République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Universitaire Yahia FARES de Médéa
Faculté De Technique
Département de Génie Civil

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil

Option: ***Materiaux en genie civil***

Thème :

ANALYSE EXPERIMENTALE DES MURS EN MACONNRIE RENFORCÉ PAR LA METHODE DE NSM (FRP).

Etudié par :

MERABET Mohamed

RAHMOUNI Bilal

Encadré par :

HERNOUNE.H

Promotion Juin 2018

RESUME

Diverses études sur le comportement des structures en maçonnerie porteuse à l'état ultime ont été réaliséesdans 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 des lamelles de fibre de carbone en appliquant la technique de NSM avec plusieurs dispositifs 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

Variousstudies on the behavior of the structures in carryingmasonry in an ultimate state werecarried out all over the world. In our country, thismethod of construction wasverymuchusedbefore the advent of the concrete, howeveritiscompletelymarginalizednowadays.

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 strips of carbon fiber applying the NSM technique, with several device tested under uniaxial loading until the rupture.

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 منعدما تاما في أيامنا.

في إطار هذا العمل وجهنا اهتمامنا نحو الدراسة التجريبية للجدران التي يستعمل في بنائها الأجر المثقب غير المدعومة والمدعومة بنسيج من صفائح 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 والبحث عن أفضل شكل للتعزيزات

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

SOMAMAIRE

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Introduction : ..... Erreur ! Signet non défini.

I .1.Historique..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2 types de maçonnerie : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1 Maçonnerie non armée : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.2. Appareillage de la maçonnerie : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.3Maçonnerie de pierre naturelle : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.4. Maçonnerie en brique de terre cuite :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.5. Maçonnerie en briques silico – calcaire : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.6. Maçonnerie en agglomérés de béton : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3. Le mortier de jointement ..... Erreur ! Signet non défini.

I.3.1 Mortier de ciment : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.2 Mortier de chaux hydrauliques : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.3 Mortier bâtard : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.4 Mortier de hourdage de maçonnerie : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.5 Mortier fabriqué sur chantier : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.6 Mortier industriel :..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4 Formulations des mortiers : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.1Propriété spécifique des mortiers : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5. Domaines d'utilisation des mortiers : ..... Erreur ! Signet non défini.

I.5.1. Mortiers et coulis de réparation : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.2. Contrôle de qualité du mortier : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.6 FONCTIONNALITÉS ET PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE.. Erreur ! Signet non défini.

1.6.1 Fonctionnalités de la maçonnerie : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.6.2 Pathologies de la maçonnerie : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7

Conclusion :……..….. Erreu r ! Signet non défini.

Chapitre II : COMPORTEMENT MÉCANIQUE

II. Comportement mécanique des structures en maçonnerie ..... Erreur ! Signet non défini.

II.1 Introduction :..... Erreur ! Signet non défini.

II.2 MODE DE RUPTURE DE LA MAÇONNERIE ..... Erreur ! Signet non défini.

II.2.1 Rupture par glissement : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.2 Rupture par basculement : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.3 Rupture par compression du coin : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.4 Rupture par cisaillement : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3 Comportement des murs en maçonnerie sous des charges de Cisaillement en diagonale : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.3.1 Essais de cisaillement : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.2 Résultats de l'essai :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.4 Comportement de la maçonnerie en compression : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.5 Résistance du cisaillement en fonction de la charge verticale (pré Compression) : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.6 Résistance des murs a la traction : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.7 Mécanisme de rupture sous compression axiale : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.8 Résistance à la compression de la maçonnerie : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.8.1 Détermination de la résistance à la compression : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8.2 Facteurs affectant la résistance à la compression des prismes :..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.9 Relation Contraintes-déformations des prismes en compression axiale :..... Erreur ! Signet non défini.

II.10 Module d'élasticité et coefficient de Poisson des assemblages de briques : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.10 Interface brique-mortier : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.11 Efficacité des briques par rapport aux prismes : ..... Erreur ! Signet non défini.

II.12 Rapport des résistances en compression de prismes et des panneaux : Erreur ! Signet non défini.

II .13 LES ETUDES EXPERIMENTALES CONCERNANT UN CHARGEMENT ..... Erreur ! Signet non défini.

UNIAXIAL..... Erreur ! Signet non défini.

II.13.1 Les travaux de Page ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.13.2 Travaux de SHAAN et TORRENTI (ENTPE)..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.13.2.1 Machine d'essai ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.13.2.2 Principe des essais ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.13.4.1 Caractéristiques des matériaux utilisés ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.13.4.2 Murets en brique silico - calcaire..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.14 CONCLUSION..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III :Techniques de renforcement de la maçonnerie

III. Introduction ..... Erreur ! Signet non défini.

III.1. Consolidation à base de briques ..... Erreur ! Signet non défini.

III.1.1 Utilisation des briques-liaison ou des moellons-liaison ... **Erreur ! Signet non défini.**

III.1.2 Utilisation des Contreforts..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.2. Consolidation a base d'acier :..... Erreur ! Signet non défini.

III.2.1 Les tiges métalliques : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.2.2 Renforcement par barres, câbles ou grillage métallique : **Erreur ! Signet non défini.**

III.2.3 Renforcement des arcs, des voûtes et des coupoles avec des barres d'acier taxidermie » ..... Erreur ! Signet non défini.

III.3 FIBRE POLYMERE RENFORCE (FRP) ..... Erreur ! Signet non défini.

III.4 Matrice cimentaire renforcée par textiles ..... Erreur ! Signet non défini.

III.5 CONCLUSION :……Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV : ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Matériaux utilises : ..... Erreur ! Signet non défini.

IV.2.Caractéristiques des matériaux :..... Erreur ! Signet non défini.

IV.3. Mortiers utilisés : ..... Erreur ! Signet non défini.

IV.3.1. Essai sur mortier frais..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.2. Essai sur mortier durci ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.3. Composition de mortier bâtard :..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.4 PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS .. Erreur ! Signet non défini.

IV.4.1 Résistance des Murets à la compression *:*..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.5 Construction des murets : ..... Erreur ! Signet non défini.

IV.5.1 : Caractéristiques des murets :..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.2.1 Matériel utilisé ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.5.2.2 Méthodologie de la confection des murets :..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.6. Matériaux de renforcement : ..... Erreur ! Signet non défini.

IV.6.1 Fibres de carbone Sika carboDur lamelles :..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.6.2 Résine d'imprégnation pour le système Sikadur®-30..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.6.3 mode d'application de fibre de carbone ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV 6.3.1 Renforcement avec NSM : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.6.3.2 LE MELANGE DES COMPOSANTS DE LA RESINE EPOXY SIKADUR -30 .. **Erreur ! Signet non défini.**

IV.6.4 DIFFERENT DISPOSITIFS DE FIBRE ADOPTE..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.7 Essai de compression uni-axiale sur des murets :..... Erreur ! Signet non défini.

IV.7.1 Présentation du dispositif d'essai ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.7.2 Paramètres expérimentaux : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.8 Conclusion :…… **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre V :Résultats et Interprétation

V.1.résultats expérimentale sur les matériaux ..... Erreur ! Signet non défini.

V.1.1 .Les briques..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.2. Les sable :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.2.1. Analyse granulométrique de sable Fin : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.2.2. Module de finesse :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.2.3. Résultats de L'équivalant de sable. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.2.4. Résultat de la masse volumique : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.1.3. Caractéristique mécanique du mortier :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2 RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MURETS.. Erreur ! Signet non défini.

V.2.1 Le comportement des assemblages de briques en compression axiale :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V2.1.1 Essai de compression uni-axiale sur des murets..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2.1.2ésultats expérimentaux ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2.1.3 Discussion de résultats : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2.2 Comportement des murs MR en cisaillement :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2.2.2 Comportement des murs non renforcés :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.2.3 Comportement des murs renforcés :..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.3.1 Résultats des murs renforcés par FRP NSM : ..... **Erreur ! Signet non défini.**

V.4
CONCLUSION…….... Erreur ! Signet non défini.

Introduction :

La maçonnerie est l'art de bâtir une construction par l'assemblage de matériaux élémentaires (pierre, briques terre cuite ou en béton aggloméré etc.), non liés ou liés entre eux par un mortier.

Le mortier est un constituant élémentaire dans la construction en maçonnerie, est traditionnellement faite en combinant de l'eau avec trois constituants : ciment Portland, la chaux hydratée et de sable.

Le mortier modifié par des chaux est fait en remplaçant une partie des liants traditionnels pour augmenter les caractéristiques qui peuvent inclure l'adhérence, la dureté, résistance à la flexion ou en traction, et une résistance aux produits chimiques.

I .1. Historique

La maçonnerie est l'un des matériaux de construction les plus anciens, l'origine constitués de briques d'argile, de pierres et de boue séchée. Par la suit les ouvrages de maçonnerie ont 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 I.1. Pyramide Maya de Tikal (Guatemala) - Pyramide de Khéops à Gizeh (Egypte),[1]

Qu'Efren, Khéops et Moquerions 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 I.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 I.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].

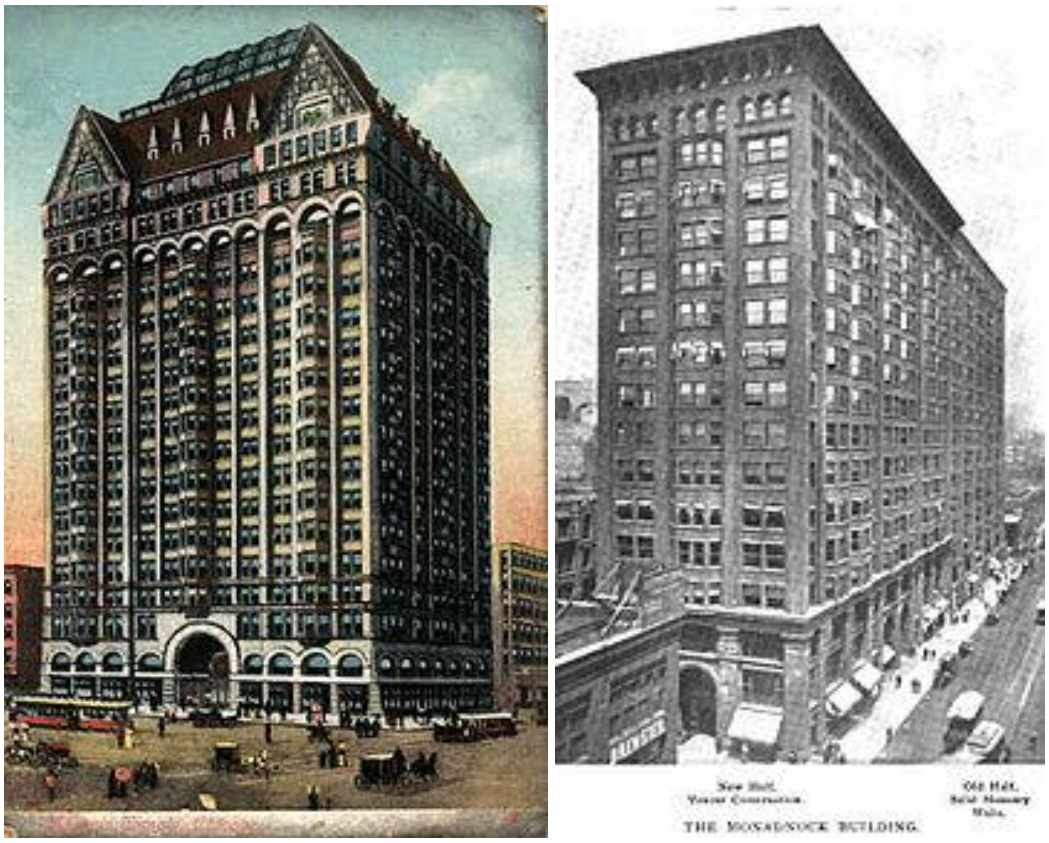


Figure I.3. Édifice Monadnock [Christine Beall, 1993].

I.2 Types de maçonnerie :

Un mur de la maçonnerie est composé de rangées de blocs reliées entre eux par 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.

Dans cet article nous présentons les différents types de maçonnerie et leurs modes de fabrication et leurs technologies de construction.

• Maçonnerie non armée.

• Appareillage de la maçonnerie.

• Maçonnerie de pierre naturelle.

• Maçonnerie en brique de terre cuite.

• Maçonnerie en briques silico-calcaire.

• Maçonnerie en agglomérés de béton

• Maçonnerie armée

I.2.1 Maçonnerie non armée :

La maçonnerie non armée (figure I.4) est généralement utilisée dans les constructions à L'horizontal où le ferraillage n'est pas nécessaire. C'est une maçonnerie où les sollicitations sont modérées.



Figure I.4. Maçonnerie non armé.

I.2.2. Appareillage de la maçonnerie :

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 1.5a).



a) pierre de taille b) maçonnerie cyclopéenne [22]

Figure 1.5. Exemple de maçonnerie.

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.

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.2.3Maçonnerie 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 côté "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 I.6).



Figure I.6. Pierre naturelle [1].

- **Moellons :**

Les pierres non gélives dites moellons, 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 la 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 imperméables. 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.

- **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 I.7).

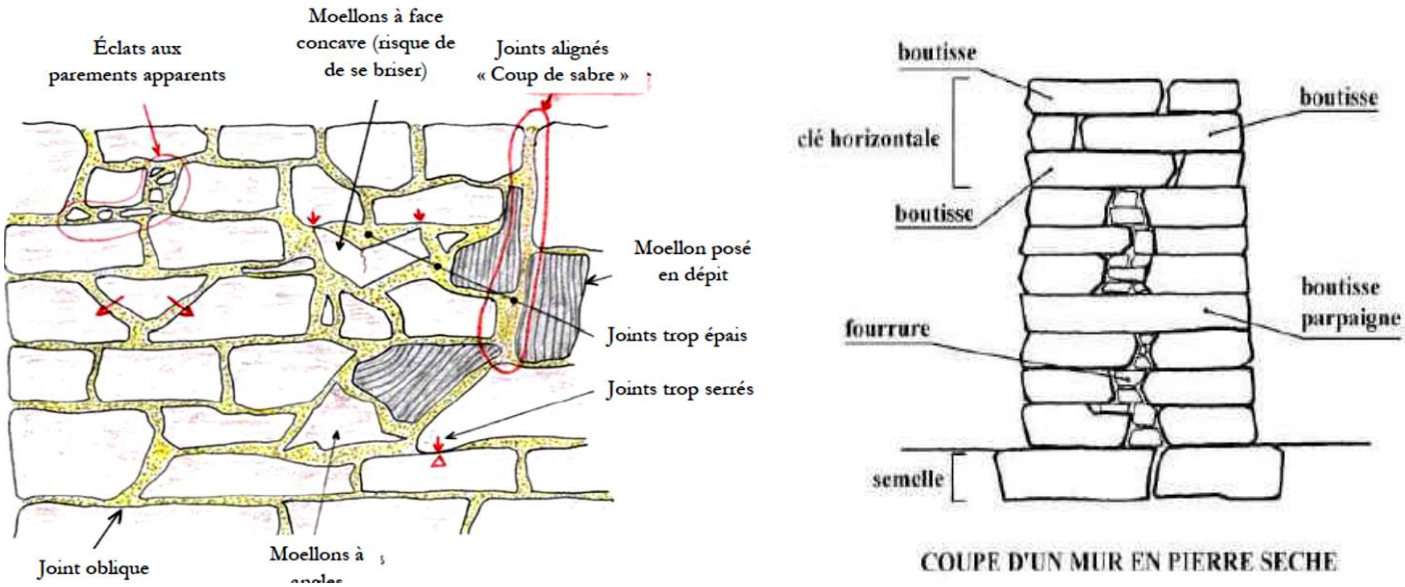


Figure I.7. Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990).

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.

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.2.4. Maçonnerie en brique de terre 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.

Grace à ces 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.

Généralement 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.



Figure I.8. 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.

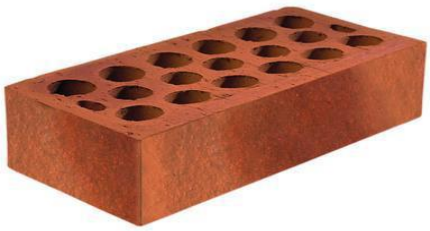


Figure I.9. Brique perforée.

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.10. 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.11. Brique monomère

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.:



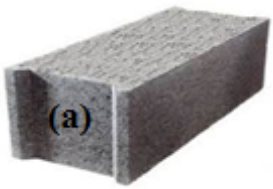
Figure I.12. Les composantes des briques silico – calcaire.



Figure I.13. Maçonnerie en briques silico – calcaire.

I.2.6. Maçonnerie en agglomérés de béton :

Le bloc de béton, désigné couramment sous le nom de parpaing est un matériau qui traverse toute l'épaisseur du mur à construire, il est de forme parallélépipédique et creux (figureI.14.b) ou plein (figure I.14.a) fabriqué en ciment à l'aide d'une machine appelée pondeuse



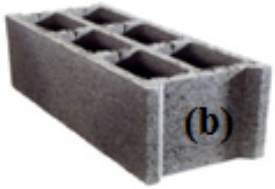




Figure I.13. Fabrication des parpaings (Sogerhwit 2016) (photos prises par les auteurs).

I.2.7 Maçonnerie armée :

La maçonnerie armée est un type de construction où les armatures sont incorporées dans les joints de mortier ou placées dans des trous remplis de coulis de mortier [GERTINY 2014, TOMAZEVIC 1999]. Leurs armatures peuvent être:

– Horizontales uniquement (figure.15.a-b).

– Horizontales et verticales (figure.15.c-d-e).

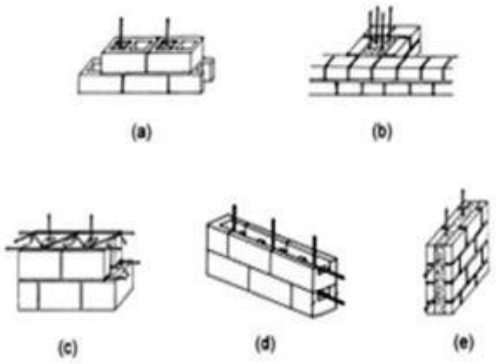




Figure I.14. Fabrication des parpaings (Sogerhwit 2016) (photos prises par les auteurs).

I.3. Le mortier de jointement

Dans le domaine bâtiment on trouve différents types de mortier, on cite :

I.3.1 Mortier de ciment :

Les mortiers de ciments sont très résistants, durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

I.3.2 Mortier de chaux hydrauliques :

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment. La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

I.3.3 Mortier bâtard :

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment en parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un à l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

I.3.4 Mortier de hourdage de maçonnerie :

On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm, le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau qui joue un rôle important ne peut être fixée à priori, en règle générale on adopte une valeur voisine de la moitié du poids du liant qui peut être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant.

I.3.5 Mortier fabriqué sur chantier :

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.
On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner.

Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids, soit en volume. Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.

I.3.6 Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

I.4 Formulations des mortiers :

La norme [ASTM C270] fournit une base pour la définition des mortiers de ciment et de chaux. Cette norme fournit une base pour cinq types de mortier différents en fonction de la résistance du mortier requise pour l'application.

Les noms de ces mortiers, élaborés en 1954, étaient basés sur les lettres alternantes de la phrase « **M**ASON W**O**R**K** ». Le mortier de type **M** offre la plus grande résistance. Le mortier de type **K** a la plus faible résistance à la compression.

L'annexe de la norme [ASTM C270] fournit une référence quant au type de mortier à utiliser dans certaines applications générales. Une version de cette liste est présentée dans le tableau I.1 suivant :

Emplacement	**Élément du bâtiment**
Extérieur, au-dessus du sol	Mur porteur, Mur non porteur, Parapet
Extérieur, au sol ou au-dessous du sol	Mur de fondation, mur de soutènement, regards, égouts, revêtements, allées et terrasses
Intérieur	Mur porteur
	Cloisons non porteuses

Tableau I.1. Annexe de la norme [ASTM C270] [5].

I.4.1Propriété spécifique des mortiers :

Les mortiers doivent avoir les propriétés spécifiques pour améliorer certain caractéristiques qui sont évalués dans un laboratoire.

La norme [ASTM C270] fournit des indications sur le type de mortier en fonction du dosage de la chaux par rapport au ciment (**Tableau I.2**).

Type de mortier	**Proportions par volume (matériaux cimentaires)**		**Ratio d'agrégat – Mesuré à l'état humide et lâche**
	Ciment	**Chaux**	
M	1	¼	Pas moins de 2¼ et pas plus de 3 fois la somme des volumes séparés des matériaux cimentaires
S	1	Plus de ¼ à ½	
N	1	Plus de ½ à 1¼	
O	1	Plus de 1¼ à 2½	

Tableau I.2. Spécification par proportion selon la norme [ASTM C270].

I.5. Domaines d'utilisation des mortiers :

I.5.1. Mortiers et coulis de réparation :

Comme son nom l'indique, ce type de mortier est utilisé pour le reprofilage du béton, la reconstitution de la protection des armatures, et le rétablissement de l'étanchéité. La figure I.18 illustre en gros une partie du cas pratique.

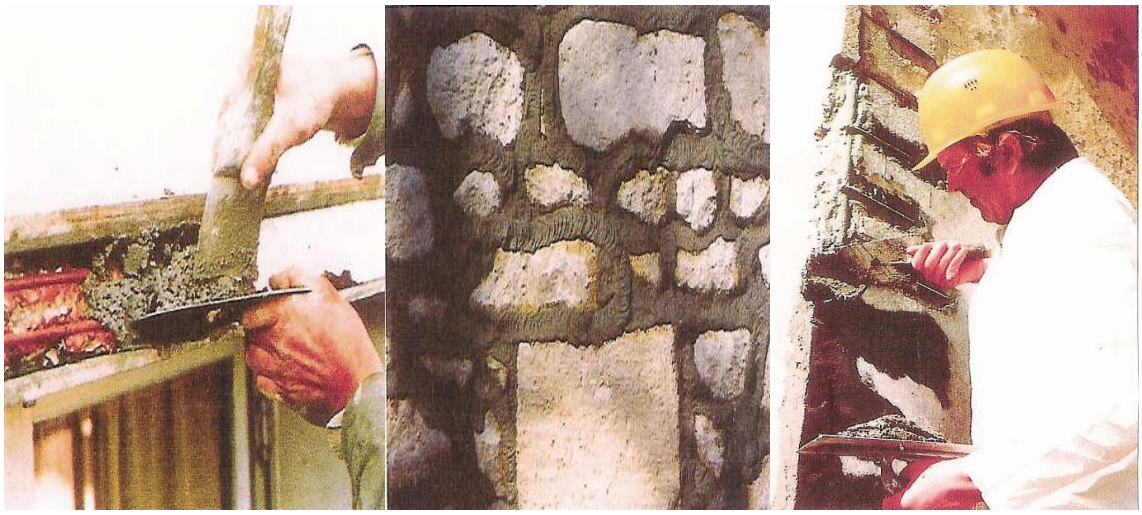


Figure I.15. Les mortiers et coulis de réparation.

