utile* $\boldsymbol{L_2}$ *est de 150 mm, l'épaisseur de l'échantillon en carbone* ***h*** *et des talons* $\boldsymbol{h_T}$ *fait 2 mm [13].*

IV.3.2.1 Protocole expérimental

Les essais ont eu lieu à température et pression ambiantes, dans une pièce thermo régulée à 25°C. Selon l'orientation des fibres, les conditions expérimentales suivent la norme NF EN ISO 527-5 . La vitesse de chargement est de 2 mm/min pour les éprouvettes à 0°, de 1 mm/min pour les éprouvettes à 90° et de 1.5 mm/min pour les éprouvettes à 45°. Pour le chargement monotone, une machine de traction électromécanique a été utilisée. Afin de mesurer la reproductibilité des tests, trois éprouvettes ont été considérées pour chaque direction testée.

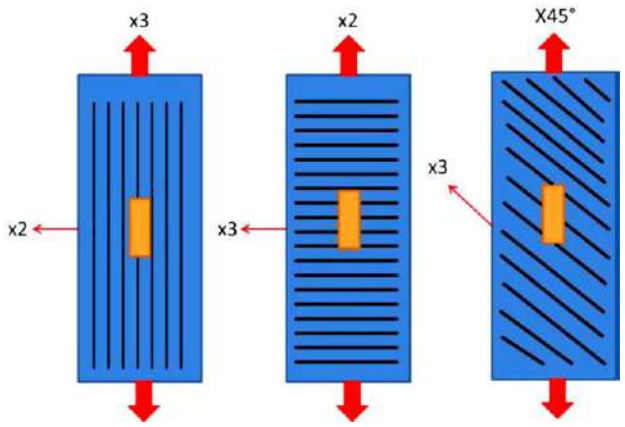


Figure IV.20: Eprouvette de traction. a) éprouvette à 0°, b) éprouvette à 90°, c) éprouvette à 45°.

La direction x3 représente l'axe de fibres, la direction x2 représente la direction transversale aux fibres et la direction x45° représente la direction à 45° des fibres. Parallèlement.

CONCLUSION :

A travers ce chapitre, nous avons présente les différentes techniques utilisées pour la réalisation du programme de notre recherche qui a été élaboré selon les règles de l'art. La confection des murets est réalisée en prenant toutes les précautions. Dans le prochain chapitre, nous allons présentes les résultats obtenus lors des écrasements des murets puis on va interpréter et comparer nos résultats avec la bibliographie.

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

La campagne expérimentale qui a été réalisée et décrite dans le chapitre précédent est sorti avec de nombreux résultats expérimentaux. L'interprétation correcte des résultats contribuera à obtenir et évaluer les paramètres mécaniques des matériaux.

Dans ce chapitre, les différentes typologies de tests sont analysées afin d'évaluer le bon renforcement du comportement en cisaillement d'un mur en maçonnerie. Les résultats de tous les tests sont présentés dans ce chapitre et sont discutées, et critique par rapport à l'autre. Nous allons dans une première partie définir les différents résultats des essais effectués sur les matériaux de construction et le matériau de renforcement utilisé. Puis nous présentons dans la deuxième partie, les résultats de comportement en cisaillement des murettes témoin et renforcés.

PARTIE 01 : RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MATERIAUX

V.1.1. Les briques

a) Caractéristiques géométriques

Les panneaux sont confectionnés à partir des briques perforés, dont les caractéristiques géométriques sont :

- Briques en terre cuite creuses : 70 x 105 x 55 mm3

b) Caractéristiques physiques :

La masse volumique de la brique est déterminée par la méthode géométrique. Les mesures sont effectuées sur trois blocs La masse volumique d'un bloc ρ $(kg/m3)$ est calculée comme suit :

$$\rho = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{V}} \qquad \text{(V.1)}$$

Ou :

ρ : Masse volumique apparente en (kg/m3).
M : masse des blocs en (kg).
V : volume net.



Figure V.1: Mesure la masse de la brique

Tableau V.1 caractéristiques physiques des briques

N°	$M(g)$	$V\ (cm3)$	$\rho\ (g/cm3)$	$\rho\ moy\ \ (g/cm3)$
01	1589,2	877	1,81	1.80
02	1592,4	880	1,81	
03	1588,7	895	1,78	

c) ***Caractéristiques mécaniques***

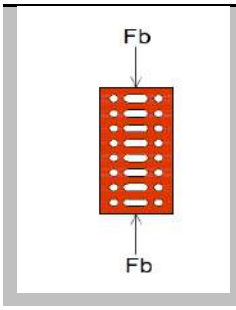
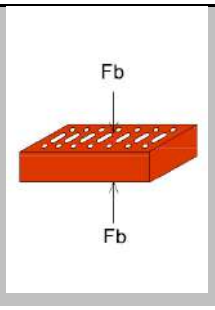
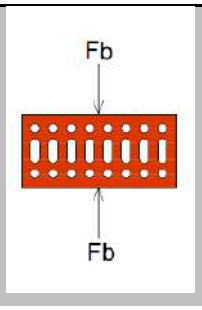
Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur trois blocs jusqu'à la rupture. Nous avons surfacé les blocs dans le sens du chargement. La résistance en MPa est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_n} \qquad \text{(V.2)}$$

Où :
σb : résistance à la compression en (MPa)
Fb : charge maximale de rupture en (N)
Sn : section nette moyenne de la brique en (mm^2)

Les résultats sont consignés dans le tableau (V.2).

Tableau V.2 : résultats d'essai de compression sur briques

	Direction 1	**Direction 2**	**Direction 3**
			
Surface de charge (mm2)	5775	14000	3800
Force maximale (N)	54000	329000	12200
Contrainte maximale(MPa)	9,35	23,50	3,21

V.1.2. Les sables :

Les résultats des essais de laboratoire réalisé sur les sables sont représentent dans le tableau V.3

Tableau V3: résultats des essais sur les sables

Echantillon		Sable jaune	Sable noir
		SIDI BAYAZID	MOKOURNO
Classe		0/1	0/3
Tamis	**6,30**		100
	5,00	100	97,64
	2,50	99,46	82,46
	1,25	97,13	44,74
	0,63	92,67	16,49
	0,315	34,78	8,34
	0,160	6,16	4,16
	0,080	0,94	1,12
E.S, à Vue		76,44	65.23
E.S, au Piston		67,36	57.25
Module de Finesse MF		1,69	3,46
Densité abs		2,55	2,51
Densité app		1,47	1,45

