

RÉSUMÉ

La prédiction du comportement mécanique de la maçonnerie est rendue difficile à cause de l'hétérogénéité de ses constituants.

Dans ce travail, qui s'inscrit dans la continuité des travaux initiés au laboratoire EOLE, nous nous proposons d'évaluer la résistance au cisaillement de murets en agglomérés de béton hourdés à l'aide d'un mortier à base de ciment et d'un mortier bâtard avec variation de l'épaisseur du joint (5, 10 et 15 mm).

Le programme expérimental effectué sur plus d'une soixantaine de murets-tests nous a permis de montrer que l'épaisseur du joint de 15 mm présente la résistance optimale dans le cas d'un mortier de jointoiment résistant. Aussi les murets à base de ciment présentent une résistance au cisaillement supérieure à ceux proposées par l'EUROCODE 6 et les recommandations du CNERIB.

Mots clés :

Cisaillement, maçonnerie, muret, joint, parpaing, résistance

ABSTRACT

Predicting the mechanical behavior of masonry is made difficult because of the heterogeneity of its components.

In this work, which is a continuation of the work initiated in the laboratory Eole, we propose to evaluate the shear strength of walls agglomerated houredés concrete with a cement mortar and a bastard mortar with varying thickness of the seal (5, 10 and 15 mm).

The experimental program carried out on more than sixty walls tests allowed us to show that the gasket thickness 15 mm is the optimal resistance in the case of a mortar resistant grouting. Also the walls cementations exhibit shear strength than those proposed by the EUROCODE 6 and recommendations of CNERIB .

Keywords:

Shear, Masonry Wall, Seal, Block, Resistance.

ملخص

يواجه السلوك الميكانيكي و البناء صعوبات بسبب عدم تجانس مكوناته.

في هذا العمل الذي ينص على الأعمال الابتدائية في مخبر EOLE التي تقترح تقييم قوة قص الجدران المصنوعة من "parpaing"، محشو بمونة الإسمنت و الآخر من الجير ، متعدد السمك المتمثل في (5 ، 10 ، 15 ملم).

أجري البرنامج التجريبي على أكثر من 60 جدار، سمحت الاختبارات بإظهار أن سمك 15 ملم هو أكثر مقاومة في حالة وجود الحشو المقاوم هو أيضا تلك اقترحت من طرف مدونات الكود الأوروبي 6 و المركز الوطني للدراسات و الأبحاث المتكاملة للبناء.

الكلمات الرئيسية :

البناء، الجدران، مقاومة، السمك، مونة الإسمنت

NOMENCLATURE

M	: Muret en parpaing
A	: Mortier en ciment (1 : 4)
B	: Mortier en ciment (1 : 6)
C	: Mortier bâtard (1 : 2 : 9)
MA	: Muret en mortier de ciment (1 : 4)
MB	: Muret en mortier de ciment (1 : 6)
MC	: Muret en mortier bâtard (1 : 2 : 9)
MA1	: Muret en mortier de ciment (1 : 4) de 10 mm d'épaisseur
MB0.5	: Muret en mortier de ciment (1 : 6) de 5 mm d'épaisseur
MC1.5	: Muret en mortier bâtard (1 : 2 : 9) de 15 mm d'épaisseur
MA1S	: Muret en mortier de ciment (1 : 4) de 10 mm sans le joint vertical
MAS3J	: Muret en mortier de ciment (1 : 4) sans les 3 joints verticaux
MA1S3J	: Muret en mortier de ciment (1 : 4) de 10 mm sans les 3 joints verticaux
C	: Coefficient d'adhérence
\emptyset	: Coefficient de friction
μ	: Coefficient de frottement apparent
σ_c	: Contrainte verticale de précompression
τ	: Contrainte moyenne de cisaillement
f_{vk}	: Résistance au cisaillement selon L'Eurocode 6
f_{vk0}	: Résistance au cisaillement sous une contrainte de compression nulle (Eurocode 6)
σ_d	: Résistance de compression de calcul perpendiculaire au cisaillement (Eurocode 6)
τ_n	: Résistance au cisaillement selon Le CNERIB
τ_0	: Résistance au cisaillement sous une contrainte de compression nulle (CNERIB)
σ_g	: Résistance de compression de calcul perpendiculaire au cisaillement (CNERIB)
f_b	: Résistance en compression normalisée des éléments de la maçonnerie
g	: Largeur totale des deux bandes de mortier

t	: Épaisseur du mur
V_{sd}	: Effort tranchant de calcul du mur
V_{Rd}	: La Résistance au cisaillement de calcul du mur.
I_c	: Longueur de la partie comprimée du mur
N_{sd}	: La Charge verticale de calcul.
Q	: Effort tranchant dans le mur exprimé
S_m	: Moment statique de la section transversale du mur
I_m	: Moment d'inertie de la section transversale
S_s	: Contrainte de traction
P	: Force de compression de la diagonale
A_n	: Surface nette
W	: Largeur du mur
H	: Hauteur du mur
n	: Pourcentage de la surface brute du bloc
γ	: Déformation tangentielle
ΔV	: Première diagonale
ΔH	: Deuxième diagonale
g	: Moyenne de la diagonale
G	: Module de rigidité

INTRODUCTION

La maçonnerie étant un élément structurel hétéroclite, on s'attend à une pluralité étendue de causes probables de son altération. En effet, toute altération de ses constituants (pierres, mortiers etc.) constitue une altération de l'ensemble.

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 qu'il faut prendre en compte.

A l'état actuel la résistance de la maçonnerie au cisaillement est estimée sur la base de relations techniques déduites des relations expérimentales obtenues à partir des essais sur des murs en vraie grandeur ou prototypes. Bien que l'empirisme garanti la stabilité de l'édifice, il fournit peu d'informations sur le comportement des matériaux dans un état de contraintes données. Mais grâce à différentes recherches qui ont été réalisés, différents critères de rupture de la maçonnerie pour un état de cisaillement ont été déterminés.

En Algérie, les blocs en béton creux « parpaing » est le matériau utilisé par excellence dans les constructions pour son prix et surtout sa disponibilité.

L'objectif de notre travail est de réaliser des essais expérimentaux sur des murs en maçonnerie en utilisant des blocs en « parpaing ». Ces essais tiendront compte des caractéristiques d'hétérogénéité de la maçonnerie et des différents mécanismes de rupture.

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre définit la maçonnerie, ses types et ses constituants,

Le deuxième chapitre présente une revue bibliographique sur le comportement de la maçonnerie à la flexion, à la compression, à la traction et au cisaillement. Différentes expressions analytiques et empiriques y sont présentées.

Le troisième chapitre introduit le programme expérimental effectué au niveau du laboratoire en mettant en exergue les méthodes et matériaux,

Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation et l'exploitation des résultats et interprétations obtenus,

Une conclusion générale clôt ce travail en identifiant quelques perspectives.

CHAPITRE 1

LES TYPES DE MAÇONNERIE

On appelle maçonnerie l'art de bâtir une construction par l'assemblage de blocs élémentaires compactés entre eux par la gravité. Les structures maçonnées sont difficiles à modéliser compte tenu de la diversité des matériaux qui peuvent les constituer ainsi que de la diversité des assemblages possibles. Nous allons dans un premier temps nous concentrer sur la caractérisation des matériaux utilisés dans la maçonnerie puis nous analyserons ensuite les difficultés liées à la modélisation de telles structures

1.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAÇONNERIE :

1.1.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les différents types de maçonnerie et leurs modes de fabrication et leurs technologies de construction .

- Maçonnerie de pierre naturelle,
- Maçonnerie en agglomérés de béton,
- Maçonnerie en brique de terre cuite,
- Maçonnerie en briques silico-calcaire.

1.1.2 Maçonnerie de pierre naturelle :

La pierre naturelle est un des matériaux les moins consommateurs d'énergie, elle ne subit presque aucune modification entre sa sortie en carrière et sa mise en œuvre sur le chantier. S'ajoute à cette qualité une production extrêmement faible de déchets sur le chantier du fait de la possible réutilisation des blocs ou moellons sans perte de qualité et de la transformation des déchets de carrière en granulats. N'oublions pas aussi que la ressource en pierre naturelle est encore très importante et que son coût 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 posés (voir figure 1.1).



Figure 1.1 Pierre naturelle (Pourrat, 2009)

1.1.2.1 *Moellons*

Les pierres employées non gélives dénommées moellons, doivent être d'un poids inférieur à 40kg afin de permettre leur manipulation par un seul homme. Les moellons peuvent être bruts de forme irrégulière ou taillés selon l'aspect recherché.

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.

1.1.2.2 *Jointoiement :*

La largeur des joints, variables dans cette maçonnerie, ne doit pas excéder 4 cm et les espaces plus larges doivent être remplis par des éclats de pierre. Lorsque les joints restent apparents, ils doivent être réalisés de manière à offrir une résistance minimale à l'écoulement de l'eau sur le parement. Les murs ainsi construits peuvent être soit laissés bruts, c'est-à-dire que l'appareil reste visible en parement, soit recouverts d'un crépissage (voir figure 1.2).

1.1.2.3 *Épaisseur des murs :*

L'épaisseur des murs dépend des pierres employées mais ne peut être inférieur à 30-40 cm. Les moellons taillés, grossièrement ou non, permettent des réalisations variées dont les caractéristiques générales d'exécution sont présentés par la figure 1.2.

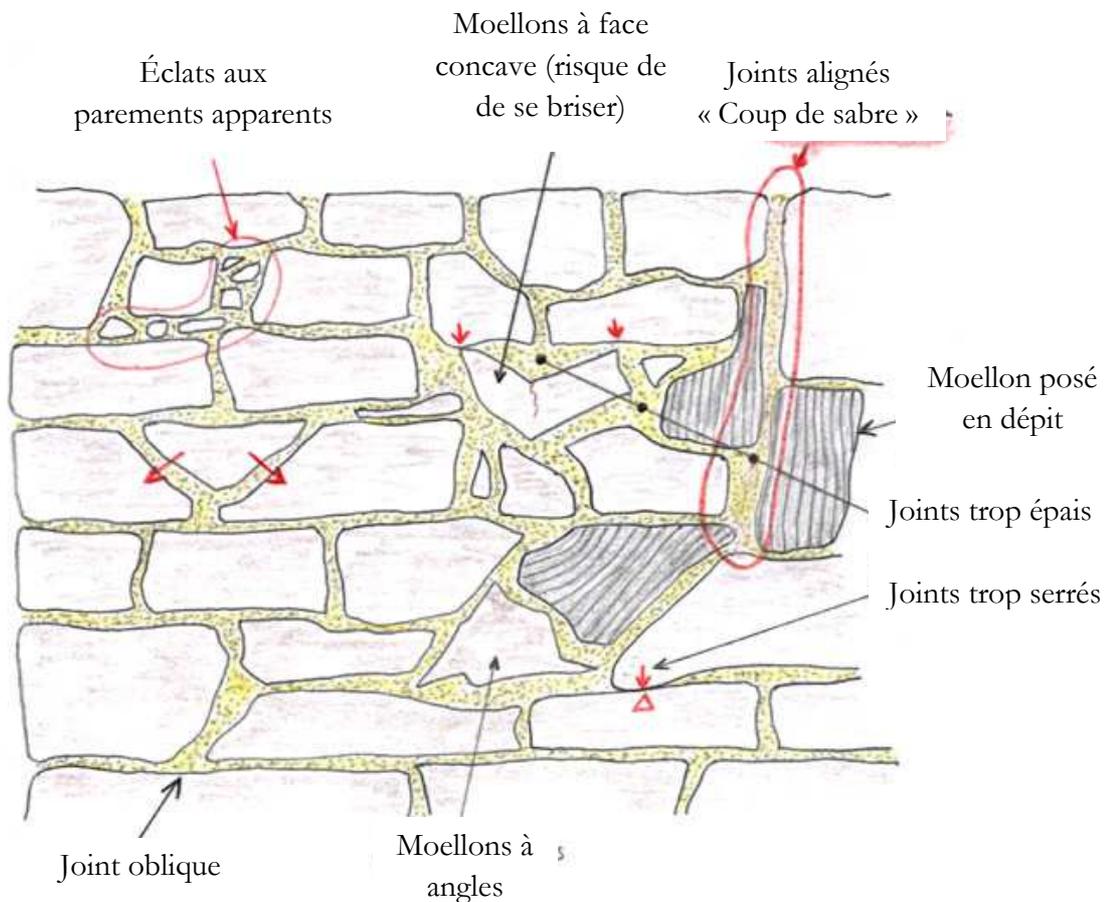


Figure 1.2 Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990)

1.1.3 Maçonnerie en agglomérés de béton

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

On distingue deux grandes catégories de blocs :

1.1.3.1 *Agglomérés pleins:*

On les utilise principalement pour ériger les murs de soubassement. La résistance des blocs pleins, ou même perforés, est supérieure à celle des blocs creux. Ces derniers résistent donc d'autant mieux aux différentes poussées du sol.

1.1.3.2 *Agglomérés creux:*

On les utilise pour tous les autres types de mur.



Figure 1.3 agglomérés en béton

1.1.3.3 *Types de parpaings :*

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

Figure 1.4 Les différents types de parpaing (BALANDIER, 1990)

1.1.3.4 Processus de fabrication des parpaings

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



- 1 : Échantillonnage des agrégats
- 2 : Mélangeur
- 3 : Bande transporteuse
- 4 : Moulage des blocs
- 5 : Système de contrôle
- 6 : Gerbeur de déchargement
- 7 : Plateforme de séchage

Figure 1.5 : Processus de fabrication des blocs en parpaing (QGM, 2014)



Préparation du mélange



Machine de fabrication



Fabrication des blocs



Séchage et stockage

Figure 1.6 : fabrication des parpaings (SOGERHWIT, 2014)

1.1.4 Maçonnerie en brique d'argile cuite :

La brique à maçonner en terre cuite possède de remarquables propriétés de durabilité, de résistance, de stabilité, de régulation de l'humidité et d'inertie thermique; elle contribue donc très activement à un habitat sécurisé et sain, éléments essentiels au développement d'une atmosphère agréable. Grâce à ses performances thermiques et phoniques, la brique à maçonner en terre cuite est adoptée par de nombreux systèmes de construction, tels que le traditionnel «double mur» ou utilisée en combinaison avec des matériaux isolants intérieurs ou périphériques modernes.



Figure 1.7 Fabrication de la brique en terre cuite (BAUD, 1990)

Il existe 3 types de briques :

- Briques pleines,
- Briques perforées,
- Briques creuses.

1.1.4.1 *Brique pleine* :

Élément de construction traditionnel, 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 1.8 Brique en terre cuite pleine

1.1.4.2 *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.

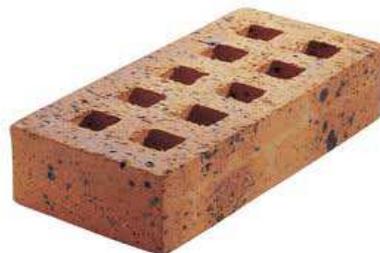


Figure 1.9 Brique perforée

1.1.4.3 *Brique creuse* :

Légère et économe en matériau en comparaison à 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.) ou du matériau utilisé.

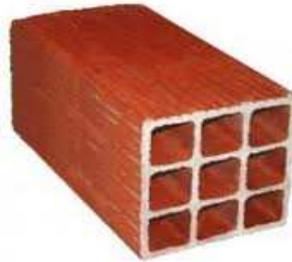


Figure 1.10 Brique creuse

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.

1.1.5 **Maçonnerie en briques silico – calcaire :**

La brique silico-calcaire est composée d'un mélange de chaux (8 – 10%), sable siliceux (90 – 92%) et d'eau, sans adjuvant chimique, pressé et durci. Lors de la fabrication des briques, la température de durcissement s'élève à 160 - 200° C (voir figure 1.9).