I.5.2. Contrôle de qualité du mortier :

La performance des mortiers de faible résistance est tributaire de la qualité de leur mise en œuvre. Une inspection quand les joints sont dégarnis, nettoyés et découpés en angle droit, après un rejointoiement en profondeur (>25 mm) et quand le rejointoiement est complété, contribue à la qualité des travaux.

Les essais de contrôle de la qualité comprennent la résistance à la compression des cubes de mortier, le foisonnement du sable (soit le changement de volume imputable à la teneur en humidité du sable), la teneur en air du mortier frais, le rapport liant/sable et la consistance du mortier.

Le cône de Vicat est un outil qui permet aux responsables du contrôle de la qualité de vérifier rapidement au chantier la consistance du mortier et de surveiller sa perte d'eau par temps chaud.

A) Résistances mécaniques :

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment ;

- rapport C/E ;
- granulométrie et nature du sable ;
- énergie de malaxage et mise en œuvre ;
- protection les tous premiers jours ;

B) Retraits et gonflements :

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).Le gonflement des mortiers sont en général assez faibles.

➢ paisseur des joints de mortier :

En général, le mortier est la partie la plus faible de la maçonnerie, cependant, les plus Hautes résistances sont trouvées pour des faibles épaisseurs des joints. Ce facteur a été mis En œuvre dans les constructions anciennes, qui utilisaient dans la maçonnerie ou L'assemblage de colonnes des joints de mortier très fins. Il est habituellement recommandé D'utiliser des joints de mortier de 10 mm d'épaisseur. Hendry (1978) a montré que les Joints de 16 à 19 mm d'épaisseur réduisent la résistance à la compression jusqu'à 30% par Rapport au joint de 10 mm. Les recherches effectuées par Bakhteri et al (2004) ont montré Numériquement et expérimentalement que l'augmentation de l'épaisseur du joint de Mortier diminue la résistance à la compression des assemblages de briques. Ils ont montré Que l'optimum de l'épaisseur du joint est de 7.5 mm.

NB ; bans notre recherche l'épaisseur du joint est 1.00 cm.

1.6 FONCTIONNALITÉS ET PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE

1.6.1 Fonctionnalités de la maçonnerie :

La maçonnerie a de différents avantages fonctionnels dont la personne a besoin, La figure 1.16 représente quelques fonctionnalités de cette dernière :

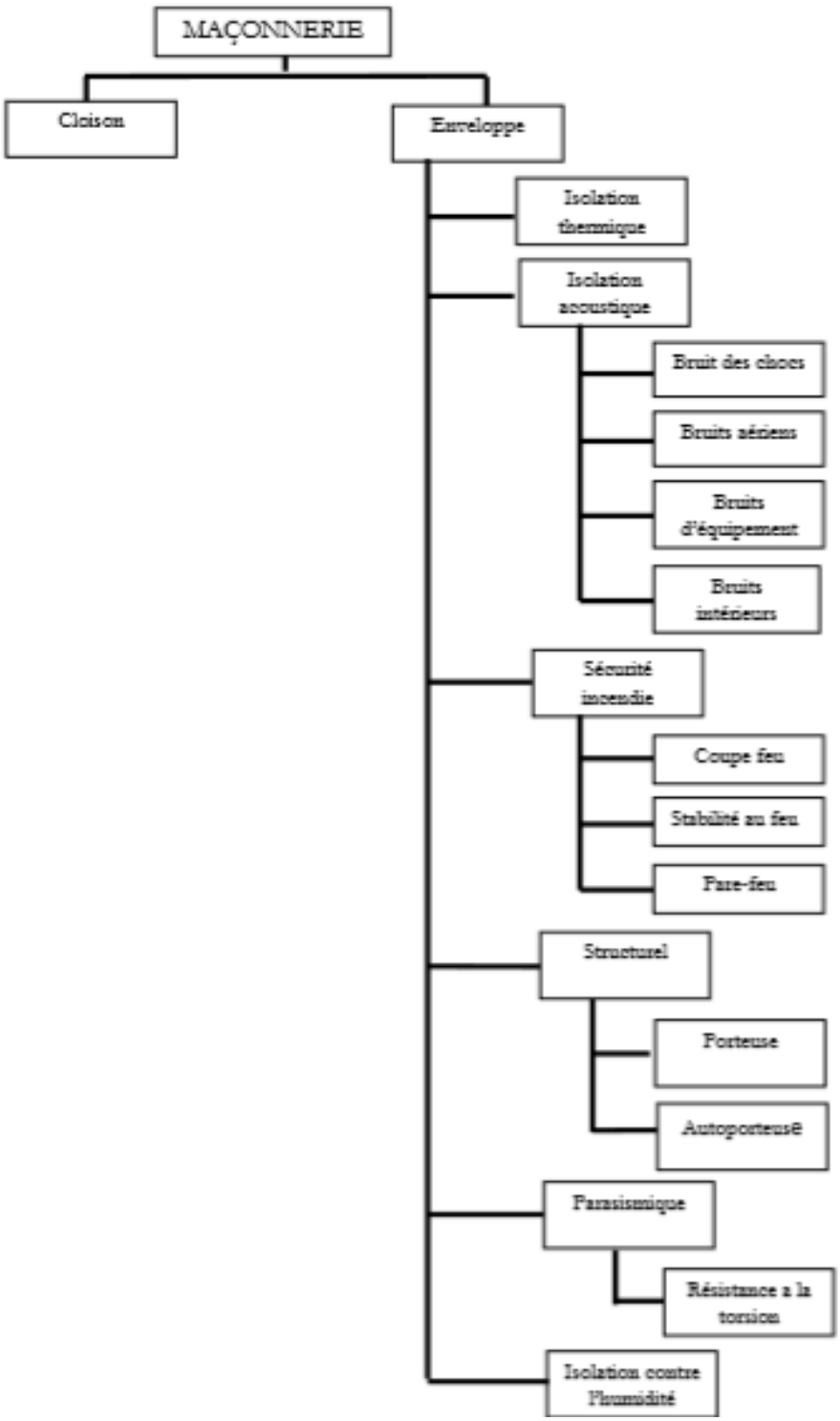


Figure 1.16 représente quelques fonctionnalités.

1.6.2 Pathologies de la maçonnerie :

L'analyse des sinistres montre en effet que, si la fonction « porteuse » ne donne guère lieu à déboires, par contre la fonction « paroi » est, elle, victime de fréquents problèmes d'origines diverses, que l'on peut répertorier selon quatre familles principales :

- ✓ Les désordres par tassement de fondation
- ✓ Les fuites des liaisons fenêtres-gros œuvres
- ✓ Les désordres des enduits

Les fissures de la maçonnerie, liées au fonctionnement de la paroi et dites pour cela « structurelles » sous l'effet de certaines sollicitations internes ou externes En dehors des problèmes strictement structurels (tassements, fondations, séismes, ...) on peut classer les pathologies en deux grandes catégories : celles liées à l'humidité et celles liées à la pollution atmosphérique. Les pathologies destructives peuvent affecter soit la brique soit le mortier de pose, soit les deux. En outre, les joints peuvent être dégarnis et ne plus jouer leur rôle.

C'est en fait la désagrégation du mortier de pose qui fragilise, puis détruit, les structures en maçonnerie de brique ; en effet, le mortier constitue à la fois la partie la plus "stratégique" et la plus faible de l'ensemble, et la rupture de sa continuité, pour quelque cause que ce soit, met en péril toute la Maçonnerie. Des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes, qui peuvent dépasser la résistance du mortier et le fissurer, Un tassement différentiel du sol entraîne l'enfoncement du mur dans sa partie la plus lourde ou la moins bien fondée, comme explique-la figure 1.20 sur l'influence du tassement sur un mur



Les fissures qui révèlent ce désordre prennent naissance à partir du dessous du niveau du sol. En se développant vers le haut, elles englobent des parties de maçonnerie qui se désorganisent en s'affaissant au rythme du tassement du sol.

Figure 1.17 cause de pathologie de la maçonnerie (BALANDIER, 1990)

En outre nous citons le cisaillement comme étant la conséquence des poussées horizontales perpendiculaires au plan des murs causés par les vents et séismes, ces dernières sont particulièrement dangereuses si le mur n'est pas suffisamment lourd et chargé, le cisaillement fait naitre des contraintes(traction sur le béton et compression dans la brique creuse) au niveau

des planchers et les murs en maçonnerie en se diffusant et concentrant obliquement en angle sous forme d'une voûte qui provoquent par la suite des contraintes tangentielles dans les briques qui finit par l'effondrement

Les trois principales causes de fissuration des murs extérieurs des pavillons sont : le retrait des mortiers, l'hétérogénéité des matériaux et la flexion des planchers. Ces souvent traversantes, sont à l'origine d'infiltrations d'eau. Il existe plusieurs causes de ces fissures dites structurelles, on en cite :

• Les variations de température ou d'humidité et cela est dû par exemple à la présence plusieurs matériaux sur la paroi et qui à cause de leur comportement différent à la Chaleur ou à l'humidité crées des fissures.

• L'absence ou la mauvaise mise en œuvre des chaînages horizontaux et verticaux au planchers,

• Une mauvaise réalisation des appuis et des linteaux au niveau des fenêtres.

• Les fissures de retrait différentiel des matériaux de la paroi, du fait de la perte en eau différents éléments. Étant donné que les blocs de maçonnerie sont liés les uns retraits ne peut s'effectuer librement et du ou cela provoque des phénomènes de rétraction est liée à la quantité d'eau présente nécessaire à la prise du mortier ou du béton (BALANDIER, 1990).

• La flexion et le retrait des planchers : le plancher haut du pavillon est réalisé à l'aide poutrelles préfabriquées en béton armé ou précontraint. Ce plancher peut subir une déformation dans sa partie centrale, elle s'accompagne des fois de la façade.

• La dislocation entre les blocs sous les déformations trop importantes de la construction.



Exemple de fissures dues au cisaillement
(France, 2011)

Figure 1.19 Pathologies de la maçonnerie

I.7 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 coût de réalisation et la facilité de transport dans les chantiers.

Notre intérêt dans cette étude est de prédire le comportement des structures par rapport au cisaillement et la valorisation des matériaux locaux.

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 joints de mortier.

Introduction : 2

I .1.Historique 2

I.2 types de maçonnerie : 4

I.2.1 Maçonnerie non armée : 5

I.2.2. Appareillage de la maçonnerie : 5

I.2.3Maçonnerie de pierre naturelle : 6

I.2.4. Maçonnerie en brique de terre cuite : 8

I.2.5. Maçonnerie en briques silico – calcaire : 10

I.2.6. Maçonnerie en agglomérés de béton : 11

I.3. Le mortier de jointement 12

I.3.1 Mortier de ciment : 12

I.3.2 Mortier de chaux hydrauliques : 13

I.3.3 Mortier bâtard : 13

I.3.4 Mortier de hourdage de maçonnerie : 13

I.3.5 Mortier fabriqué sur chantier : 13

I.3.6 Mortier industriel : 13

I.4 Formulations des mortiers : 13

I.4.1Propriété spécifique des mortiers : 14

I.5. Domaines d'utilisation des mortiers : 15

I.5.1. Mortiers et coulis de réparation : 15

I.5.2. Contrôle de qualité du mortier : 15

1.6 FONCTIONNALITÉS ET PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE 17

1.6.1 Fonctionnalités de la maçonnerie : 17

1.6.2 Pathologies de la maçonnerie : 18

I.7 Conclusion : 20

Figure I.1. Pyramide Maya de Tikal (Guatemala) - Pyramide de Khéops à Gizeh (Egypte),[1] 2

Figure I.2 Cathédrale de Strasbourg Construite en blocs de grès des Vosges[1]. 3

Figure I.3. Édifice Monadnock [Christine Beall, 1993]. 4

Figure I.4. Maçonnerie non armé 5

Figure 1.5. Exemple de maçonnerie 5

Figure I.6. Pierre naturelle [1]. 6

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

Figure I.11. Brique monomère 10

Figure I.12. Les composantes des briques silico – calcaire..... 11

Figure I.13. Maçonnerie en briques silico – calcaire. 11

Figure I.15. Les mortiers et coulis de réparation..... 15

figure 1.16 représente quelques fonctionnalités..... 17

Figure 1.17 cause de pathologie de la maçonnerie (BALANDIER, 1990) ... 18

Figure 1.19 Pathologies de la maçonnerie 19

II. Comportement mécanique des structures en maçonnerie

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons un état des connaissances sur :

- Mode de rupture de la maçonnerie.
- Comportement en cisaillement des murs en maçonnerie.
- Comportement en compression des murs en maçonnerie.
- Comportement des murs en traction.

II.2 MODE DE RUPTURE DE LA MAÇONNERIE

Le comportement des portiques remplis de maçonnerie est défini par les différentes modes de rupture cité ci-dessous (voir figure 2.1).

II.2.1 Rupture par glissement :

A cause de la formation de fissures horizontales en traction des joints causées par l'alternance de l'action sismique. Des plans de glissements se forment le long des fissures. Ce mode de rupture peut se produire pour les niveaux de charge verticale faible ou pour de faibles coefficients de friction. La rupture se produit par cisaillement du mortier.

II.2.2 Rupture par basculement :

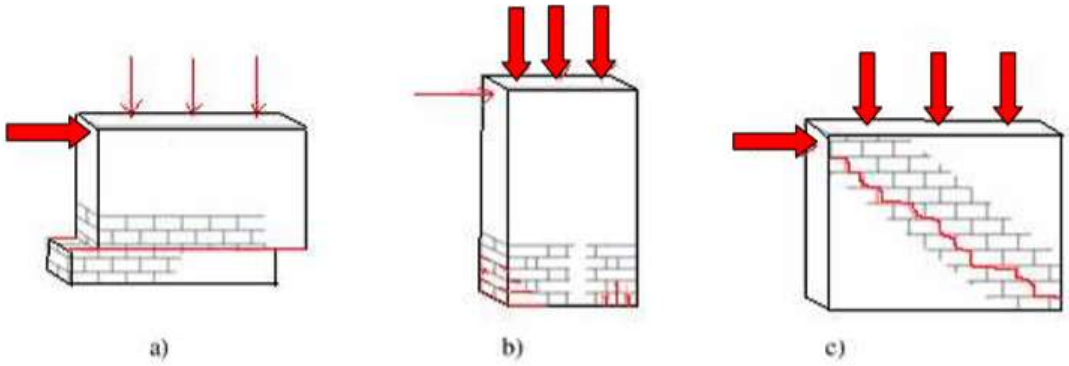
Le basculement se produit lorsque la charge ou le déplacement horizontal augmentent, le joint se rompe en traction, et l'effort tranchant est conduit par la maçonnerie en compression, la rupture finale est obtenue par basculement du mur et rupture en compression du coin.

II.2.3 Rupture par compression du coin :

Il s'agit d'une forme de rupture très proche de celle du basculement. Ce mode de rupture est basé sur la résistance en compression du coin comprimé.

II.2.4 Rupture par cisaillement :

La résistance ultime est gouvernée par la formation et le développement des fissures diagonales. Les fissures peuvent suivre le joint ou se former à travers les blocs. Le chemin dépend de la résistance relative du joint par rapport à celle du mortier, de l'interface joint-bloc.



(a) : rupture par glissement, (b) : rupture par basculement, (c) : rupture par cisaillement
Figure 2.1 Comportement des murs remplis de maçonnerie (GHANEM, 2013)

II.3 Comportement des murs en maçonnerie sous des charges de Cisaillement en diagonale :

D'un point de vue pratique, il s'avère nécessaire de fixer un critère pour définir la résistance d'un mur en maçonnerie sous charge latérale

De nombreuses normes proposent le calcul de cette résistance sur la base d'une contrainte de cisaillement nominale qui pourrait être déterminée expérimentalement

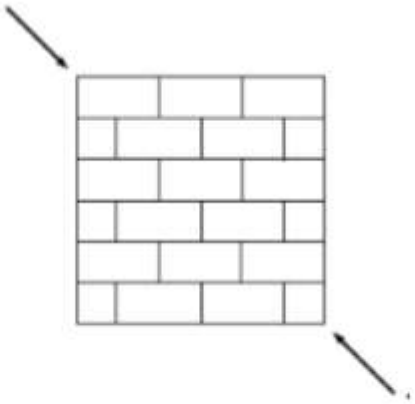


Figure 2.3 Mur sous charge en diagonale (LAFUENTE, 1990)

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

- Les essais de cisaillements caractérisant le mécanisme du type joint.
- Les essais sur petits murs soumis à une traction diagonale

II.3.1 Essais de cisaillement :

L'essai le plus simple à exécuter et à contrôler en laboratoire pour caractériser le comportement de la maçonnerie sous charge de cisaillement est celui sur figure 2.4. En ce qui concerne d'autres types d'essais, il a été constaté expérimentalement l'apparition d'efforts de flexion qui modifient les conditions de cisaillement recherchées.

Le modèle dont il est question est constitué d'un ensemble de trois blocs de maçonnerie ou celui du milieu se trouve coupé en 2. Les 2 moitiés sont séparés par un joint vertical vide d'1 cm de largeur Les charges de cisaillement s'appliquent sur cette pièce au milieu, tandis que les pièces externes peuvent être soumises à l'action de la charge verticale.

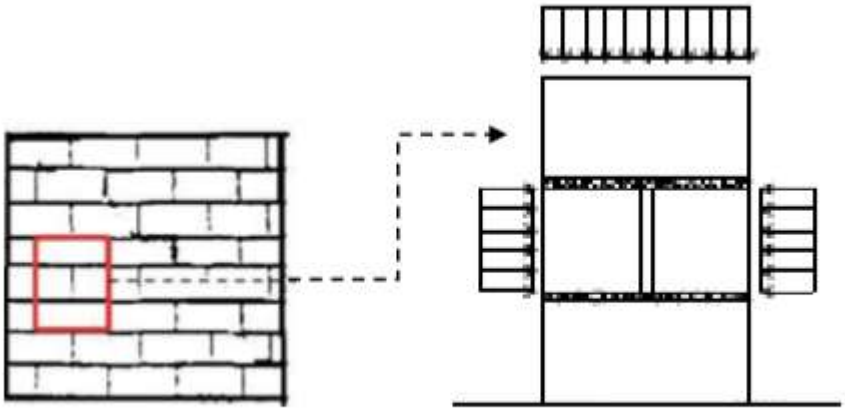


Figure 2.4 Essai de cisaillement (LAFUENTE, 1990)

II.3.2 Résultats de l'essai :

Les études de MÉLI et REYES témoignent de l'existence de différents types de comportement a la rupture (voir la figure 2.5)

- Rupture de la pièce en maçonnerie par cisaillement figure 2.5 – (a)
- Glissement au niveau des joints (rupture par adhérence) figure 2.5– (b).

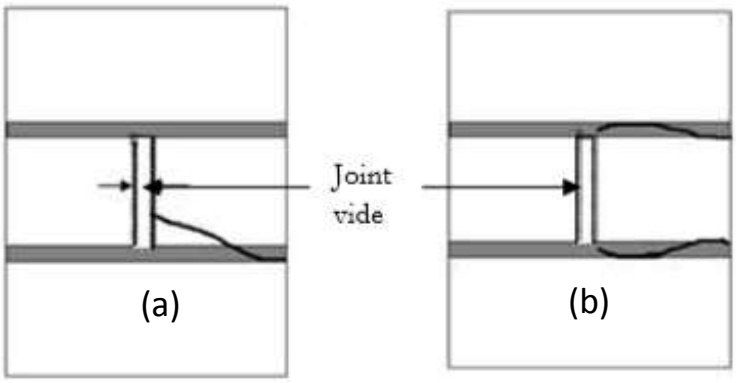


Figure 2.5 Schéma des fissurations (LAFUENTE, 1990)

Ce type d'essai aboutit à l'obtention de courbes telles que celles de la figure 2.6 qui permettent la détermination des coefficients d'adhérence et de friction (Cet Ø).

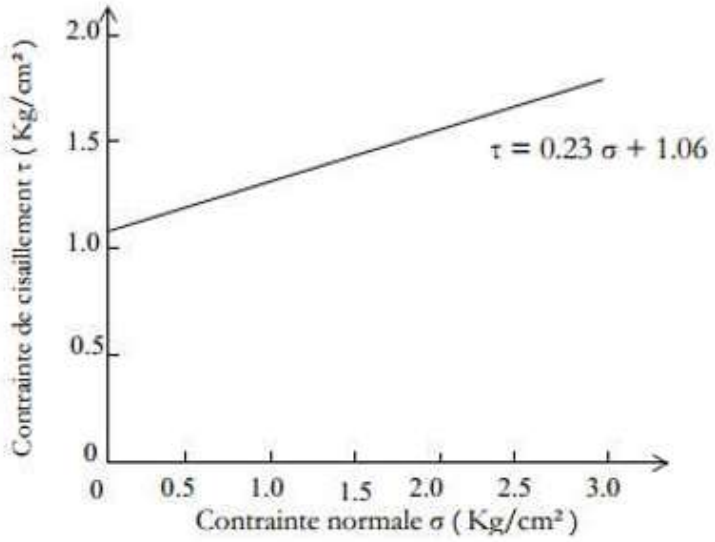


Figure2.6 : Résistance au cisaillement en fonction de la charge verticale

(LAFUENTE, 1990)

II.4 Comportement de la maçonnerie en compression :

La maçonnerie chargée uniformément atteint le domaine de la rupture par le développement des fissures parallèles à la direction de chargement qui sont dues aux contraintes de traction, dont la direction est perpendiculaire à celle des contrariantes de compression

La résistance à la compression de la maçonnerie est très faible vis-à-vis de la résistance nominale de compression des briques (fournie par les essais standards). Par contre la résistance à la compression de la maçonnerie peut être plus importante que la résistance nominale du mortier.

