



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID –TLEMCE-

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER

OPTION : INGÉNIERIE DES STRUCTURES

Thème

ETUDE DU COMPORTEMENT DE LA
MAÇONNERIE SOUS
SOLLICITATION DE FLEXION

Présenté par :

M^r. BENCHERIF Mohammed

M^r. HADJI Zakarya

Soutenu en : Juin 2015

Composition du jury

Dr BOUKLI HACENE	S.M.A.	MCA	Univ .Tlemcen	Président
Dr BEZZAR	A.	MCA	Univ .Tlemcen	Examinateur
Mr HASSAINE	N.	MAA	Univ .Tlemcen	Examinateur
Pr GHOMARI	F.	PR	Univ .Tlemcen	Encadreur
Mr HOUTI	F.B.	MAA	Univ .Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2014 - 2015



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID –TLEMCE-

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER

OPTION : INGÉNIERIE DES STRUCTURES

Thème

ETUDE DU COMPORTEMENT DE LA
MAÇONNERIE SOUS
SOLLICITATION DE FLEXION

Présenté par :

M^r. BENCHERIF Mohammed

M^r. HADJI Zakarya

Soutenu en : Juin 2015

Composition du jury

Dr BOUKLI HACENE	S.M.A.	MCA	Univ .Tlemcen	Président
Dr BEZZAR	A.	MCA	Univ .Tlemcen	Examinateur
Mr HASSAINE	N.	MAA	Univ .Tlemcen	Examinateur
Pr GHOMARI	F.	PR	Univ .Tlemcen	Encadreur
Mr HOUTI	F.B.	MAA	Univ .Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2014 - 2015

RESUME

La maçonnerie présente un comportement mécanique très complexe dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants.

Le but de notre travail consiste à prédire le comportement de la maçonnerie grâce aux tests effectués au laboratoire. Nous nous proposons d'évaluer la résistance à la flexion des murs en brique de terre cuite creuse 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) sur deux types de murs (murs où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X) et murs où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y)).

Les tests expérimentaux effectués sur une cinquantaine de murs nous ont permis de montrer que l'épaisseur du joint de 10 mm offre la valeur optimale de la résistance à la flexion des murs pour les trois mortiers et pour les deux types de murs, tandis que le mortier bâtard offre la résistance la plus faible. La résistance à la flexion pour les murs (F_Y) est plus élevée que les murs (F_X).

Nous avons constaté que les murs présentent une résistance à la flexion supérieure à ceux proposées par l'EUROCODE 6 et DTR C2.45 sauf pour quelques murs de type F_X dont le joint est de 5 mm.

Mots clés :

Brique, flexion, joint, maçonnerie, mur, résistance.

ملخص

يتميز البناء بسلوكه الميكانيكي المعقد للغاية ويرجع ذلك أساساً إلى عدم تجانس مكوناته.

الغرض من عملنا هو التنبؤ بسلوك البناء من خلال التجارب المقامة في المختبر. نقترح لتقييم قوة انحناء الجدران المصنوعة من أجر الطين المجوف استخدام خليط الإسمنت والآخر من الجير «bâtard» و مع اختلاف سمك الوصلة (5 ، 10 و 15 ملم) على نوعين من الجدران (الجدران حيث الأحمال موازية للوصلة (F_X) و الجدران حيث الأحمال عمودية للوصلة (F_Y)).

سمحت لنا الاختبارات التجريبية على حوالي خمسين جدار أن نستنتج أن سمك الوصلة المقدر بـ: 10 ملم هو الأكثر مقاومة لقوة الانحناء في كل الخلطات و الجدران المستعملة ، في حين أن الخليط الذي استعمل فيه الجير قدم أدنى مقاومة. كما أن مقاومة الجدران F_Y أعلى من الجدران F_X .

يمكننا أن نستخلص أن الجدران لها قوة انحناء أعلى من التي اقترحها «DTR C2.45» و «EUROCODE 6» باستثناء البعض من النوع F_X الذي له سمك الوصلة 5 ملم.