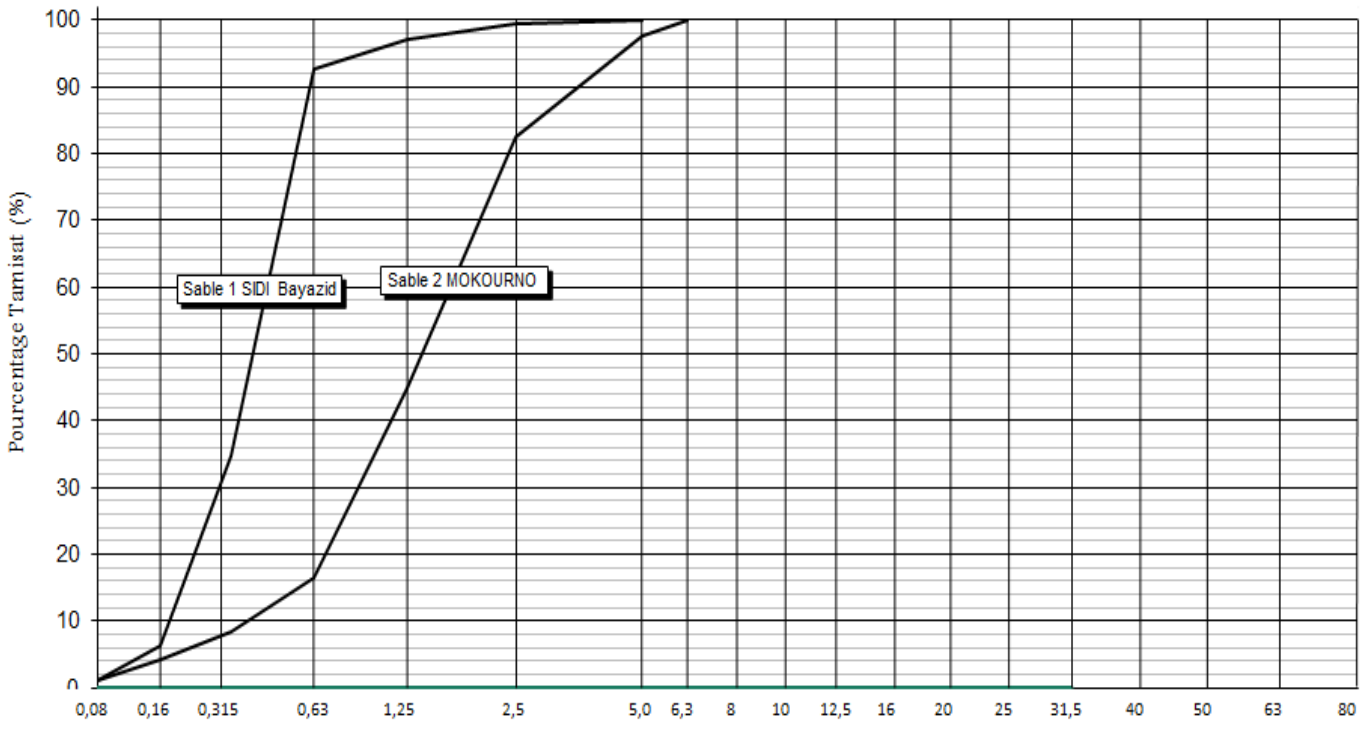


Figure V.2: courbe granulométrique du sable

V.1.3. Le mortier :

A. Résistance à la compression :

Les résultats des essais de compression au niveau du laboratoire sont présentés dans le tableau IV.4 suivant :

Tableau V.4: résultats des essais de compression de mortier

N° Eprouvette	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
Mortier 1/4	3.75	4.55	27.02	35.23

V.1.4. La fibre de carbone :

a) Caractérisation mécanique:

La (Figure V.3) présente les courbes contrainte-déformation pour les trois types d'échantillons.
Lorsque les fibres sont orientées à 0°, la charge maximale de la machine ne permet pas d'attendre la contrainte de rupture de 4000 MPa définie par le fabricant, soit une charge de 200 kN compte tenu des dimensions de l'éprouvette (Figure IV.20). Pour cet essai donc, le comportement obtenu correspond à la partie élastique pour un chargement inferieur à la capacité de la machine, qui est dans l'ordres de 100KN .En revanche, les essais des fibres orientées à 90° et 45° ont pu être effectués jusqu'à la rupture finale de l'échantillon.

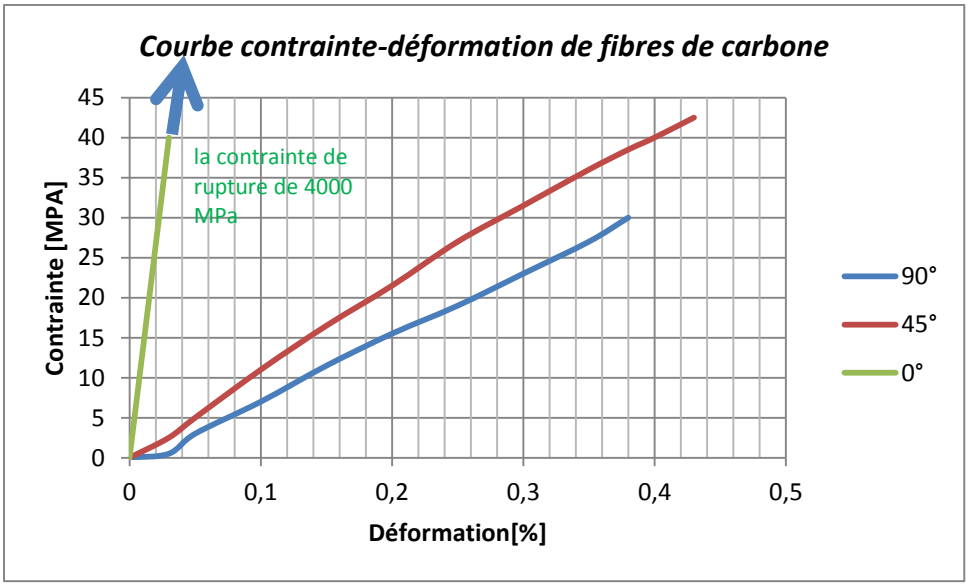


Figure V.3 Courbe contrainte-déformation obtenue par les jauges pour les trois directions de fibres

PARTIE 02 : RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MURETS :

V.2.1. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Huit murets sont construits et testés en compression diagonale. Les murs sont composés de six rangées de briques . les résultats de compression diagonale sont présentés dans ce qui suit.

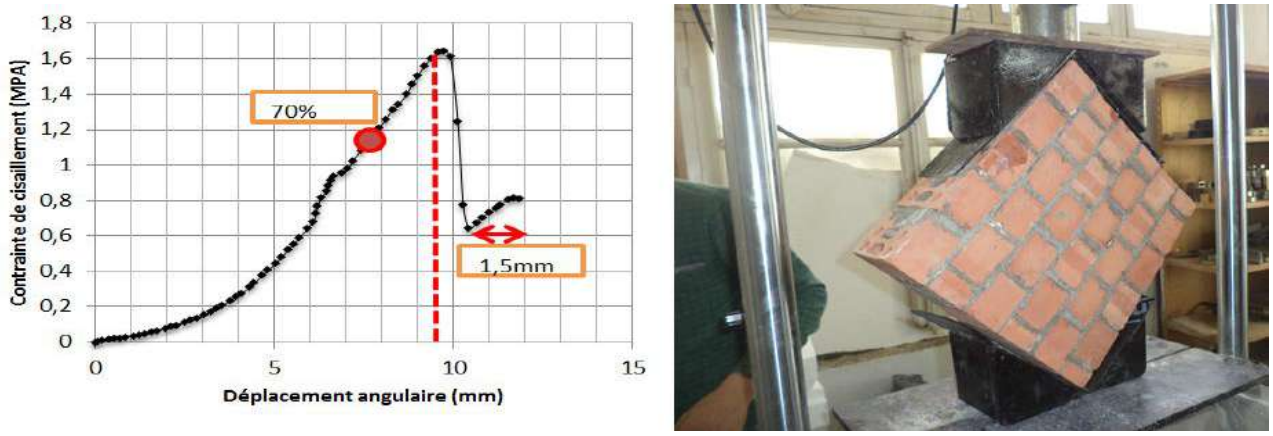
V.2.1.1. Comportement de murs non renforcé :

Deux murs non renforcés ont été testés. La rupture du mur M1-NR-Réf et M2-NR-Réf présente une fissuration diagonale traversant les joints verticaux de mortier.(*FigureV.4)*



FigureV.4 le mode de rupture de mur M1 de référence

Le mur M1-NR-Réf a une résistance au cisaillement maximale de *1.64 MPa* correspondant à une force maximale de *88.63 KN.* En plus, le mur M2-NR-Réf présente une force de rupture de *90 KN*, ce qui produit dans ce mur une contrainte de cisaillement maximale de 1.67*MPa*. (*FigureV.5)*.