La résistance à la compression de la maçonnerie varie comme la racine carrée de la résistance normale des briques et comme la racine cubique ou quatrième de la résistance à la compression du mortier. A partir de ces observations on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les contraintes de traction causant les fissurations sont dues à déformations générées du mortier du joint. La résistance nominale à la compression des briques (essais standards) ne peut pas être exploitée directement pour déterminer la résistance des briques dans les murs car les modes de rupture d'une brique dans les deux situations sont différentes (CHERRABI.A, 1990)

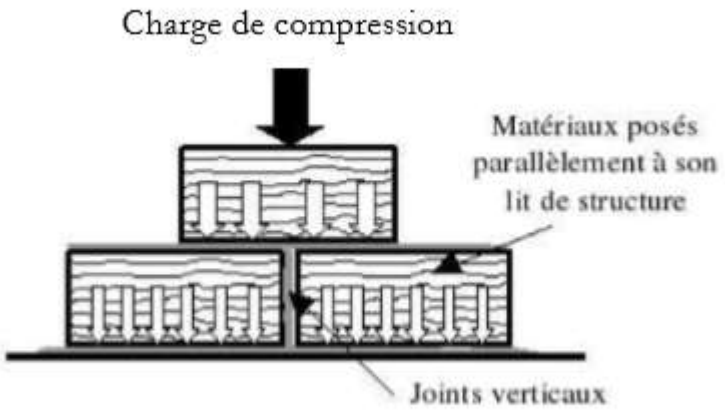


Figure 2.7 : charge de compression (CHERRABI.A, 1990)

II.5 Résistance du cisaillement en fonction de la charge verticale (pré Compression) :

C'est le cas des murs porteurs sollicités par des efforts verticaux. Plusieurs essais ont été réalisés sur des murs en maçonnerie soumis à ce type de chargement pour déterminer les résistances ultimes. Il existe une relation de type coulomb (figure2.8) entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré-compression c'est-à-dire il existe une résistance au cisaillement initiale qui dépend de l'adhésion entre les briques et le mortier a laquelle vient s'ajouter une composante de frottement proportionnelle a la precompression soit :

$$\tau = \tau_0 + \mu \, . \sigma_c \qquad (2.1)$$

Avec :

τ_o : résistance au cisaillement pour un effort normal nul

μ : oefficient de frottement apparent

σc: contrainte verticale de précompression

A la limite lorsque σc atteint la résistance de compression à la rupture, la résistance au cisaillement s'annule, la résistance au cisaillement dépend de la résistance du mortier et pour des murs en maçonnerie de brique ayant une résistance ultime à la compression entre 20 et 50 N/mm², τ_o =0.3 N/mm² pour un bon mortier et τ_o =0.2 N/mm² pour un mortier moyen. La valeur moyenne de μ est d'environ 0.4

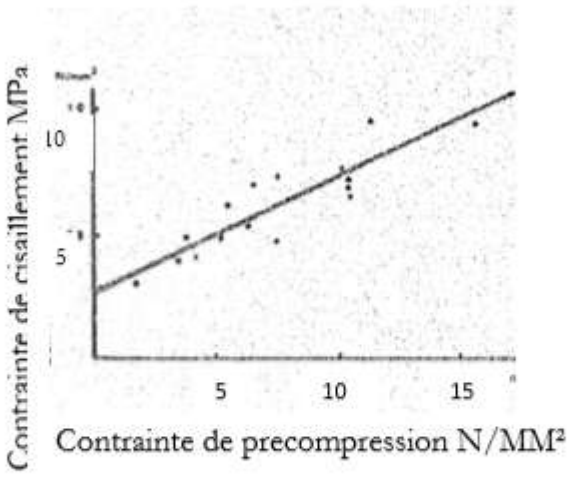


Figure 2.8 Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré-compression (CHERRABI.A, 1990)

II.6 Résistance 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 à la traction est habituellement prise égale à zéro.

Cette 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 fabriqués et pourraient être soulevés et transportés sans rupture.

La résistance à 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 celui en travers de la brique (ASTM C952-76) illustré dans la figure (2.9). les résultats de cet essai indique que la résistance à la traction directe se situe entre un tiers et deux-tiers du moment de flexion.

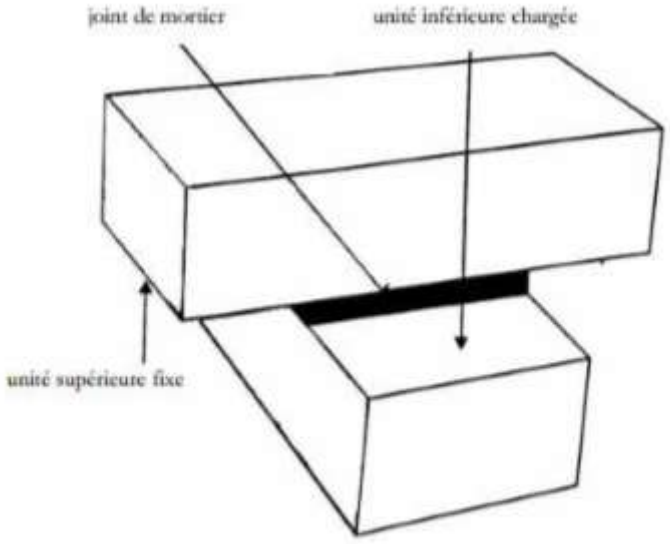


Figure 2.9 Résistance à la traction (ASTM, 1976)

II.7 Mécanisme de rupture sous compression axiale :

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

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

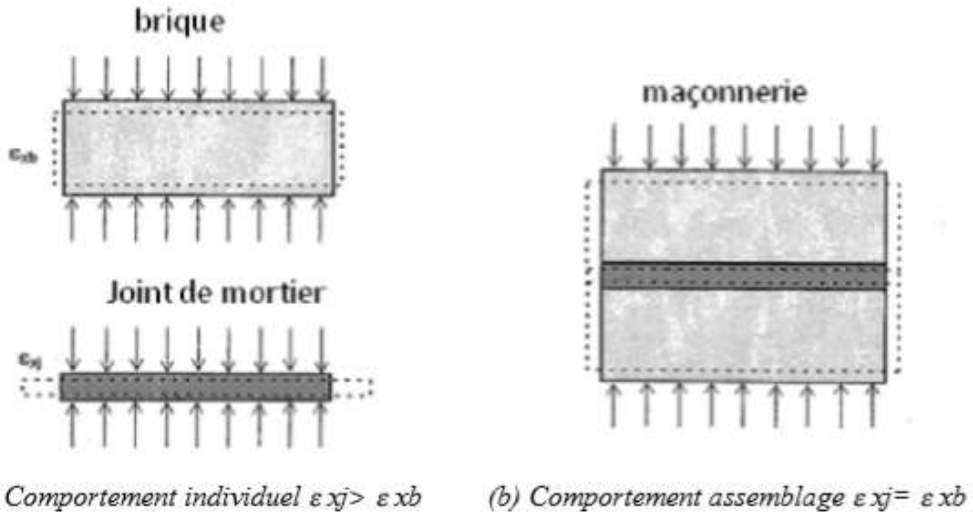


Figure 2.10 : Comportement individuel et de l ' assemblage des briques et du mortier en compression

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

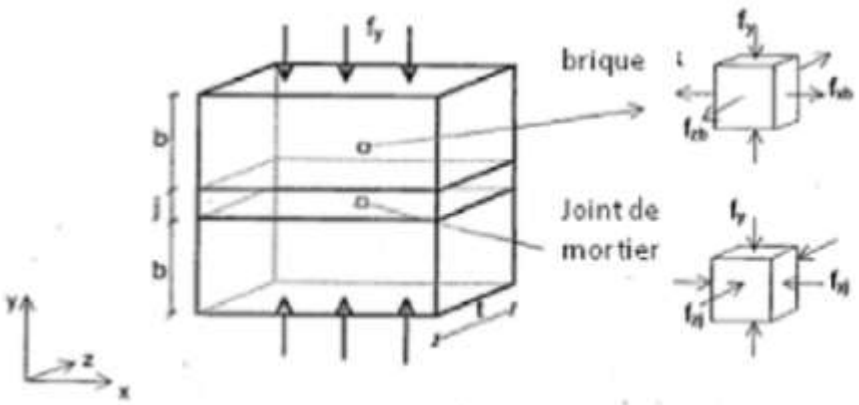


Figure 2.11 : Etat de contraintes dans les briques et le joint de mortier

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

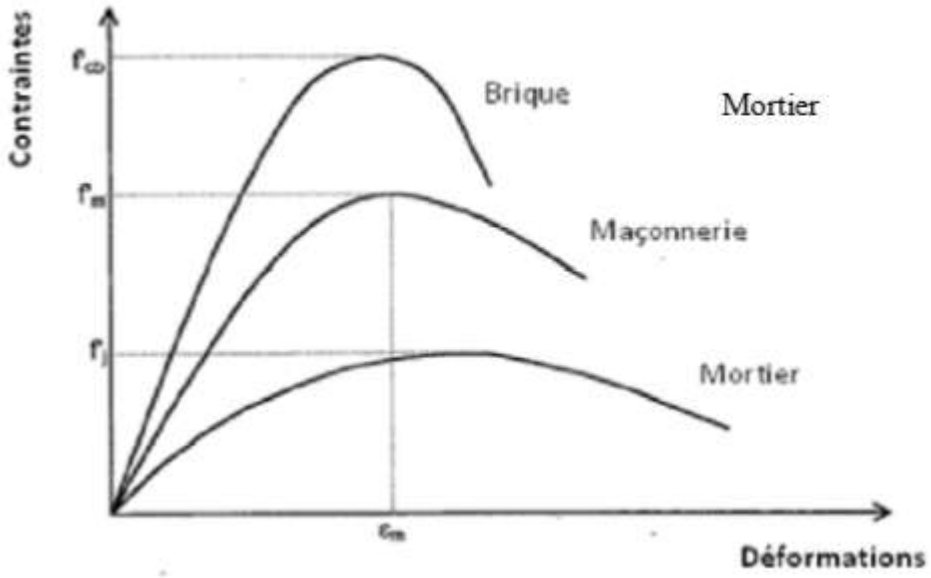


Figure 2.12 : Relation type contrainte-déformation du mortier, brique et assemblage de briques

La figure 2.12 montre les relations contraintes-déformations type pour le mortier, les briques et les assemblages d'unités de briques. On constate que la résistance à la compression des briques est généralement supérieure à celle du mortier, mais la résistance à la compression des assemblages des unités de briques est inférieure à celle des unités de briques, et supérieure à celle du mortier, puisque le mortier se trouve confinée par un effet triaxial.

II.8 Résistance à la compression de la maçonnerie :

Les assemblages des unités de briques présentent un comportement optimum quand ils sont soumis à la compression. La résistance à la compression est un des paramètres les plus importants pour caractériser les murs en maçonnerie, et a été l ' objet de plusieurs recherches effectuées par les chercheurs et les ingénieurs. Il y a d'autres paramètres qui influencent la résistance à la compression des assemblages en maçonnerie, tel que la résistance à la compression du mortier, des unités de briques et l'épaisseur des joints de mortier. La qualité d'exécution des murs a aussi une grande influence sur la résistance à la compression des assemblages.

II.8.1 Détermination de la résistance à la compression :

Les prismes sont des assemblages de briques superposés. Ils sont utilisés pour déterminer la résistance caractéristique des assemblages de briques testés en compression axiale perpendiculairement aux joints de mortier.

La résistance à la compression axiale des prismes (f'm) est mesurée généralement sur des assemblages dont les rapports hauteur/épaisseur (h/t) est égal à 5.0 pour les prismes de briques et à 2.0 pour les prismes de blocs de béton. Pour des rapports différents, des coefficients de correction doivent être introduits pour tenir de l'effet de l'élancement, c'est-à-dire le rapport (h/t).

Les normes canadiennes ont introduit les coefficients suivants :

Hauteur/ épaisseur (h/t)	Facteurs de correction	
	Prismes de briques	Prismes de blocs de béton
1.5	**NA**	**0.86**
2.0	**0.73**	**1.00**
2.5	**0.80**	**1.11**
3.0	**0.86**	**1.20**
3.5	**0.91**	**NA**
4.0	**09.5**	**NA**
4.5	**0.98**	**NA**
5.0	**1.00**	**NA**

Tableau 2.1 : Coefficients de correction (CAN S304 M78)

En se basant sur ces résultats, on peut conclure que la résistance à la compression diminue lorsque le nombre des joints augmente. Il a été donc recommandé que la résistance à la compression soit évaluée en utilisant des prismes n'ayant pas moins de trois joints et pas plus de quatre joints.

II.8.2 Facteurs affectant la résistance à la compression des prismes :

La résistance à la compression des prismes dépend principalement des caractéristiques mécaniques des deux constituants essentiels la brique et mortier, elle dépend également d'autres paramètres, qui seront cités brièvement ci-après :

- **Résistance des unités de briques :**

La résistance à la compression des prismes ou assemblages de briques dépend principalement de la résistance des unités de briques, mais pas d'une façon proportionnelle. En outre la résistance à la tension latérale est la caractéristique la plus importante, puisque la rupture des prismes des briques se fait justement par tension latérale, ce qui justifie l'apparition de fissures verticales le long des prismes chargés en compression axiale. Merzoud M a montré que la résistance à la compression des briques affecte considérablement la résistance à la compression de l ' assemblage de briques sous compression axiale.

Pour sa part .Houti E.B (2004), a montré que les murets en parpaings présentent une résistance à la compression supérieure à ceux des briques en terre cuite.

- **Résistance du mortier :**

Dans la majorité des cas, la résistance à la compression des unités de briques a une grande influence sur la résistance à la compression des prismes en compression que la résistance du mortier. Mais pour une certaine gamme donnée de briques, la résistance à la compression des assemblages de briques dépend de la résistance du mortier.

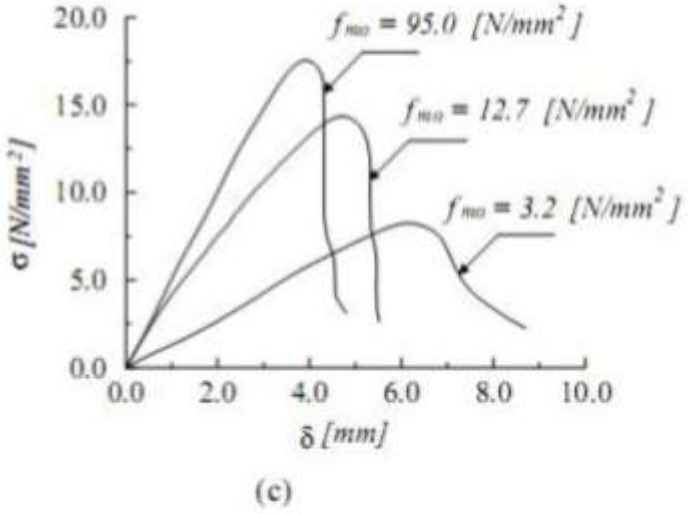


Figure 2.13 : diagramme typique expérimentale contrainte-s déplacements pour un prisme de dimensions 500 × 250 × 600 [mm3] avec : fmo la résistance du mortier à la compression

Une étude expérimentale effectuée par Kfoury (1986) sur le mortier en vue de la détermination de la résistance à la compression et à la traction a permis de mettre en relief quelques caractéristiques importantes de ce matériau qui se résument par ce qui suit :

1) A des âges élevés le mortier a une résistance à la compression plus au moins plus grande. par exemple à l'âge de 4 jours la résistance trouvée et de l'ordre de 7.6 MPa tandis à l'âge de 28 jours cette résistance passe à 9.0 MPa soit une augmentation de 18%.

2) La résistance à la compression est à peu près sept fois plus grande que la résistance à la traction.

3) Les propriétés des liants et du matériau composant le mortier influencent énormément ces résistances, la marge est assez élevée et peut atteindre jusqu'à 2 .4 fois d'un mortier à un autre.

- Epaisseur des joints de mortier :

En général, le mortier est la partie la plus faible de la maçonnerie, cependant, les plus hautes résistances sont trouvées pour des faibles épaisseurs des joints. Ce facteur a été mis en œuvre dans les constructions anciennes, qui utilisaient dans la maçonnerie ou l'assemblage de colonnes des joints de mortier très fins. Il est habituellement recommandé d'utiliser des joints de mortier de 10 mm d'épaisseur. Hendry (1978) a montré que les joints de 16 à 19 mm d'épaisseur réduisent la résistance à la compression jusqu'à 30% par rapport au joint de 10 mm. Les recherches effectuées par Bakhteri et al (2004) ont montré numériquement et expérimentalement que l ' augmentation de l ' épaisseur du joint de mortier diminue la résistance à la compression des assemblages de briques. Ils ont montré que l'optimum de l'épaisseur du joint est de 7.5 mm.

Orientation des joints de mortier : Les essais menés par Abdou L et al (2005) conduisent à deux types de rupture, ces deux types sont en fonction de l'angle d'orientation des joints de mortier : - La fissuration des briques et du mortier. - La fissuration de l'interface brique/mortier.

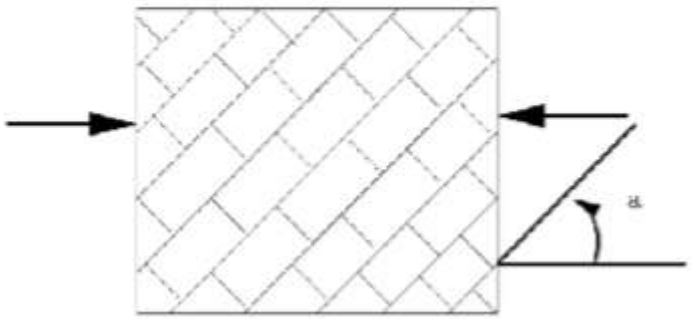


Figure 2.14 : Influence de l ' orientation des joints de mortier sur le mode de rupture de la maçonnerie

Pour a < 30° : Rupture par fissuration verticale le long des briques et du mortier.

Pour a $30° < a < 45°$: Rupture par fissuration verticale le long des briques et du mortier mais aussi au niveau de l'interface briques /mortier.

Pour a $45° < a < 70°$: Rupture au niveau de l'interface briques /mortier.

Pour a $> 80°$: Rupture par fissuration verticale le long des briques et du mortier mais aussi au niveau de l'interface briques /mortier.

- **Coefficient d'absorption :**

Les maçonneries sont mises en œuvre avec un rapport d'Eau/Ciment beaucoup plus important que d'habitude, nécessaire à l ' hydratation du ciment, pour pallier à l ' eau absorbée par les briques. L ' évaluation du coefficient d ' absorption des briques est importante, nous permet d'évaluer l'eau et le temps nécessaire pour saturer les briques. Sahlin (1971) a montré que la résistance à la compression des assemblages de briques diminue, plus que le coefficient d'absorption croit.

- **Qualité de travail :**

La qualité de travail a une grande influence sur la résistance à la compression des assemblages de briques. Des études antérieures ont montré que les joints horizontaux non finis réduisent la résistance à la compression de 33% relativement aux joints bien finis et remplis.

II.9 Relation Contraintes-déformations des prismes en compression axiale :

Les caractéristiques des courbes contraintes-déformations des assemblages des briques dépendent des caractéristiques des matériaux les constituants, c'est-à-dire les briques et le mortier. Etant donné qu'on est en présence de deux matériaux hétérogènes, formant un assemblage automatiquement hétérogène, il serait difficile alors de connaitre la relation contrainte-déformation d ' un assemblage de briques à la base uniquement des caractéristiques des deux matériaux, puisqu'il y a également d' autres paramètres qui peuvent influencer ce comportement, tel que l'épaisseur des joints, la qualité de travail, le taux d'absorption et le coefficient de frottement entre les briques et le mortier. Partant de ces hypothèses, il serait difficile de déterminer théoriquement le comportement des assemblages des briques, mais il est plus loisible de faire des essais expérimentaux pour déterminer la courbe contrainte-déformation des assemblages de briques.

II.10 Module d'élasticité et coefficient de Poisson des assemblages de briques :

Le module d'élasticité des assemblages de briques est déterminé dans la partie linéaire des courbes contraintes-déformations. Il est déterminé soit en plaçant des jauges de déformations au milieu du prisme, et faire des lectures automatiques à chaque pas de chargement, en utilisant un minimum de dix pas de chargements. Il se mesure également en mesurant les déplacements à l ' aide de micromètres ou mieux encore à l'aide des capteurs de déplacements électroniques (LVDT ou DCDT). Ces moyens de mesure permettent de

déterminer le module d'élasticité moyen des assemblages de briques. Plusieurs auteurs ont déterminé des relations expérimentales ou empiriques entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des assemblages des briques

II.10 Interface brique-mortier :

Vermeltfoort A.T et al (2007) ont montré que les grandes variations de matériau se trouvent à l'interface brique-mortier. Ces variations sont sous la forme de lien d'interface avec une zone centrale liée entourée de fissures. Et les forces se concentrent dans la partie centrale et les variations de contraintes ont lieu près de l'extrémité des fissures engendrant l'écaillage des briques.

Fouchal (2006,2007) s' est intéressée à la modélisation de l' endommagement dans les interfaces briques-mortier dans les murs en maçonneries. A l ' aide d ' une étude expérimentale préliminaire, elle a déduit le comportement mécanique macroscopique de l'interface et utilisé un modèle avec le code LMGC90.

Le modèle n'étant pas suffisamment pertinent pour le problème considéré, elle a choisi de développer un nouveau modèle, le modèle asymptotique, basé sur des techniques d'homogénéisation.

La modélisation asymptotique de l'endommagement occasionné dans les interfaces entre le mortier et la brique tient compte de certains phénomènes mécaniques qui gouvernent leur rupture tels que le glissement et le frottement à l'échelle microscopique, ainsi que de l'endommagement (normal et/ou tangentiel).

En adoptant une approche asymptotique en faisant tendre l'épaisseur de l'interface vers zéro, nous avons pu passer d'un comportement volumique à un comportement surfacique



Figure 2.15 : Schématisation du modèle asymptotique (Fouchal 2006,2007)

II.11 Efficacité des briques par rapport aux prismes :

Sahlin (1971) a défini un « facteur d'efficacité » qui est le pourcentage du rapport de la résistance à la compression des prismes sur la résistance à la compression des unités de maçonnerie. Il a été observé à partir de divers essais déjà faits, que ce facteur d'efficacité est de l'ordre 10 à 40% pour les briques d'argile, et peut atteindre 50% pour les briques de chaux et sable et de 50 à 80% pour les briques de béton.

Merzoud M et al (2007) ont trouvé que pour le cas de briques de la région d'Amérique du Nord, les facteurs d'efficacité étaient assez comparables à ceux mentionnés par Sahlin, et

sont de l'ordre de 36% pour les briques de béton, de 52% pour les briques de chaux et sable, et de 19.62% pour les briques d'argile (voir figure 1.11). Pour les briques de la région d'Annaba, les facteurs d'efficacité varient entre 62.5, 78.2 et 72.9 pour BBS, BBZ et BBB respectivement (figure 1.12)

En observant les résultats des facteurs d'efficacité, et en sachant que la rupture des prismes de briques d'argile a eu lieu par le développement de fissures de tension parallèles à l'axe de chargement, il est assez évident que la facteur d'efficacité des prismes de briques d'argile soit le plus faible, parce que l'aire qui devrait reprendre la tension latérale est trop faible à l'endroit des trous, où la rupture a eu lieu.