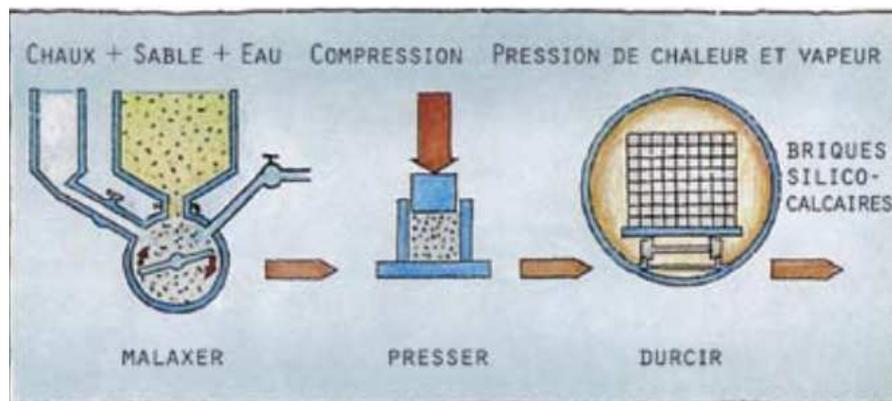


Figure 1.11 Schéma de production d'une brique silico – calcaire (POURRAT, 2009)

En plus de ses qualités thermiques et phoniques, elle a la possibilité de faire des économies importantes de matières premières (peut rester brute d'enduisage) car elle est très utilisée dans les systèmes constructifs qui assurent un prix de revient plus bas que les autres matériaux tel que le parpaing et la brique rouge.



Figure 1.12 Brique silico-calcaire (POURRAT, 2009)

1.2 LES MORTIERS :

Le mortier est un mélange de liant « chaux et/ou ciment », de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

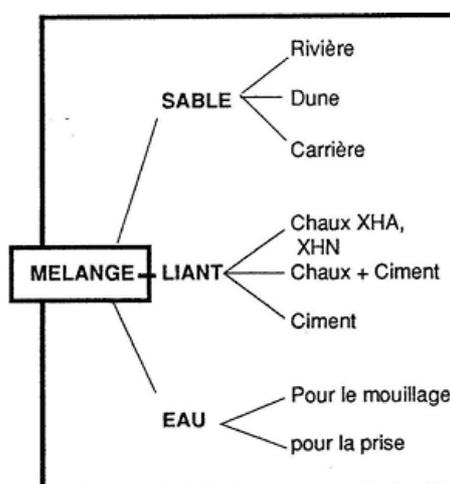


Figure 1.13 : Constituants d'un mortier (SEMLALI, et al., 2008)

1.2.1 Types de mortier

1.2.1.1 Mortier de ciment

Les mortiers de ciment, résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus, un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable.

1.2.1.2 Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique. Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges.

1.2.2 Emploi des mortiers :

1.2.2.1 *Le hourdage de maçonnerie :*

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre détaille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche.

1.2.2.2 *Les enduits*

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers à côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans le DTU 26.1, se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.

1.2.2.3 *Les chapes*

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise niveau du dallage et la régularité de sa Surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol.

1.2.2.4 *Les scellements et les calages*

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de Mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de Mobiliers urbains, de regards de visite.

1.3 APPAREILLAGE DE LA MAÇONNERIE :

Les éléments de maçonnerie dans un mur doivent être appareillés au mortier de sorte que le mur se comporte comme un unique élément structural. Voir figure 1.14

1.3.1 Appareillage de la maçonnerie pour les éléments de forme régulière et de dimensions uniformes

Pour assurer une adhérence appropriée, les éléments devraient être appareillés d'un lit à l'autre avec un recouvrement égal à au moins 0,4 fois la hauteur de l'élément ou 40 mm, en prenant la plus grande de ces deux valeurs. Dans les angles ou les jonctions, le recouvrement des éléments ne doit pas être inférieur à la largeur des éléments ou 0,4 fois la hauteur des éléments, en prenant la plus faible de ces deux valeurs. Des éléments de maçonnerie accessoires devraient être utilisés de sorte à obtenir le recouvrement spécifié dans le reste du mur (EN 1996-2)

1.3.2 Orientation des plans de stratification d'un mur en maçonnerie :

Dans les murs où les éléments de maçonnerie ne font pas toute l'épaisseur du mur, des éléments d'une longueur comprise entre 0,6 et 0,7 fois l'épaisseur du mur devraient être utilisés avec un intervalle ne dépassant pas 1 m aussi bien horizontalement que verticalement. Ces éléments de maçonnerie devraient généralement avoir une hauteur supérieure à 0,3 fois leur longueur. Les éléments traversant ne sont pas recommandés en raison du risque de pénétration d'eau le long des joints de mortier traversant

1.3.3 Adhérence :

L'adhérence entre le mortier et les éléments de maçonnerie doit permettre un comportement correct de la maçonnerie.

- Si le calcul repose sur la résistance au cisaillement ou à la flexion, des prescriptions relatives aux caractéristiques de la maçonnerie concernée et aux procédures d'humidification appropriées doivent être incluses dans la spécification de conception.
- Si la résistance au cisaillement ou à la flexion de la maçonnerie est évaluée à partir d'essais menés conformément aux parties correspondantes de l'EN 1052, il devrait être spécifié que les matériaux, les types d'appareillage et la conservation doivent être identiques à ceux des essais.

1.3.4 Finitions des joints :

Les finitions des joints doivent être appropriées pour atteindre l'aspect et les performances requises du mur.

Lors de la spécification des finitions des joints, les facteurs suivants devraient être pris en compte

- le support requis pour l'application des finitions ;
- la forme de la finition des joints ;
- toute exigence spéciale pour serrer les joints par outillage ;
- le rejointoiement pour obtenir une couleur ou un effet particulier ;
- l'effet de joints en retrait ou de bandeaux.

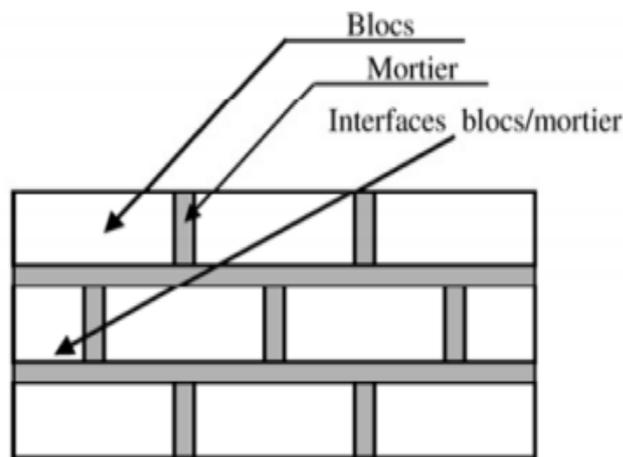


Figure 1.14 : Appareillage d'un mur en maçonnerie (GHANEM, 2013)

1.4 FONCTIONNALITÉS ET PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE

1.4.1 Fonctionnalités de la maçonnerie

La maçonnerie a de différents avantages fonctionnels dont la personne a besoin, La figure 1.15 représente quelques fonctionnalités de cette dernière :

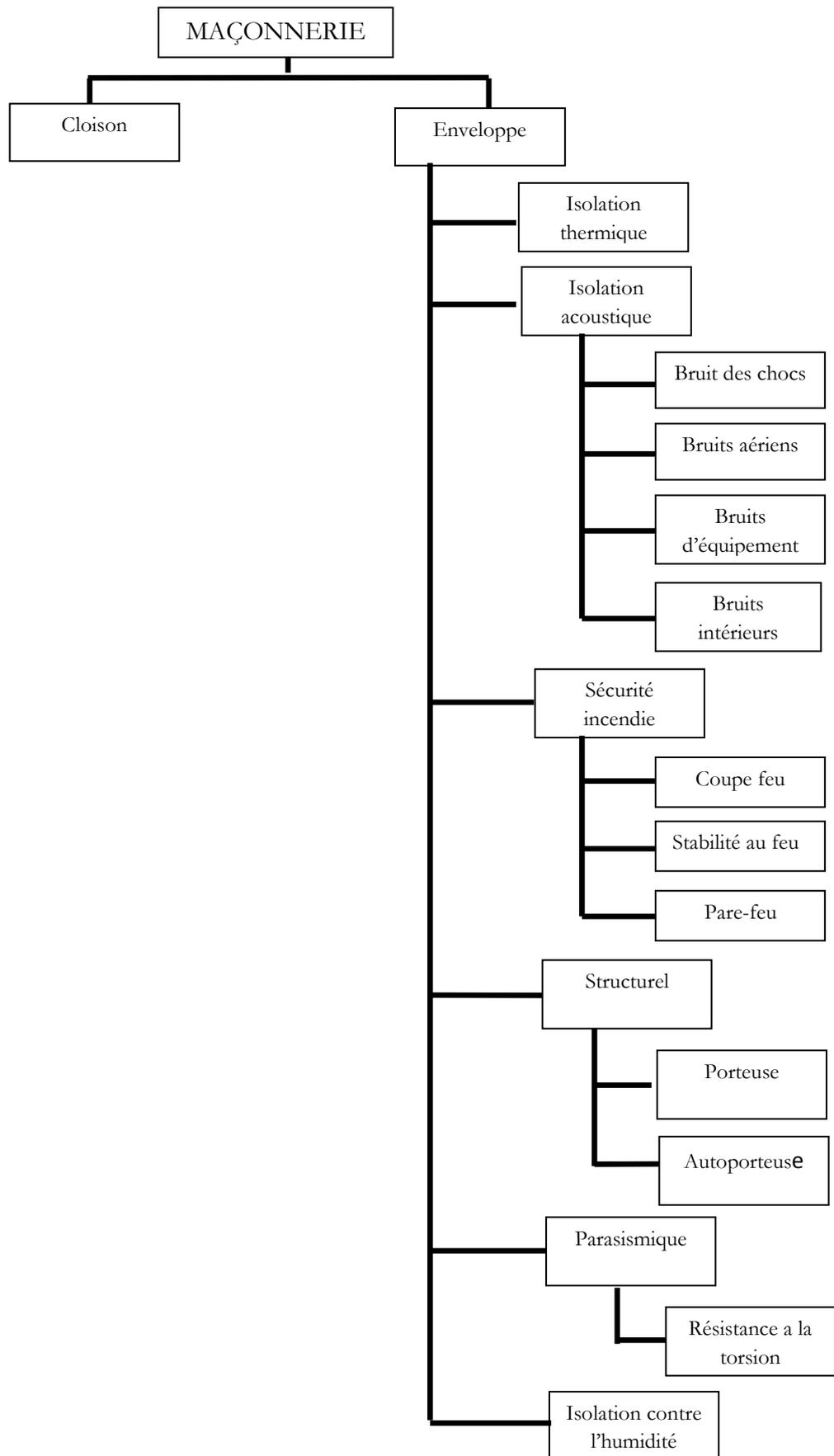


Figure 1.15 fonctionnalité de la maçonnerie (GHANEM, 2013)

1.4.2 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 1.16 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 1.16 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 naître 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 fissures, qui sont le plus 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 de plusieurs matériaux sur la paroi et qui à cause de leur comportement différent à la Chaleur ou à l'humidité créés des fissures.
 - L'absence ou la mauvaise mise en œuvre des chaînages horizontaux et verticaux au niveau des 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 de ces différents éléments. Étant donné que les blocs de maçonnerie sont liés les uns aux autres, leur retrait ne peut s'effectuer librement et du cou cela provoque des fissures. L'intensité de ce phénomène de rétraction est liée à la quantité d'eau présente en excès par rapport au minimum 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 de poutrelles préfabriquées en béton armé ou précontraint. Ce plancher peut subir une légère déformation dans sa partie centrale, elle s'accompagne des fois par la rotation de l'appui sur le mur 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 1.17 : Pathologies de la maçonnerie

1.5 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.

CHAPITRE 2

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE

2.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous présentons un état des connaissances sur :

- Mode de rupture de la maçonnerie.
- Influence des charges latérales sur une structure en générale.
- Comportement en cisaillement des murs en maçonnerie.
- Comportement en compression des murs en maçonnerie.
- Comportement en flexion des murs en maçonnerie.
- Comportement des murs en traction.
- Comportement des murs vis-à-vis à la charge concentrée.

2.2 MODE DE RUPTURE DE LA MAÇONNERIE

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

2.2.1 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.

2.2.2 Rupture par basculement

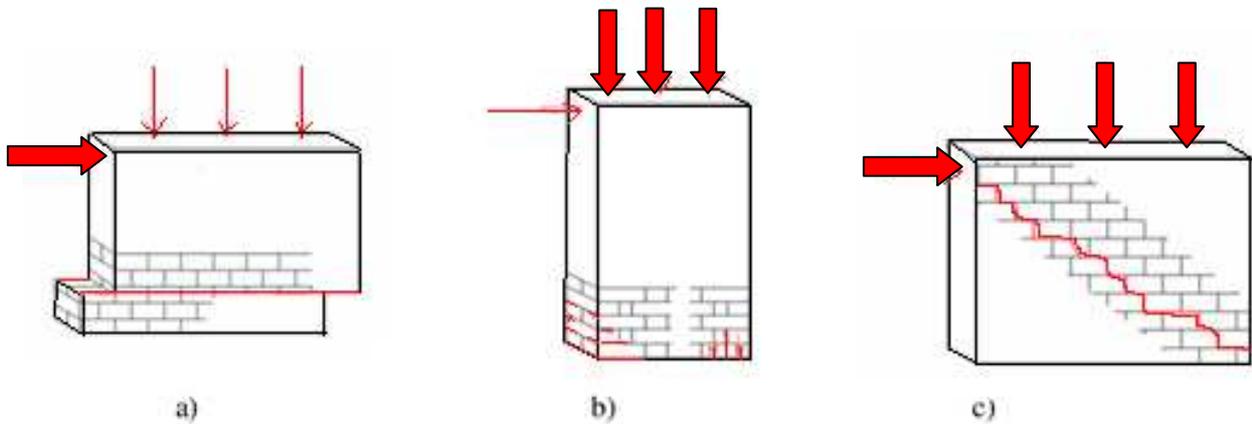
Le basculement se produit lorsque la charge ou le déplacement horizontal augmentent, le joint se rompt en traction, et l'effort tranchant est conduit par la maçonnerie en compression, la rupture finale est obtenue par basculement du mur et rupture en compression du coin.

2.2.3 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.

2.2.4 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)

2.3 RESISTANCES AUX CHARGES LATÉRALES :

Les charges latérales, telles que celles provenant des séismes et du vent, sont supportées dans les structures en maçonnerie, par des murs. Ceux-ci ont un comportement différent, selon qu'il s'agit de murs isolés ou des murs ossatures en béton-armé, les derniers présentent un comportement plus ductile que les premiers, mais ils présentent un réseau de fissuration similaire (figure 2.2) :

- ✓ Rupture par traction diagonale, caractérisée par l'apparition de fissures qui traversent les briques et le mortier (figure 2.2a),
- ✓ Rupture par friction ou glissement (figure 2.2b),
- ✓ Rupture par flexion : la fissuration se produit dans des zones voisines de la base encastrée (figure 2.2c),
- ✓ Rupture mixte, caractérisée par l'apparition de fissures diagonales qui tantôt traversent les pièces, tantôt suivent la direction des joints (figure 2.2d),
- ✓ Écrasement du matériau dans les zones en compression (figure 2.2e).

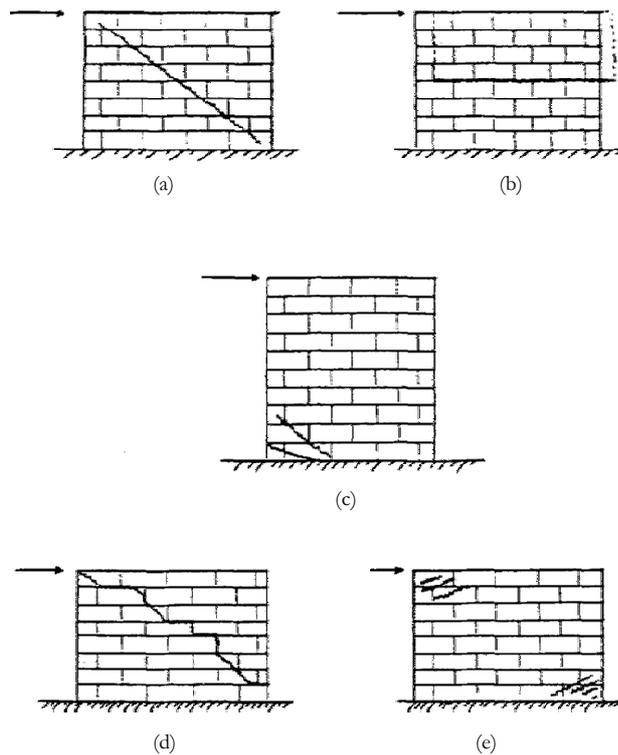


Figure 2.2 : Schéma des modes de rupture sinistrés par les charges latérales
(CHERRABLA, 1990)

2.5 COMPORTEMENT DES MURS EN MAÇONNERIE SOUS DES CHARGES DE CISAILLEMENT EN DIAGONALES :

D'un point de vue pratique, il s'avère nécessaire de fixer un critère pour définir la résistance d'un mur en maçonnerie sous 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 (LAFUENTE.M, 1990)

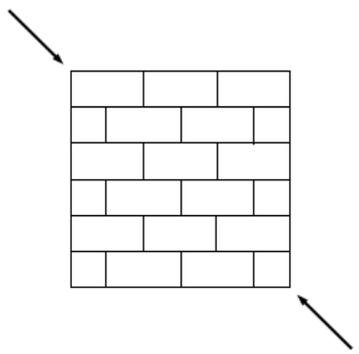


Figure 2.3 Mur sous charge en diagonale (LAFUENTE, 1990)

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

- Les essais de cisaillements caractérisant le mécanisme du type coulomb au niveau des joints.
- Les essais sur petits murs soumis à une traction diagonale.