الكلمات المفتاحية :

الأجر، الانحناء، الوصلة، البناء، حائط صغير، المقاومة.

ABSTRACT

Masonry has a very complex mechanical behavior essentially due to the heterogeneity of its constituents.

The objective of our work consists to predict the behavior of masonry through testing performed in the laboratory. We propose to evaluate the flexural strength of walls constructed with terracotta hollow brick, by using a cement mortar and bastard mortar with the variation of the joint thickness (5, 10 and 15 mm) on two types of walls (walls where loads are parallel to the joint bed (F_X) and low walls where loads are perpendicular to the joint bed (F_Y)).

Experimental tests on fifty walls allowed us to show that the joint thickness of 10 mm offers the optimum value of the flexural strength of the walls for the three mortars and for the two types of walls, while the bastard mortar provides the lowest resistance. The flexural resistance for walls (F_Y) is higher than the walls (F_X).

We found that the walls have flexural strength greater than those proposed by EUROCODE 6 and DTR C2.45 except for some type of F_X walls whose joint thickness is 5mm.

Key words:

Brick, Flexural, joint, masonry, wall, strength.

DEDICACES

A mes parents

A mes frères

A mes sœurs

A tout les membres de ma famille

A tous les étudiants de master 2 génie civil 2014/2015

A tous mes amis

A tous ceux qui me connaissent

A mes parents

A mes frères

A mes sœurs

A tout les membres de ma famille

A tous les étudiants de master 2 génie civil 2014/2015

A tous mes amis

A tous ceux qui me connaissent

RESUME

La maçonnerie présente un comportement mécanique très complexe dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants.

Le but de notre travail consiste à prédire le comportement de la maçonnerie grâce aux tests effectués au laboratoire. Nous nous proposons d'évaluer la résistance à la flexion des murets en brique de terre cuite creuse 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) sur deux types de murets (murets où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X) et murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y)).

Les tests expérimentaux effectués sur une cinquantaine de murets nous ont permis de montrer que l'épaisseur du joint de 10 mm offre la valeur optimale de la résistance à la flexion des murets pour les trois mortiers et pour les deux types de murets, tandis que le mortier bâtard offre la résistance la plus faible. La résistance à la flexion pour les murets (F_Y) est plus élevée que les murets (F_X).

Nous avons constaté que les murets présentent une résistance à la flexion supérieure à ceux proposées par l'EUROCODE 6 et DTR C2.45 sauf pour quelques murets de type F_X dont le joint est de 5 mm.

Mots clés :

Brique, flexion, joint, maçonnerie, muret, résistance.

ملخص

يتميز البناء بسلوكه الميكانيكي المعقد للغاية ويرجع ذلك أساسا إلى عدم تجانس مكوناته.

الغرض من عملنا هو التنبؤ بسلوك البناء من خلال التجارب المقامة في المختبر. نقترح لتقييم قوة انحناء الجدران المصنوعة من أجر الطين المجوف استخدام خليط الإسمنت والآخر من الجير «bâtard» و مع اختلاف سمك الوصلة (5 و 10 و 15 ملم) على نوعين من الجدران (الجدران حيث الأحمال موازية للوصلة (F_x) و الجدران حيث الأحمال عمودية للوصلة (F_y)).

سمحت لنا الاختبارات التجريبية على حوالي خمسين جدار أن نستنتج أن سمك الوصلة المقدر بـ 10 ملم هو الأكثر مقاومة لقوة الانحناء في كل الخلطات و الجدران المستعملة ، في حين أن الخليط الذي أستعمل فيه الجير قدم أدنى مقاومة. كما أن مقاومة الجدران F_y أعلى من الجدران F_x .

يمكننا أن نستخلص أن الجدران لها قوة انحناء أعلى من التي اقترحتها «DTR C2.45» و «EUROCODE 6» باستثناء البعض من النوع F_x الذي له سمك الوصلة 5 ملم.