Dans le cas de briques pleines de chaux et sable et de béton, on remarque que le coefficient d'efficacité est plus faible dans le cas de briques de béton, ceci est certainement lié à la résistance à la tension latérale de deux types de briques, qui parait être plus faible dans le cas de briques de béton. Ceci s'explique par le fait que même pour un coefficient d'efficacité de l'ordre de 50%, la rupture des prismes de briques de chaux et sable a débuté par effritement du mortier avant d'atteindre les briques ; par contre la rupture des prismes de briques de béton a lieu par apparition de fissures longitudinales à travers les briques, parallèles à l' axe de chargement. Pour les briques de la région d'Annaba, les facteurs d'efficacité sont très importants, du fait que la rupture aura lieu par perte de résistance des briques, et l'excédent de charge ne pourra pas être transmis aux briques des rangées inférieures pour le transmettre à tout le panneau.

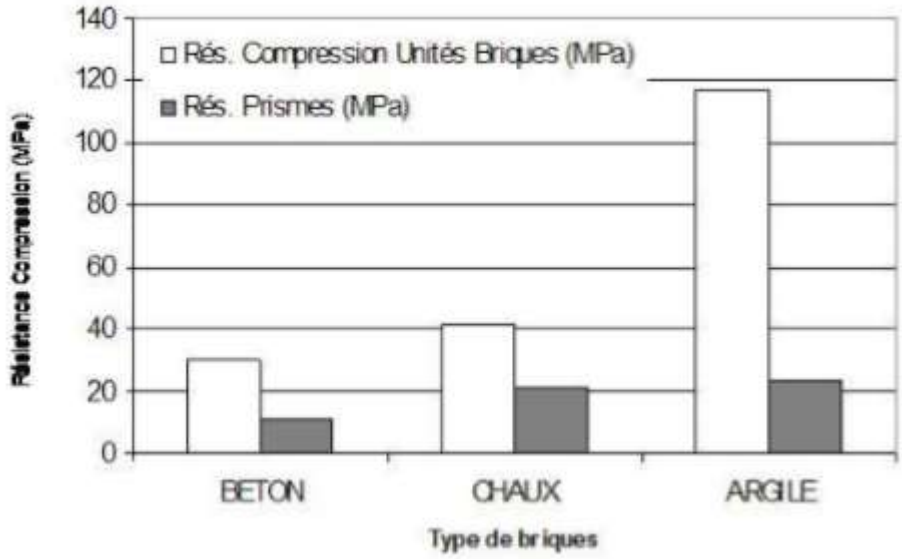


Figure 2.16 : Résistance à la compression des prismes versus Résistance des unités de maçonnerie des briques de l ' Amérique du Nord, Merzoud et al (2007)

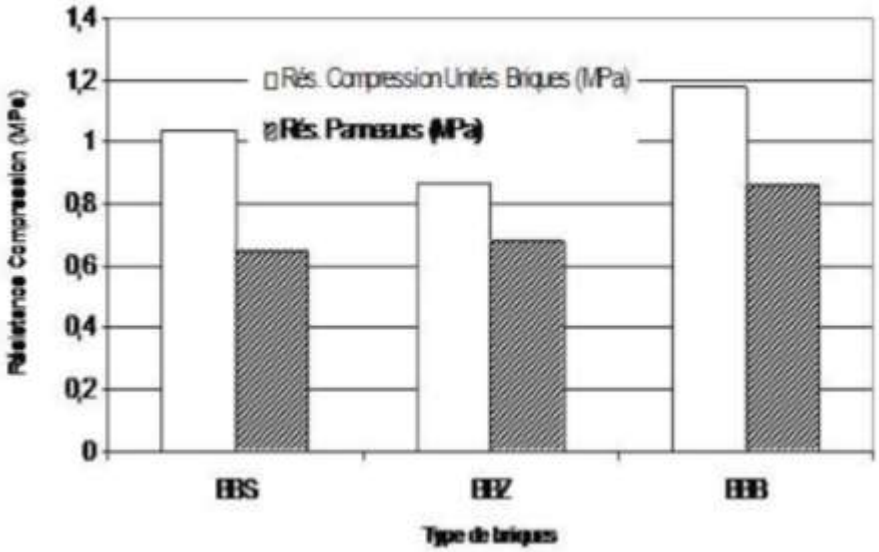


Figure 2.17 : Résistance à la compression des prismes versus Résistance des unités de maçonnerie des briques de la région d ' Annaba, Merzoud et al (2007)

II.12 Rapport des résistances en compression de prismes et des panneaux :

La résistance caractéristique à la compression doit être mesurée sur des panneaux à grandeur réelle, ou à la rigueur sur des panneaux comportant des joints horizontaux et des joints horizontaux. Pour commodité et simplicité des essais, les normes ASTM E447, ont défini des essais des résistances caractéristiques en compression axiale sur des prismes, formés par la superposition de cinq briques. Les résultats donnés par l'un ou l'autre des essais ont donné généralement des résultats différents. Jaafar M.J et al (2006) ont effectué justement des essais des blocs en béton creux, des prismes et de murs, ils ont trouvé des corrélations entre les différentes résistances. Ils ont montré que la résistance à la compression des prismes est de 0.47 fois la résistance à la compression des unités de blocs, qui correspond à un coefficient d'efficacité de 47%. La résistance à la compression des murs a été évaluée à 0.83 fois la résistance à la compression des prismes. La résistance à la compression des murs a été déduite de ces corrélations à 0.39 fois la résistance à la compression des unités de blocs. De cette étude, on pourra en tirer la conclusion que la résistance à la compression des prismes de blocs de béton creux est de l'ordre de 1.20 fois la résistance à la compression des murs, cette augmentation est due à la présence de plusieurs joints verticaux qui sont responsables de la diminution de la résistance à la compression des murs par rapport aux prismes.

II .13 LES ETUDES EXPERIMENTALES CONCERNANT UN CHARGEMENT UNIAXIAL

Nous présentons dans cette partie les travaux qui ont été développé dans la littérature

Concernant l'étude de la maçonnerie non confinée et non armée sous chargement uniaxial.Diverses études ont été réalisées concernant le comportement de la maçonnerie, Benjamine[Benjamine, 1985] Stafford et col. [Stafford et col, 1970] et Samarasinghe et col. [Samarasingheet col, 1980]. Toutefois les études les plus intéressantes sont celles de Page [Page, 1981], Shaanet Torrenti [Shaan et col, 1990], Pume [Pume, 1998] et Hakimi et col. [Hakimi et col, 1998].

II.13.1 Les travaux de Page

a) Page [Page, 1981] a testé des panneaux de maçonnerie de 360 x 360 mm sous des sollicitations uniaxiales et selon cinq différentes orientations (θ) du plan des joints (θ= 0,22.5, 45, 67.5 et 90°). Lorsque θ= 0 et 90° (figure 3.6), la fissuration intervient parallèlement à l'axe de chargement et dans un plan perpendiculaire à la surface libre du panneau ; lorsque θ= 22.5, 45, 67.5 (figure 3.6), la fissuration prend la forme d'un escalier suivant les joints horizontaux et verticaux.

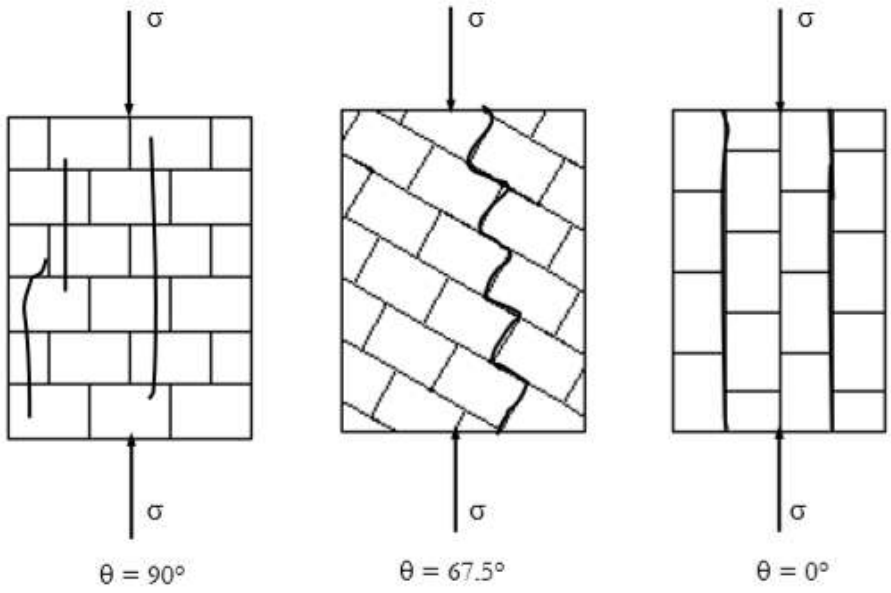


Figure 2.18 Mode de rupture selon l'orientation de la sollicitation par rapport au plan des joints

Cette étude met en évidence des modes de rupture qui dépendent de l'orientation du plan de joints par rapport à l'axe de chargement. Mais ces modes de rupture dépendent aussi des caractéristiques mécaniques des matériaux constituants. Ainsi l'orthotropie des briques pourrait avoir une influence sur le mode de rupture (celles de Page étaient isotropes).

b) Page [Page, 1978] a fait des études numériques et expérimentales sur des panneaux de maçonnerie en terre cuite de 500x240x54 mm3 soumise à un chargement uniaxial (figure 3.7).

Les panneaux de maçonnerie ont été traités pendant 6 jours. 24 heures avant l'écrasement, les panneaux ont été exposés à l'air libre. La cure de 7 jours a été choisie par l'auteur pour une question de convenance ; le développement de la résistance à la compression de la maçonnerie est rapide, atteignant en 7 jours entre 70% à l00% de la résistance à 28 jours.

Les résultats obtenus par Page [Page, 1978] sont les suivantes :

- Lorsque l'orientation du plan de joint θ est égale à 90°, la rupture se produit par une fissuration due à la traction dans le joint du mortier parallèle à l'axe de chargement.

- Lorsque l'orientation du plan de joint θ est égale à 70°, 60° et 30°, le mode de rupture change avec le rapport entre l'effort de cisaillement et l'effort normal ($\tau/\sigma n$).

- Pour des rapports élevés de $\tau/\sigma n$, la rupture s'est produite uniquement dans le joint.
- Pour des faibles valeurs de $\tau/\sigma n$, la capacité de l'ensemble est importante. Il y'a eu une rupture combinée de brique et mortier. L'auteur [Page, 1978] a observé de grands déplacements de cisaillement dans les joints avant que la rupture de la brique ne se produise. Cette capacité élevée est attribuée à la résistance de frottement additionnelle dans le joint dû à l'effort normal de compression.
- Pour de très faibles valeurs $\tau/\sigma n$, le mode de rupture approche celle de la compression pure.

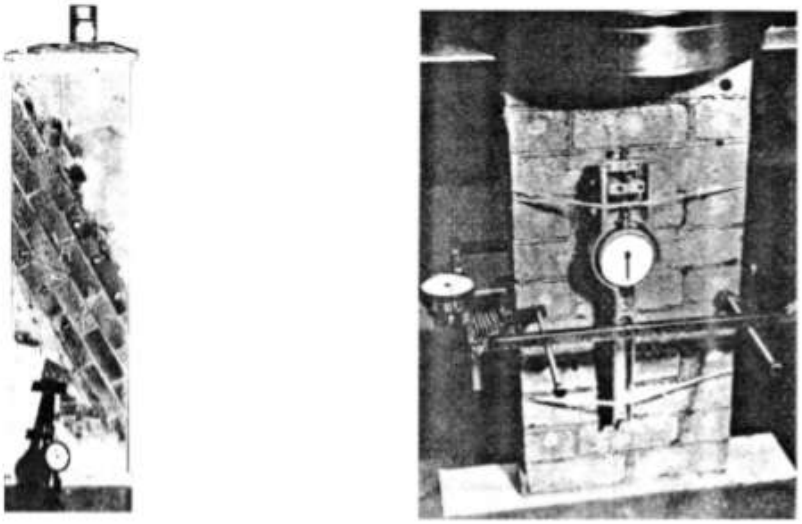


Figure 2.19 Essais de compression sur les murets en maçonnerie

II.13.2 Travaux de SHAAN et TORRENTI (ENTPE)

L'étude de Shaan et Torrenti [Shaan et col, 1990] a été élaborée à L'ENTPE1 dans le cadre d'un contrat REX-COOP du plan d'habitat, et concerne le comportement mécanique de la maçonnerie sous charge uniaxiale avec différentes orientations du plan de joints. Dans cette étude les briques utilisées étaient orthotropes.

Les panneaux ont été confectionnés à partir de briques en terre cuite creuses de petit format 190 x 100 x 40 mm, assemblées par un mortier de ciment (épaisseur du joint égal à 9 mm). Les tableaux 3.2 et 3.3 présentent les caractéristiques mécaniques des briques et du mortier.

Ces panneaux ont été construits horizontalement en découpant les briques d'une manière à obtenir les différentes orientations du plan de joints par rapport à l'axe de la sollicitation (θ = 0°, 22.5°, 45°, 67.5° et 90°).

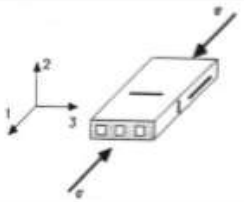
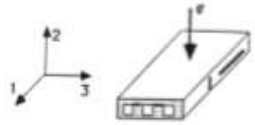
Caractéristiques mécaniques	Valeurs moyennes	
Contrainte de compression à la rupture σ_{c11} (MPa) Module élastique E_{b11} (MPa) Coefficient de Poisson ν_{21} Coefficient de Poisson ν_{31} Contrainte de traction à la rupture σ_{t11} (Mpa)	37.8 7220 0.01 0.01 3.53	
Contrainte de compression à la rupture σ_{c22} (MPa) Module élastique E_{b22} (MPa) Coefficient de Poisson ν_{12} Coefficient de Poisson ν_{32}	8.847 405 0.14 0.08	

Tableau 2.20 Caractéristiques mécaniques des briques

Caractéristiques mécaniques	Valeurs moyenne	Type D'échantillon
Contrainte de compression à la rupture σ_{et1} (MPa)	16.69	16 x 32 cm 
Module élastique (MPa)	3800	
Contrainte de traction à la rupture σ_{tt1} (MPa)	2.0	10 x 10 x 10 cm 
Coefficient de Poisson (ν_m)	0.25	

Tableau 2.2 Caractéristiques mécaniques du mortier

II.13.2.1 Machine d'essai

Une presse a été conçue spécialement pour réaliser ces essais. Elle est constituée d'un vérin de capacité de 500 KN. Les efforts sont transmis intérieurement par des doubles barres de transmission. Des articulations et des plaques d'appuis assurent une meilleure distribution des efforts sans aucune excentricité.

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

La mesure des déplacements est effectuée à l'aide de potentiomètres rotatifs de précision qui ont été installés sur les deux faces du panneau.

L'ensemble des données, forces et déplacements, est enregistré par un système d'acquisition des données.

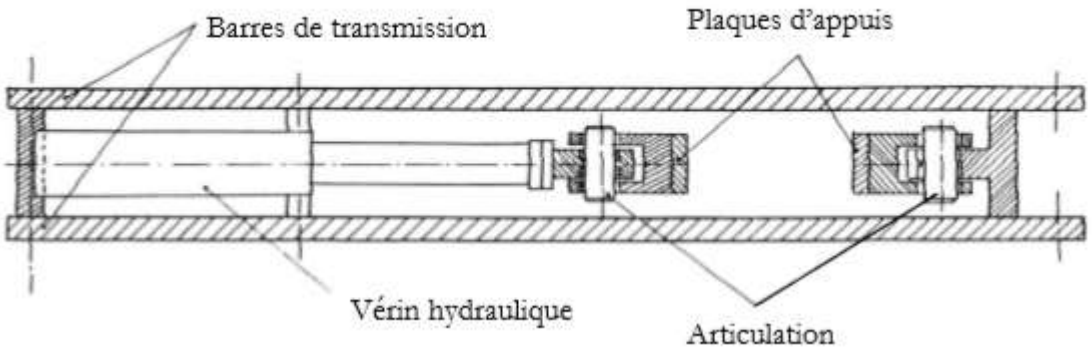


Figure 2.20 Vue d'ensemble de la presse uniaxiale

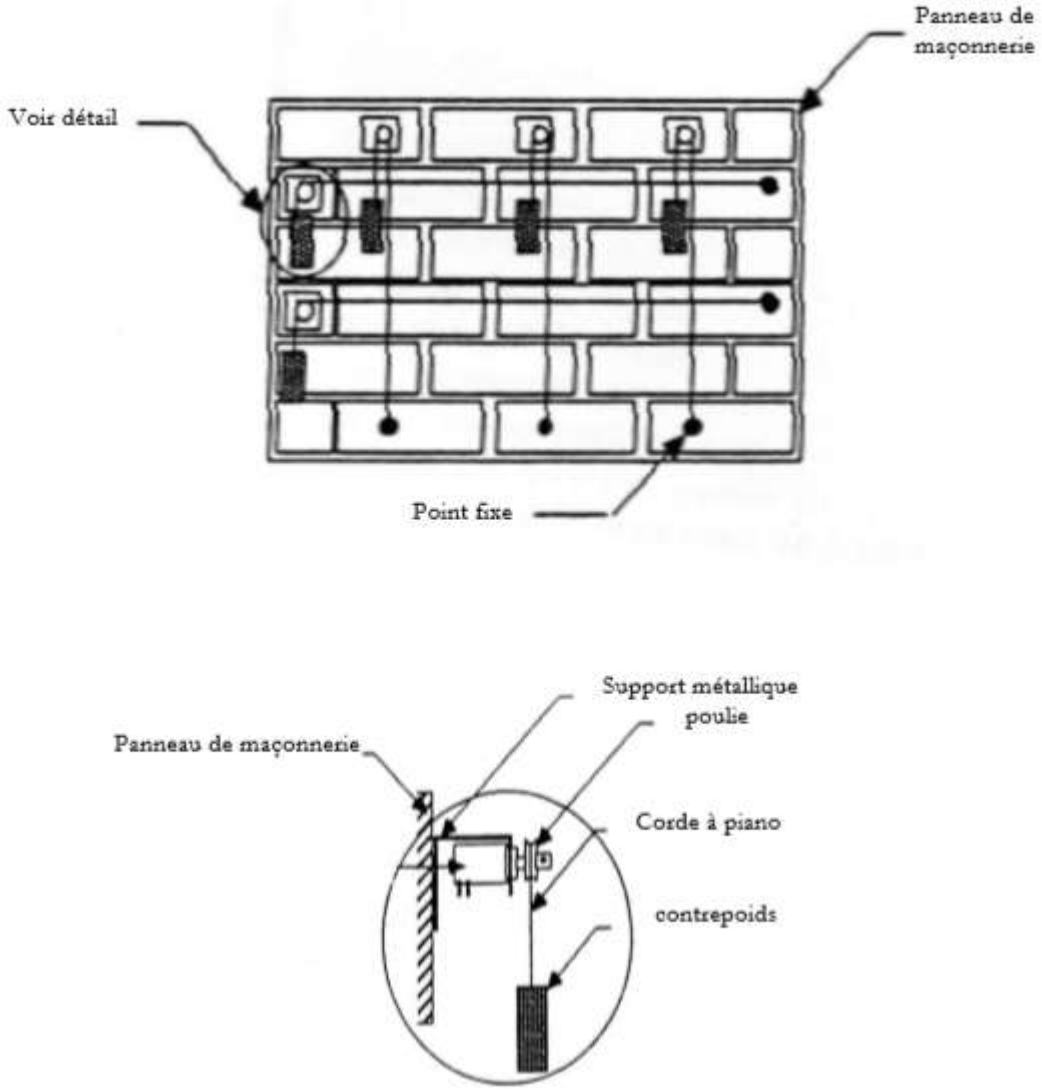


Figure 2.21 Principe de mesure des déplacements

II.13.2.2 Principe des essais

La sollicitation est exercée suivant des paliers de pression d'une valeur de 0.1 MPa jusqu'à la rupture (figure 3.10).

Les résultats obtenus dans cette recherche sont résumés dans la figure (3.11) (les courbes contraintes-déformations longitudinales).

Ces essais confirment l'importance de l'orthotropie de la maçonnerie, cette orthotropie étant due à l'orientation des joints par rapport à l'axe de la sollicitation, mais aussi à l'orthotropie des briques utilisées.

Trois modes de rupture ont été observés (figure 3.12) :

- Lorsque l'orientation du plan de joint θ est égale à 0° et 22.5°, la rupture se fait par décohésion entre les joints de mortier parallèle au chargement et les briques. Ceci entraîne ensuite un flambage des lits horizontaux des briques.

- Lorsque θ est égal à 67.5°et 90°, la rupture se produit par une fissuration de traction s'initialisant dans le joint de mortier parallèle à l'axe de chargement.

- Dans le cas ou l'orientation est de 45°, la rupture intervient par combinaison des deux précédents cas.