FigureV.5 Diagramme des contraintes de cisaillement-déplacement diagonale de mur M1 de référence

Le calcul de la ductilité est effectué pour le mur de référence. Le changement de la valeur du déplacement maximal et élastique est fortement relié au mode de rupture. Le déplacement maximal enregistré dans le mur M 1 -NR-Ref est de *12mm,*

Le module de cisaillement de M1-NR-Ref est de 60 MPa, calculé à 70% de la contrainte maximale.
La (figure V.5) illustre un comportement fragile des murs témoins jusque un déplacement de 9.5mm.
Aussi, la courbe est caractérisée par quelque saut de déplacement, du au frottement entre les briques atteignant le déplacement de 1.5mm.

V.2.1.2. Comportement des murs renforcés par fibre de carbone

Les murs renforcés par les composites FC reflètent une augmentation différente de la valeur de la résistance au cisaillement selon l'orientation des fibres de renforcement et le pourcentage de renforcement.

La rupture des murets renforcés présente une fissuration diagonale traversant les joints verticaux de mortier. (*FigureV.6a).*au furet au mesure de l'augmentation de la contrainte de cisaillement une bielle de compression apparais diagonalement (FigureV.6b).



FigureV.6 Compression diagonale: le mode de rupture de mur M8 et M7

Résultats expérimentaux des murs M2-RFC- H ET M3-RFC- V

1) Le mur ***M2-RFC-V*** reprend une force maximale de 100.4 KN soit une valeur de 1.86 MPa pour la résistance au cisaillement. Le déplacement élastique enregistré est égale à 11.8mm et le déplacement ultime vont 21mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité µ jusqu'à 34%. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ s'élève à 71 MPa. (*FigureV.7)*

2) Le mur ***M3-RFC-H*** reprend une force maximale de 98.8 KN soit une valeur de 1.83 MPa pour la résistance au cisaillement. Le déplacement élastique enregistré est égale à 11.8mm et le déplacement ultime vont 20mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité µ jusqu'à 38%. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ est de l'ordre de 65 MPa. (*FigureV.7)*

Le mode de rupture s'est produit par une fissuration diagonale qui traverse des joints de mortier et des briques.

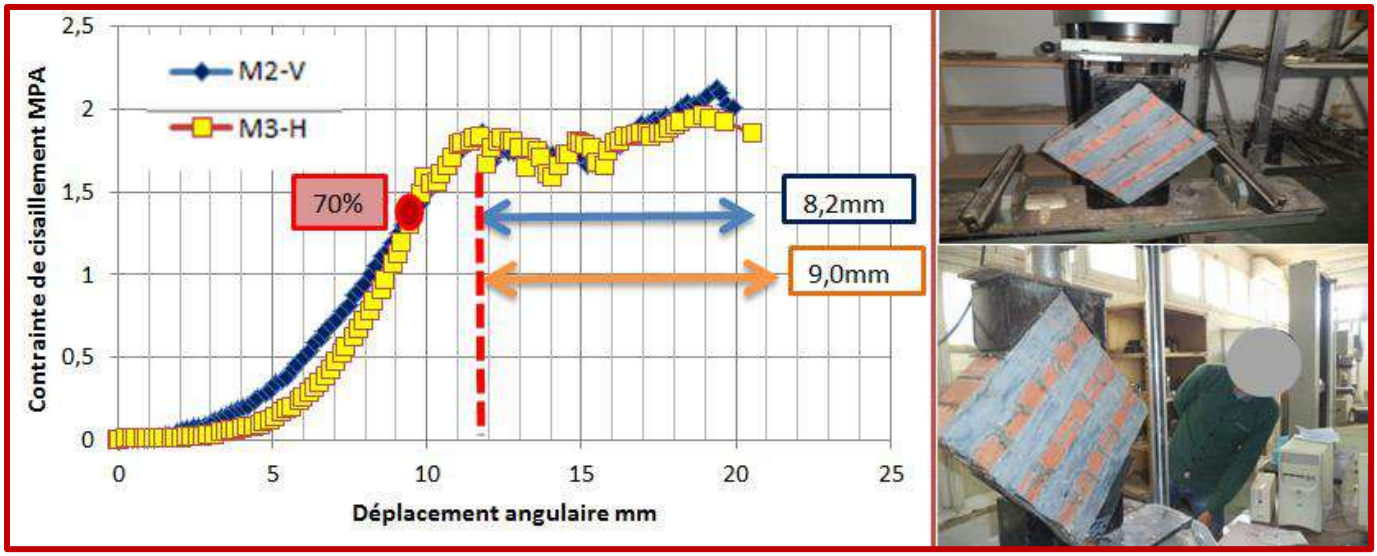


Figure V.7: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M2-RFC –V et M3-RFC -H

Résultats expérimentaux des murs M4-RFC- HV

Le renforcement avec des bandes horizontales et verticales dans le mur M4-RFC-H+V a conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à 2.79 MPa correspondant à une charge maximale de *150.56 KN*. (*FigureV.8)*