2.5.1 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 séparées 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.

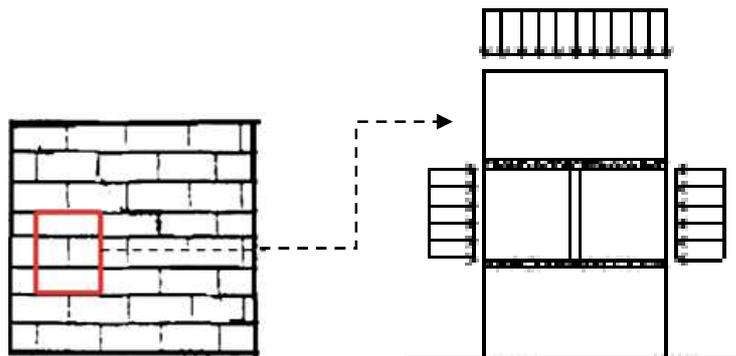


Figure 2.4 Essai de cisaillement (LAFUENTE, 1990)

2.5.2 Résultats de l'essai :

Les études de MÉLI et REYES témoignent de l'existence de différents types de comportements à 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).

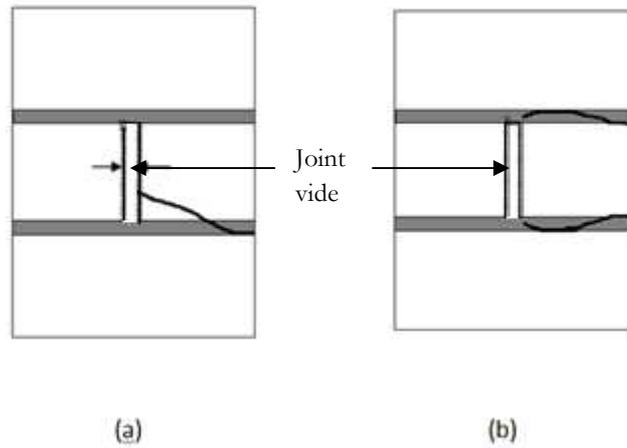


Figure 2.5 Schéma des fissurations (LAFUENTE, 1990)

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 ϕ).

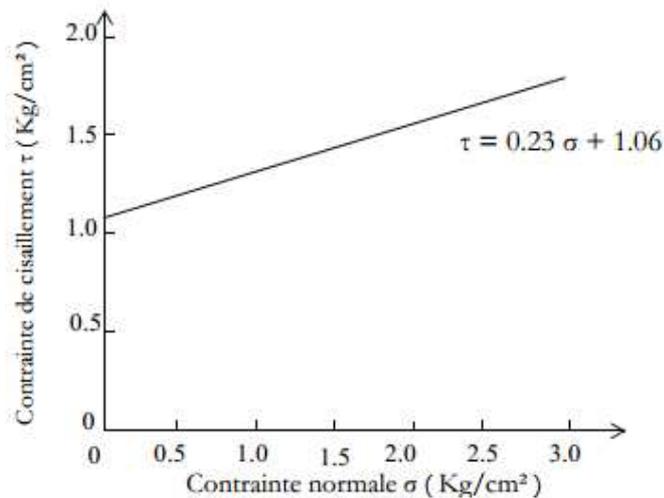


Figure 2.6 : Résistance au cisaillement en fonction de la charge verticale
(LAFUENTE, 1990)

2.6 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 contraintes 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 (CHERRABIA, 1990)

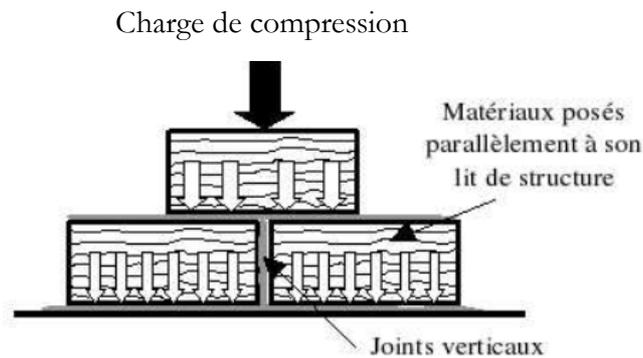


Figure 2.7 : charge de compression (CHERRABIA, 1990)

2.7 RESISTANCE AU CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA CHARGE VERTICALE (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 (figure 2.8) entre la résistance au cisaillement et la contrainte de précompression c'est-à-dire il existe une résistance au cisaillement initiale qui dépend de l'adhésion entre les briques et le mortier à laquelle vient s'ajouter une composante de frottement proportionnelle à la précompression soit :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_c \quad (2.1)$$

Avec :

τ_0 : résistance au cisaillement pour un effort normal nul

μ : coefficient de frottement apparent

σ_c : contrainte verticale de précompression

A la limite lorsque σ_c 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, $\tau_0 = 0.3$ N/mm² pour un bon mortier et $\tau_0 = 0.2$ N/mm² pour un mortier moyen.

La valeur moyenne de μ est d'environ 0.4

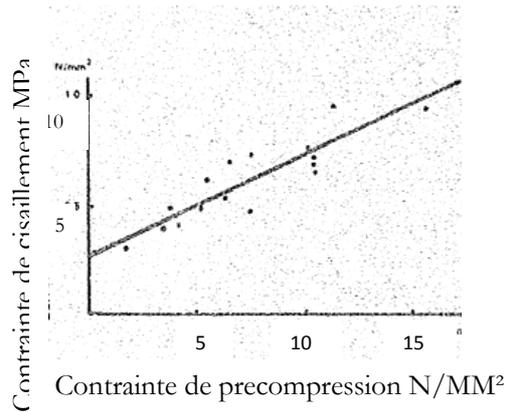


Figure 2.8 Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré-compression (CHERRABIA, 1990)

2.8 RESISTANCE DES MURS A LA TRACTION

La maçonnerie constituée avec des mortiers traditionnels a 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 indiquent que la résistance à la traction directe se situe entre un tiers et deux-tiers du moment de flexion.

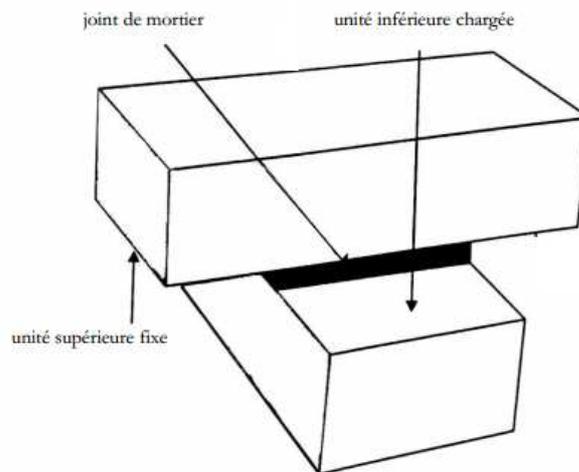
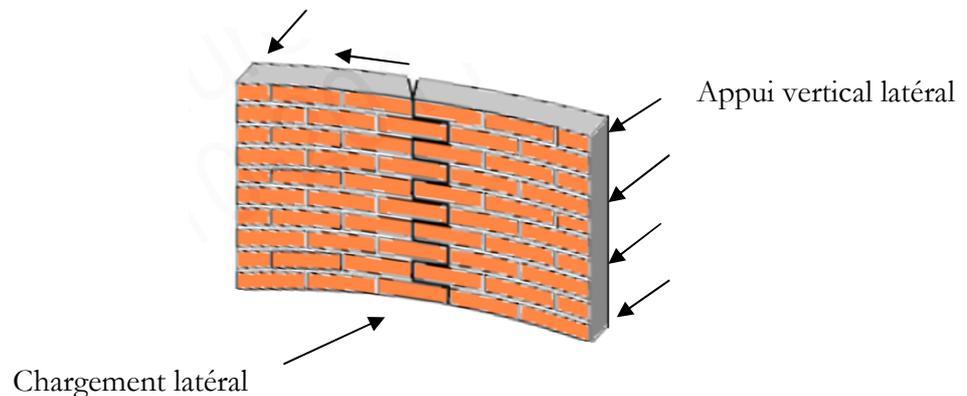


Figure 2.9 Résistance à la traction (ASTM, 1976)

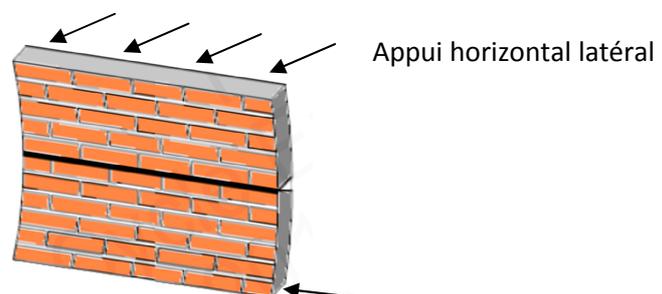
2.9 RESISTANCE A LA FLEXION

La stabilité des murs en maçonneries de brique chargée latéralement dépend de sa résistance à la traction de flexion. Cette résistance dépend des facteurs qui conditionnent l'adhésion brique-mortier

Si un mur est appuyé horizontalement sur sa barre supérieure et inférieure, sa résistance latérale dépend de la résistance à la traction de flexion développée à travers le joint, si en plus, il est appuyé latéralement sa résistance latérale dépend aussi de sa résistance a la traction de flexion développée le long de la direction perpendiculaire au lit de joint (voir figure 2.10). Cette résistance est généralement trois fois plus grande que celle a travers les joints si l'adhésion (mortier-brique) est bonne, la résistance à la flexion parallèle au lit du joint est conditionnée par la résistance à la traction de flexion des briques, si l'adhésion est mauvaise, cette résistance est conditionnée principalement par la résistance au cisaillement développé dans le joint à l'interface brique-mortier



a. Rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits



b. Rupture le long de la ligne parallèle aux lits des joints

Figure 2.10 Comportement a la flexion des murs en maçonnerie (CHERRABI.A, 1990)

2.10 COMPORTEMENT VIS-À-VIS DE LA CHARGE CONCENTRÉE

Si la majorité des efforts appliqués au droit d'un mur sont uniformes et amenés par le poids de la structure au-dessus, les charges concentrées, sont dues aux impacts d'extrémités de poutre, de linteaux ou arcs, etc.

Une maçonnerie peut résister à un chargement concentré si celle-ci est correctement positionnée et suit une répartition à 45° similaire à celle montrée en figure 2.11

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

- le rapport de la section chargée à la longueur du mur,
- la position de la charge le long du mur,
- si la charge se prolonge à travers la pleine largeur du mur ou est limitée à une partie de la largeur
- si la charge est appliquée par une plaque rigide ou flexible,
- le type et la résistance des matériaux de maçonnerie,
- le rapport de longueur-largeur du mur et de son épaisseur,
- la présence du chargement de compression au-dessus du mur de maçonnerie,
- l'application des charges multiples.

Page et Hendry (Page et col, 1987) ont suggéré que pour une charge centrale de bande la longueur utile peut être prise comme longueur réelle mais inférieure à $(b + 1,2 h)$, où b est la longueur de l'extrémité chargée du secteur et h est la taille du mur. Ceci est basé sur le concept que la diffusion de la charge sera contenue dans une ligne de 45° à partir du bord du secteur chargé et que l'effort de compression vertical sera relativement uniforme à 0,6 de la taille de mur à partir du haut.

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

La discussion ci-dessus s'applique seulement à la maçonnerie construite avec les unités de maçonnerie pleines. Kirtschig et Kasten (KIRTICHING.K, et al., 1979) ont trouvé qu'il n'y a aucune augmentation de contrainte pour les charges concentrées appliquées à l'extrémité d'un mur construit avec des blocs de maçonnerie perforés. Les résultats obtenus par Page et col. [Page et col, 1987] sur les charges concentrées ont prouvé que le mode de rupture pour ce type de chargement se produit dans les fentes des blocs plutôt que par une rupture verticale.

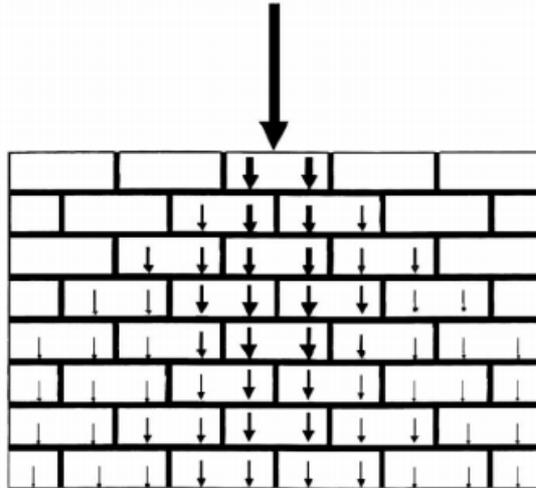


Figure 2.11 : Propagation de la charge concentrée d'un mur (ASTME519-02, 2002)

2.2 CALCUL DU CISAILLEMENT SELON EUROCODE 6 ET CNERIB

2.2.1 Résistance caractéristique au cisaillement de la maçonnerie non armé

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

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

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_d \quad (\text{EUROCODE 6}) \quad (2.2)$$

$$\tau_n = \text{Min}(\tau_0 + 0.4 \cdot \sigma_g, \tau_{lim}) \quad (\text{CNERIB}) \quad (2.3)$$

Ou $= 0.065 f_b$ mais pas inférieure à f_{vk0}

Ou = la valeur limite donnée au tableau 2.1 $0.065 f_b \leq f_{vk} \leq f_{vk0}$

f_{vk0} : Résistance au cisaillement sous une contrainte de compression nulle déterminée à partir des EN 1052-3 et 1052-4 ou pour les mortiers d'usage courant ne contenant ni adjuvants ni ajouts extraite du tableau 2.1.

σ_d : Résistance de compression de calcul perpendiculaire au cisaillement dans la partie d'ouvrage au niveau considéré.

f_b : Résistance en compression normalisée des éléments de la maçonnerie.

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

$$f_{vk} = 0.5 * f_{vk0} + 0.4 * \sigma_d \quad (2.4)$$

Où $f_{vk} = 0.045 f_b$ mais pas inférieure à f_{vk0} .

$f_{vk} = 0.7$ fois la valeur limite donnée au tableau 2.1.

Où f_{vk0} , σ_d , f_b sont tels que définis auparavant.

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

$$f_{vk} = \frac{g}{t} * f_{vk0} + 0.4\sigma_d \quad (2.5)$$

Où $f_{vk} = 0.05 f_b$ mais pas inférieure à f_{vk0} .

Où $f_{vk} = 0.7$ fois la valeur limite donnée au tableau 2.1.

Où f_{vk0} , σ_d , f_b sont tels que définis auparavant.

Où g : Largeur totale des deux bandes de mortier.

t : Épaisseur du mur.

Tableau 2.1 valeur de la résistance initiale au cisaillement f_{vk0} (EN 1996-1-1, 2006)

Élément de maçonnerie	f_{vk0} (MPa)		
	Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces $0.5 \leq t \leq 3$ mm	Mortier allégé
Terre cuite	0.3	0.3	0.15
	0.2		
	0.1		
Silico-calcaire	0.3	0.4	0.15
	0.15		
	0.1		
Béton de granulat	0.2	0.3	0.15
Béton cellulaire autoclavé	0.15		

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

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

$$V_{sd} \leq V_{Rd} \dots \dots \dots (2.6)$$

Où :

V_{sd} : Effort tranchant de calcul du mur ;

V_{Rd} : Résistance au cisaillement de calcul du mur.