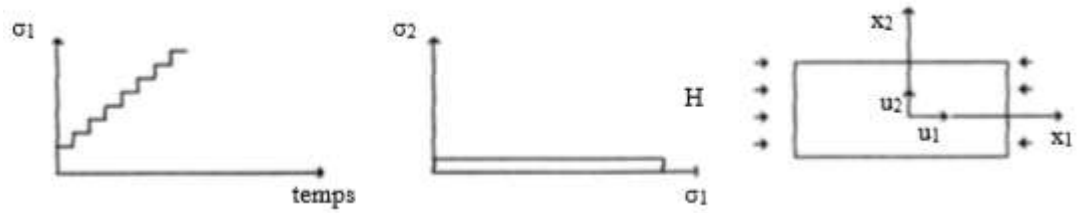


Figure 2.22 Schéma de contrainte uniaxiale

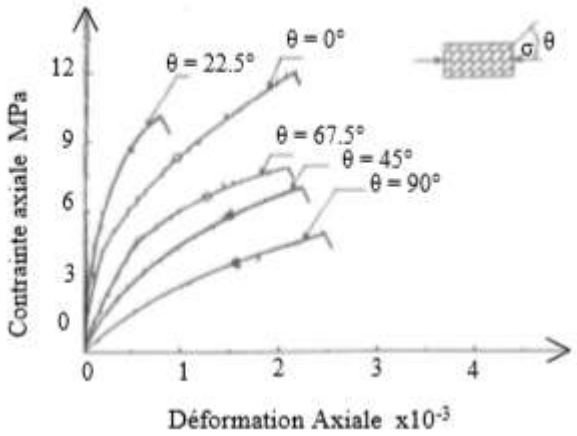


Figure 2.23 Courbes contrainte-déformation

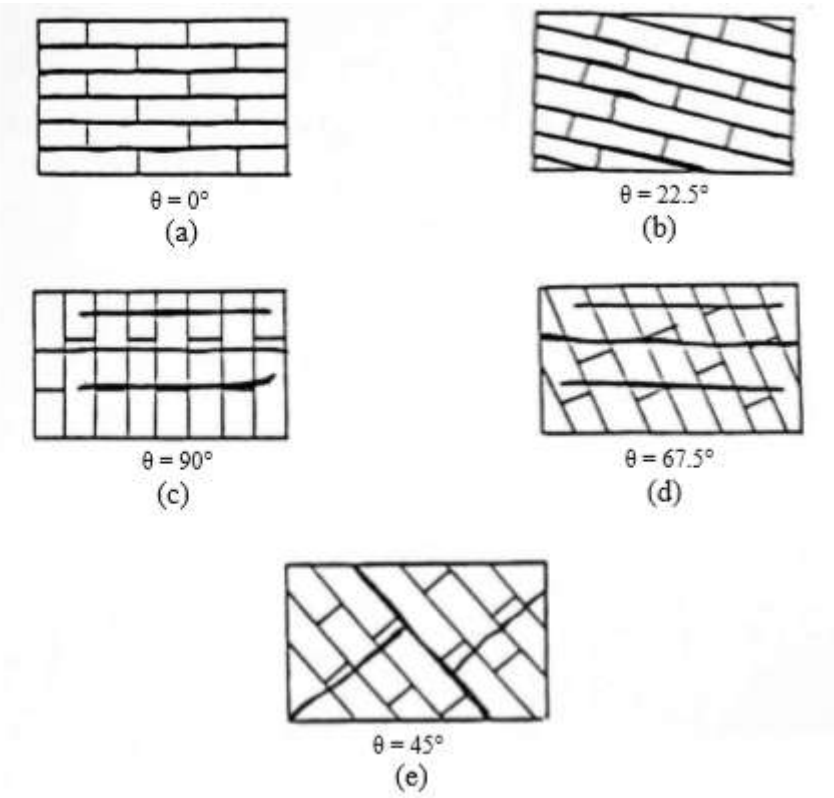


Figure 2.24 Mode de rupture lorsque l'orientation des joints par rapport à la direction de l'effort change

II.13.3 Travaux de PUME

Pume [Pume, 1998] a travaillé sur 275 murets en maçonnerie en brique de terre cuite creuse (petits modèles), soumis à la compression, produite entre 1955 et 1992 en République Tchèque. Pume a utilisé des briques avec une perforation verticale. Les données ont été exploitées dans les études Tchèques et européennes et dans la vérification des modèles structuraux des murs en maçonnerie soumis à la compression.

Ces essais lui ont permis de montrer que les murets en maçonnerie confectionnés avec les briques présentant une perforation verticale, donnent une résistance à la compression plus élevée que les autres briques.

II.13.4 Les travaux de HAKIMI et Col.

L'étude de Hakimi et col. [Hakimi et col, 1998], élaborée au CNERIB2, concerne le comportement mécanique de la maçonnerie porteuse en brique silico-calcaire sous charge uniaxiale, avec différents types de briques (1DF et 2DF) et différentes classes de mortier.

II.13.4.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

a) La brique

Les types de briques silico-calcaires utilisées se distinguent par deux formats différents :

Brique 1DF (L x l x h) = (24 x 11.5 x 5.2) cm3 Brique 2DF (L x l x h) = (24 x 11.5 x 11.3) cm3

Résistance à la compression de la brique 1DF σb moy = 21.6 MPa Résistance à la compression de la brique 2DF σb moy = 31.4 MPa

b) Le mortier

Le sable utilisé est un sable hybride (une partie du Oued de « BABA-ALI » et l'autre de sable de mer de « ZERALDA »). Qui présente les caractéristiques suivantes : Masse volumique : s ρ = 1510 kg/m3 Equivalant sable : ES = 97.75%

Trois différents types de mortier ont été utilisés (Tableau 3.4), avec une épaisseur du joint de mortier de 1.0 cm

Les essais de compression et de traction du mortier sont résumés dans le Tableau (3.5)

Composition	Ciment (CPA325) Kg	Chaux aérienne Kg	$\frac{\text{Eau}}{\text{C + CH}}$
C1	300	15	0.70
C2	400	10	0.59
C3	480	0	0.55

Tableau 2.3 Composition des mortiers

Composition	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
C1	2.7	3.25	8.23	11.86
C2	2.98	3.74	16.76	19.15
C3	3.87	3.91	20.01	25.35

Tableau 2.4 Résultats des essais mécaniques sur les mortiers

II.13.4.2 Murets en brique silico - calcaire

a) Disposition et gabarit des murets

Les auteurs ont confectionné 18 murets (voir figure 3.13)

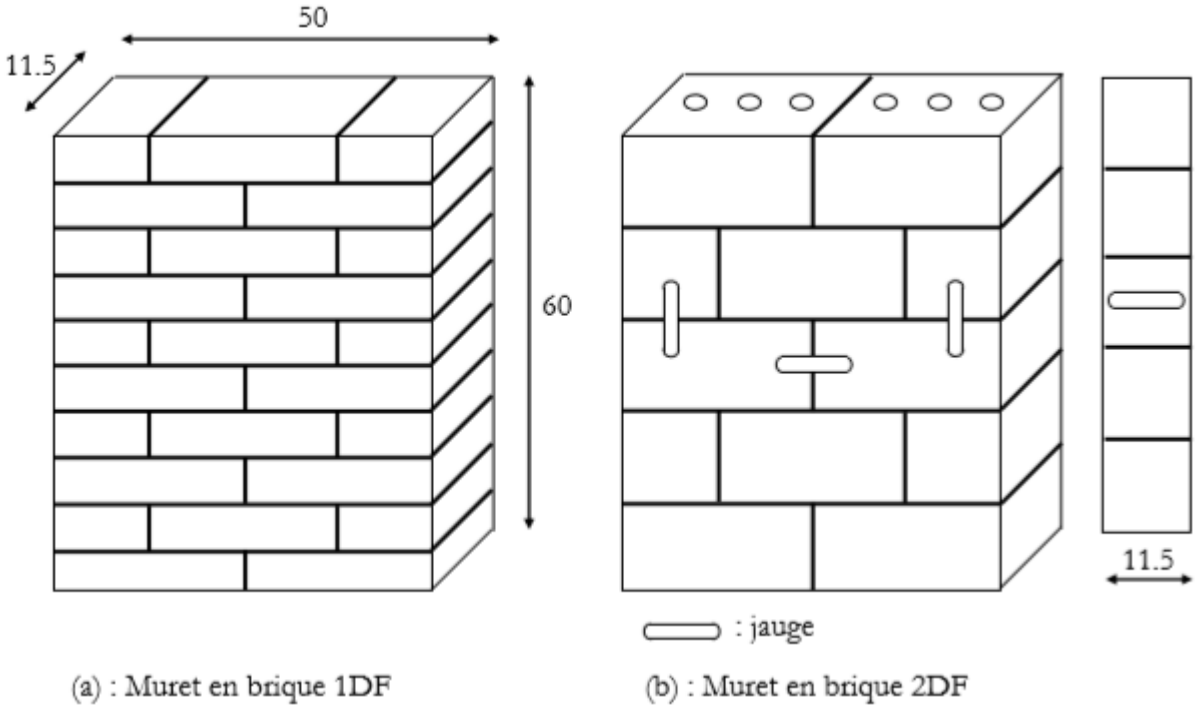


Figure 2.25 Murets en brique silico-calcaire

b) Déroulement de l'essai

Les essais d'écrasement à la compression des murets ont été effectués à 28 jours sous une presse hydraulique de 2500 KN. La charge est répartie uniformément sur le muret par l'intermédiaire d'un profilé métallique rigide. Les résultats d'essais d'écrasement sont représentés par la Figure (3.14).

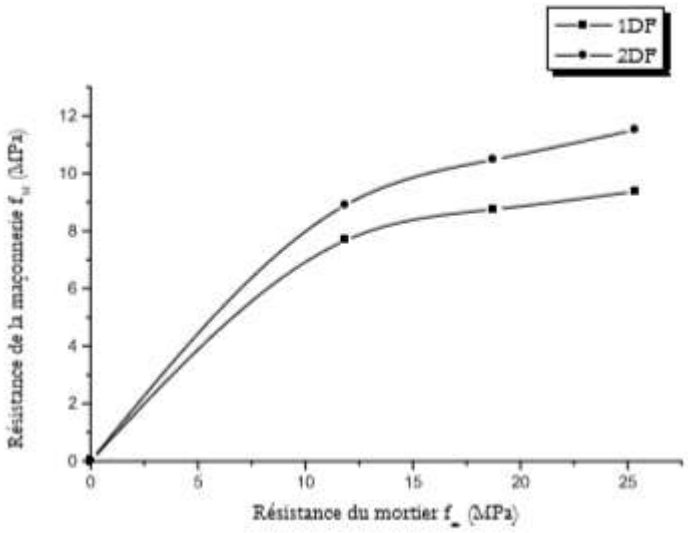


Figure 2.26 Variation de f_M avec f_m et la nature des briques

La résistance de la maçonnerie augmente avec le gabarit de la brique (les murets construits avec la brique 2DF présentent les meilleures résistances) et le dosage du mortier (C3). On a intérêt à avoir des briques assez grandes [Hakimi et col, 1998].

II.14 CONCLUSION

L'analyse bibliographique nous a permis de constater que, malgré la grande quantité de travaux effectués, qu'il reste beaucoup d'inconnues relatives au comportement de la maçonnerie structurale.

Il reste, en particulier, à préciser l'influence de certaines variables telles que :

- Variation de la nature du mortier (mortier en ciment, mortier de chaux, mortier bâtard etc.) ;
- Variation de l'épaisseur du joint de mortier ;
- La disposition des joints verticaux par rapport aux sollicitations verticales ;
- La géométrie de la maçonnerie.

II. Comportement mécanique des structures en maçonnerie 22

II.1 Introduction :..... 22

II.2 MODE DE RUPTURE DE LA MAÇONNERIE 22

II.2.1 Rupture par glissement : 22

II.2.2 Rupture par basculement :..... 22

II.2.3 Rupture par compression du coin : 22

II.2.4 Rupture par cisaillement : 22

II.3 Comportement des murs en maçonnerie sous des charges de Cisaillement en diagonale : 23

II.3.1 Essais de cisaillement : 24

II.3.2 Résultats de l'essai : 24

II.4 Comportement de la maçonnerie en compression : 25

II.5 Résistance du cisaillement en fonction de la charge verticale (pré Compression) :.. 26

II.6 Résistance des murs a la traction : 27

II.7 Mécanisme de rupture sous compression axiale : 28

II.8 Résistance à la compression de la maçonnerie : 30

II.8.1 Détermination de la résistance à la compression : 30

II.8.2 Facteurs affectant la résistance à la compression des prismes : 30

II.9 Relation Contraintes-déformations des prismes en compression axiale :..... 33

II.10 Module d'élasticité et coefficient de Poisson des assemblages de briques : 33

II.10 Interface brique-mortier : 34

II.11 Efficacité des briques par rapport aux prismes : 34

II.12 Rapport des résistances en compression de prismes et des panneaux : 36

II .13 LES ETUDES EXPERIMENTALES CONCERNANT UN CHARGEMENT..... 36

UNIAXIAL..... 36

II.13.1 Les travaux de Page..... 37

II.13.2 Travaux de SHAAN et TORRENTI (ENTPE)..... 39

II.13.2.1 Machine d'essai 40

II.13.2.2 Principe des essais 41

II.13.4.1 Caractéristiques des matériaux utilisés 44
II.13.4.2 Murets en brique silico - calcaire 45
II.14 CONCLUSION 46

Figure 2.1 : Comportement des murs remplir en maçonneries (CHANEM 2013) ……..01

Figure 2.3 : Mur sous charge en diagonale ……..03

Figure 2.4 : Essai de cisaillement……..15

Figure 2.5 Schéma des fissurations (LAFUENTE, 1990)..... 24

Figure 2.6: Résistance au cisaillement en fonction de la charge verticale (LAFUENTE, 1990) ……...……24

Figure 2.7: Charge de compression (CHARRABI.A.1990) ……25

Figure 2.8 : relation entre la Résistance au cisaillement et la contrainte pré-compression (CHARRABI.A.1990) ……..……27

Figure 2.10 : Comportement individuel et de l ’ assemblage des briques et du mortier en compression..... 28

Figure 2.11 : Etat de contraintes dans les briques et le joint de mortier 29

Figure 2.12 : Relation type contrainte-déformation du mortier, brique et assemblage de briques 29

Figure 2.13 : diagramme typique expérimentale contrainte-s déplacements pour un prisme de dimensions 500 × 250 × 600 [mm3] avec : fmo la résistance du mortier à la compression 31

Figure 2.14 : Influence de l ’ orientation des joints de mortier sur le mode de rupture de la maçonnerie 32

Figure 2.15 : Schématisation du modèle asymptotique (Fouchal 2006,2007) 34

Figure 2.16 : Résistance à la compression des prismes versus Résistance des unités de maçonnerie des briques de l ’ Amérique du Nord, Merzoud et al (2007)..... 35

Figure 2.17 : Résistance à la compression des prismes versus Résistance des unités de maçonnerie des briques de la région d ’ Annaba, Merzoud et al (2007)..... 36

Figure 2.18 Mode de rupture selon l’orientation de la sollicitation par rapport au plan des joints..... 37

Figure 2.19 Essais de compression sur les murets en maçonnerie..... 39

Figure 2.20 Vue d’ensemble de la presse uniaxiale..... 40

Figure 2.21 Principe de mesure des déplacements..... 41

Figure 2.22 Schéma de contrainte uniaxiale 42

Figure 2.23 Courbes contrainte-déformation 42

Figure 2.24 Mode de rupture lorsque l'orientation des joints 43

par rapport à la direction de l'effort change 43

Figure 2.25 Murets en brique silico-calcaire 45

Figure 2.26 Variation de fM avec fm et la nature des briques 45

III. Introduction

Ce chapitre représente quelques techniques de renforcement de la maçonnerie.

Le développement de la science de construction se présente dans la variation de l'architecture des monuments historiques. Cet avancement réside dans la possibilité de construire et de renforcer des éléments de maçonnerie solides et qui accordent une stabilité à la structure, sans augmenter le poids propre de la structure.

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

III.1. Consolidation à base de 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.2. Consolidation a base d'acier :

III.2.1 Les tiges métalliques :

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 Renforcement par barres, câbles ou grillage métallique :

C'est un procédé qui consiste à la disposition éléments linéaires qui vont exercer des tractions visant à fermer l'effondrement du mur ou leurs déformations progressives transversalement à leur plan. Ces tirants sont constitués d'un câble d'acier ancré par forage Valluzzi et al. 2005 [37], Borri et al, 2011, [38].

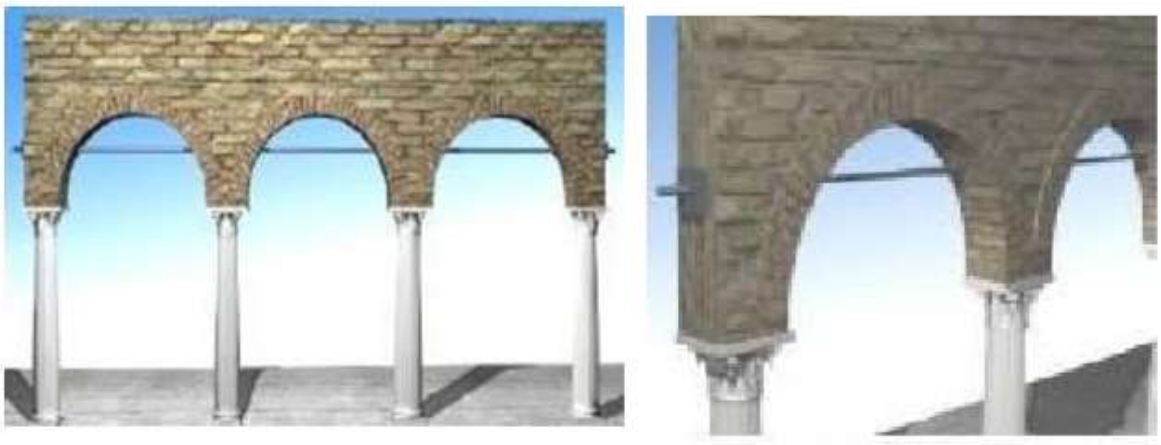


Figure III.5: Renforcement du système d'arcatures [39]

Dans la maçonnerie à une hauteur du 1/3 de la flèche des arcades et fixés à murs opposés (Fig_III.7a) et à l'extrémité de la contactions, par des pièces spécifiques d'ancrage (Fig.III.7b), à travers lesquelles l'évolution de leur écartement et la pelte de leur capacité résistante sera évitée. Le système de tirant se pose de façon à ce que I 'un, au moins, des deux

éléments d'ancrage admette un réglage périodique de la tension afin d'en compenser les effets éventuels de son allongement (Figure III.6)



Figure III.6: système de réglage pénodique [39]

III.2.3 Renforcement des arcs, des voûtes et des coupoles avec des barres d'acier taxidermie »

C'est un procédé de renforcement des éléments linéaires posés pour étayer les arcs et les voutes, visant à freiner l'effondrement du mur ou leurs déformations progressives transversalement à leur plan tels les tirants métalliques ces derniers seront placés sur les pallies tractées de l'extrados ; la résistance aux surcharges au niveau des arcs pourra être effectué par l'introduction de barres d'acier inoxydables en guise de taxidermie à partir de l'intrados.

III.3 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 de l'élément avec la technique « wet lay-up » ou « pre-cured ». 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 [67].

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 [68].

Les lamelles de FRP s'appliquent dans les éléments par encrage dans la brique ou par la technique NSM qui seront utilisés dans cette étude.

La Figure II.7 représente un mur historique renforcé par collage de tissus de CFRP sur la surface extérieure [69]. 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 II.8 représente quelques formes de barres et de lamelles de FRP.



Figure II.7: Renforcement avec bandes de CFRP



Figure II.8: Formes de quelques barres, et de lamelles de FRP utilisées dans le renforcement NSM

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.

	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

Tableau III.2: Caractéristiques mécaniques moyennes des résines époxy

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.

- **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 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-1jusqu'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 dû 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.9)

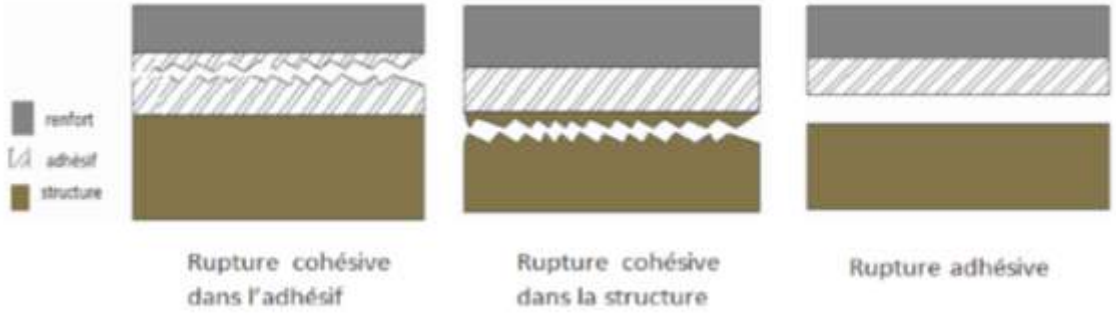


Figure III.9: Modes de rupture du joint collé

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.10a)

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.10b)

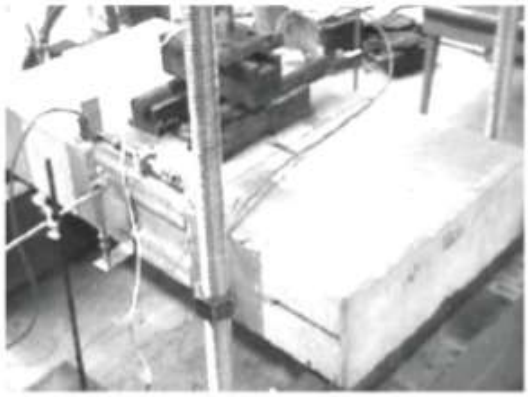
3. Essai de pull-out qui consiste à appliquer force de traction axiale sur le renfort FRP fixé sur une éprouvette prismatique de maçonnerie, Petersen, 2009 [14], Kashyap et al. 2012 [68]. (Figure III.10c)

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.10d)

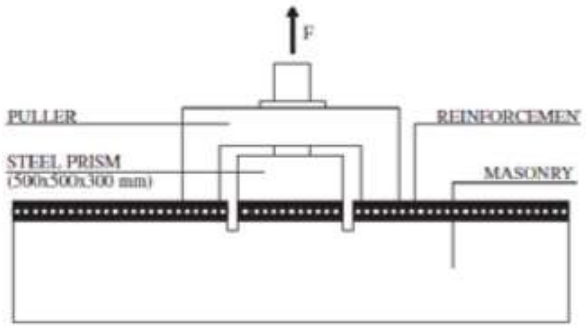
5. Essai de traction directe de la maçonnerie renforcé par TRC sau niveau de la surface. (Figure III.10e)

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.10: Essais de la détermination de la résistance d'adhésion entre le renfort et la maçonnerie.

III.5 CONCLUSION :

Les ouvrages en 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 (brique, mortier) et de leurs interactions au niveau de l'interface joint de mortier / brique. 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 renforcées sera étudié sur des murs composés de plusieurs rangées de brique réaliser en diagonale.

La réalisation des essais sur les murettes à 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 ; des lamelles en FRP par la technique de NSM en utilisant Sikadur®-30.