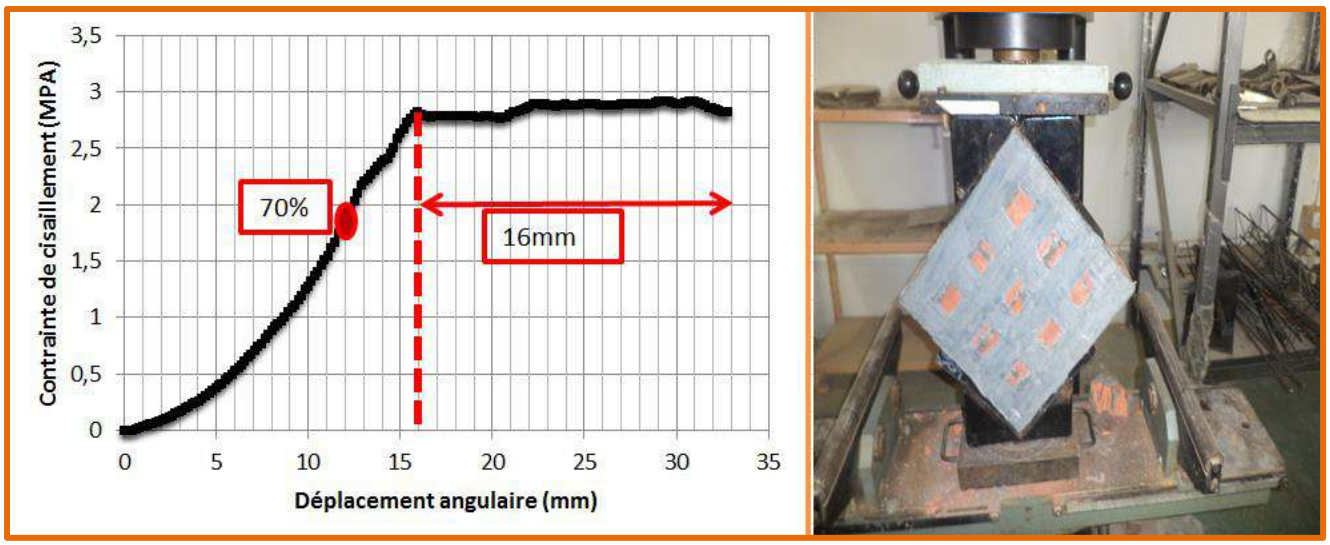


Figure V.8: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M4-RFC –HV

Le déplacement élastiques enregistrées sont égales à 16mm et le déplacement ultime vont 33mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité μ jusqu'à 57%. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ est de l'ordre de 80.96 MPa.

Résultats expérimentaux des murs M5-RFC- 45°

Le mur ***M5-RFC -45°*** reprend une force maximale de 97.019 KN soit une valeur de 1.80MPa pour la résistance au cisaillement. Le déplacement élastique enregistré est égale à 11mm et le déplacement ultime vont 22mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité μ jusqu'à 56%. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ s'élève à 73MPa. (*FigureV.9)*

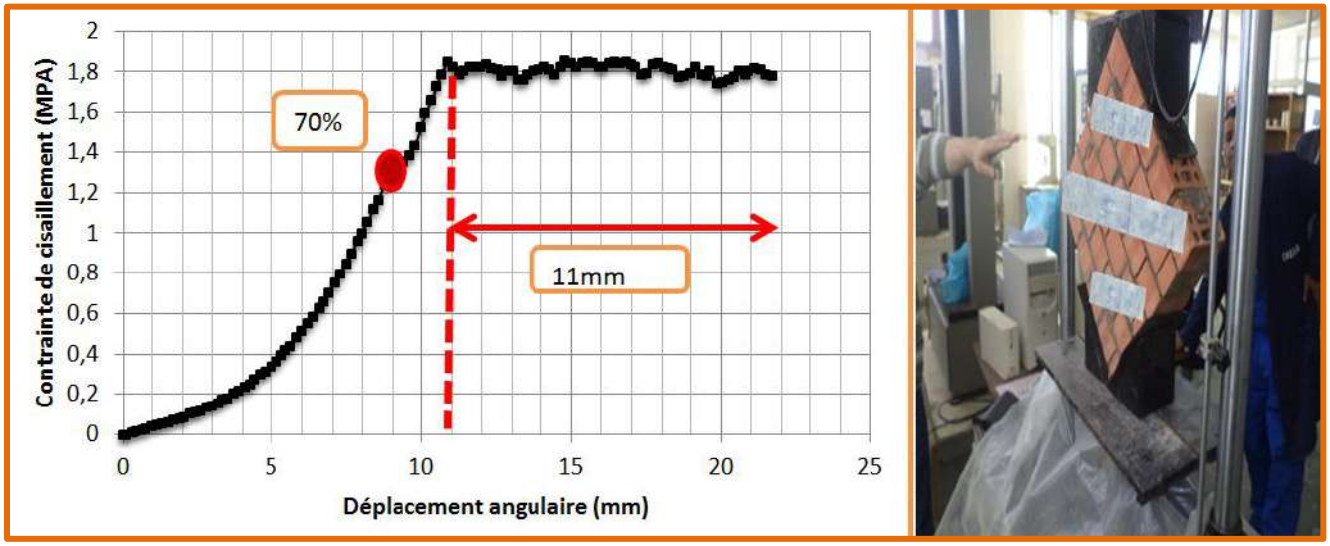


Figure V.9: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M5-RFC –45°

Résultats expérimentaux des murs M6-RFC- X

Le mur ***M6-RFC -X*** est renforcé par deux bandes de fibre de carbone de 100mm de largeur de forme **X**, cette dispositif nous donne une force maximale de 139 KN soit une valeur de 2.58MPa pour la résistance au cisaillement.

Le déplacement élastique enregistré sont égale à 13mm et le déplacement ultime vont 30 mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité μ jusqu'à 72%. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ s'élève à 103 MPa. (*FigureV.10)*

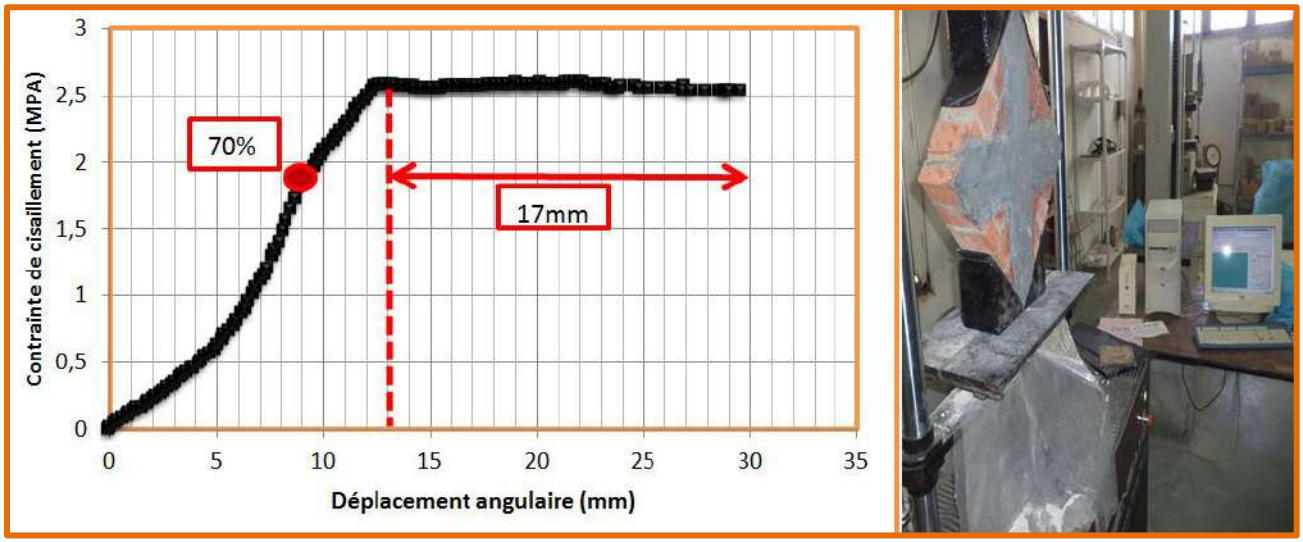


Figure V.10: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M6-RFC –X

Résultats expérimentaux des murs M7-RFC- 2X

Le mur ***M7-RFC-2X*** reprend une force maximale de 162.17 KN soit une valeur de3.01 MPa pour la résistance au cisaillement.