الكلمات المفتاحية :

الأجر، الانحناء، الوصلة، البناء، حائط صغير، المقاومة.

ABSTRACT

Masonry has a very complex mechanical behavior essentially due to the heterogeneity of its constituents.

The objective of our work consists to predict the behavior of masonry through testing performed in the laboratory. We propose to evaluate the flexural strength of walls constructed with terracotta hollow brick, by using a cement mortar and bastard mortar with the variation of the joint thickness (5, 10 and 15 mm) on two types of walls (walls where loads are parallel to the joint bed (FX) and low walls where loads are perpendicular to the joint bed (FY)).

Experimental tests on fifty walls allowed us to show that the joint thickness of 10 mm offers the optimum value of the flexural strength of the walls for the three mortars and for the two types of walls, while the bastard mortar provides the lowest resistance. The flexural resistance for walls (FY) is higher than the walls (FX).

We found that the walls have flexural strength greater than those proposed by EUROCODE 6 and DTR C2.45 except for some type of FX walls whose joint thickness is 5mm.

Key words:

Brick, Flexural, joint, masonry, wall, strength.

SOMMAIRE

Résumé

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : Les différents types de maçonnerie

1.1. Introduction..... 2

1.2. Maçonnerie..... 2

1.2.1. Définition..... 2

1.2.2. Domaine d'application..... 2

1.3. Les différents types de maçonnerie..... 3

1.3.1. Maçonnerie de pierre naturelle..... 3

1.3.2. Maçonnerie en agglomérés de béton..... 3

1.3.3. Maçonneries en briques silico-calcaire..... 4

1.3.4. Maçonnerie en briques d'argile cuite..... 4

1.4. Les mortiers..... 6

1.4.1 Types de mortier..... 7

1.4.2. Les mortiers de liaisonnement..... 7

1.4.3. Les classes de mortier..... 8

1.4.4. Épaisseur des joints de mortier..... 8

1.5. Défauts dans la maçonnerie..... 9

1.6. Pathologies de la maçonnerie..... 10

1.7. Conclusion..... 10

Chapitre 2 : Comportement mécanique des structures en Maçonnerie et les travaux effectués sur la flexion

2.1 Introduction..... 11

2.2 Mode de rupture de la maçonnerie..... 12

2.2.1 Rupture par glissement..... 12

2.2.2 Rupture par basculement..... 12

2.2.3 Rupture par compression du coin..... 12

2.2.4 Rupture par cisaillement..... 12

2.3. Comportement des murs soumis aux charges horizontales et sous des charges latérales monotones..... 13

2.4 Comportement des Murs Vis-à-vis de la charge concentrée	13
2.5 Comportement au cisaillement des murs en maçonnerie	14
2.6 Comportement en traction des murs en maçonnerie	14
2.7 Comportement en flexion des murs en maçonnerie.....	15
2.7.1 Flexion uni-axiale.....	15
2.7.2 Flexion bi-axiale.....	16
2.8 Essai De Résistance à la Flexion Suivant l'eurocode6 et D.T.R C2.45.....	17
2.8.1 Essai de résistance à la flexion.....	17
2.8.2 Résistance caractéristique à la flexion f_{yk}	18
2.9 Travaux effectués sur la flexion	20
2.9.1 Les travaux de Graca.....	20
2.9.2 les travaux de Morton.....	21
2.9.3 les travaux de Sachin et coll.....	21
2.9.4 les travaux de Bui.....	23
2.9.5 les travaux de Gazzola et Drysdale.....	24
2.10 Conclusion	26
Chapitre 3 : Présentation des matériaux et des techniques Expérimentales utilisées	
3.1 Introduction.....	27
3.2 Matériaux utilisés	27
3.2.1 Provenance des matériaux	27
3.2.2 Caractéristiques des matériaux.....	27
3.3 Programme des essais sur les murets.....	34
3.3.1 Introduction.....	34
3.3.2 Nature des murets tests.....	35
3.4 Confection des murets.....	36
3.4.1 Matériel utilisé.....	36
3.4.2 Méthodologie de la confection des murets.....	37
3.4.3 Cure et stockage des murs	39