III. Introduction 48

III.1. Consolidation à base de briques 49

III.1.1 Utilisation des briques-liaison ou des moellons-liaison 49

III.1.2 Utilisation des Contreforts 49

III.2. Consolidation a base d'acier : 50

III.2.1 Les tiges métalliques : 50

III.2.2 Renforcement par barres, câbles ou grillage métallique : 51

III.2.3 Renforcement des arcs, des voûtes et des coupoles avec des barres d'acier taxidermie » 52

III.3 FIBRE POLYMERE RENFORCE (FRP) 52

III.4 Matrice cimentaire renforcée par textiles 55

III.5 CONCLUSION : 60

Figure III.1: Renforcement des ouvertures par (a) arc de décharge (b) arrières voussures plate-bande 49

Figure III.2: Renforcement par des briques, liaison commune aux deux murs 49

Figure III.3: Renforcement par des des Contreforts 50

Figure III.4: Différents types d'ancres de façade 51

Figure III.5: Renforcement du système d'arcatures [39] 51

Figure III.6: système de réglage pénodique [39] 52

Figure II.8: Formes de quelques barres, et de lamelles de FRP utilisées dans le renforcement NSM 53

Figure II.7: Renforcement avec bandes de CFRP 53

Figure III.9: Modes de rupture du joint collé 58

Figure III.10: Essais de la détermination de la résistance d'adhésion entre le renfort et la maçonnerie. 59

Introduction

En Algérie et dans la majorité des projets récents, l'usage de la maçonnerie est limité, elle n'est souvent utilisée que comme matériau de remplissage dans la construction de structure en béton armé. Dans les calculs, l'influence de la maçonnerie sur le comportement des bâtiments est couramment négligée. Cependant le remplissage en maçonnerie a une influence importante sur les caractéristiques des structures. Cette pratique consistant à négliger l'influence de la maçonnerie s'est imposée par l'usage, en raison, principalement, de l'absence d'une méthode de calcul pratique ainsi que d'un outil réglementaire approprié. Dans notre pays, Il n'existe pratiquement aucune norme concernant le comportement de la maçonnerie.

Dans ce chapitre présente le comportement en cisaillement des murs en maçonnerie. Les murs composés de sept rangées de brique perforée assemblées par mortier en diagonale, sont étudiés sans et avec renforcement, et deux murets de sept rangées

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 deux types de mortier de jointement (mortier batard), l'épaisseur du joint de mortier utilisé est de 10 mm

Ce chapitre est divisé en trois parités principales :

- Les matériaux utilisés et le mode de construction des murets
- Les matériaux de renforcement et leurs applications sur les murets.
- Essai de compression.

IV.1. Matériaux utilises :

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
- chaux
- Eau

IV.2.Caractéristiques des matériaux :

- **Brique perforée :**

La Brique perforée utilisée a été fabrique par la briqueterie de Sétif. La brique est de forme parallélépipédique rectangle a base d'argile, (L'argile est souvent dégraissée par du sable). Les dimensions (Longueur x Largeur x Hauteur) sont données comme suit : 220 x 105 x 55 mm (Figure II.1).

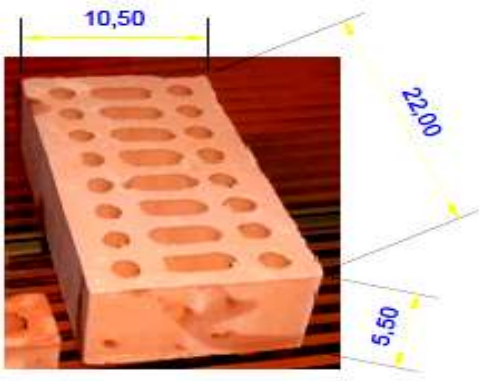


Figure 4.1: Dimensions des briques perforées.

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 $\rho\,(kg/m3)$ est calculée comme suit :

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (2.1)$$

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

- **Caractéristiques mécaniques de la brique :**

Afin de caractériser la contrainte ultime en compression, les briques sont testées dans les trois directions caractéristiques (voir figure IIV.2).

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur trois blocs jusqu'à la rupture. La résistance en MPa est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_n} \quad (2.2)$$ Où :

σb : résistance à la compression en (MPa)

Fb : charge maximale de rupture en (N)

Sn : section nette moyenne de la brique en (mm²)



Figure 4.2: briques en compression selon les trois directions.

- **Caractéristiques des sables :**

✓ **Nous avons utilisé un seule type de sable :**

a-sable hassi bahbah

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 génie civil, 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 »

- **Granulométrie :**

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.

- **Eau de gâchage :**

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable de robinet. Elle permet à la fois d'hydrater le liant (ciment ou chaux) et à contribuer à l'ouvrabilité du mortier. Le dosage en eau est pris selon l'ouvrabilité du mortier.

- **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 fractions 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).

- **Ciment :**

Au cours de cette étude nous avons utilisé un ciment portland composé (CPJ-CEM II /A 4,25 produite par l'entreprise des ciments et dérives de Chleff.



Figure 4.3 Ciment de Matine.

Le ciment portland composé est conforme à la norme NA 442 et à la norme NF P 15-301 et il dépasse considérablement les exigences de résistance de ces normes.

- **La chaux :**

La chaux utilisée est un liant Ariane obtenue à partir de la carrière de Hassani Saida.



Figure 4.4 : chaux de Saida.

IV.3. Mortiers utilisés :

Afin d'étudier l'influence du type de mortier sur le comportement des éléments en maçonnerie, on a utilisé un seul type de mortiers :

a) Le mortier dit bâtard est constitué de chaux, de ciment, de sable fin.

IV.3.1. Essai sur mortier frais

A) Le cône :

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône qui peut être muni d'un vibrateur

B) la Prise :

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 4,0 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 1,0 mm du niveau supérieur.

IV.3.2. Essai sur mortier durci

La résistance à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier. Selon la norme EN196-1

- les éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm sont place dans une machine d'essai à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150.
- 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.

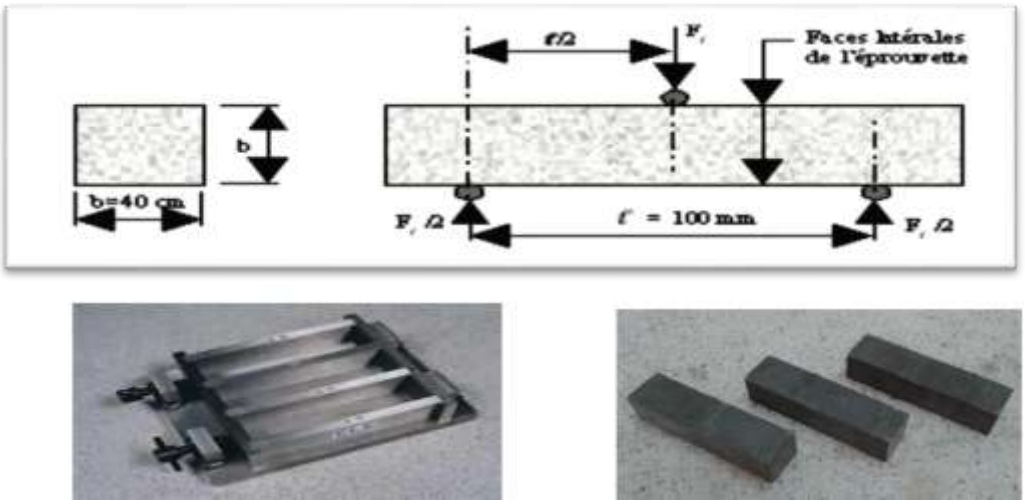


Figure 4.5*:* Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier**.**

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 :

$$Rf = \frac{1.5\,Ff.l}{b^3} \qquad (2.5)$$

b-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 :

$$Rc = \frac{Fc}{b^2} \qquad (2.6)$$

$$Rc = \frac{F}{1600} \qquad (2.7)$$

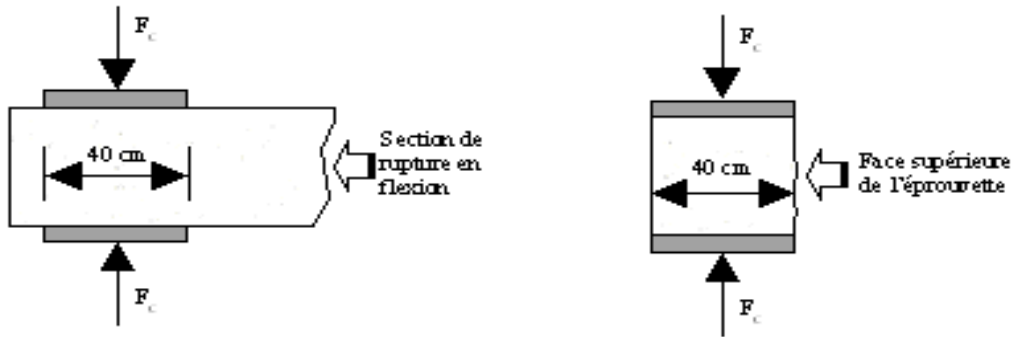


Figure 4.6. Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. (Michael, 1989).

IV.3.3. Composition de mortier bâtard :

Le mortier bâtard est constitué par un mélange de Ciment-Chaux-Sable.

Matériaux	Ciment	chaux	Sable
1 :3	**1**	**1**	3
1 :4	**1**	**1**	4
1 :5	**1**	**1**	5
1 :6	**1**	**1**	6

Tableau IV.1 : dosage de mortier bâtard.

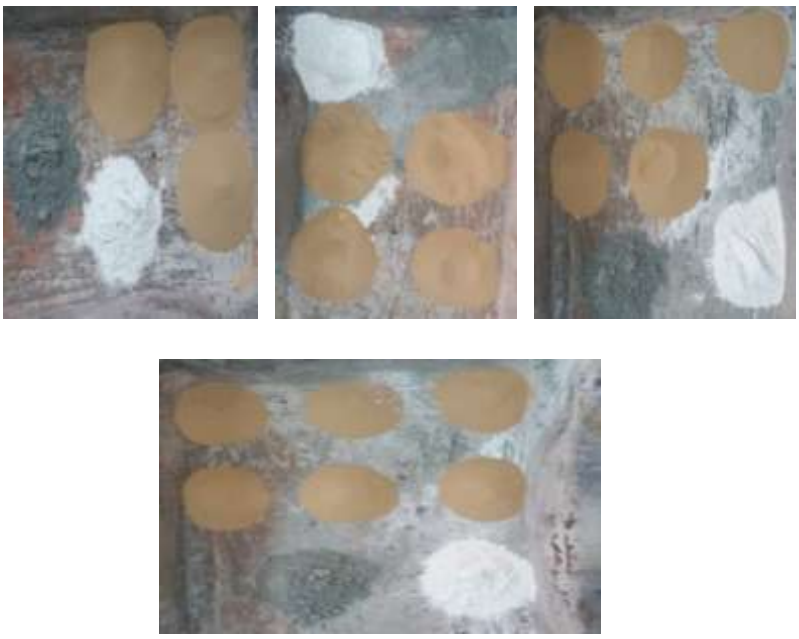


Figure 4.7. Le dosage en ciment-chaux-Sable pour la préparation de mortier (sable fin).



Figure 4.8. Les étapes de préparation les éprouvettes prismatiques

IV.4 PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS

Notre étude concerne les panneaux de maçonnerie en briques perforées testés sous chargement uniaxial avec différentes orientations des joints du mortier par rapport à l'axe de la sollicitation. Cette inclinaison varie de 0° et 90°, avec épaisseur du joint 10 cm et deux types de mortier bâtard type A et type B (figure ……).

IV.4.1 Résistance des Murets à la compression :

Introduction :

Le comportement des assemblages de briques soumis à la compression axiale et normale aux joints de mortier a été l'objet de plusieurs études expérimentales, théoriques et approches numériques.

La rupture des prismes en maçonnerie soumis à la compression axiale, dépend de plusieurs paramètres, principalement de l'interaction entre les briques et le mortier, de la résistance de ces deux matériaux et leurs comportements. Les différences des propriétés élastiques des matériaux (briques et mortier), influencent considérablement les modes de rupture des assemblages, qui se traduit généralement par des fissures parallèles à la direction du chargement, dues aux tensions latérales au niveau des briques.

Le but de cette étude qui sera présentée porte sur l'étude du comportement des prismes en maçonnerie soumis à la compression axiale, et déterminer toutes les caractéristiques correspondantes en prenant de type différents de Mortier

IV.5 Construction des murets :

Nous avons réalisé 2 murets en maçonnerie construits en briques perforés (MCA et MCB) sont composés de 7 rangés alternées avec une orientation de joint de θ=90°, ces briques sont jointées par un mortier batard 1 :1 : 3 et 1 :1 : 5 d'une épaisseur de 10mm, les panneaux fabriques sont soumis à un chargement de compression

Muret	Type	Dimension des murets	Orientation de joint	épaisseur	Nbre murets
MCA	Type A 1 :1 :3	430X445X105	90°	10mm	2
MCB	Type B 1 :1 :5	430X445X105	90°	10mm	2

Tableau IV.2: caractéristiques des murets

A-l 'orientation du joint par rapport à l'axe du chargement Angle θ=90° (Muret MC)

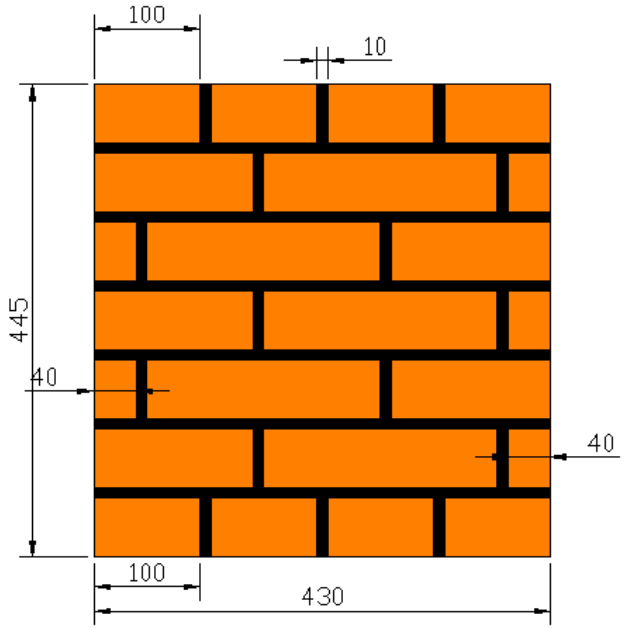




Figure 4.9 Dimensions des murets en briques perforées MC

Notre étude concerne la réalisation de dix panneaux en maçonnerie construits en briques perforés, ces briques sont jointées par un mortier batard 1 :1 : 3 et 1 :1 : 5 d'une épaisseur de 10mm, avec orientations de 90° des joints du mortier par rapport à l'axe de la sollicitation les panneaux fabriques sont soumis à un chargement de compression, sur des murets renforcés et des murets non renforcés.

IV.5.1 : Caractéristiques des murets :

Nous avons réalisé 8 murets de dimension «105x450x400 mm » avec une orientation de joint de θ=45 par rapport à l'axe de chargement.

Trois dispositions de renforcement ont été utilisées, avec deux types de mortier différent

Tableau 4.3: caractéristiques des murets

muret	Mortier	Angle θ	joint	Nombre de murs avec renforcement	Nombre de murs sans renforcement	Nombre total des murs
MTA MR1A MR2A MR3A	Type A 1 :1 :3	45°	10 mm	3	1	4
MTB MR1B MR2B MR3B	Type B 1 :1 :5	45°	10 mm	3	1	4

A-l'orientation du joint par rapport à l'axe du chargement, angle de θ=45°

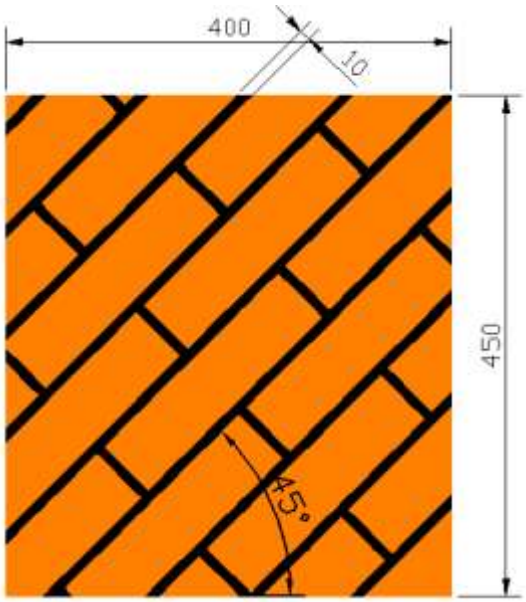




Figure 4. 10 Dimensions des murets en briques perforées MT

IV.5.2 CONFECTION DES MURETS

IV.5.2.1 Matériel utilisé

Le matériel utilisé pour la confection des murs est le suivant (photos 4.2, 4.3 et 4.3) : truelles, auge, fil à plomb, niveau, scie.

IV.5.2.2 Méthodologie de la confection des murets :

Un dispositif a été réalisé pour la confection des murets, afin de respecter la planéité (voir photo 4.5). Les opérations suivies sont :

1. Mouiller préalablement les briques, pour éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie,
2. Placer le fil avant la disposition des blocs en maçonnerie (photo 4.5),
3. Etaler le mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide de différents gabarits fixant ainsi les dimensions du joint,
4. Vérifier la planéité du mur avec la règle en bois et le fil à plomb.
5. Après 24 h, effectuer un surfaçage avec un mortier.
6. Les murets sont ensuite transportés et stockés,
7. L'écrasement est effectué, après 28 jours de cure, aux conditions du laboratoire.



Figure 4.11 : Outils utilisés





Figure 4.12: Deus type de Tronçonneuse



Figure 4.13 : Dispositif pour la confection des murets







Figure 4.15 : Découpage à l'aide d'une Tronçonneuse à table.





Figure 4.16 : Respect de la planéité et orientation de joint



Figure 4.17 : Muret fini



Figure 4.18 : Opération de surfaçage

Les matériaux de renforcement et leur application sur les murets

IV.6. Matériaux de renforcement :

IV.6.1 Fibres de carbone Sika carboDur lamelles :

Les Sika® CarboDur® Lamelles sont des P.R.F.C. pultrudés (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone), à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Elles se présentent sous forme de lamelles préfabriquées en usine, et sont conçues pour le renforcement des structures en béton armé, en béton précontraint, en bois, en maçonnerie, en métal.

Les lamelles sont collées in-situ avec la colle structurale Sikadur®-30.



Figure 4.19: lamelle en fibre de carbone

Tableau 4.4: caractéristiques de fibre de carbone

Largeur de lamelle	**15 mm**
Longueur de rouleaux	**10 m**
section	**37,5 mm2**
Epaisseur de lamelle	**2.5 mm**
Module d'élasticité	**165 000 Mpa**
Résistance a la traction	**3 100 N/mm²**
Allongement a la rupture	**1.7 %**

IV.6.2 Résine d'imprégnation pour le système Sikadur®-30

Sikadur®-30 est une colle structurale thixotrope à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux.

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

Tableau 4.5 : 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 4.20: Sikadur-330



IV.6.3 mode d'application de fibre de carbone

IV 6.3.1 Renforcement avec NSM :

L'application de NSM est réalisée dans les étapes suivantes en effectuant une rainure sur la surface de mur dont la profondeur est le largueur corresponde au diamètre de lamelle, puis en insérant la lamelle (Figure 4b).



Figure 4.21 : Effectuées rainures



Figure 4.22 : Insertion d'une lamelle de FRP dans une rainure sur la surface du mur

IV.6.3.2 LE MELANGE DES COMPOSANTS DE LA RESINE EPOXY SIKADUR -30

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 4.23 : composants A et B de la résine époxy bi-composants

IV.6.4 DIFFERENT DISPOSITIFS DE FIBRE ADOPTE

On adopte 3 type de disposition des lamelles pour renforcer les murets, (figure IV.22)

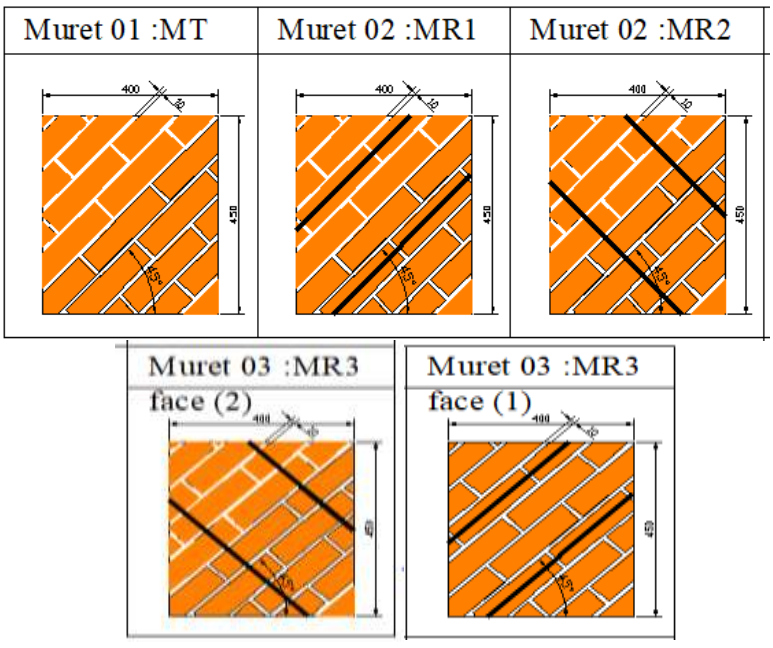




Figure 4.24 : Disposition des lamelles en FRP.

Présentation des essais

IV.7 Essai de compression uni-axiale sur des murets :

Dans cette partie, nous avons étudié le comportement de la maçonnerie en Compression axiale, en étudiant l'effet de la résistance des briques, la résistance du mortier, Nous avons pu déterminer les modules d'élasticité homogénéisés des prismes de différents types de mortiers.

IV.7.1 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 de300 KN de capacité ;(et autre machine de 100KN)
- Un système hydraulique ;
- Un système d'acquisition des données,

- Capteur de déplacement vertical ;
- Un logiciel pour le traitement des données.



Figure 4.25: Presse pilotée par ordinateur pour d'essai.

Le chargement est appliqué par un vérin hydraulique de capacité de 150KN. La vitesse de chargement est de 5mm/min. L'ensemble des données, forces et déplacements, sont enregistrés automatiquement par un système d'acquisition des données. Les déplacements horizontaux sont déterminés 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.7.2 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 τdt est fait selon l'ASTM 519 – 02. En considérant un état de contrainte isotrope dans le centre du mur

$$\tau dt = pmax/\sqrt{2} \times A = 0.707 pmax/A \quad (4.1)$$

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.