Le déplacement élastique enregistré est égale à 15.5mm et le déplacement ultime vont 35mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité μ jusqu'à 74 %. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ s'élève à 120 MPa. (*FigureV.11)*

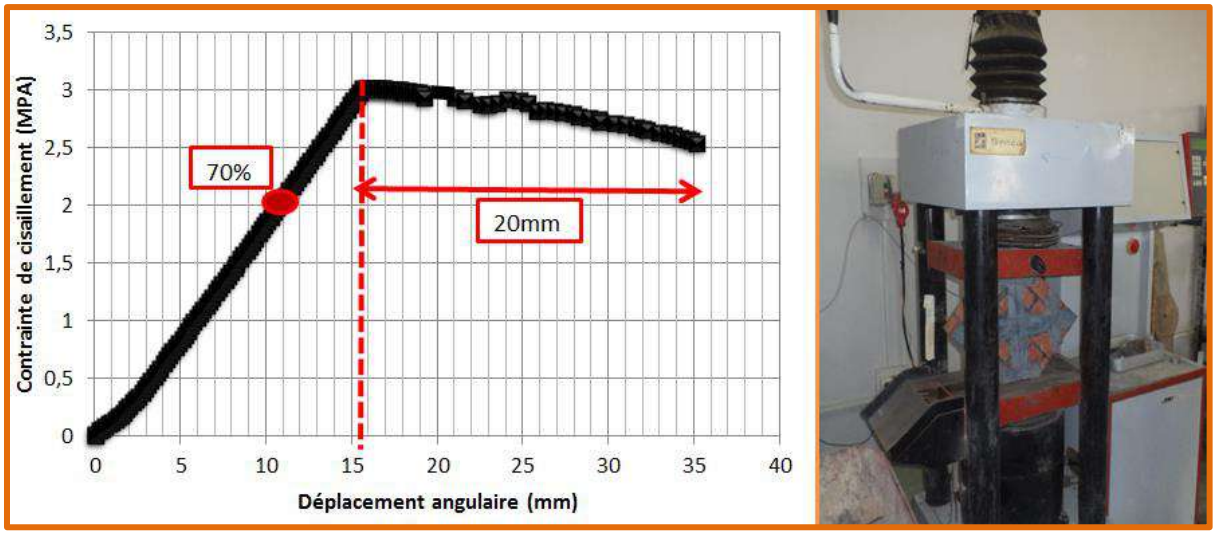


Figure V.11: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M7-RFC –2X

Résultats expérimentaux des murs M8-RFC- PL

Le mur ***M8-RFC -PL*** reprend une force maximale de 180.22 KN soit une valeur de3.35 MPa pour la résistance au cisaillement.

Le déplacement élastique enregistré est égale à 18mm et le déplacement ultime vont 39mm Ce renforcement a permis d'augmenter la ductilité μ jusqu'à 80 %. Le module de cisaillement $G_{(70\%)}$ s'élève à 125 MPa. (*FigureV.12)*

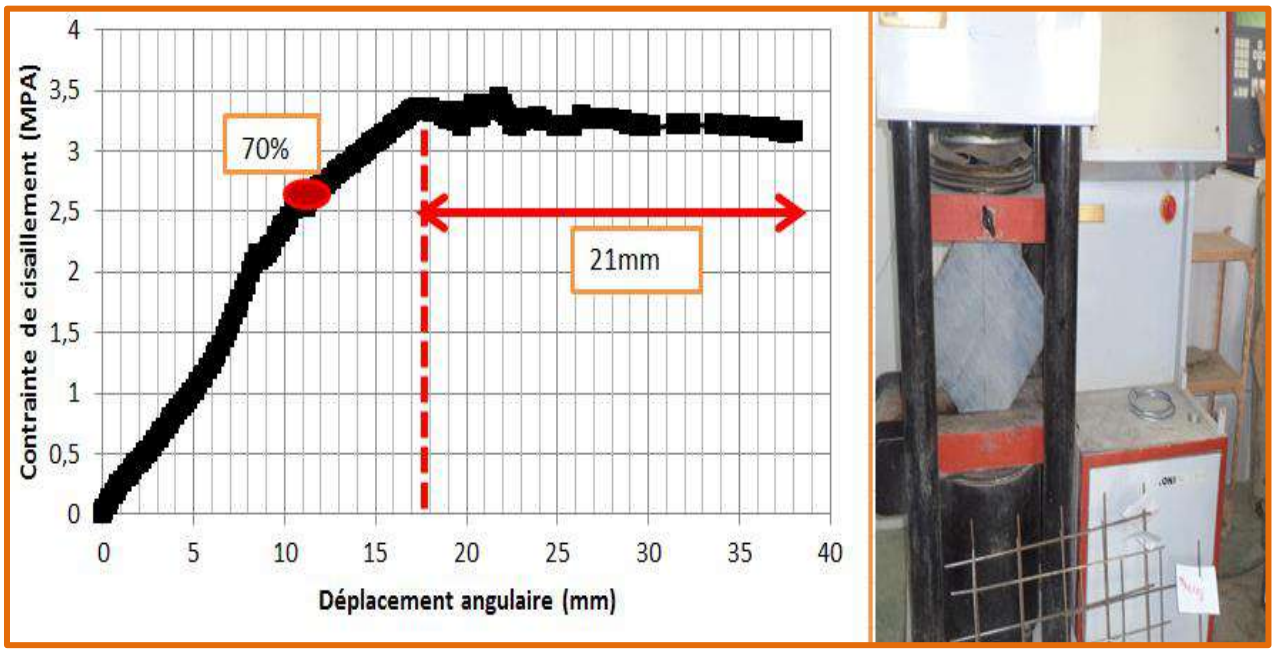


Figure V.12: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M8-RFC –PL

V.2.2. L'INFLUENCE DU %DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT DES MURETS

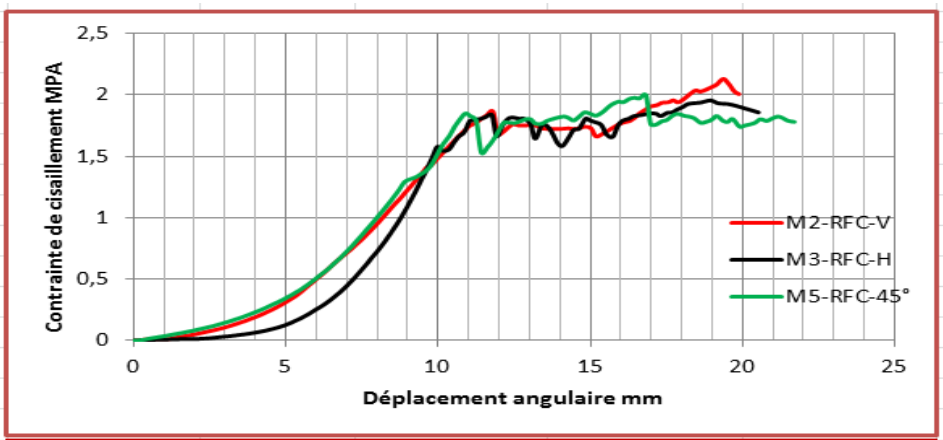
Tous les résultats de compression diagonale des murets sont présentés dans le tableau V.4 pour permettre d'analyser l'influence du pourcentage des fibres sur le comportement au cisaillement des murets :