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

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

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

$$V_{Rd} = \frac{1}{\delta_M} (t \times I_c \times f_{vk0} + 0.4 N_{sd}) \quad (2.7)$$

V_{Rd} Devant être compris entre

$$\frac{1}{\delta_M} \times t \times I_c \times f_{vk0} \text{ et } \frac{1}{\delta_M} \times t \times I_c \times 0.065 f_b \quad (2.8)$$

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

$$V_{Rd} = \frac{1}{\delta_M} (0.5 t \times I_c \times f_{vk0} + 0.4 N_{sd}) \quad (2.9)$$

V_{Rd} Devant être compris entre

$$\frac{1}{\delta_M} \times t \times I_c \times f_{vk0} \text{ et } \frac{1}{\delta_M} \times t \times I_c \times 0.045 f_b \quad (2.10)$$

Où :

I_c : Longueur de la partie comprimée du mur, en supposant une répartition linéaire de la Contrainte,

t : Épaisseur de la paroi intérieure du mur,

N_{sd} : Charge verticale de calcul,

δ_M : Coefficient partiel de sécurité du matériau.

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

La contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{Q \cdot S_m}{I_m \cdot d} \quad (2.11)$$

Q : Effort tranchant dans le mur exprimé en MN ,

S_m : Moment statique de la section transversale du mur exprimée en m³

I_m : Moment d'inertie de la section transversale exprimé en m^4

d : Épaisseur du mur exprimé en m.

S_m et I_m sont à déterminés pour la partie comprimée de la section transversale du mur en cas de fissuration de celui-ci.

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

τ Est la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement, elle est égale à la contrainte de traction principale σ_t donnée par :

$$S_s = \tau_t = \frac{0.707*P}{A_n} \quad (2.12)$$

Où

P : La force de compression de la diagonale.

A_n : La surface nette.

$$A_n = \left(\frac{w+h}{2}\right) tn \quad (2.13)$$

W : Largeur du mur (mm).

H : Hauteur su mur (mm).

t : Épaisseur totale.

n : Surface brute du bloc exprimé en pourcentage.

Déformation tangentielle :

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (2.14)$$

Où :

γ : La déformation tangentielle (mm/mm).

ΔV : Première diagonale (mm).

ΔH : Deuxième diagonale (mm).

g : Moyenne de la diagonale (mm).

Module de rigidité :

$$G = \frac{S_s}{\delta} \quad (2.15)$$

G : Module de rigidité (MPa).

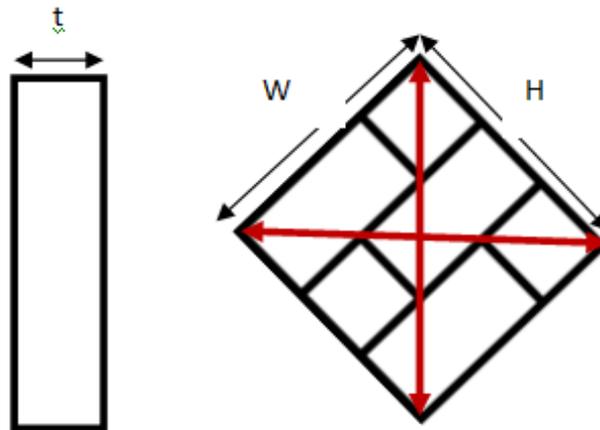


Figure 2.12: Caractéristiques géométriques des murets

2.4 TRAVAUX EFFECTUÉS SUR LE CISAILLEMENT

2.4.1 Travaux De Miha Tomazevic

MIHA TOMAZEVIC (MIHA, 2008) à fait un test sur le comportement du cisaillement, 3 blocs de briques en terre cuite ont été jointoyé avec un mortier courant ,puis on a placé deux plaques métalliques sous les deux blocs externes et une plaque sur la brique du milieu séparés de 2 petites barres de ($\phi 12$) ensuite la force a été exercé, comme on peut le voir sur la figure 2.13. Pendant l'essai, il faut veiller à ce que des contraintes de cisaillement pur se développent dans les plans de raccordement entre les blocs et le mortier. Six échantillons de chaque type ont été testés. Les résultats de f_{vk0} sont présentés dans le tableau 2.2.

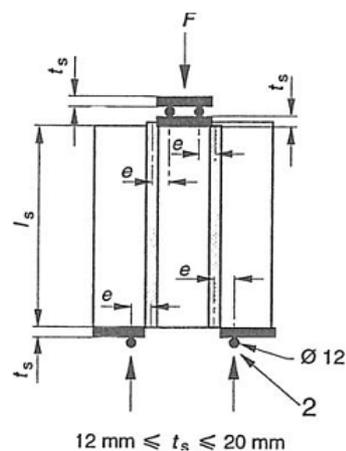


Figure 2.13 Test de résistance du cisaillement initiale selon l'ASTM EN 1502-3

(MIHA, 2008)

Tableau 2.2 Les valeurs caractéristiques f_{vk0} suivant l'eurocode 6 et les valeurs trouvés expérimentalement par MIHA TOMAZEVIC (MIHA, 2008).

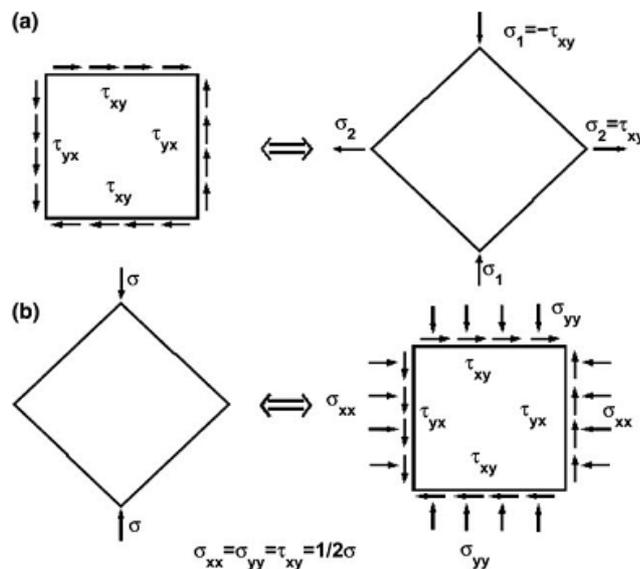
unités	Charge de compression (KN)	Résistance au cisaillement(MPa)			
		5 MPa		10 MPa	
		f_{vk0}	f_{vk}	f_{vk0}	f_{vk}
B1	20.7	0.17	0.23	0.19	0.27
B2	13	0.19	0.26	0.21	0.26
B3	14.6	0.16	0.2	0.16	0.2
B4	12.2	0.26	0.31	0.22	0.38
B5	11.5	0.5	0.6	0.55	0.66
B6	30.3	0.28	0.34	0.28	0.33



Figure 2.14 Résultats obtenus sur les blocs (MIHA, 2008)

2.4.2 Les travaux d'A. Gabor et al.

Gabor et al (Gabor, 2006) ont fait une étude afin de mettre en place la distribution de la contrainte de cisaillement dans un panneau en briques de terre cuite et comment elle peut être générée expérimentalement (voir figure 2.15).



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

Figure 2.15 Dispositif de l'essai (Gabor, 2006)

2.4.2.1 Principe de l'Essai :

Du point de vue expérimental, la compression simultanée et la traction le long des diagonales du mur produisent un état de contrainte de cisaillement pur qui engendre une rupture par la fissuration le long de la diagonale comprimée. Toutefois, ce type de test bi axial n'est pas facile à mettre en place. Par conséquent, il convient d'exclure la charge de traction le long d'une des diagonales et ne garder que la compression. Par conséquent, la charge de compression appliquée le long de la diagonale produit des contraintes équivalentes à une compression biaxiale et un état de contrainte de cisaillement le long des joints Figure 2.16.

Les contraintes de compression et de cisaillement générées ont la même intensité et sont égales à la moitié de la contrainte de compression le long de la diagonale.

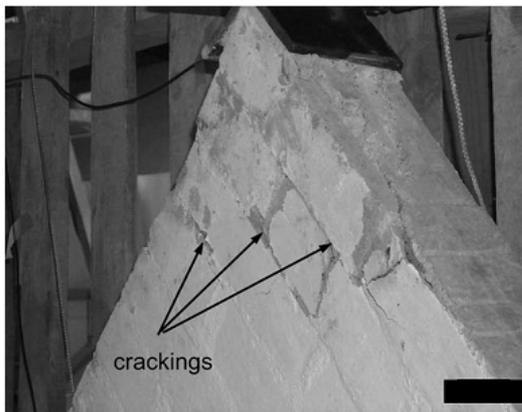


Figure 2.16. Montage expérimental pour l'essai de cisaillement (Gabor, 2006)

Les recommandations de la RILEM proposent un tel test de compression de chargement incliné sur des éléments de maçonnerie afin d'estimer la résistance à la traction diagonale. Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'un cadre rigide de haute rigidité qui permet d'appliquer la compression considérée qui permet d'appliquer la charge de compression considérée par un vérin hydraulique 1000 KN (**Figure 2.14**) la Force appliquée et le déplacement le long des deux diagonales sont évalués en utilisant la cellule de charge et extensomètres respectivement LVDT. La charge est continuellement augmentée jusqu'à la rupture. Deux panneaux ont été testés en maçonnerie, en tenant compte des deux conditions aux limites.

2.4.2.2 Résultat :

Pour le premier cas Gabor et al ont obtenu une rupture localisée, marqué avec un glissement et écrasement au niveau des appuis (Figure 2.17a), pour le second panneau ils ont remarqué une rupture générale du mur (Figure 2.17b). La rupture a été très soudaine sans apparition des fissures sur la surface du mur. Néanmoins, l'analyse du panneau après rupture révèle que des fissures se propagent le long de la diagonale comprimée et qu'elles étaient présentes dans les joints de mortier et dans les briques (voir figure 2.17 b).



(a) Fissuration de la première paroi



(b) Fissuration de la deuxième paroi

Figure 2.17 Résultat des essais

2.4.3 Les Travaux De Parker Et Al.

Parker et al ont utilisé une méthode pour déterminer la résistance au cisaillement suivant la norme (ASTM E 519-02, 2012).

Cette norme a été développée pour déterminer la résistance au cisaillement des assemblages de maçonnerie.

Dans cet essai, une charge verticale est appliquée à des panneaux de 1.2 x 1.2 m², des assemblages en maçonnerie placés à 45 ° par rapport à l'horizontale comme illustré sur les Figure 2.18.

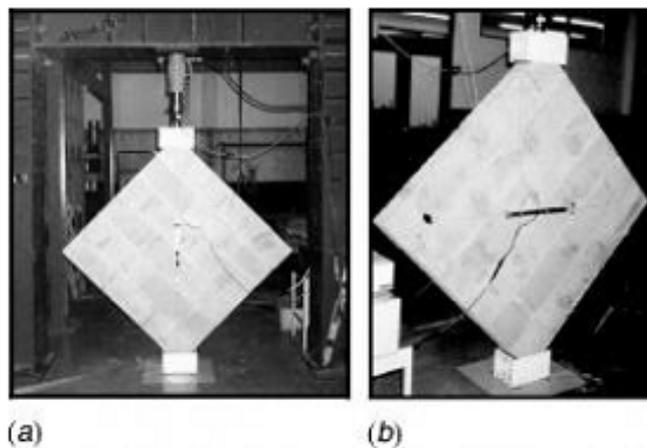
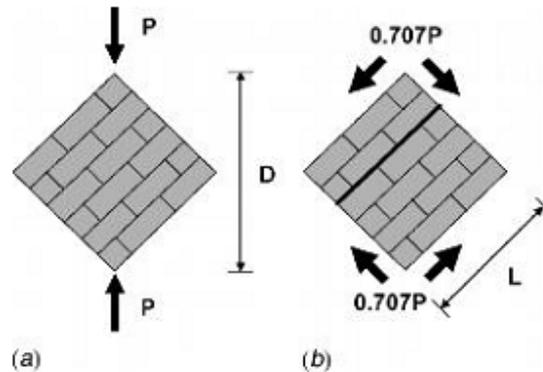


Figure 2.18 Configuration du test sur les murs (ASTM E 519-02, 2012).

Ils ont calculé la contrainte de cisaillement par la formule (2.16) suivante

$$f_v = \frac{0.707 \cdot P}{L \cdot t} \quad (2.16)$$



(a) Test suivant l'ASTM E 519.

(b) Plan de rupture potentiel suivant le lit de joint.

Figure 2.19 Dispositif de l'essai (ASTM E 519-02, 2012).

La figure 2.20 présente le mode de rupture des panneaux de (1.2 x 1.2 m²) en bloc de béton testés par les auteurs.

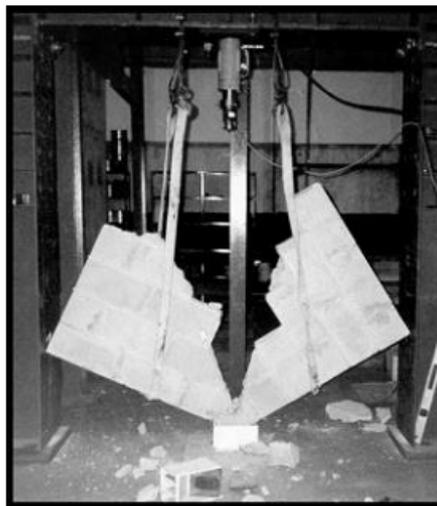


Figure2.20 Résultat de l'essai de cisaillement (ASTME519-02, 2002)

2.4.4 Étude De Vasconcelos, Alves Et Lourenço :

Les auteurs (Vasconcelos, et al., 2012) ont fait une étude expérimentale sur des murs en maçonnerie non armée, ces derniers ont été confectionnés avec un mortier de ciment dans une proportion en volume de ciment et de sable de 1:3. La cure des murs a été réalisée dans les conditions ambiantes du laboratoire avec une humidité relative de l'air pratiquement constante et égale à environ 65%. Les blocs de béton ont été également testés en compression uniaxiale. La

résistance à la compression moyenne obtenue pour le mortier, pris comme la moyenne des 12 échantillons, était de 18.77 MPa.

Les essais de compression diagonale ont été effectués selon la recommandation de la norme (ASTM E519-02, 2002). La charge verticale est appliquée au moyen de servocommande, relié à un portique en acier, avec une charge de 200 kN (voir figure 2.21) Les essais de compression diagonale ont été effectués sous le contrôle de déplacement, au moyen d'un LVDT placés dans le panneau.

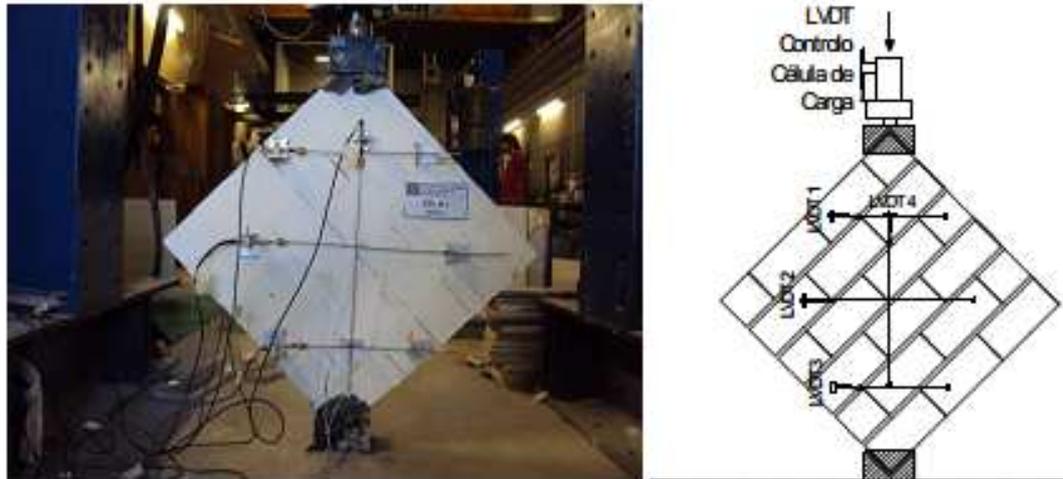


Figure 2.21 Dispositif de l'essai (Vasconcelos, et al., 2012)

2.4.4.1 Modes de ruptures trouvés

La figure 2.22 présente Les modes de ruptures qu'ils ont obtenus lors des essais d'écrasement



Figure 2.22 Résultat obtenu des écrasements des murs (Vasconcelos, et al., 2012)

Le comportement des blocs non armé de maçonnerie actuelle se caractérise par l'ouverture de fissures en escalier et l'apparition de fissures diagonales suivant l'interface d'unité-mortier, la fissuration de cisaillement se produit soudainement. En dépit d'un mécanisme de glissement le long des interfaces unité-mortier, on voit que la maçonnerie non armé présente un comportement fragile.