$A = (w+h)/2 \times t$ (4.2)

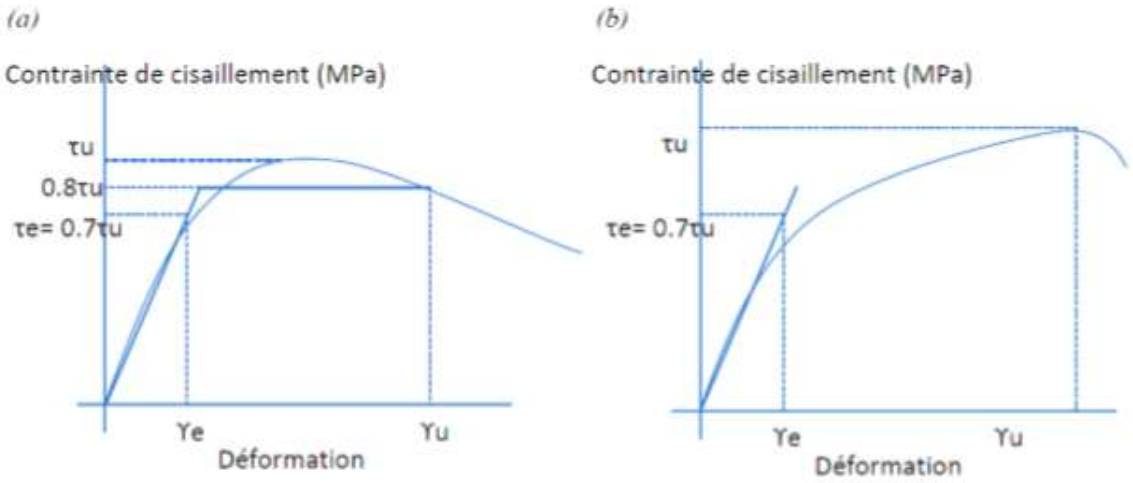
Déplacement latéral et ductilité Le module de cisaillement G et la ductilité μy représentent deux paramètres correspondant à la réponse du mur en déplacement. Ces deux paramètres nécessitent la mesure du déplacement latéral élastique et maximale. La déformation totale ɣ est la somme de la valeur absolue de la déformation en compression εcet en traction$|\varepsilon t|$.

$\gamma = \varepsilon c + |\varepsilon t$ (4.3)

$\varepsilon c = \Delta Lc / Lc$ Et $\varepsilon t = \Delta Lt / Lt$ (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 définie comme le rapport entre la déformation ultime γu et celle élastique γe.

- La déformation élastique ɣe est définie à 70% de la contrainte maximale de rupture τu. La déformation maximale ɣu est définie à 80% de la contrainte maximale τu. 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).



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

- Le module de cisaillement G est calculé dans la zone de contrainte élastique $\Delta\tau e$ avec l'Équation IV.5.

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

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

II.8 Conclusion :

Le dispositif utilisé pour la réalisation des essais présente une bonne fiabilité, et les charges sont uniformément réparties dans les murets lors de leur chargement.

La confection des murets tests a été réalisée selon les règles de l'art, où toutes les précautions nécessaires ont été respectées.

IV.1. Matériaux utilises : 62

IV.2.Caractéristiques des matériaux : 63

IV.3. Mortiers utilisés : 66

IV.3.1. Essai sur mortier frais 67

IV.3.2. Essai sur mortier durci 67

IV.3.3. Composition de mortier bâtard : 68

IV.4 PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS 69

IV.4.1 Résistance des Murets à la compression *:* 70

IV.5 Construction des murets : 70

IV.5.1 : Caractéristiques des murets : 71

IV.5.2.1 Matériel utilisé 73

IV.5.2.2 Méthodologie de la confection des murets : 73

IV.6. Matériaux de renforcement : 77

IV.6.1 Fibres de carbone Sika carboDur lamelles : 77

IV.6.2 Résine d'imprégnation pour le système Sikadur®-30 78

IV.6.3 mode d'application de fibre de carbone 79

IV 6.3.1 Renforcement avec NSM : 79

IV.6.3.2 LE MELANGE DES COMPOSANTS DE LA RESINE EPOXY SIKADUR -30 80

IV.6.4 DIFFERENT DISPOSITIFS DE FIBRE ADOPTE 80

IV.7 Essai de compression uni-axiale sur des murets : 81

IV.7.1 Présentation du dispositif d'essai 81

IV.7.2 Paramètres expérimentaux : 82

II.8 Conclusion : 84

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, nous présentons les résultats des essais réalisés, 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.

V.1.résultats expérimentale sur les matériaux

V.1.1 .Les briques

a) Caractéristiques géométriques :

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

- Briques perfore : 220 x 105 x 55 mm3

b) Caractéristiques physiques :

Le tableau V.1 montre que la masse volumique des briques et de l'ordre de 1800 Kg/m3.

N°	$M(g)$	$V\ (cm3)$	$\rho\ (g/cm3)$	$\rho\ moy\ \ (Kg/m3)$
01	1589,2	877	1,81	1800
02	1592,4	880	1,81	
03	1588,7	895	1,78	

Tableau 5.1 caractéristiques physiques des briques perforés.

c) **Caractéristiques mécaniques :**

La résistance à la compression en fonction de la disposition des briques est donnée dans le tableau (V.2).

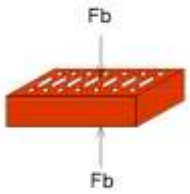
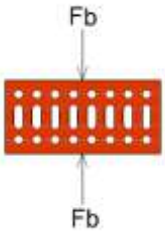
Direction 1	Direction 2	Direction 3
		
3.76(MPa)	22.84(MPa)	5.66(MPa)

Tableau 5.2 : résultats d'essai de compression sur briques.

Les résultats donnent une valeur moyenne de résistance en compression de 22.61. MPa. Le module élastique s'élève à une valeur de 105.43. MP a calculé à 30% de la résistance maximale. Les valeurs expérimentales synthétisant la force maximale, les contraintes et le module de Young des briques testées sont présentées dans le Tableau III.3.

Tableau 5.3 caractéristique mécanique de brique

N° d'éprouvette	**Force de Compression maximale *(KN)***	**Résistance de compression *(MPa)***	**Module de Young *(MPa)***
1	**243.43**	**22.47**	**5513**
2	**240.52**	**22.75**	**5236**
Moyenne	**241.98**	**22.61**	**5375**

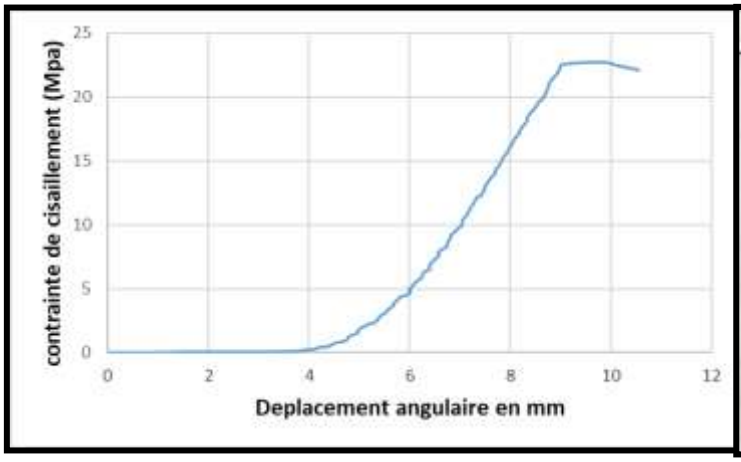




Figure 5.1: Compression uni-axial de brique : comportement de contrainte-déformation.

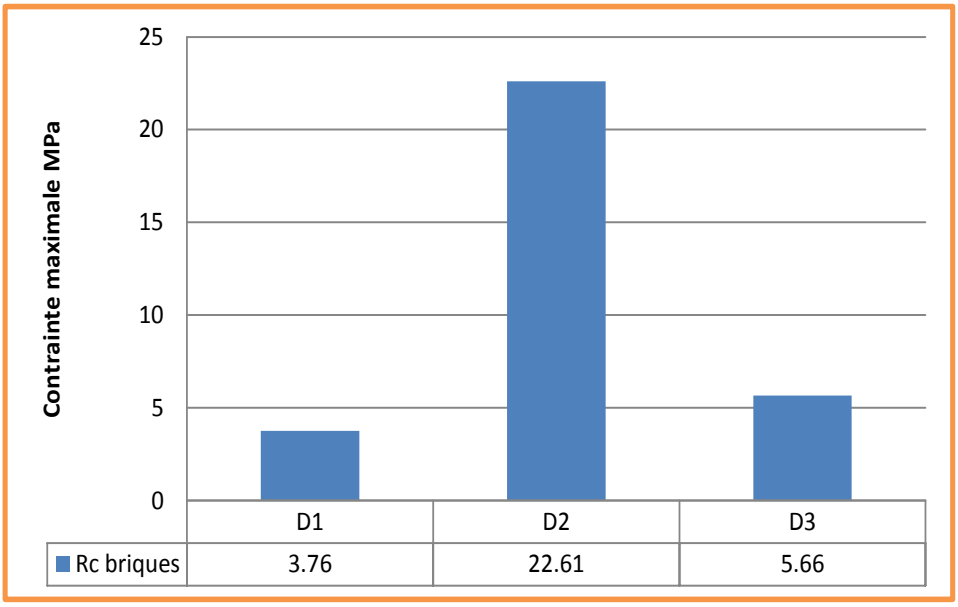


Figure V.2 Résultats d'essai de compression sur brique.

V.1.2. Les sable :

Les résultats des essais réalisés sur le sable fin sont représentés dans le tableau suivante :

V.1.2.1. Analyse granulométrique de sable Fin :

Tableau 5.4 : Analyse granulométrique sable.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisât cumulés(%)
0.315	**591.2**	**59.12**	**90.88**
0.20	**727.8**	**72.78**	**27.22**
0.16	**981.2**	**98.12**	**4.88**
0.1	**998.3**	**99.83**	**0.17**
0.08	**998.9**	**99.89**	**0.11**
Fond	**999.8**	**99.98**	**0.02**

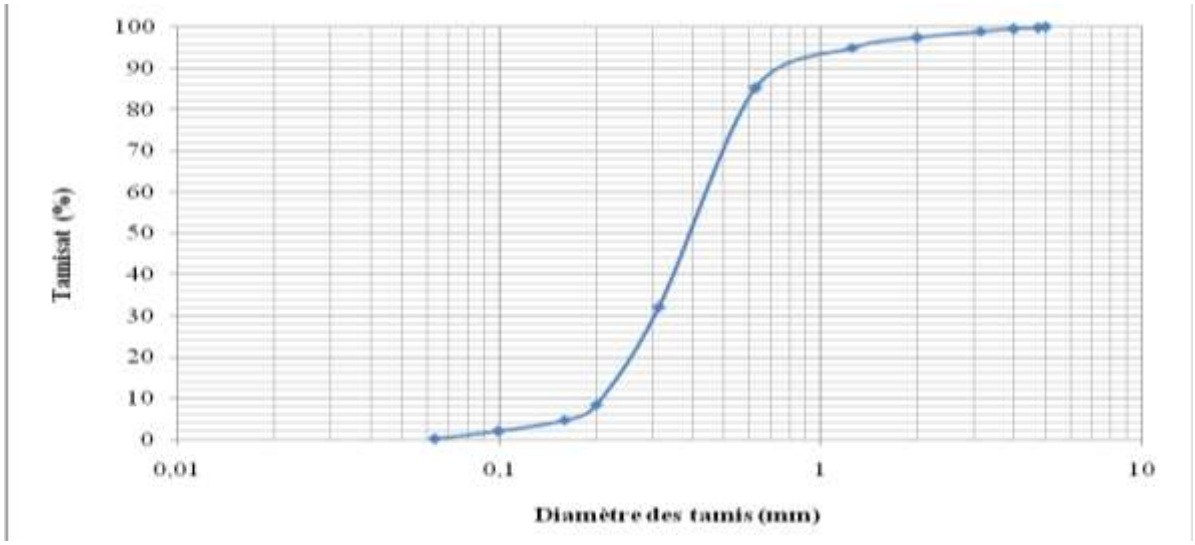


Figure 5.3. Courbe granulométrique de sable Fin.

V.1.2.2. Module de finesse :

$$\mathbf{MF} = 1/100 \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16\text{-}0.315\text{-}0.63\text{-}1.25\text{-}2.5\text{-}5\}$$

MF=1.57

✓ **Classification :**

Le module de finesse est < 1.8 ⟹ sable très fin

V.1.2.3. Résultats de L'équivalant de sable.

Sable Fin	Eprouvette°1
Hauteur de la colonne(H1)	**13.2**
Hauteur de sable à vue(H2)	**10**
Hauteur au piston (H2')	**8.6**
ESV%	**75.75**
ESP %	**65.15**

Tableau 5.5: Résultats de l'équivalent de sable.

Observation : Sable propre

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

Tableau 5.6. Nature et qualité de sable en fonction de (ESV et ESP).

Observation :

- **Le sable Fin est Sable très propre**

V.1.2.4. Résultat de la masse volumique :

- **la masse volumique absolue de sable fin.**

Pycnomètre 1 : $\boldsymbol{\rho abs}$= (100/1573.5+100-1636.1) x1 ⟹ $\boldsymbol{\rho abs}$=2.67 g/m3

La masse	m1	M2	M3
Valeur(g)	1573.5	100	1636.1
$\boldsymbol{\rho ab}$ (g/dm3)	2.67		

Tableau 5.7. Résultats de la masse volumique absolue.

V.1.3. Caractéristique mécanique du mortier :

Le mortier utilisé dans la maçonnerie est un mortier bâtard, constitué de ciment et de chaux.

La composition du mortier est présentée dans le Tableau III.2. Les résistances de compression et de traction par flexion ont été déterminées sur douze éprouvettes prismatiques de mortier à l'âge de 28 jours.

Les éprouvettes de mortier ont les dimensions de 40*40*160 mm et sont soumises à une flexion 3 points. Les essais de flexion sont suivis par compression uni-axiale sur chaque demi prisme Figure III.4. La compression est appliquée sur une surface carré de 40*40*160mm. Selon la norme européenne EN 196-1 [101] la résistance à la traction en flexion σf de l'éprouvette de longueur l et de largeur b, ainsi que la résistance en compression σc des cubes se calculent avec l'Équation III.2& Équation III.3.



Figure 5.4: Caractérisation de mortier : (a) Essai de flexion.

$$\sigma_f = \frac{1.5\ P\ l}{b^3} \quad (2)$$

$$\sigma_c = \frac{P_c}{b^2} \quad (3)$$

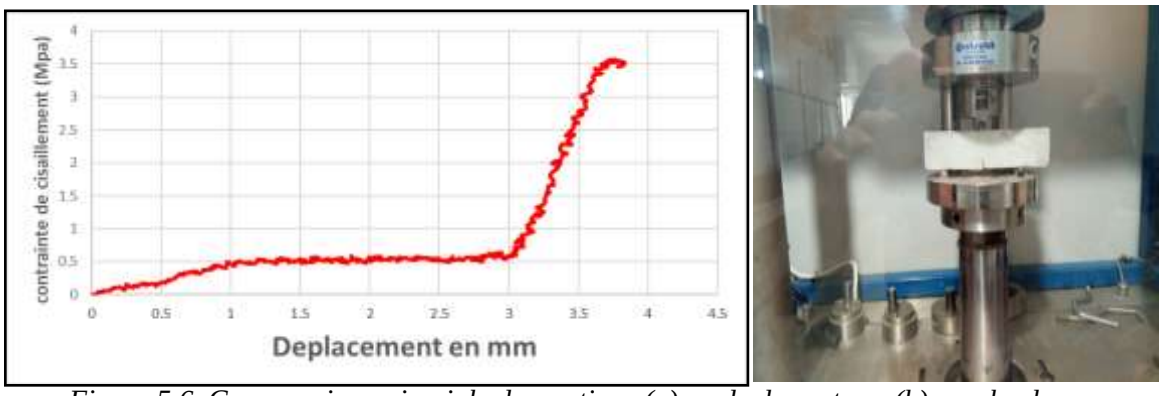


Figure 5.6 Compression uni-axiale de mortier : (a) mode de rupture, (b) courbe de contrainte-déformation

Tableau 5.8 : caractéristique mécanique mortier 1 :1 :3.

N° d'éprouvette	Force maximale en flexion (N)	σf (Mpa)	Force maximale en compression (KN)	σc (Mpa)	Module de Young *(MPa)*
1	**0.891**	**0.209**	**10.557**	**6.59**	**1154.8**
2	**0.901**	**0.211**	**13.985**	**8.74**	**1965.6**
Moyenne	**0.869**	**0.210**	**12.271**	**7.665**	**1560.2**

Tableau 5.9 : caractéristique mécanique mortier 1 :1 :5.

N° d'éprouvette	Force maximale en flexion (N)	σf (Mpa)	Force maximale en compression (KN)	σc (Mpa)	Module de Young *(MPa)*
1	**0.121**	**0.028**	**5.552**	**3.47**	**622.6**
2	**0.125**	**0.029**	**5.653**	**3.56**	**659.6**
Moyenne	**0.123**	**0.028**	**5.602**	**3.516**	**641.1**

V.2 RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MURETS

V.2.1 Le comportement des assemblages de briques en compression axiale :

Dans cette partie, nous avons étudié le comportement de la maçonnerie en compression axiale, en étudiant l'effet de la résistance des briques, la résistance du mortier.

V2.1.1 Essai de compression uni-axiale sur des murets

- ***Procédure expérimental***

Deux murets de maçonnerie sont soumis aux charges de compression uni-axiale MCA et MCB avec deux type de mortier différents Chaque muret est construit par set rangés composées de quatre brique dans la largeur du muret.

Les dimensions des murets ainsi que les cas de chargement sont présentés dans *le Tableau IV8*

Le chargement vertical est appliqué avec un vérin hydraulique de capacité maximale de *100 KN*. La vitesse de chargement est *5mm /min*.



Figure 5.7: Compression uni-axiale de murets de maçonnerie : application de charges sur les murs

- **Mode de rupture :**

➢ **Muret MCA :**



Figure 5.8: Mode de fissuration muret MCA

➢ **Muret MCB :**



Figure 5.9: Mode de fissuration muret MCB

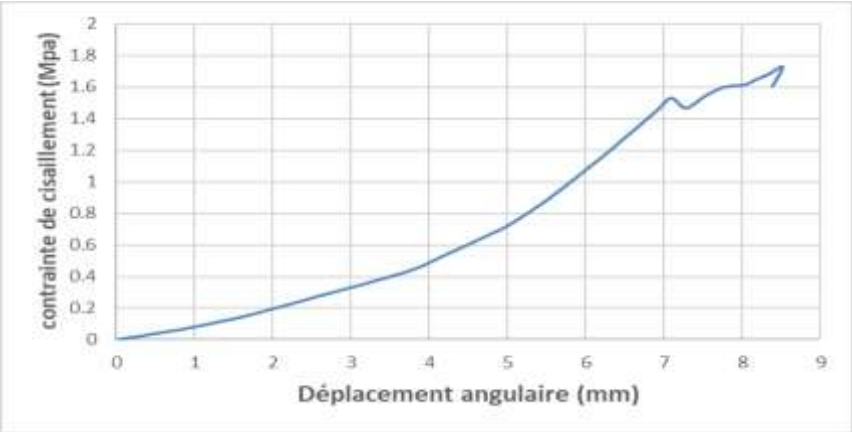


Figure 5.10 Diagramme de cisaillement-déplacement MCA

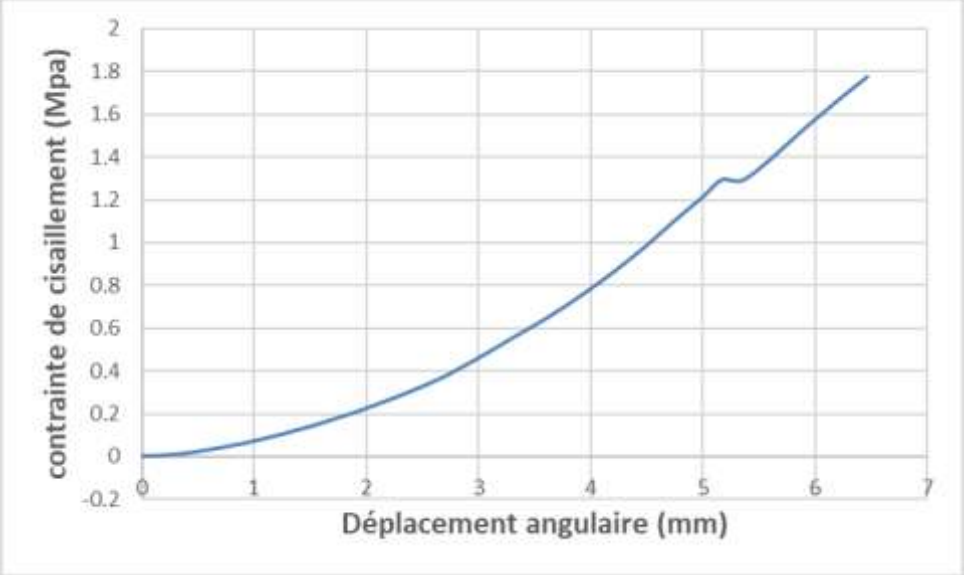


Figure 5.11 Diagramme de cisaillement-déplacement MCB

V.2.1.2ésultats expérimentaux

Le calcul du module de Young de la maçonnerie E_{maco} est réalisé dans la zone allant jusqu'à 30% de la charge maximale Fmax. L'évolution de la déformation en fonction de la contrainte de compression est présentée dans la *Figure 5.10*. Le calcul de la contrainte de compression maximale σ est réalisé en divisant la force Fmax par la surface de section *A*. Les résultats expérimentaux sont résumés dans le *Tableau 5.10*. La résistance en compression des maçonneries est de *1.22. MPa* et la valeur moyenne du module de Young de la maçonnerie est *22.096 MPa*.

Tableau 5.10 les résultats expérimentaux sur les murets MCA et MCB

Nom Muret	***A(mm²)***	**FC *(KN)***	**σc *(MPa)***	**Module de Young maçonnerie *(MPa)***
MCA	**430*105**	**97.711**	**2.164**	**15.80**
MCB	**430*105**	**100.51**	**2.226**	**20.87**

Les résultats expérimentaux montrent que la rupture des murs se produit avec une fissuration Verticale en parallèle à l'axe de compression. La *Figure 5.7* représente le comportement en compression des deux murets MCA et MCB

V.2.1.3 Discussion de résultats :

Les charges sont transmises aux brique qui sont soumises en traction par flexion. La *Figure 5.8.* Représente la rupture du muret par fissuration verticale traversant les joints verticaux et les briques. La rupture des joints verticaux est produite à l'interface brique-mortier avant que les briques soient fissurées. La rupture est plus fragile.