N°	Nom	% de fibre	Pmax(KN)	A(mm2)	τdt (MPA)	déplacement ultime	G(70%)
01	M1-NR-Réf	0	88.63	38062.5	1.64	12	60.00
02	M2-NR-Réf	0	90	38062.5	1.67	13.5	61.22
03	M2-RFC-V	54	100,4	38062,5	1,86	20	71
04	M3-RFC-H	56	98,8	38062,5	1,83	21	65
05	M4-RFC-VH	80	150,56	38062,5	2,79	33	80,96
06	M5-RFC-45°	25	97,019	38062,5	1,8	22	73
07	M6-RFC-X	63	139	38062,5	2.58	30	103
08	M7-RFC-2X	50	162,468	38062,5	3,01	35	120
09	M8-RFC-PL	100	180.22	38062,5	3,35	39	125

Tableau V.5: Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux

D'après le tableau V.4, on remarque que les dispositions horizontale, verticale et diagonale des murets M3, M2et M5 respectivement ,donne presque la même contrainte au cisaillement de l'ordre de 1.8MPA

Cela est après la figure V.13, Le renforcement des murets M2-RFC-V, M3-RFC-H et M5-RFC-45° augmente la résistance au cisaillement de *7 à11%* par rapport au mur témoin (*Figure V.13)*



Nom	% de fibre	Pmax(KN)	τdt (MPA)	déplacement ultime
M2-RFC-V	54	100,4	1,86	20
M3-RFC-H	56	98,8	1,83	21
M5-RFC-45°	25	97,019	1,8	22

Figure V.13: Diagramme de cisaillement-déplacement angulaire: M2-RFC –V, FC: M2-RFC –H et FC: M5-RFC –45°

Le taux de remplissage de 25% a donné les mêmes résultats que les surface de 54 et 56%, à cet effet la disposition des fibres de carbone sur les murets joue un très grand rôle pour le renforcement,

D'autre part, une augmentation remarquable supérieure à 2.5MPA a été constatée dans les murets renforcés par les dispositions M4, M7 et M8.

En effet M4, M7 et M8 donnent respectivement les contraintes 2.79, 3.01 et 3.5MPA, ces valeurs obtenues par un taux de remplissage de 80, 50 et100% respectivement.(*Figure V.14)*

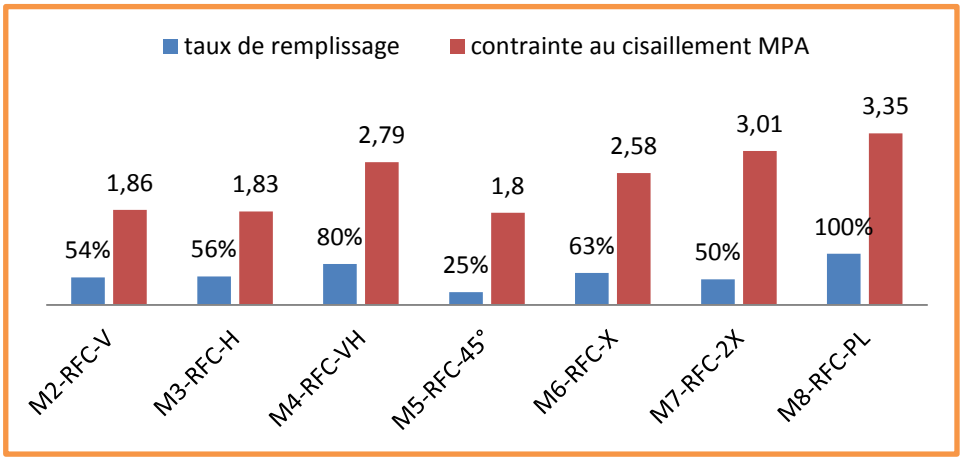


Figure V.14: Histogramme des contraintes de ruptures – taux de renforcement

On peut constater que le remplissage de 50% de la surface est suffi pour donner des contraintes de cisaillement très élevés.

V.2.3. CONCLUSION

Le renforcement avec les fibres de carbone augmente la résistance au cisaillement de *10 à 105%* par rapport au muret témoin (*Figure V.15)*

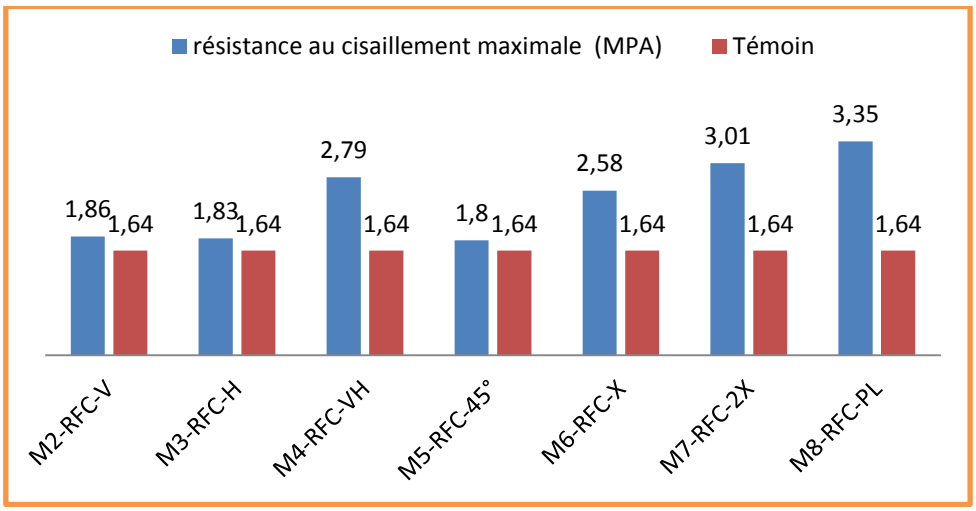


Figure V.15: Histogramme des contraintes de ruptures

Le renforcement diagonal a permis de renforcer les joints de mortier et de changer le mode de rupture. La résistance au cisaillement est augmenté de 57 %, dans le cas du mur M6-RFC-X et de 84% dans le cas du mur M7-RFC-2X , le déplacement est augmenté jusqu'à 35mm.

En effet, le renforcement diagonal est joue un rôle très important pour l'amélioration de la résistance et aussi la ductilité du mur. Ce résultat a été approuvé par Luccioni et Al [75] qui ont trouvé une amélioration de 79% de la contrainte de cisaillement, lorsqu'ils ont utilisé trois bandes de CFRP dans la direction diagonale.