(Vasconcelos, et al., 2012) Ont calculé la contrainte de cisaillement par la loi de (ASTME519-02, 2002) (voir formule 2.12)

Le tableau suivant présente les valeurs de la contrainte de cisaillement et module de rigidité qu'ils ont trouvés

Tableau 2.4 Résultats experimental et numerique de cisaillement (Vasconcelos, et al., 2012)

Murets testés	τ (MPa)	G (GPa)
(a)	0.42	4.05

Après comparaison des valeurs qu'ils ont trouvées avec celles de (Haach et al. (2010)) ils constatent que leurs résultats sont considérables par rapport aux types de maçonneries et mortier qu'ils ont utilisés. Ils ont mentionné que le taux de variation de contrainte de cisaillement pour les joints verticaux remplis de 10 mm d'épaisseur vari de 25 % par rapport aux joints non remplis totalement

2.4.5 Les travaux de Corradi

Le test de de compression en diagonale a été conçu par CORRADI (CORRADI.M, et al., 2003) et dans le but d'évaluer la résistance au cisaillement. Le test a été effectué sur des panneaux de 120 x120 cm² avec une section transversale maximale d'épaisseur de 20 cm dans le but de déterminer la contrainte de cisaillement.

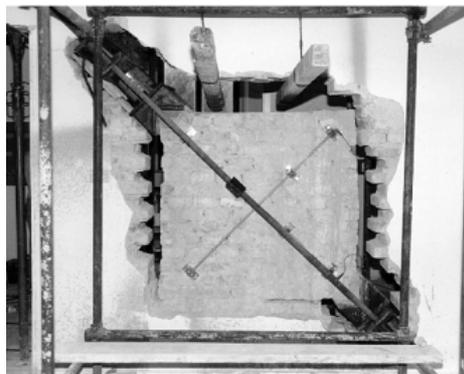


Figure 2.23 Test d'un mur en diagonale (CORRADI et AL, 2003).

2.5 CONCLUSION

L'analyse bibliographique nous a permis de constater que malgré la grande quantité de travaux effectués par PARKER, GABOR, TOMAZOVIC et VASCONCELOS, qu'il reste beaucoup d'inconnus relatifs au comportement de la maçonnerie structurale au cisaillement vis-à-vis de la déformation et des grandeurs de résistance.

C'est dans ce contexte que nous proposons de réaliser une étude expérimentale en utilisant les matériaux locaux permettant la mise en exergue de variables ayant une incidence directe sur le comportement de la maçonnerie.

CHAPITRE 3

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES AU LABORATOIRE

1.6 INTRODUCTION :

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 ou 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 panneaux de maçonnerie en blocs de béton creux « parpaings ». Nous avons utilisé différents types de mortier de jointement (mortier à base de ciment et l'autre bâtard), l'épaisseur du joint de mortier utilisé est de 5, 10 et 15 mm, aussi, nous avons considéré les joint verticaux sans mortier testés sous un chargement de cisaillement jusqu'à la rupture.

1.7 MATÉRIAUX UTILISES :

1.7.1 Provenance des matériaux :

- ✓ *Le sable* : le sable utilisé est un sable concassé extrait de la carrière de l'ENG,
- ✓ *Le ciment* : ciment portland composé (CPJ-CEM II/A 42.5) provenant de la cimenterie de « BENI-SAF »,
- ✓ *La chaux Hydraulique* : Provient de l'usine de « HASSASNA » wilaya de Saïda,
- ✓ le parpaing à été confectionné dans une plateforme près de TLEMCEN,
- ✓ *L'eau* : l'eau utilisée est celle du robinet de la commune de « CHETOUANE ».

1.7.2 Caractéristiques des matériaux

1.7.2.1 Agglomérés de béton (parpaing)

a. Caractéristiques géométriques

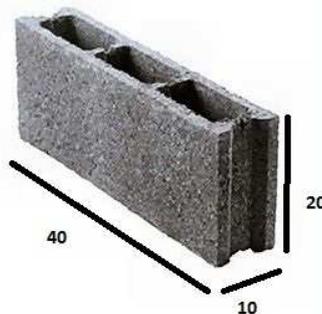


Figure 3.1 Dimensions de l'aggloméré de béton en cm.

b. Caractéristiques physiques :

La masse volumique d'un bloc du parpaing est déterminée par la méthode géométrique. Les mesures sont effectuées sur sept blocs (voir le tableau 3.1).

La masse volumique d'un bloc ρ (kg/m³) est calculée comme suit :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

Où :

ρ : Masse volumique apparente en (kg/m³).

M : masse des blocs en (kg).

V : volume net.

Tableau 3.1 caractéristiques physiques du parpaing

N	masse (g)	Volume net (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	7188	3899.75	1843.19	1865.13
2	7982	3899.75	2046.79	
3	7345	3899.75	1883.45	
4	7223	3899.75	1852.17	
5	6980	3899.75	1789.85	
6	7052	3899.75	1808.32	
7	7145	3899.75	1832.16	

c. Caractéristiques mécaniques

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur 7 blocs (voir figure 3.2) jusqu'à la rupture nous avons surfacé les blocs dans le sens du chargement. La résistance en MPa est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_n} \times 10 \quad (3.2)$$

Où :

σ_b : Résistance a la compression (MPa).

F_b : Charge maximale de rupture en (KN).

S_n : Section nette moyenne du bloc (cm²).

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.2 suivant :

Tableau 3.2.Caractéristiques mécaniques des parpaings ρ

N	FORCE (KN)	σ (MPa)	σ_{moy} (MPa)	Écart-type (MPa)
1	91.1	2.27	3.216	0.668
2	115.1	2.877		0.239
3	138.1	3.452		0.166
4	123.1	3.077		0.0982
5	119.2	2.98		0.166
6	134.2	3.355		0.098
7	180.3	4.507		0.912



Figure 3.2 Essai de compression des parpaings

Lors des essais de compression sur les blocs de parpaing nous avons eu des valeurs disparates de contraintes avec un écart-type différent ceci est dus à l'hétérogénéité et aux voilements des blocs (voir figure 3.3)

Remarque :

Cette étude a été faite selon les règles de l'art malgré les obstacles qu'on a eu avec le parpaing car il est de mauvaise qualité voir **figure 3.3**, donc on va prendre en considération quelques erreurs lors des essais d'écrasement



Figure 3.3 Exemple de parpaings tordues et gonflées

1.7.2.2 Mortiers

Nous avons utilisé 3 types de mortiers :

- Mortier en ciment (1/4) * : c'est le plus utilisé actuellement
- Mortier en ciment (1/6) : utilisé autrefois
- Mortier bâtard (1/2/9) : c'est un mortier utilisé dans les constructions contemporaines

* : (1/4) : 1 volume de ciment dans 4 volumes de sable

i. Caractéristiques du sable utilisé

- Le sable utilisé est un sable concassé qui a été étuvé pendant 24 h ensuite on l'a tamisé dans un tamis de 2 mm
- Masse volumique apparente est de 1380 kg/m^3
- Masse volumique absolue est de 2440 kg/m^3
- Équivalent de sable est de 78.26%
- Granulométrie de sable (figure 3.4)

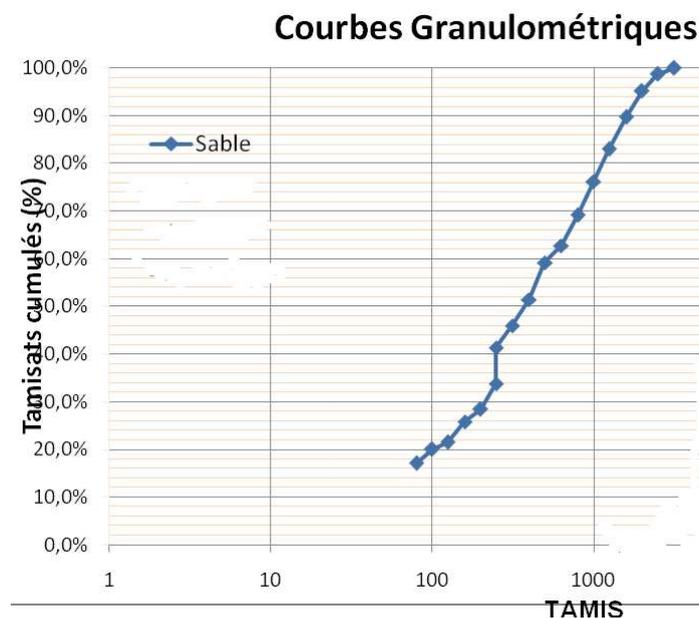


Figure 3.4 Courbe granulométrique

ii. Composition des mortiers

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

Le tableau suivant (3.3) présente les différents dosages de liants mélangés dans 1 m³ de sable sec. La quantité d'eau de gâchage est obtenue pour une consistance normale

Tableau 3.3 : composition des mortiers utilisés dans 1m³ de sable

Nature du mortier	Ciment (kg)	Chaux hydraulique (kg)	$\frac{eau}{C + CH}$
Mortier (1/4)	350	-	0.95
Mortier (1/6)	230	-	1.23
Mortier (1/2/9)	230	276	0.99

iii. Essai sur les mortiers (EN 196-1)

L'objectif de cet essai est d'étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

a. Équipement nécessaires pour l'essai :

- ✓ Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés éprouvettes « 4×4×16 » voir figure (3.5))
- ✓ Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s
- ✓ Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s ± 10N/s.
- ✓ Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN



a. Moule prismatique



b. Eprouvette

Figure 3.5 Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier

b. Conduite de l'essai :

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

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

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

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

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	~28 j
Précision	$\pm 15\text{ min}$	$\pm 30\text{ min}$	$\pm 45\text{ min}$	$\pm 2\text{ h}$	$\pm 8\text{ h}$

c. Résistance à la flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (3.6)

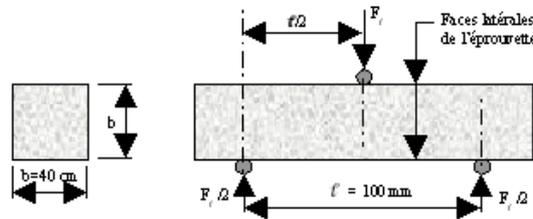


Figure 3.6 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (VENUAT, 1989).

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

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \tag{3.3}$$

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

$$R_f = 0.234 \cdot N_f \tag{3.4}$$

d. Résistance à la compression :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 3.7. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (3.5)$$

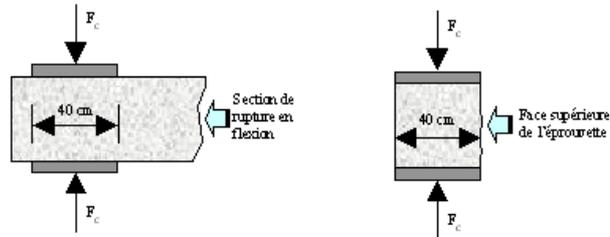


Figure 3.7 *Dispositif pour l'essai de résistance à la compression.* (michael, 1989)

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newton, cette résistance exprimée en MPa vaut :

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.6)$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 MPa près et on en fait la moyenne voir le tableau (3.). Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion.

1.8 PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS

1.8.1 Introduction

Notre étude concerne les panneaux de maçonnerie en blocs de parpaing testés sous un chargement de cisaillement avec différentes variations du joint de mortier : 5, 10, 15 mm et différents types de mortier à base de ciment et de mortier bâtard

Ensuite en deuxième phase on va faire la même chose sauf qu'on va éliminer un des joints verticaux, car dans la réalité les travaux de maçonnerie ne se font pas selon les règles de l'art le remplissage des joints n'est pas à 100 %.

Mortier

Épaisseur

Joint vertical

Répétabilité
Des murs

Nombre total
des murs

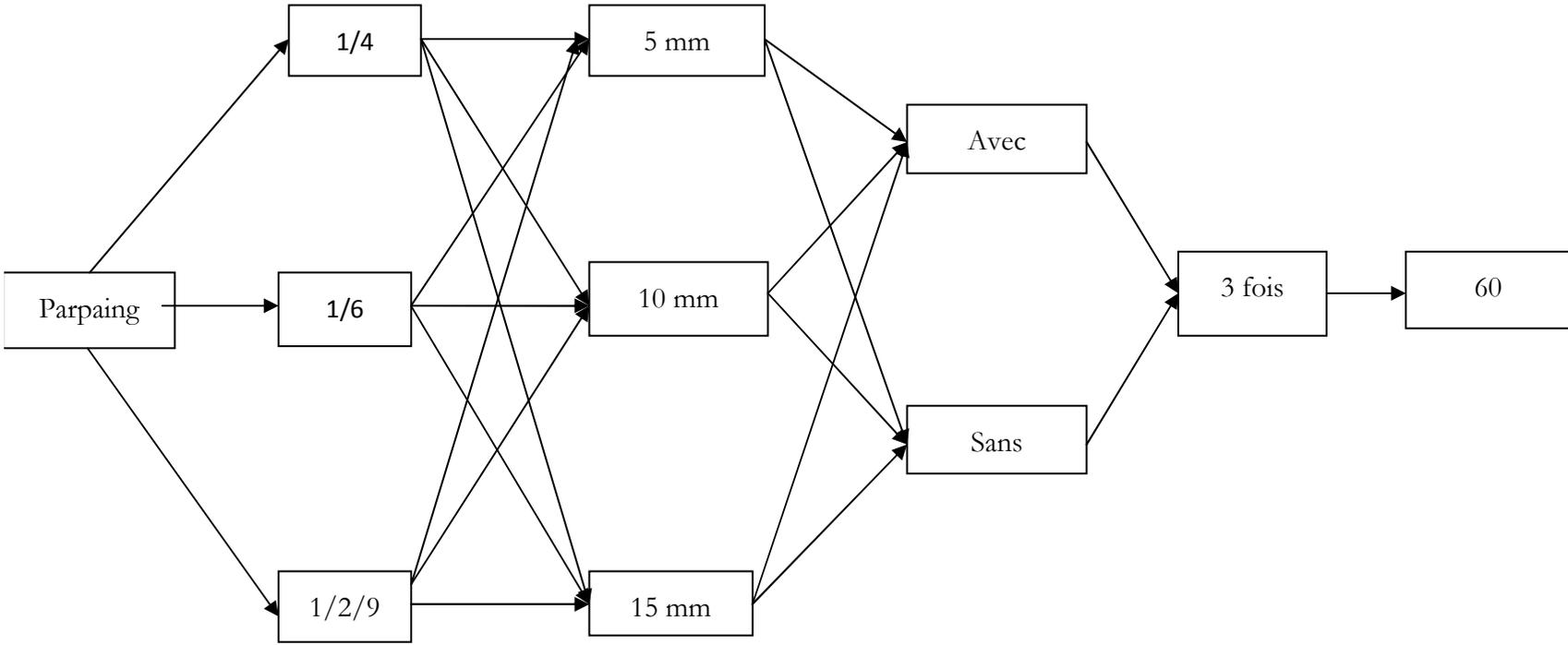


Figure 3.6 programme des essais

1.8.2 Nature des murs à tester

1.8.2.1 *Mur en bloc de parpaing de dimension de « 10x60x60 cm »*

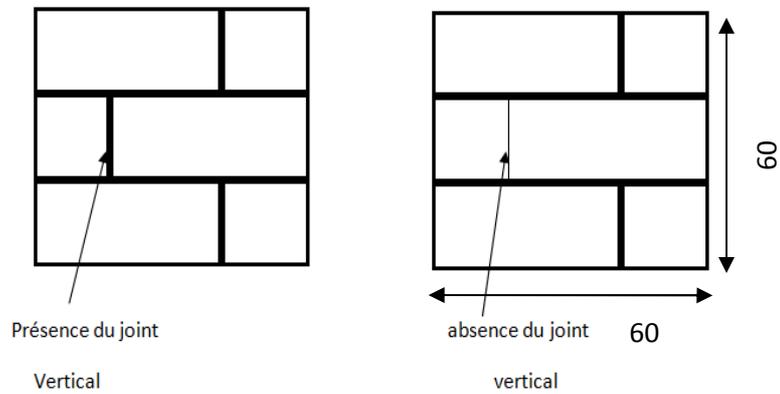


Figure 3.7 Dimensions des murs en parpaing.

1.9 CONFECTION DES MURETS :

Nous avons confectionné plus de 60 murets selon les règles de l'art au niveau du laboratoire de résistance des matériaux de la faculté de technologie.