*** nous avons constaté que les valeurs à la compression du muret MTB sont supérieur a les valeurs de compression du muret MTA, malgré que les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes (4x4x16) du mortier 1 :1 :3 sont supérieur de 1 :1 :5.**

V.2.2 Comportement des murs MR en cisaillement :

Cinque murets ont été testés. Deux muret témoin MTA -Réf et MTB-NR-Réf Deux murets renforcés par FRP selon la technique (NSM) avec deux lamelles FRP dans la direction des joints de mortier horizontale(MR1)
Deux murets renforcés par FRP selon la technique (NSM) avec deux lamelles FRP dans la direction des joints de mortier verticale et Un Muret renforcé par FRP(NSM) dans les deux cotés.
La variation des configurations de renforcement a l'objectif d'étudier :
1. L'effet de l'orientation des lamelles.
2. L'effet de la direction de renforcement de NSM FRP.

Muret MTA :



Figure 5.12:MURET MTA

V2.2.1 Résultats expérimentaux :

Différents modes de rupture sont caractérisent les murs de référence (non renforcés). Cette différence est liée essentiellement au travail d'appareillage, et à la vitesse de chargement du mur testé à une faible vitesse de chargement. Par conséquent, les comportements des murs renforcés sont comparés avec le comportement du mur de référence correspondant

V.2.2.2 Comportement des murs non renforcés :

- ***Résistance au cisaillement :***

Le muret témoin MTA a une résistance au cisaillement maximale de 1.22 MPa correspondant à une force maximale de 69.17 KN.

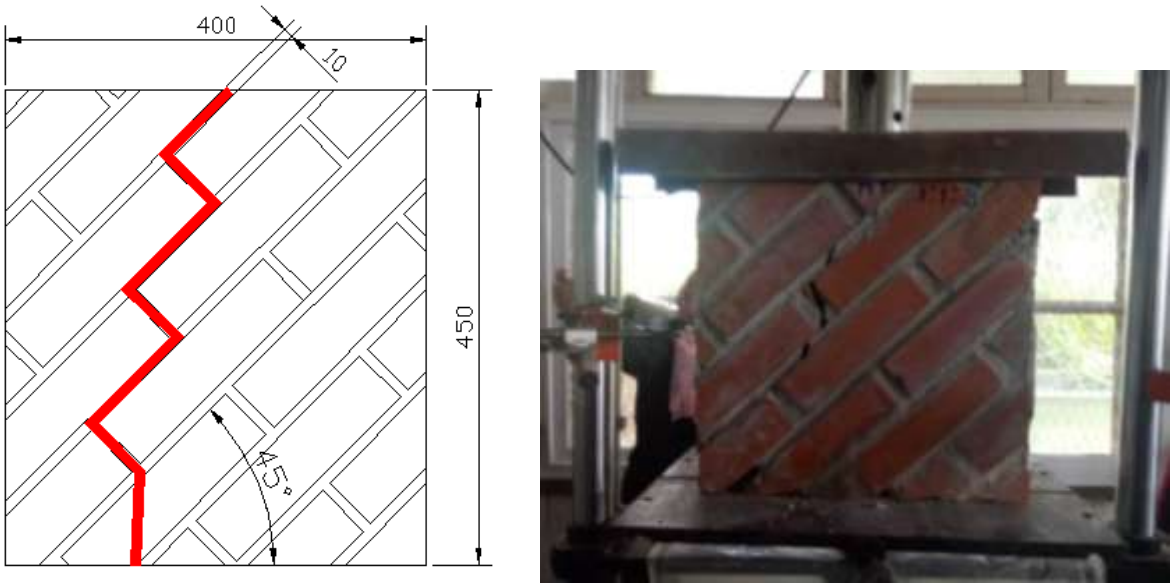


Figure 5.13 : Compression des murs inclinés non renforcés : modes de rupture

- ***Déplacement et ductilité des murs non renforcés :***

Le déplacement maximal enregistré est de 11.79mm, et le déplacement élastique 2.76 mm, ce qui signifié que le comportement du mur est fragile.

Tableau 5.11 : Résultats expérimentaux des murs non renforcés

	P_{max}	Surface A	τ_{max}	Module de cisaillement 30G	Module de cisaillement 70G	γ_u	Déformation max	γ_e	Déformation élastique	Ductilité μ_y
MRTA	69.17	400*105	1.22	22.096	29.512	11.79	2.62%	2.76	0.61%	4.27
MRTB	91.03	400*105	1.61	20.626	26.009	10.78	2.40%	4.73	1.05%	2.28

➢ ***Module de cisaillement des murs non renforcés :***

Le module de cisaillement est de 22.096 MPa, calculé à 30% de la contrainte maximale.

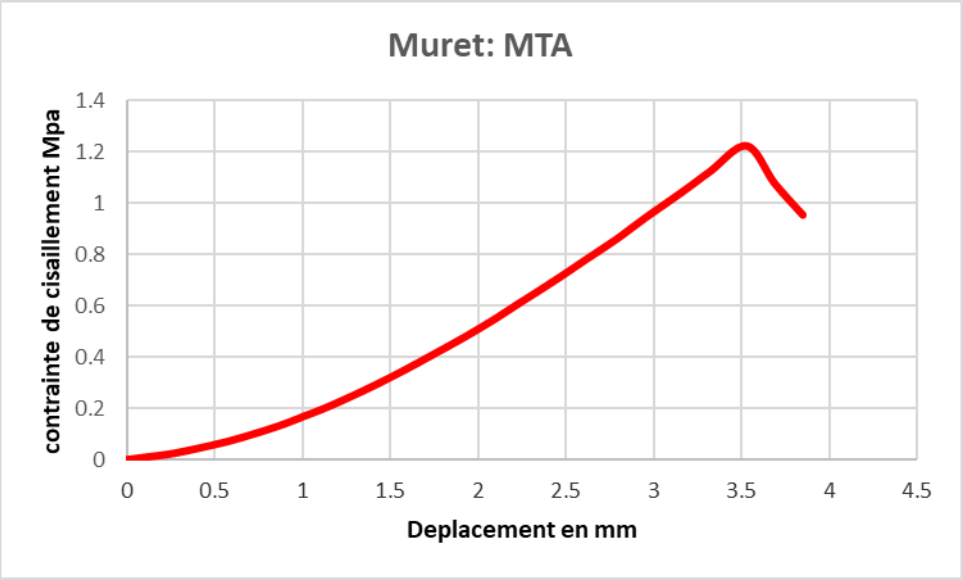


Figure 5.14: Diagramme de cisaillement-déplacement MTA

Muret MTB :

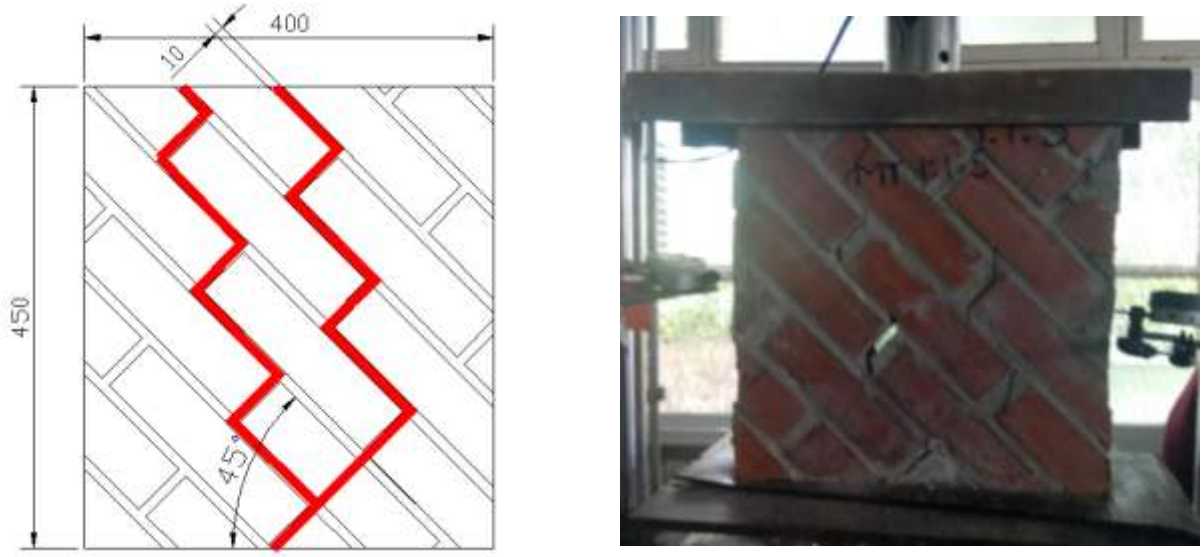


Figure5.15 le mode de rupture de mur témoin

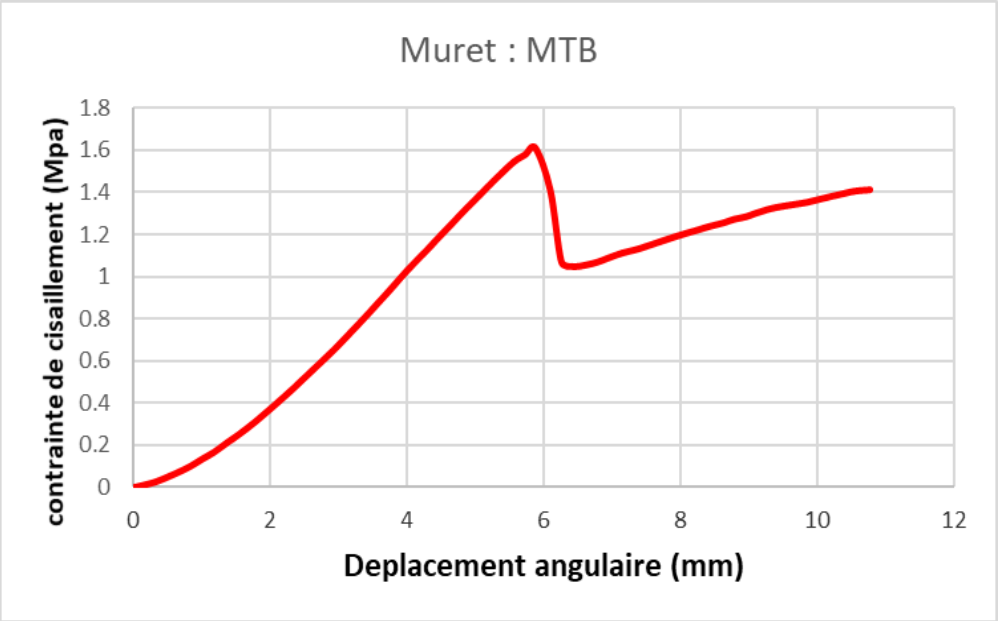


Figure5.16 Diagramme de cisaillement-déplacement MTB

Le mur MTB présente une force de rupture de 91.025 KN, ce qui produit dans ce mur une contrainte de cisaillement maximale de 1.61 MPa. (FigureV.6).

Le déplacement maximal enregistré est de 11.78 mm, et le déplacement élastique 4.73 mm, ce qui signifié que le comportement du mur est fragile.

Le module de cisaillement est de 20.6026 MPa, calculé à 30% de la contrainte maximale.

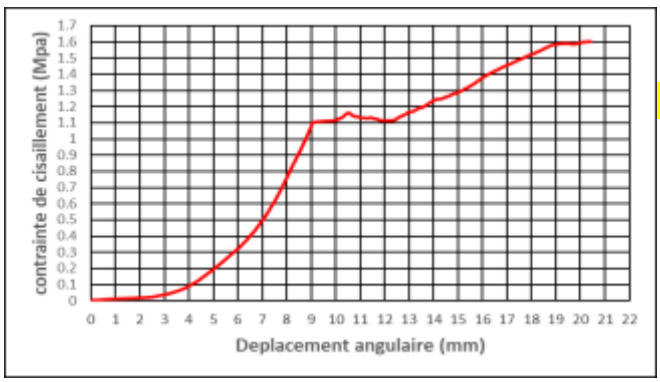
V.2.3 Comportement des murs renforcés :

V.3.1 Résultats des murs renforcés par FRP NSM :

Le renforcement par FRP NSM est effectué sur un seul face et les deux faces du mur en variant l'orientation des lamelles et Les différentes configurations sont présentées dans la *Figure …….*

- **Murets renforcés en perpendiculaire au joint de mortier encré au brique par la méthode de NSM (MR1A et MR1B) :**

- Muret M1A :





Cisaillement-déformation angulaire *mode de rupture*

Figure 5.17 Diagramme de cisaillement-déplacement Muret M1A

➢ *Résistance et modes de rupture*



Figure 5.18 ; mode de rupture, destruction du muret (brique et mortier).

Le renforcement du mur avec une barre PFRP a augmenté la charge maximale jusqu'à 90.04 *KN*, ce qui a produit une contrainte de cisaillement de *1.60 MPa*. Les déformations élastiques et maximales sont de 0.10.%. La ductilité a une valeur de *2.03.*
La déformation élastique et maximale enregistrées ont une valeur de 2.24 % et de 4.54%.
La ductilité du mur est de 2.03. Le module de cisaillement G30 et G70 a les valeurs 6.934 et 10.302 MPa, respectivement.
Nous avons constaté par apport au muret témoin (MTA) :

- Une augmentation de résistance de cisaillement de 30.17%

- Une augmentation de valeur de déplacement ultime de 73.37%.

- - Une augmentation de valeur de la ductilité de 15%

- Muret M1B :

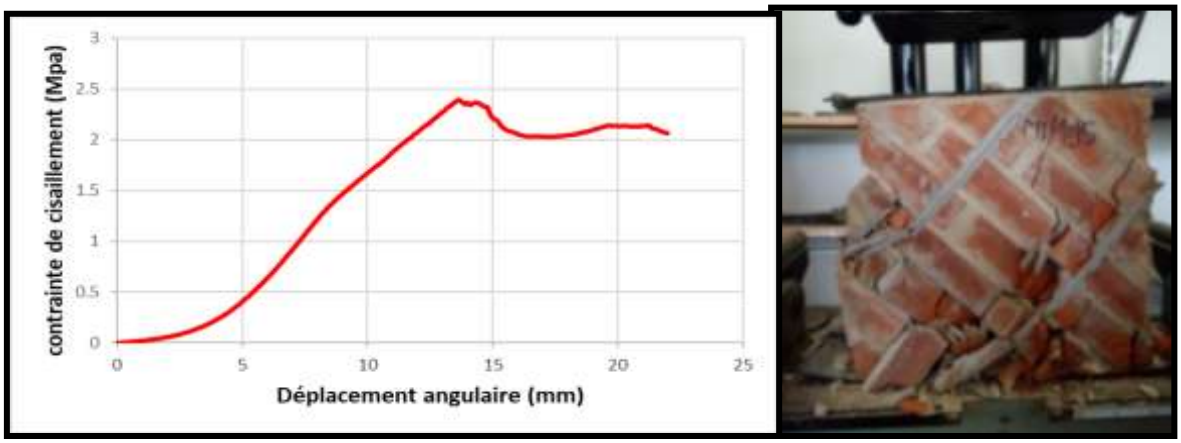


Figure 5.19: Diagramme de cisaillement-déplacement et le mode de repture : M1B

Le renforcement du mur avec une barre PFRP a augmenté la charge maximale jusqu'à 135.50 KN, ce qui a produit une contrainte de cisaillement de 2.39 MPa.

La déformation élastique et maximale enregistrées ont une valeur de 2.23 % et de 4.89%.

La ductilité du mur est de 2.19. Le module de cisaillement G30 et G70 a les valeurs 11.368 et 16.276 MPa, respectivement.

Nous avons constaté par apport au muret témoin (MTB) :

- Une augmentation de résistance de cisaillement de 48.86%

- Une augmentation de valeur de déplacement ultime de 104.08%.

- Une augmentation de valeur de la ductilité de 97.85%

*** Murets renforcés en parallèle au joint (MR2A et MR2B) :**

- Muret MR2A :

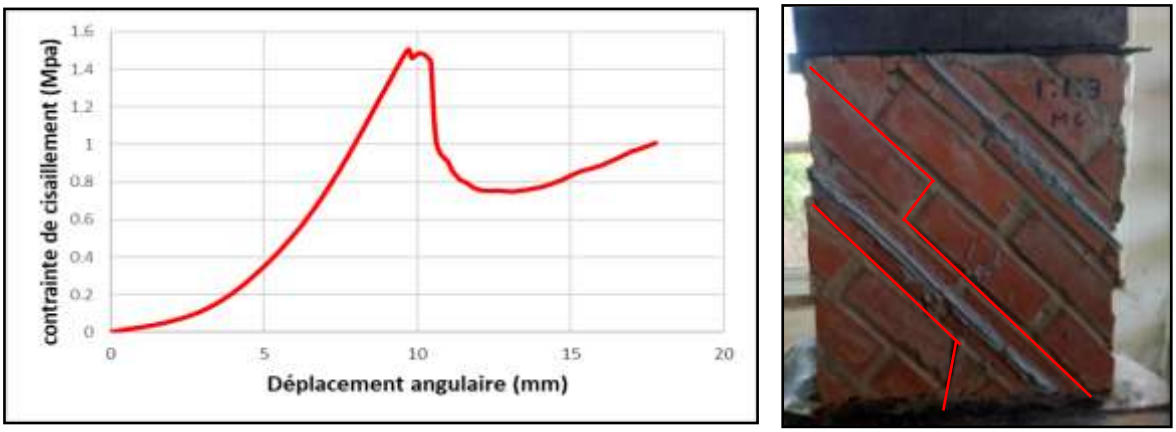


Figure 5.20: Diagramme de cisaillement-déplacement et le mode de rupture : M2A

Le renforcement du mur avec une barre PFRP a augmenté la charge maximale jusqu'à 85.08

KN, ce qui a produit une contrainte de cisaillement de 1.50 MPa.

La déformation élastique et maximale enregistrées ont une valeur de 1.81% et de 3.95%.

La ductilité du mur est de 61.8. Le module de cisaillement G30 et G70 a les valeurs 7.915 et 12.948 MPa, respectivement.

Nous avons constaté par apport au muret témoin (MTA) :

- Une augmentation de résistance de cisaillement de 23.00%

- Une augmentation de valeur de déplacement ultime de 50.72%.

- Une augmentation de valeur de la ductilité de 7.00%.

- Muret M2B :

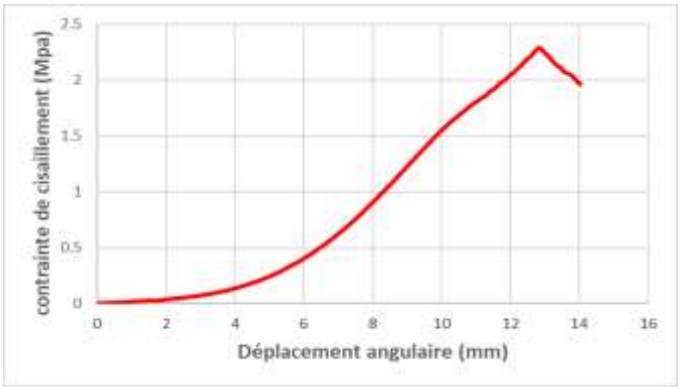




Figure 5.21: Diagramme de cisaillement-déplacement et le mode de rupture : M2B



a- Face non renforcé



b- face renforcé

Figure 5.22 ; mode de rupture, fissuration au niveau de joint mortier

Le renforcement du mur avec une barre PFRP a augmenté la charge maximale jusqu'à 129.70 KN, ce qui a produit une contrainte de cisaillement de 2.29 MPa.

La déformation élastique et maximale enregistrées ont une valeur de 2.26 % et de 3.12%.

La ductilité du mur est de 1.38. Le module de cisaillement G30 et G70 a les valeurs 9.512 et 15.748 MPa, respectivement.

Nous avons constaté par apport au muret témoin (MTB) :

- Une augmentation de résistance de cisaillement de 42.49%
- Une augmentation de valeur de déplacement ultime de 30.24%.
- Une démunissions de valeur de la ductilité de 36.36%.

*** Murets renforcés en parallèle au joint (M3A et M3B) :**

- Muret M3A :



a- Face 01



b- face 02

c-Vue de coté



Figure V.13 ; mode de rupture muret M3A

- On a constaté que la résistance de cisaillement augmente de 158.74% par rapport au muret témoin.

- Une destruction apparue a l'intérieur du muret. voir Figure V.11 .a.

Muret M3B :



Figure V.14 ; mode de rupture muret M3A

- On a constaté que la résistance de cisaillement augmente de 97.86% par rapport au muret témoin (MTB).

Le tableau suivant résume tous les résultats expérimentaux sur les murets :

Tableau 5.12 : Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux murets renforcé

muret	P_{max} kN	Surface A (mm)	T_{max} Mpa	Module de cisaillement 30G	Module de cisaillement 70G	γ_u mm	γ_e mm	Ductilité μ_y
MR1A	90.04	400*105	1.60	6.934	10.302	20.44	10.09	2.03
MR1B	135.50	400*105	2.39	11.368	16.276	22.00	10.03	2.19
MR2A	85.08	400*105	1.50	7.915	12.948	17.77	8.14	2.18
MR2B	129.70	400*105	2.29	9.512	15.748	14.04	10.19	1.38
MR3A	178.98	400*105	3.16					
MR3B	180.10	400*105	3.18					

V.4 CONCLUSION

Le renforcement du mur avec une barre PFRP a augmenté la charge maximale

Le renforcement perpendiculaire au joint augmente la résistance par rapport au renforcement parallèle au joint.

Les valeurs à la compression et au cisaillement des muret construit avec mortier 1 :1 :3 sont supérieur a les valeurs de compression du muret (1 :1 :5), malgré que les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes (4x4x16) du mortier 1 :1 :3 sont supérieur de 1 :1 :5.

Le renforcement des murets dans les deux faces augmente la résistance jusqu'à 160%.

V.1.résultats expérimentale sur les matériaux 84

V.1.1 .Les briques 84

V.1.2. Les sable : 86

V.1.2.1. Analyse granulométrique de sable Fin : 86

V.1.2.2. Module de finesse : 87

V.1.2.3. Résultats de L'équivalant de sable. 87

V.1.2.4. Résultat de la masse volumique : 88

V.1.3. Caractéristique mécanique du mortier : 89

V.2 RESULTATS EXPERIMENTALE SUR LES MURETS 91

V.2.1 Le comportement des assemblages de briques en compression axiale : 91

V2.1.1 Essai de compression uni-axiale sur des murets 91

V.2.1.2ésultats expérimentaux 93

V.2.1.3 Discussion de résultats : 94

V.2.2 Comportement des murs MR en cisaillement : 94

V.2.2.2 Comportement des murs non renforcés : 95

V.2.3 Comportement des murs renforcés : 97

V.3.1 Résultats des murs renforcés par FRP NSM : 97

V.4 CONCLUSION 103

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 le renforcement au direction perpendiculaire au sens