Dans la figure V.16 on constate une variation suivant les types de renforcement, le déplacement ultime varié de 12 à 39 mm et le déplacement élastique de 9.5 à 17 mm

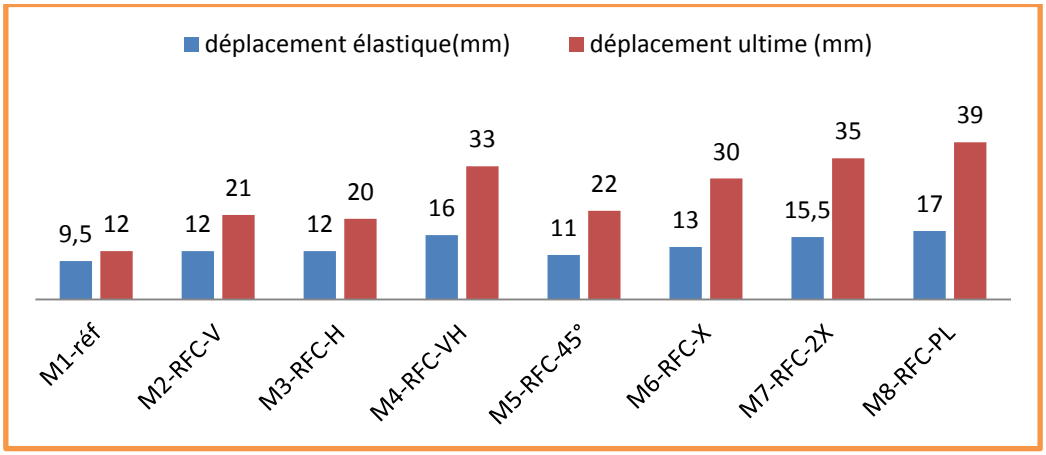


Figure V.16: Histogramme des d*éplacements diagonaux des murets*

On conclure, que la disposition diagonale amélioré le comportement au cisaillement des murets, avec un taux de renforcement le plus économique.

CONCLUSION GENERALE

Il existe un potentiel important pour l'application de FRP dans l'industrie de la maçonnerie, à la fois dans la construction et la réhabilitation des anciennes structures. FRP peuvent améliorer non seulement la capacité de résistance du matériau, mais aussi conserver l'intégrité structurelle et d'augmenter la ductilité par une résistance accrue. Donc, il est affirmé que les méthodes disponibles d'application FRP sur les membres de maçonnerie, sont très efficaces et constituent un bon potentiel. La résistance de cisaillement peut être augmentée jusqu'à 200% par les fibres de carbones et peut augmenter la ductilité jusqu'à 350%.

D'autre par la disposition de forme X avec des talents comme présenté dans le mur M7XT présente un meilleur comportement au cisaillement avec un pourcentage d'occupation de 50%

Recommandations pour des nouvelles études

Les recherches dans le renforcement des structures de maçonnerie sont relativement nouvelles. Très peu de chercheurs travaillent pour développer ce domaine.

Aujourd'hui encore beaucoup de questions sont disponibles dans le renforcement des structures de maçonnerie. Certains domaines qui exigent en particulier des recherches supplémentaires sont énumérés ci-dessous.

- Des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer avec précision le pourcentage optimal de renforcement par les différents types de textiles.
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les facteurs environnementaux agressifs tels que température, cycles de gel-dégel, l'exposition aux UV, etc.
- Pendant un test expérimental élément structurel isolé et idéal est généralement testé. Comme par exemple, quand un mur est testé paroi généralement aussi isolée sans ouverture et aucune architecture particulière est testée. Mais en réalité, ce type de mur ne peut pas être présent. Donc, certains échantillons réels ou parfait représentant des membres réels doivent être testés.
- Des recherches supplémentaires sur le renforcement des deux faces des murs.

REFERENCES BIBLIGRAPHIQUES

1. *"D.M. 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le costruzioni, Cap. 11 Materiali e prodotti per uso strutturale", January 2008."*
2. *Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A., Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing. Construction and Building Materials, 22 p. 463–472, 2008."*
3. *Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenc P.B., A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modeling. Engineering Structures 28 p. 1132–1148, 2006."*
4. *EC 96: Eurocode 6: Design of masonry structures—part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures, 2006."*
5. *Turath GHARIB Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : Application aux murs en pierres calcaires L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON 1 2015"*
6. *" Hilsdorf, H. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. Designing, engineering and constructing with masonry pro-ducts, eds. F.H. Johnson, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA (1969), 34-41."*
7. *"La maçonnerie de pierre. Guide technique 6. La ville de Québec. Dépôt légale: 2' trimestre 1989. ISBN 2-920860-30-5"*
8. *"DOCUMENTATION KSV ,Ouvrage de référence technique pour maçonneries en briques silico-calcaires"*
9. *Ramzi SAHLAOUI.Analyse par le calcul a la rupture des murs en maconnerie en vue de leur renforcement par des composites collés.p36-54 .12 juillet 2011*
10. *"Zucchini A., Lourenço P.B., Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenisation approach, Computers and Structures 85 p.193–204, 2007."*
11. *Farid Brahim HOUTI,COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE SOUS SOLLICITATION UNIAXIALE,03 Novembre 2002*
12. *"Coignet J., Coignet L., Maçonnerie de pierre Matériaux et Techniques, désordres et interventions. Livre, 2007."*
13. *"Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy. (2014) In: VIIIèmes Journées d'Etudes Techniques - International congress for applied mechanics JET 2014, 28 April 2014 - 30 April 2014 (Marrakech, Morocco).*
14. *"Petersen R.B., In-plane shear behaviour of unreinforced masonry panels strengthened with fibre reinforced polymer strips. PhD. Theses. The University of Newcastle, 2009."*
15. *"Zimmermann T., Strauss A., Bergmeister K., Structural behavior of low- and normalstrength interface mortar of masonry, Materials and Structures, p.45:829–839, 2012."*
16. *"Masia M.J., Han Y., Player C.J., Correa M.R.S., Page A.W., Torsion shear test for mortar joints in masonry: Preliminary experimental results. In Tenth North American Masonry Conference, St Louis, Missouri, U.S.A., June 2007."*
17. *"Corradi M., Borri A., Vignoli A., Experimental study on the determination of strength of masonry walls, Construction and Building Materials p.17 325–337, 2003."*
18. *"RILEM TC 76-LUM. Diagonal tensile strength of small walls specimens. RILEPublications SARL; 1994."*
19. *"Frocht MM. Recent advances in photoelasticity. ASME Trans 1931;55:135–53 (September–December)."*