Figure 3.8 Murs en parpaing

1.9.1 Matériels utilisés :

Le matériel utilisé pour la confection des murs est : voir figure (3.9 à 3.11) : truelles, auge, fil à plomb, niveau, taloche, scie à béton et la transpalette.



Figure 3.9 Outils de construction



Figure 3.10 Scie à béton



Figure 3.11 Transpalette

1.9.2 MÉTHODOLOGIE DE LA CONFECTION DES MURS

Un dispositif a été réalisé pour la réalisation des murets afin de respecter la planéité (figure 3.12). Les opérations suivies sont :

- Mouiller les blocs dans tous les cotés afin d'éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie
- Placer le fil avant la disposition des blocs
- Étaler le mortier suivant l'épaisseur et a l'aide des gabarits fixant les dimensions du joint voir (figure 3.14)
- Vérifier la planéité du mur a l'aide du fil a plomb et du niveau (figure 3.13)
- Confection des éprouvettes de mortier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec le mortier de notre gâché (voir le tableau (3.4)
- Après 24 h, effectuer un surfacage avec un mortier (1/1) (voir figure 3.15)
- Après sept jours, les murs sont transportés et stockés dans les mêmes conditions de cure. L'écrasement est effectué, après 28 jours de cure, aux conditions de laboratoires voir figure (3.15)



Photo 3.12 Dispositif de l'essai



Figure 3.13 Première couche du mortier

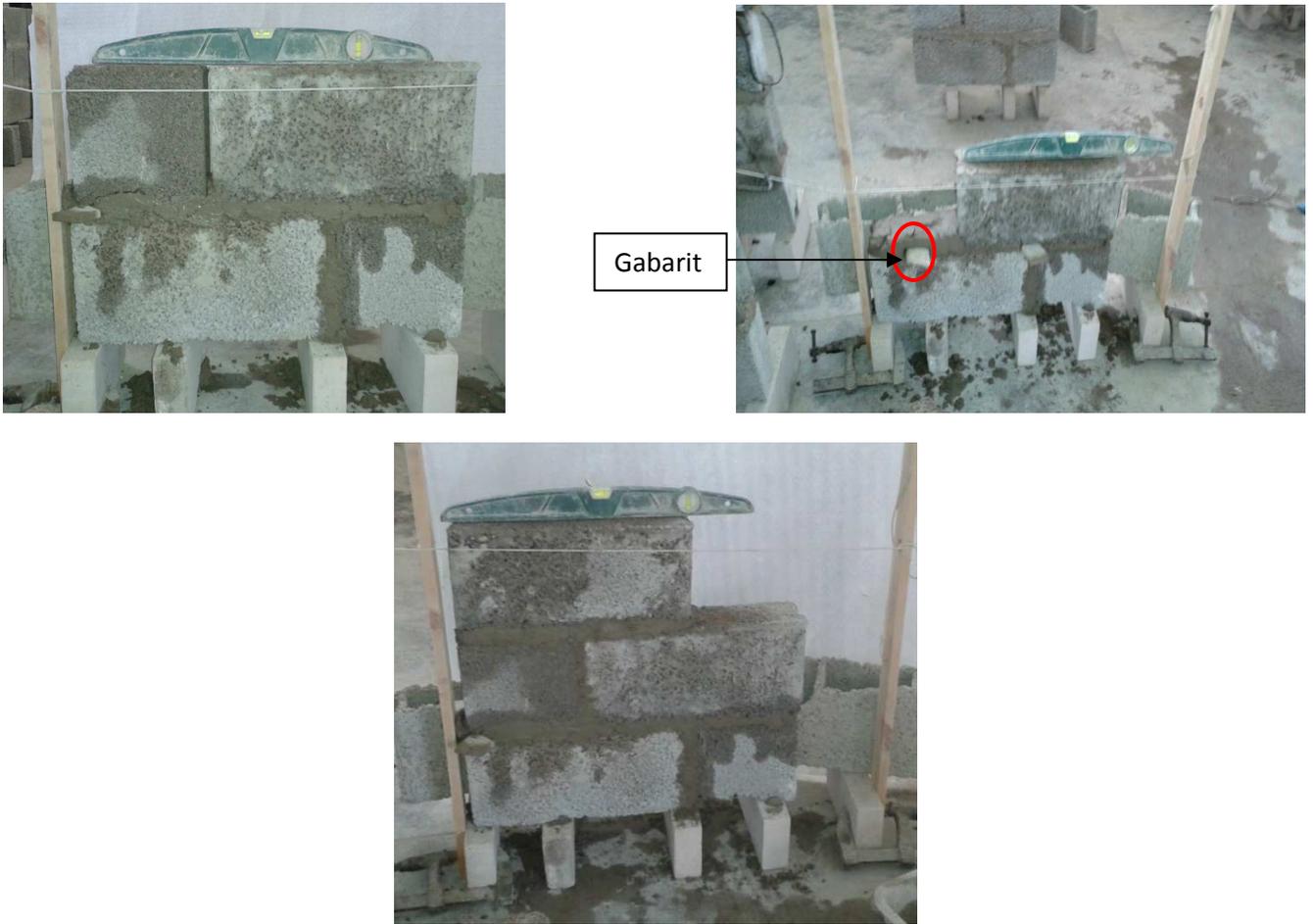


Figure 3.14 Confection et vérification de la planéité à l'aide du niveau

1.9.3 Surfaçage des murets

Lors des essais d'écrasement les murs se placent en diagonale ce qui signifie qu'il faut qu'ils soient plans, pour cela on a surfacé les parties dont les semelles vont être placées
Le mortier de surfacage utilisé est un mortier de ciment (1/1)

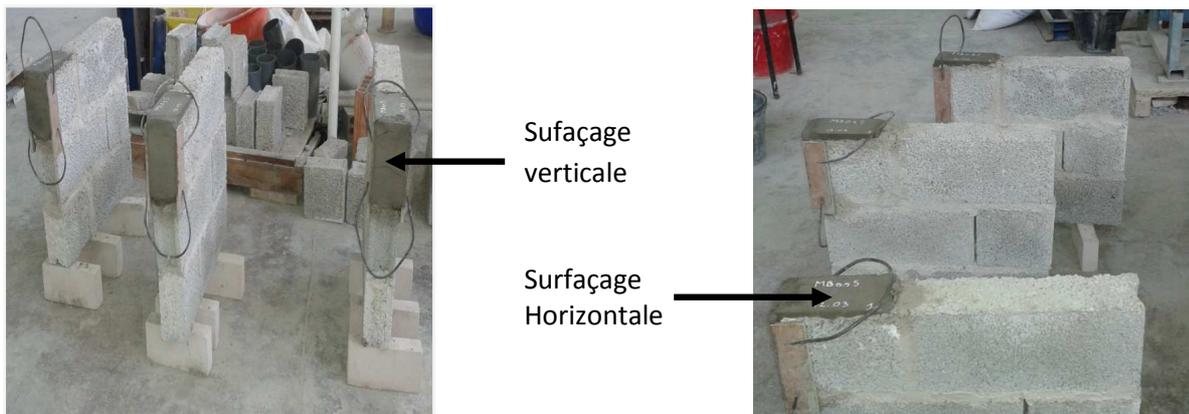


Figure 3.15 Surfaçage des murs

1.9.3.1 *Surfaçage pour le capteur*

Lors des essais d'écrasements on a besoin de placer deux capteurs : horizontal et vertical sur le mur à tester.

Pour le capteur horizontal, on a fixé une plaque en bois afin de mesurer le déplacement horizontal (voir figure 3.16).



Figure 3.16 Surfaçage pour le capteur

1.9.4 **Cure et stockage des murs**

Après confection, les murs seront stockés pour une durée de 28 jours de cure selon les conditions du laboratoire.



Figure 3.17 Cure et stockage des murs

1.9.5 Essai sur les mortiers (EN 196-1)

20 éprouvettes ont été confectionnées et soumises à la traction par flexion et à la compression. Les résultats sont présentés dans le tableau (3.4) suivant la norme EN 196-1 (voir annexe).

1.9.6 Mur de dressage

Pour approfondir notre recherche, nous avons décidé d'enduire un mur sur ces deux faces pour voir s'il y a une influence sur la résistance de la maçonnerie au cisaillement (voir les figures de 3.18 à 3.21).

A) Façonnage :

Pour mettre en œuvre un enduit, il faut tout d'abord broser le mur pour enlever toutes les poussières pouvant nuire à l'adhérence de l'enduit.

B) L'emplacement des arêtes :

Placer les arêtes parfaitement droites au mur à l'aide du fil à plomb. Elles doivent dépasser le mur d'une distance égale à l'épaisseur de l'enduit, soit 15 à 20 mm (voir figure 3.18).



Figure 3.18 L'emplacement des arêtes du mur

1.9.6.1 *Gobetis :*

Pour les enduits traditionnels, il faut effectuer plusieurs couches successives. La première s'appelle le gobetis. C'est la couche d'accrochage de l'enduit sur le support. Il faut projeter le mortier sur le mur à l'aide d'une truelle sur quelques millimètres d'épaisseur sur toute la surface.



Figure 3.19 Réalisation du gobetis.

1.9.6.2 *Corps de l'enduit :*

Intervient ensuite la projection du corps de l'enduit. C'est la deuxième couche, c'est la partie structurante de ce dernier. Il faut laisser sécher la première couche quelques jours. Ensuite, il faut appliquer une couche de mortier (1/3) car il est résistant sur environ 15 mm. Après la projection, il faut, à l'aide d'une règle, « tirer » en arasant le mortier selon les arêtes de bas en haut en suivant les repères déposés sur les murs. Cette couche étant assez épaisse, il faut le laisser sécher de 7 à 10 jours.

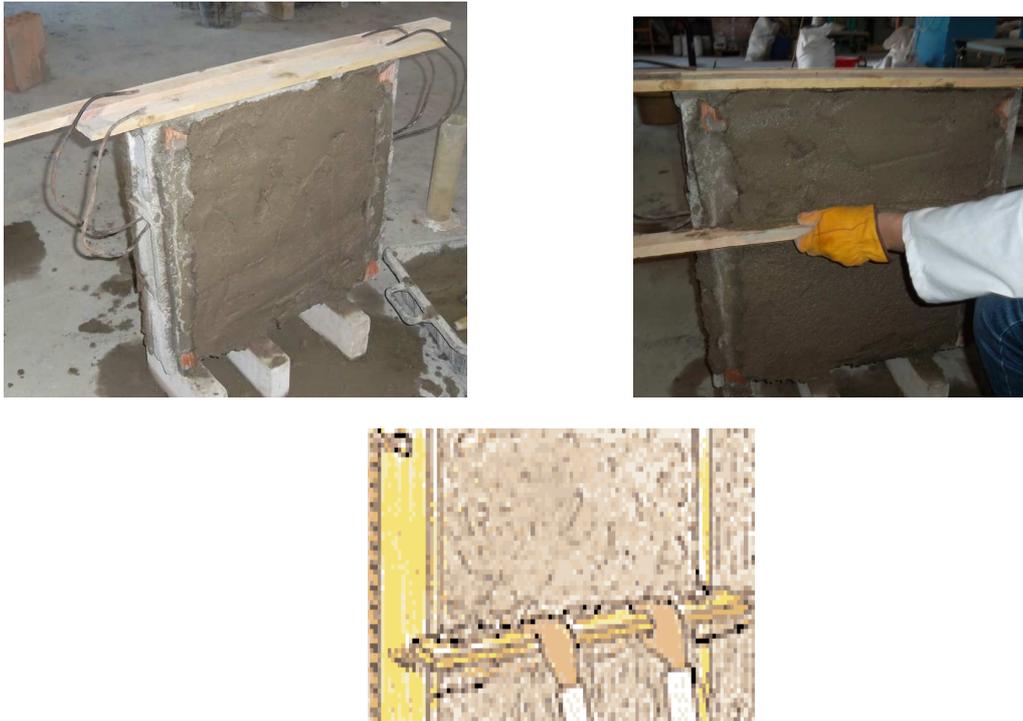


Figure 3.20 Réalisation du corps d'enduit.

1.9.6.3 *Couche de finition :*

On applique de la même façon l'enduit de finition, plus fin (sable fin) sur quelques millimètres d'épaisseur. Cette dernière couche s'applique à la taloche en effectuant des mouvements rapides et circulaires pour compacter et enlever les surplus.



Figure 3.21 Couche de finition

1.10 DISPOSITIF DES ESSAIS

- Une presse pilotée par ordinateur a été utilisée pour la réalisation des essais, comprenant :
- Un portique de 1.5 m x 1.7 m (figure 3.23),
- Un vérin de 160 KN de capacité (figure 3.23),
- Un système hydraulique (figure 3.23),
- Un système d'acquisition des données,
- Sabots (semelles) de transmission des charges figure 3.22),
- Capteur de déplacement vertical (figure 3.23),
- Capteur de déplacement horizontal (figure 3.23),
- Un ordinateur pentium 2,
- Un logiciel pour le traitement des données.

1.10.1 Principe de l'essai

Le mur est placé en diagonale dans les sabots en acier. Ces derniers permettent la transmission de la charge au mur. La mesure des déplacements est effectuée à l'aide de deux capteurs de déplacements qui sont installés au-dessus et sur la diagonale du mur.

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.

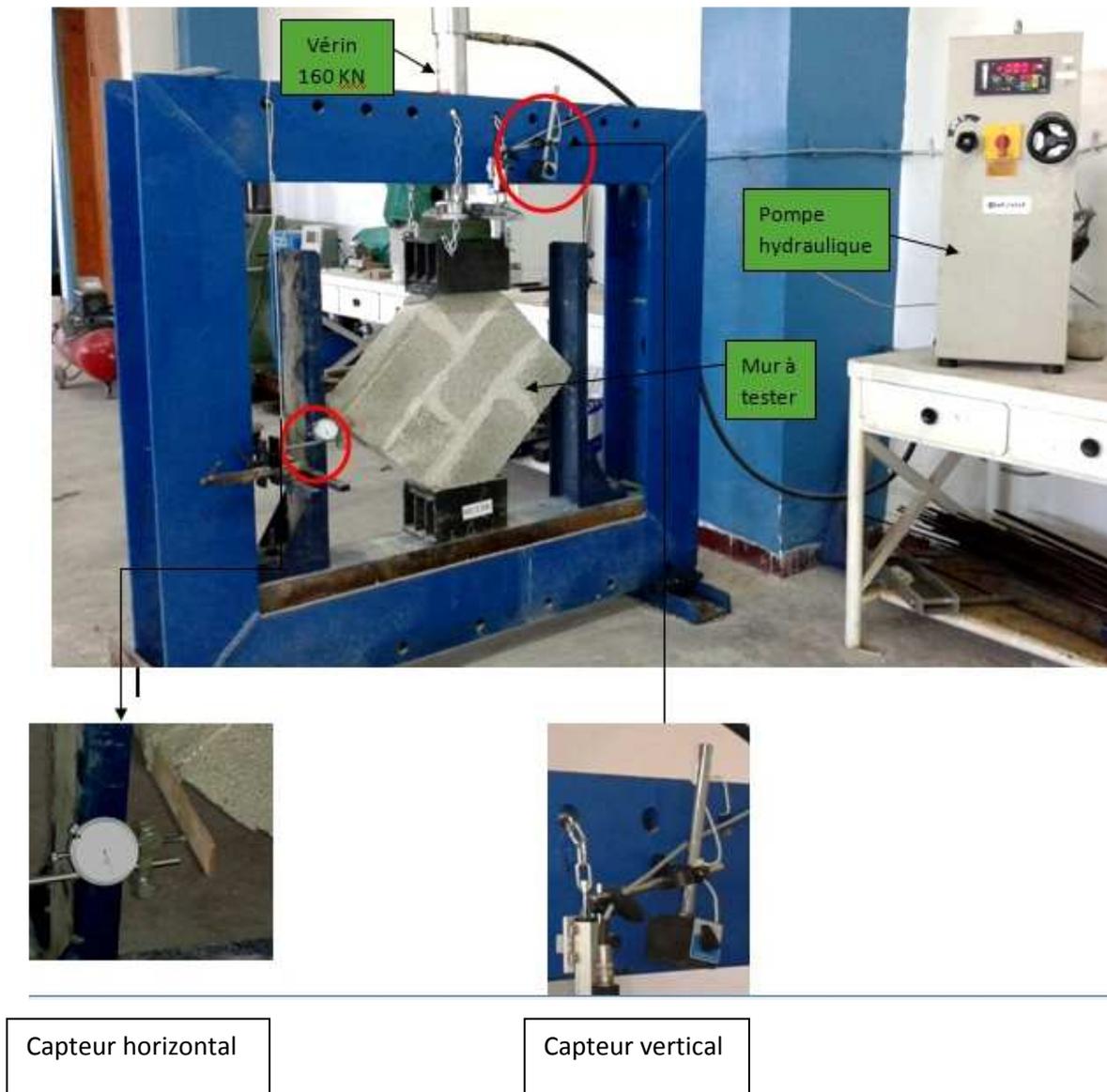


Figure 3.23 Banc d'essai.

1.10.2 Essai de cisaillement sur des triplets :

Le but de l'essai est de déterminer la contrainte de cisaillement avec une contrainte normale nulle (f_{vk0} ou τ_0) afin de calculer la contrainte de cisaillement (f_{vk} ou τ_n) selon L'eurocode 6 et les recommandations du CNERIB (voir formule 2.7).

La résistance au cisaillement représente la contrainte moyenne dans la section horizontale d'un mur soumis à une charge axiale spécifique à un glissement ou rupture par cisaillement (voir figure 3.6)

1.10.2.1 *Principe de l'essai*

3 blocs en parpaing ont été jointoyé avec un les 3 mortiers utilisés dans notre étude (1/4, 1/6 et 1/2/9) sous forme d'un triplet (voir figure 3.24). Après 28 jours de cure, nous avons testé le triplet en utilisant le portique universel (voir figure 3.25). On a placé une plaque métallique de 10 mm d'épaisseur sous les deux moitiés externes et deux plaques sur la pièce du milieu en séparant ces dernières par 2 petites barres de ($\Phi 12$). Enfin, on a commencé à exercer la charge jusqu'à la rupture des pièces comme on peut le voir sur la figure 3.25.



Figure 3.24 Triplet de parpaing.



Figure 3.25 Banc d'essai de cisaillement.

1.11 ESSAI DE COMPRESSION

Afin d'élargir l'étude et de faire une comparaison entre la contrainte de cisaillement et de compression, on a confectionné deux murs de 100 x 80 cm² pour réaliser l'essai de compression (figure 3.26).



Figure 3.26 Murets-test pour la compression.

1.11.1 Dispositif d'essai et principe de l'essai

Le dispositif de l'essai est le même que celui utilisé pour le cisaillement, on y ajoutant les barres de transmissions de charges, ces dernières contiennent des plaquettes qui se chargent de transmettre les efforts de manière uniformément répartis (Houti, 2002).



Figure 3.28 Muret sous charge de compression.

1.12 CONCLUSION :

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

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des différents essais réalisés sur les murets en bloc de béton « parpaing » sous sollicitations de cisaillement et de compression. Les murets ont été confectionnés avec et sans joint verticaux.

Nous montrons l'influence de chaque paramètre sur le comportement de la maçonnerie au cisaillement. Aussi, nous montrons dans ce qui suit l'importance du rôle des joints. Ces derniers sont souvent à l'origine de la rupture et nous décrivons les différents modes de rupture rencontrés.

4.2 CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT :

Nous avons calculé la contrainte de cisaillement suivant la norme ASTM E 519 – 02. A cet effet nous avons utilisé les formules suivantes :

$$\tau = \frac{0.707 \cdot P}{A_n} \quad (4.1)$$

τ Est la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement. Ensuite, nous calculerons la surface nette du mur désignée A_n (mm²) :

$$A_n = \left(\frac{w+h}{2} \right) t \cdot n \quad (4.2)$$

n : Pourcentage de la surface brute du bloc, dans notre cas n = 0.65 (bloc en béton creux)

Le calcul de la déformation tangentielle est comme suit :

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (4.3)$$

g : Moyenne des diagonales (mm)

Le module de rigidité est donné :

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.4)$$

4.3 RÉSISTANCE DES MURETS TESTÉS

1.12.1 4.3.1 Résistance des murets avec joint verticaux remplis

Nous présentons dans le **tableau (4.1)** les résultats respectifs des contraintes de cisaillement obtenues par la moyenne de trois murets en parpaing avec joints verticaux remplis, calculées par la formule (4.1).

Les forces de ruptures et les dimensions des murets testés sont présentés en Annexe :

Tableau 4.1 : Contraintes de cisaillement des murets avec joints verticaux remplis

Identité des murs		τ (MPa)	τ_{moy} (MPa)	γ 10^{-3}	γ_{moy} 10^{-3}	G (MPa)	G_{moy} (MPa)	Écart type (MPa)	Taux de variation (%)
MA0.5	M1	1.28	1.34	19.75	16.82	64.81	82.31	0,08	5.11
	M2	1.34		16.96		79.00			0.66
	M3	1.427		13.77		103.12			5.782
MA1	M1	1.17	1.17	11.28	12.70	103.72	91,93	0,07	0.00
	M2	1.25		15.16		82.45			7.26
	M3	1.08		12.05		89.62			7.52
MA1.5	M1	1.68	1.47	20	14.08	84	81.98	0,31	14.07
	M2	1.31		16.38		79.97			11.09
	M3	1.43		5.87		-			2.97
MB0.5	M1	1.20	1.20	9.48	13.02	126,58	98,49	0.15	0.4
	M2	1.12		16.54		70,13			6.86
	M3	1.29		13.06		98,77			7.36
MB1	M1	0.87	1.02	10.06	12.48	185,88	115,45	0.143	14.29
	M2	1.17		12.84		91,12			15.37
	M3	1.01		14.56		69,36			0.97
MB1.5	M1	1.41	1.39	11.65	10.6	121,03	133,83	0,0736	1.22
	M2	1.42		11.62		122,20			1.93
	M3	1.35		8.53		158,26			2.87
MC0.5	M1	0.86	1.08	12.36	11.12	69,57	100,97	0,0378	20.31
	M2	1.44		9.58		150,31			32.99

	M3	0.95		11.44		83,04			13
MC1	M1	0.98	0.95	12.31	10.89	79,61	88,31	0,2815	3.78
	M2	1.00		9.26		107,99			5.252
	M3	0.86		11.12		77,33			8.82
MC1.5	M1	0.63	0.72	15.31	19.06	41,14	44,68	0,1042	12.32
	M2	0.69		28.84		23,92			3.32
	M3	0.83		13.04		68,99			15.92

4.3.2 Résistance des murets sans le joint vertical

Nous présentons dans le tableau (4.2) les résultats respectifs des contraintes de cisaillement obtenues par la moyenne de trois murets en parpaing avec absence des joints verticaux, calculées par la formule (4.1).

Tableau 4.2 Contraintes de cisaillement des murets sans le joint vertical

Identité des murs		τ (MPa)	τ_{moy} (MPa)	γ 10^{-3}	γ_{moy} 10^{-3}	G (MPa)	G_{moy} (MPa)	Écart type (MPa)	Taux de variation (%)
MA0.5	M1	0.888	0.98	5.8	8,206	153.10	129.77	0,218	3.25
	M2	1.072		10.07		106.45			24.65
	M3	-		-		-			
MA1	M1	1.01	0.993	10.53	11,03	95,91	90.03	0,064	1.71
	M2	0.92		11.59		79,37			7.35
	M3	1.04		10.97		94,80			4.73
MA1.5	M1	1.07	1.07	17.18	12,91	62,28	87.43	0,061	0.00
	M2	1.01		11.08		91,15			5.70
	M3	1.14		10.47		108,88			6.45
MB0.5	M1	0.95	0.924	11.6	11.44	81,89	81.43	0.034	2.81
	M2	0.88		10.18		86,69			4.76
	M3	0.95		12.55		75,69			2.81
MB1	M1	0.95	0.95	11.82	10.85	80,37	87.94	0.043	0
	M2	0.92		10.54		87,28			3.15
	M3	0.98		10.19		96,17			3.15

MB1.5	M1	0.84	0.79	49.77	24.86	16,87	50.97	0.069	6.32
	M2	0.71		15.66		45,33			10.12
	M3	0.83		9.15		90,71			5.06
MC0.5	M1	0.6	0.65	14.95	12.91	40,13	57.75	0.045	7.62
	M2	0.69		14.31		48,21			6.15
	M3	0.67		7.89		84,91			2.17
MC1	M1	0.63	0.61	10.13	24.86	62,06	78.62	0.039	5
	M2	0.62		7.15		86,71			3.33
	M3	0.56		6.43		87,09			6.66
MC1.5	M1	0.58	0.56	11.02	11.23	52,63	51.40	0.037	3.57
	M2	0.52		8.62		60,32			7.14
	M3	0.58		14.06		41,25			3.57
MS3J	M1	0.46	0.53	9.12	8.73	50,43	61.53	0.131	16.6
	M1	0.69		10.12		68,18			22.4
	M1	0.46		6.97		65,99			17.1

L'épaisseur du joint de mortier de 15 mm offre la valeur optimale de la résistance au cisaillement des murets à base de mortier en ciment pour les joints verticaux remplis et vides. Par contre, elle présente la résistance minimale dans le cas du mortier bâtard.

Paradoxalement, l'épaisseur du joint de mortier de 10 mm, pour les murets jointoyés à base de mortiers de ciment ou bâtard, présente la résistance optimale en compression (HOUTI, 2002).

Selon la figure 4.2 les murets jointoyés à base de mortier de type A, présentent des résistances élevées au cisaillement pour les 3 épaisseurs utilisées pour les murets avec joint vertical ou sans.

4.4) INFLUENCE DE LA NATURE ET L'ÉPAISSEUR DU JOINT DE MORTIER :

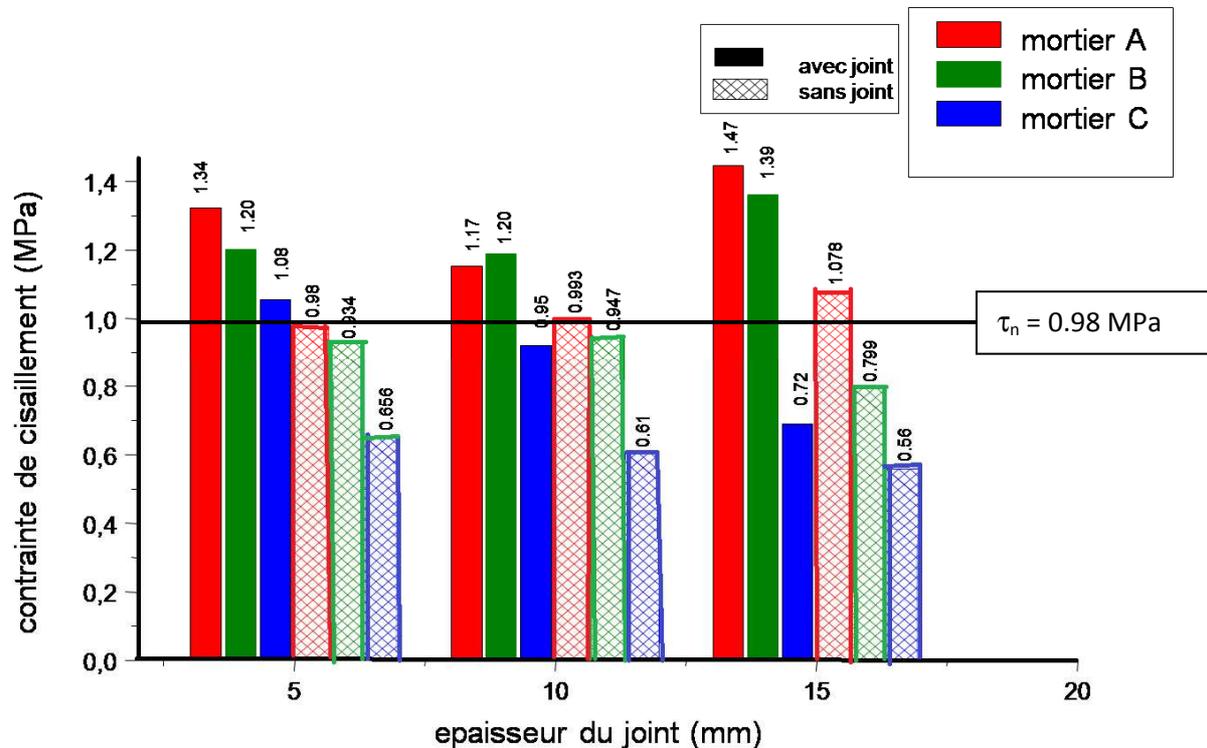


Figure 4.1 : Variation de la résistance des murets avec et sans joint vertical

Les murets aux joints verticaux remplis présentent une variation de 17 à 70% par rapport aux murets sans le joint vertical, ce qui est confirmé par les travaux de Vasconcelos et al (Vasconcelos, et al., 2012) qui ont trouvé une différence de cisaillement moyenne de 25%.

1.12.2 4.4.1 Étude comparative aux joints des murets en parpaing

Les 3 murets représentatifs dans le tableau (4.3), sont conçus de la même manière concernant le mortier de jointoiment et l'épaisseur utilisée (10 mm); par contre le remplissage des joints verticaux diffère d'un mur à l'autre. Les résultats sont comme suit:

Tableau 4.3: Comparaison des joints verticaux des murets

murets	τ (MPa)	G (MPa)
MA1	1.17	92.30
MA1S	0.99	94,36
MA1S (3joints)	0.53	61.5

Après comparaison des deux murets (MA1S et MA1S3J) avec le muret (MA1), une chute de résistance à été constatée de (19% et 120%) de taux de variation respectifs aux deux murs par rapport à MA1 voir le tableau (4.3). Cela explique que le remplissage des joints influent sur la résistance; plus le nombre de joints verticaux diminue plus la résistance de la maçonnerie diminue aussi. En outre, ceci est compatible avec les travaux de VASCONCELOS ; ALVES. et LOURENÇO (Vasconcelos, et al., 2012) cités auparavant, où ils ont constaté que l'absence d'un des joints offre une diminution de 25 % de la résistance au cisaillement.

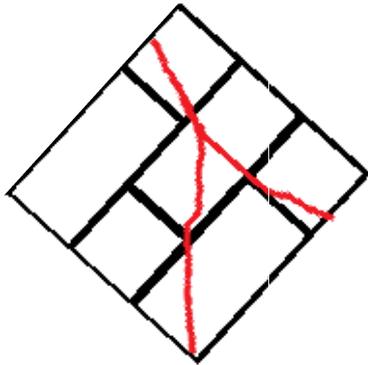
4.4.2 Mode de rupture des murets

Lors des écrasements des murets, nous avons observé plusieurs modes de ruptures :

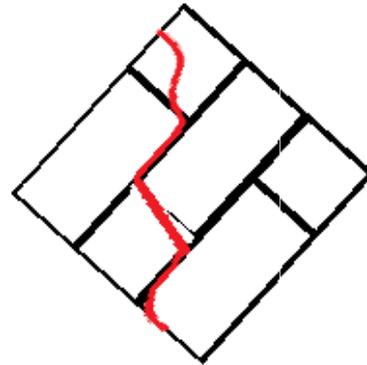
- Les murets jointoyé avec un mortier en ciment (mortier A et B) avec joints verticaux remplis, présentent généralement une rupture brutale et soudaine et leurs modes de rupture sont presque identiques dans tous les murets de ce mortier. Le type de fissure qu'ils présentent est en « coup de sabre » c'est-à-dire qu'il a eu un éclatement du muret selon l'axe du chargement et c'est les pièces de parpaing qui ont cédé en premier avant le mortier. On constate donc, que le mortier est plus résistant par rapport au support voir figure (4.2) et (4.3) ; Par contre, dans les murets sans le joint vertical du mortier A et B, nous avons remarqué que la rupture à été sous forme d'un escalier avec décollement du joint voir figure (4.3.b). Ce qui est du au joint vide ayant provoqué le glissement de l'ensemble du muret.
- Après comparaison de nos résultats de modes de ruptures avec ceux des travaux de GABOR (Gabor, 2006) et VASCONCELOS et Al (Vasconcelos, et al., 2012), nous observons que nous avons pratiquement les mêmes modes de rupture.
- Pour la maçonnerie hourdée avec un mortier bâtard, nous constatons qu'elle présente une rupture progressive et douce en escalier et en diagonale (voir figure 4.4), dans pratiquement tous les murets, c'est le joint qui a cédé en premier avant la pièce.

Dans les figures (4.2, 4.3, 4.4) qui suivent, nous présentons les modes de ruptures observés lors des essais d'écrasements.