20. *"De Lorenzis L., Teng J.G., Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures Composites: Part B 38 (2007) 119–143"*
21. *"Reparación y refuerzo de paredes de obra de fábrica. estudio experimental de la respuesta ante tensiones de corte"*
22. *Renforcement des structures historiques en ma connerie par mat eriaux composites : application aux murs en pierres calcaires*
23. *REVEREAU André:la casbah d'alger,et le site créa la ville,ED Sindbad.paris.1989*
24. *RAYMOUND A,les grandes villes arabes à l'épouque ottomane.ED Sindbad.paris.1985*
25. *REHABIMED.bulletin trimestriel du projet pour promouvoir la réhabilitation de l'architecture traditionnlle méditerranéenne.avril2006*
26. *REVUE-Vie des villes- in -les techniques constructives sismo-résistantes dans la casbah d'alger*
27. *Revue Africane,LXVI (1925),f.66.p 472 et F.CRESTI,situation et transformation urbaine d'alger au XVI e siècle d'après les déscriptions littéraire et iconographie de la ville ,en sciences sociales panorama 1985,f.10*
28. *OLIVIER Emile professeur technique du batiment,des méthdes les maconneries ,technologies de construction,tome II 5e Edition revue,technique et Document Lavoisier,paris1990*
29. *PANERAI PHILIPPE ,DEPAULE Jean-Charles et DEMORGON Marcelle analyse urbaine.Ed parenthèses ,marseille,2001*
30. *PELLIZZER ET SABATINI ,1976;amoroso et fassina,1983;Karpuz et pasame thouglou1992*
31. *PERRET J,Guide de maintenance des batiments,Ed le moniteur,paris 1995*
32. *PERRET P ,Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins à la chaux:étude globale du phénomène et application.These docteur-ingénieur -INSA de Rennes.1982*
33. *POCHON J,(facteurs biologique de l'altération des pierres),paris,1982*
34. *PULIKOWSKI A ,Citadelle d'alger,1980,dossier PKZ*
35. *"CNRC-NRC, Lignes directrices pour la protection parasismique des structures de batiments existants, Institut de recherche en construction, Canada, Decembre, 1995."*
36. *"Lourenço P.B., Assessment, diagnosis and strengthening of Outeiro Church, Portugal Construction and Building Materials 19 p. 634–645, 2005."*
37. *"Valluzzi M. R., Binda L., Modena C., Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing, Construction and Building Materials 19, p. 63–73, 2005."*
38. *"Borri A., Castori G., Corradi M., Speranzini E., Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests, Construction and Building Materials, 25 p.4403–4414, 2011."*
39. *"Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A., Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing. Construction and Building Materials, 22 p. 463–472, 2008."*
40. *"Oliveira D.V., Silva R.A., Garbin E., Lourenço P.B., Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research, University of Minho, 2004."*
41. *"Vintzileou E., Iniezione di miscela fluida in muratura a sacco: Risultati sperimentali eprevisione delle caratteristiche meccaniche, Seminar CIAS Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni, pp. 191–211, 2007."*
42. *"Contamine R., Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier. Application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton*

armé vis-à-vis de l'effort tranchant. Thèse de doctorat, l'Université Claude Bernard Lyon 1, 2011."

43. *"Karbhari V.M., Zhao L., Use of composites for 21st century civil infrastructure, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 185, p. 433-454, 2000."*
44. *"De Lorenzis L., Teng J.G., Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures Composites: Part B 38 (2007) 119–143"*
45. *"Khalifa A., Gold W., Nanni A., Abdel Aziz M.I., Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of flexural members, Vol.2, No.4, p. 195-203, 1998."*
46. *"Secondin S., Masonry reinforced with FRP systems. PhD these, Univerity of Missouri-Rolla, CIES, USA, 2003."*
47. *"Nguyen T.H.T., Model d'endommagement des assemblages collés : Identification et application à la description d'un essai de vieillissement accéléré. Thèse de doctorat, l'Ecole National des Ponts et des Chaussées, 2008."*
48. *"Ismail N., Petersen R.B., Masia M.J., Ingham J.M., Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars, Construction and Building Materials, 25 p. 4386–4393, 2011."*
49. *"Kalali A., Kabir M.Z., Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests, Engineering Structures, 39 p.24–37, 2012."*
50. *"Mosallam A., Banerjee S., Enhancement in in-plane shear capacity of unreinforced masonry (URM) walls strengthened with fiber reinforced polymer composites Composites, 42, p.1657–1670, 2011."*
51. *"Santa-Maria H., Duarte G., Duarte A., Garib A., Experimental Investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in-plane shear load, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, No. 1627, August 1-6, 2004."*
52. *"Valluzzi M.R., Tinazzi D., Modena C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, Construction and Building Materials, 16 p.409–416, 2002."*
53. *"Marshall O.S., Sweeney S.C., In-plane shear performance of masonry walls strengthened with FRP. In 47th International SAMPE Symposium and Exhibition, p. 929–940, Long Beach, CA, USA, May 12-16 2002."*
54. *"Tinazzi D., Nanni A., Assessment of technologies of masonry retrofitting with FRP. Technical report. Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla; 2000."*
55. *"Silva P.F., Belaebi A., Li T., In-plane performance assessment of URM walls retrofitted with FRP. Masonry Soc J;24(1) p. 57–68, 2006."*
56. *"Turco V., Secondin S., Morbin A., Valluzzi M.R., Modena C., Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars, Composites Science and Technology, 66 p. 289–296, 2006."*
57. *"Konthesingha K.M.C., Masia M.J., Petersen R.B., Mojsilovic N., Simundic G., Page A.W., Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation, Engineering Structures, 50, p. 126– 136, 2013."*
58. *"Li T., Galati N., Tumialan G., Nanni A., FRP strengthening of URM walls with openings – experimental results. Masonry Soc J;23(1):47–57, 2005."*
59. *"Brandt A.M., Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Composite Structures, 86 p.3–9, 2008."*

60. *"Mechtcherine V., Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. Construction and Building Materials, 41 p.365–373, 2013."*
61. *"Barhum R., Mechtcherine V., Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading, Engineering Fracture Mechanics, 92 p.56–71, 2012."*
62. *"Guide for the design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, CNR-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome-CNR July 13th, 2004."*
63. *"Ortlepp R., Lorenz A., Curbach M., Column Strengthening with TRC: Influences of the Column Geometry onto the Confinement Effect, Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 493097, 5 pages, 2009."*
64. *"Brückner A., Ortlepp R., Curbach M., Textile reinforced concrete for strengthening in bending and Shear, Materials and Structures, 39:p. 741–748, 2006."*
65. *"Schladitz F., Curbach M., Torsion tests on textile-reinforced concrete strengthened Specimens, Materials and Structures, 45: p.31–40, 2012."*
66. *"Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M., Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels, Construction and Building Materials, 25 p.504–514, 2011."*
67. *"Parisi F., Iovinella I., Balsamo A., Augenti N., Prota A., In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix–grid composites, Composites 45 p.1657–1666, 2013."*
68. *"Kashyap J., Willis C.R., Griffith M.C., Ingham J.M., Masia M.J., Debonding resistance of FRP-to-clay brick masonry joints Engineering Structures 41 p.186–198, 2012."*
69. *"De Lorenzis, L., D. Tinazzi, A. Nanni, A., "Near Surface Mounted FRP Rods for Masonry Strengthening: Bond and Flexural Testing," Symposium, "Meccanica delle Strutture in Muratura Rinforzate con FRP Materials," Venezia, Italy, December 7-8, 2000."*
70. *"Tomazevic M., Lutman M., Pertrovic L. In plane behavior of reinforced masonry walls subjected to cyclic lateral loads. Report to the Ministry of Science and Technology of Republic of Slovenia, parts 1 and 2. Liubljana, Slovenia, 1993."*
71. *"Luccioni B., Rougier V.C., Shear behaviour of brick–mortar interface in CFRP retrofitted or repaired masonry, International Journal of Mechanical Sciences, 52 p.602–611, 2010."*
72. *"Ehsani M. R., Saadatmanesh H., Al-Saidy A., Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays, Journal of Composites for Construction, 1(1):17–25, 1997."*
73. *"Carozzi F.G., Milani G., Poggi C., Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry Structures, Composite Structures, 107 p.711–725, 2014."*
74. *"D'Ambrisi A., Feo L., Focacci F., Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry, Composites: Part B, 46 p.15–20, 2013."*
75. *"Luccioni B., Rougier V. C., In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials, Construction and Building Materials, 25 p.1772– 1788, 2011."*