1.12.2.1 4.4.2.1 Muret de parpaing hourdés au mortier « A et B »



Fissure en coup de sabre



Fissure en escalier



a. Avec joint



b. Sans joint

Figure 4.2 Mode de rupture des murets hourdés au mortier A



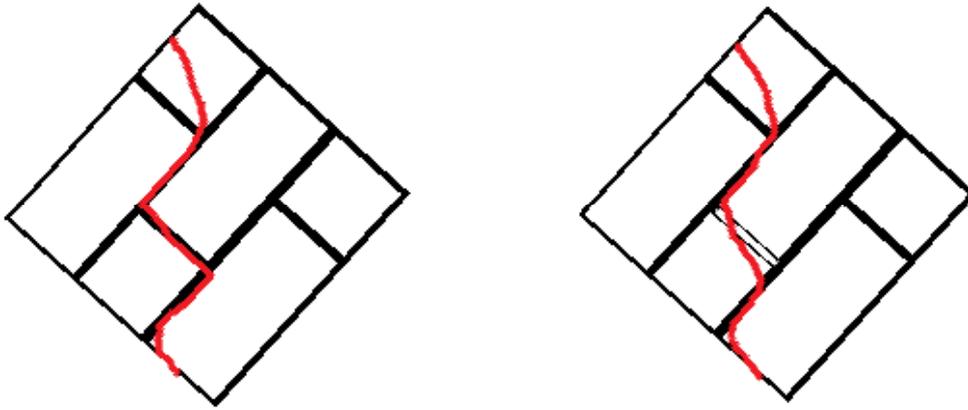
a. Avec joint



b. Sans joint

Figure 4.3 Mode de rupture des murets hourdés au mortier B

4.4.4.2 Murets de parpaing hourdés au mortier « C »



Fissure en escalier



a. Avec joint



b. Sans joint

Figure 4.4 mode de rupture des murets de mortier C

4.5 ESSAI DE CISAILLEMENT D'UN MUR DRESSÉ

Après l'obtention des résultats du mur enduit, nous l'avons comparé avec un mur du même type de remplissage mais sans enduit, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau. (4.4)

Tableau 4.4 : Résultats du mur de dressage

	Force (KN)	τ (MPa)	G (MPa)	$\delta \cdot 10^{-3}$	Taux de variation(%)
Mur Avec dressage	124.5	1.705	116.84	0.0146	45.72
Mur Sans dressage	63.86	1.17	92.30	12.70	

D'après le tableau (4.4), nous remarquons que la contrainte de cisaillement d'un mur enduit est supérieure de 46 % par rapport à un mur sans enduit. L'enduisage des deux faces a une influence non négligeable sur la résistance de la maçonnerie au cisaillement.



Figure 4.5 : Rupture du mur enduit

1.13 4.6 ESSAI DE CISAILLEMENT D'UN TRIPLET EN PARPAING

Le calcul de la contrainte de cisaillement expérimentale f_{vk0} selon l'EUROCODE et τ_0 selon le CNERIB en MPa par la formule suivante :

$$f_{vk0} = \tau_0 = \frac{F}{b \cdot d} \quad (4.5)$$

F : force appliquée en KN,
b : largeur du bloc (mm),
d : hauteur du bloc (mm).



Figure 4.6 Essai de cisaillement sur le triplet

Calcul de la contrainte de cisaillement $f_{vk}(\tau)$:

- Cas des joints verticaux remplis

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4 \cdot \sigma_d \quad (4.5)$$

- Cas d'un joint vertical vide

$$f_{vk} = 0.5 \cdot f_{vk0} + 0.4 \cdot \sigma_d \quad (4.6)$$

Tableau 4.5 : Résultats expérimentaux de f_{vk0} et f_{vk} (MPa)

Mortier	F (KN)	f_{vk0} (τ_0) ??? (MPa)
Ciment (1/4)	5.30	0.265
Ciment (1/6)	3.22	0.161
Bâtard (1/2/9)	2.73	0.14
$f_{vk}(\tau_n)$ (MPa)		
joint	Avec joint	Sans joint
Eurocode ou CNERIB	0.98	0.85

En comparant les résultats trouvés dans le tableau (4.5) avec ceux des travaux effectués par TOMAZEVIC (MIHA, 2008), nous constatons que les résultats sont pratiquement compatibles et les valeurs obtenues sont dans l'intervalle de l'eurocode 6 voir tableau (2.3).

La contrainte de cisaillement minimale selon L'EUROCODE 6 ou CNERIB est de 0,98 MPa (voir figure 4.3). Les murets jointoyés avec le mortier à base de ciment (mortier A et B) et pour les 3 épaisseurs utilisés (5, 10 et 15 mm) sont supérieurs à cette valeur limite.

4.7 ESSAI DE COMPRESSION

La résistance à la compression des murs maçonneries est déterminée en appliquant la formule tirée de l'Eurocode 6 ou en testant les murs.

Calcul de la contrainte par l'eurocode 6

$$f_k = K \cdot f_b^{0.25} \cdot f_m^{0.65} \quad (4.6)$$

Où

f_k : Résistance à la compression caractéristique de la maçonnerie, en N/mm².

K, α et β : Constantes déterminées en fonction de la maçonnerie du mortier utilisés, tirés de la NBN EN 1996-1-1 ANB. Dans notre cas K=0.45, $\alpha=0.65$, $\beta=0.25$

f_b : Résistance à la compression moyenne normalisée des blocs de maçonnerie en béton, en MPa. ($f_b = 3.22$ MPa).

f_m : Résistance à la compression du mortier, en MPa. ($f_m = 19.44$ MPa).

La contrainte de compression expérimentale

Après avoir obtenu une charge de rupture égale à 150 KN, nous avons calculé la contrainte de compression par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4.)$$

Où

F : force exercée par le vérin (N).

S : Surface exposée à la compression (mm²).

Tableau 4.6 valeurs de la contrainte de compression

Contrainte de compression	σ (MPa)	Taux de variation (%)
Expérimentale	1.8	17
Eurocode 6	2.1	

La résistance a la compression des murets a été calculée par la formule empirique de l'eurocode 6 et expérimentalement. Les résultats obtenus s'avèrent être proches avec une variation de 17%.

D'après le tableau 4.6, la résistance à la compression des murets en parpaings est supérieure de 79% par rapport à la résistance au cisaillement.

Nos résultats présentent une compatibilité avec celle de (CHERRABI.A, 1990) dans l'essai de compression : $\sqrt{F_b} \approx f_m$ et $\sqrt[3]{F_m} \approx f_m$

f_m : Résistance à la maçonnerie.

4.8 CONCLUSION :

L'étude expérimentale sur les murets tests s'est avéré un moyen efficace pour l'étude du comportement de la maçonnerie.

Nous avons constaté l'importance de l'influence de l'épaisseur du joint sur le comportement de la maçonnerie sous un chargement de cisaillement, l'épaisseur optimale pour la maçonnerie en parpaing jointoyée avec un mortier en ciment est de 15 mm; Par contre, pour les mortiers bâtard l'épaisseur de 5 mm présente la meilleure résistance. Aussi, la nature du remplissage des maçonneries influe considérablement sur la résistance du cisaillement. Ce dernier résiste plus lorsque les éléments de maçonnerie utilisés sont pleins (joints verticaux remplis).

En concordance avec la littérature, nous avons observé les mêmes modes de rupture et les mêmes ordres de grandeurs des résistances.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

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

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

1. Première hypothèse : « le cisaillement des murets en parpaing est impacté par la nature du joint ». Le programme expérimental adopté, a permis de tester 3 mortiers de jointoiment différents, mortier à base de ciment (1/4 et 1/6) et bâtard (1/2/9).
2. Deuxième hypothèse : « l'épaisseur du joint influe sur le comportement de la maçonnerie ». Trois épaisseurs ont été testées à cette fin : 5, 10 et 15 mm.

Nous avons réalisé 3 murets identiques pour chaque paramètre, les résultats montrent que la différence ne dépasse les 15 %.

Pour notre programme expérimental réalisé au laboratoire, nous avons considérés les deux aspects : la nature et l'épaisseur du joint en même temps. Les résultats obtenus ont montré que, plus le joint utilisé est résistant et l'épaisseur est importante, et plus la résistance au cisaillement de l'ensemble augmente. Paradoxalement, quand le joint est de moindre résistance, plus ductile et l'épaisseur est la plus faible, la résistance de l'ensemble est élevée. De plus, le remplissage partiel des joints verticaux diminue la résistance au cisaillement des murets testés de 17 à 70%, ce qui reste comparable avec la littérature où la diminution est de plus de 25 %.

Aussi, nous avons montré sur un muret que l'enduisage augmente la résistance au cisaillement d'une manière non négligeable, d'environ 50%. Ce qui demande à être validé encore par d'autres essais.

L'essai réalisé selon l'eurocode 6 sur un triplet de parpaing sous un chargement de cisaillement, nous a permis de calculer la contrainte de cisaillement initiale f_{vk} , pour déterminer ensuite la contrainte moyenne au cisaillement.

Au cours de ce travail de recherche, nous nous sommes rendu compte que la maçonnerie a une faible résistance au cisaillement vis-à-vis du chargement en diagonal, provoquant une rupture par glissement des blocs.

En résumant, les résultats obtenus nous permettent de retenir les renseignements suivants :

- a) Influence de l'épaisseur du joint :

- L'épaisseur du joint de 15 mm offre la meilleure résistance au cisaillement pour les murets en « parpaing » dans le cas d'un mortier en ciment. En revanche, pour un mortier bâtard, c'est l'épaisseur de 5 mm qui offre la résistance optimale. La résistance au cisaillement de la maçonnerie est donc liée intimement à la rigidité du joint.

b) Influence de la nature du joint de mortier

- Nous avons constaté que le mortier à base de ciment (1/4) a présenté la meilleure résistance au cisaillement relativement aux deux types de murets « avec remplissage total et sans joints verticaux ».

Les modes de ruptures montrent que la résistance de l'ensemble dépend des résistances des constituants (support et joint). En effet, dans le cas d'un joint plus résistant que les parpaings, ces derniers sont traversés par les fissures, cèdent en premier et par voie de conséquence l'ensemble s'écroule. Par contre, avec un joint moins résistant que le support, la fissuration des murets commence généralement au niveau du joint avec un décollement ou glissement de ce dernier en forme d'escaliers.

Perspectives d'étude :

- ✓ Répéter le programme expérimental pour des supports de nature différente : briques en terre cuite et briques silico-calcaire,
- ✓ Étude de l'influence du confinement de la maçonnerie sur son comportement au chargement en diagonal,
- ✓ Étude du comportement de la maçonnerie sous chargement latéral et biaxial,
- ✓ Étudier l'incidence du renforcement de la maçonnerie à l'aide d'armatures, sous sollicitation de cisaillement,
- ✓ Identifier des modèles de prédiction du comportement de la maçonnerie en faisant une simulation numérique sur la base de l'ensemble des résultats des programmes expérimentaux.

ANNEXE

Dimensions et forces des murets aux joints verticaux remplis

identité		D1 (cm)	D2 (cm)	Hauteur (cm)	Largeur (cm)	Dh (mm)	Dv (mm)	Force (KN)	remarque
MA1	M1	58.7	79	56.1	58.5	3	10.23	63.93	
	M2	58.8	80.6	56.2	58	1	8.385	63.86	
	M3	58.9	78	56	58.9	1	10.41	53.68	Pr.planeité
MB1	M1	80.5	80.5	55.9	58.6	1	7.1	44.65	bon
	M2	78.5	81	56.2	58.7	0.5	9.74	60.31	
	M3	79	81	55.7	58.9	2	9.65	51.6	Non bon
MC1	M1	78.9	79.9	55.1	59	1	8.78	50.25	
	M2	78.3	80.5	55.2	58.6	0.5	6.85	50.8	
	M3	79.3	79.8	55.5	59	0.2	8.647	44.28	
MA0.5	M1	79.8	78.9	55.3	57.4	3.5	12.03	64.62	M.bon
	M2	77.7	79.8	54.8	57.7	6	7.355	62.25	
	M3	79.8	79.8	55.7	57.5	0.5	10.49	72	
MB0.5	M1	79.8	78.5	55.3	57.3	0.8	7.379	60.44	
	M2	78.4	80.3	55.9	57.3	0.1	8.65	56.81	D écalé
	M3	80	80.1	60.2	57.9	1	9.454	68.34	
MC0.5	M1	79.9	78.7	55.2	57.8	0.6	9.207	43.67	
	M2	78.5	79.8	55.4	57.7	1.5	7.08	51.57	M.bon
	M3	79.3	79.8	55.4	57.7	0.5	8.6	47.91	bon
MA1.5	M1	80.4	80.7	56.3	56.4	0.5	15.61	84.64	M.bon
	M2	79.7	80.6	55.7	58.4	1	12.13	66.79	
	M3	79.8	80.7	55.4	58.3	2	2.71	72.66	Piece sup éclat
MB1.5	M1	82.2	78.4	56	58.8	0.5	8.85	72.2	tordu
	M2	81.6	79.9	55.1	59.2	1	8.38	71.91	
	M3	79.9	80.5	56	58.9	1	5.84	69.29	Piece sup éclat

MC1.5	M1	80.8	80.5	56.7	58.3	6.5	5.85	32.45	
	M2	81.9	79.8	56.9	60	17	6.32	36.37	
	M3	80.5	78.8	55.6	58.5	0.5	10.39	42.58	

Dimensions et forces des murets dont le joint vertical est non rempli

Identité		D1 (cm)	D2 (cm)	Hauteur (cm)	Largeur (cm)	Dh (mm)	Dv (mm)	Force (kn)	remarque
MA1S	M1	80	80.6	56	58.2	1	7.458	53.54	
	M2	80.4	80.5	56.3	57.6	1	7.826	48.19	
	M3	79.7	80.4	56	58.3	1	8.6	54.68	
MB1 S	M1	79.7	79.6	54.9	58.2	1.5	7.915	49.56	m.bon
	M2	80.7	79.9	56.7	57.9	0.25	8.217	47.49	
	M3	80.7	80	55.5	58	0.1	8.095	51.49	
MC1	M1	81.2	80.9	56.5	58.5	0.5	6.873	33.76	
	M2	82	80.9	57.3	58.3	0.2	5.63	33.34	
	M3	79.2	81	56.7	58	0.2	4.951	29.85	A écarter
MA0.5	M1	80.1	79.7	55.8	58	0.5	4.135	46.46	
	M2	78.8	79.7	55.3	57.4	0.5	7.486	55.57	
	M3	79.8	79.8	55.1	57.8	1	5.988	33.12	
MB0.5	M1	79.3	79.3	55	57.3	1	8.199	49.14	
	M2	79.2	80	55.8	58.2	1	7.109	46.92	
	M3	79.6	78.5	54.9	57.2	1	8.925	49.26	
MC0.5	M1	79.4	78.8	56.2	57.2	5	6.827	31.61	
	M2	79.6	78.9	56.4	58	5	6.342	36.44	eclatement
	M3	78.5	80.4	55.5	58	1	5.272	35.06	
MA1.5	M1	80.3	80	55.7	58.1	4	9.772	56.06	
	M2	79.2	80.8	56.1	57.7	1	7.87	53.35	tordu
	M3	79.5	80.6	55.9	58.4	1	7.387	60.04	

MB1.5	M1	81.3	80.5	57.3	57.8	4	10.17	44.72	
	M2	80.6	79.8	56.3	58	4	8.563	37.77	
	M3	80.6	80.9	56.8	59	2	6.396	44.38	
MC1.5	M1	79.7	81.2	56.8	58	3	5.87	30.76	
	M2	89.8	80.6	57.5	58	2	5.34	27.07	
	M3	79.9	79.5	55.2	58.9	5	6.212	29.74	
MS3JS	M1	81.3	80.2	56.5	57.5	2	5.371	23.53	
	M2	79.4	80.3	56.1	58.9	2	6.085	35.71	
	M3	80.3	79.6	55.9	57.9	1	4.573	23.39	

Résistance à la flexion et à la compression des mortiers.

	Épaisseur (mm)	Résistance à la flexion (MPa)			Résistance à la compression (MPa)		
		Avec joint	Sans joint	Ecart-type	Avec joint	Sans joint	Ecart-type
A	5	0.503	0.444	0.041	15.15	12.8	1.66
	10	0.514	0.446	0.048	19.44	14.57	3.44
	15	0.514	0.319	0.137	17.59	13.7	2.75
B	5	0.374	0.304	0.049	11.37	11.37	0
	10	0.374	0.234	0.098	11.25	7.63	2.55
	15	0.304	0.339	0.024	10.12	10.38	0.18
C	5	0.093	0.152	0.041	2.82	2.23	0.41
	10	0.152	0.117	0.0247	3.55	3.75	0.14
	15	0.128	0.19	0.0438	3.55	3.03	0.367