3.5 Dispositif d'essai.....	40
3.5.1 Principe de l'essai.....	40
3.5.2 Essai de flexion	41
3.5.3 Essai de compression.....	42
3.6 Conclusion.....	43
Chapitre 4 : Résultats et interprétations	
4.1 Calcul des contraintes.....	44
4.2 Résistance des murets testés.....	44
4.2.1 Résistance des murets sous sollicitations de flexion.....	44
4.2.2 Résistance des murets sous sollicitations de compression.....	45
4.3 Variation de la résistance à la flexion des murets par l'influence de la nature, l'épaisseur du joint de Mortier et type de muret.....	46
4.4 Mode de rupture des murets sous sollicitation de flexion.....	48
4.4.1 Mode de rupture des murets f_x (flexion horizontale)	48
4.4.2 Mode de rupture pour les murets f_y (flexion verticale)	49
4.5 Conclusion	50
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques	
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1	Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990)	3
Figure 1.2	Les différents types de parpaing (BALANDIER, 1990)	4
Figure 1.3	Brique silico-calcaire (POURRAT, 2009).	4
Figure 1.4	Processus de fabrication des briques en terre cuite creuses (HABER et SMITH, 1987).	5
Figure 1.5	Briques pleines	5
Figure 1.6	Mur en briques perforées	6
Figure 1.7	Briques creuses de différents formats	6
Figure 1.8	Constituants d'un mortier (CHERIF et coll., 2013)	7
Figure 1.9	Epaisseur des joints de mortier épais (MARCEL et coll., 2009).	8
Figure 1.10	Défauts causés par le Mouvement des dalles	9
Figure 1.11	Mouvements de dilatation thermique	9
Figure 1.12	Fissure le long des fenêtres	9

Chapitre 2

Figure 2.1	Types de chargement appliqués sur les murs (MARCEL et coll., 2009).	11
Figure 2.2	Trois modes de ruine sous sollicitations agissant dans le plan (TOMAZEVIC, 2003)	13
Figure 2.3	Propagation de la charge concentrée d'un mur (ASTME519-02, 2002)	14
Figure 2.4	Essai de traction (HOUTI, 2002)	15
Figure 2.5	Comportement à la flexion des murs en maçonnerie (NF EN 1996-1-1, 2006)	16
Figure 2.6	Modes de rupture sous flexion uni-axiale (GAZZOLA, 1986)	16
Figure 2.7	Modes de rupture des murs (DRYSDALE, 1988)	17
Figure 2.8	Test flexion 4 points (Eurocode 6) (EUROCODE6, 1996)	18
Figure 2.9	Définition des résistances caractéristiques à la flexion (MARCEL et coll., 2009)	18
Figure 2.10	Type de chargement pour la détermination expérimentale de la résistance à la flexion de la maçonnerie (EN 1052-2, 1999)	20
Figure 2.11	Détails sur le comportement de flexion de maçonnerie non armée (GRAÇA, 2014).	20

Figure 2.12	Panneaux muraux à pleine échelle construits dans des bancs d'essai (MORT 1986)	21
Figure 2.13	Modes de ruptures (MORTON, 1986)	21
Figure 2.14	a. Tension normale au lit de joint et b Tension parallèle au lit de joint (SACHIN et coll., 2014).	22
Figure 2.15	Géométrie de l'éprouvette et les détails de ferrailage (SACHIN et coll, 2014).	22
Figure 2.16	Maillage 3DEC (BUI, 2013)	23
Figure 2.17	Résistance à la flexion (BUI, 2013).	23
Figure 2.18	Résistance à la flexion uni-axiale selon les deux plans de rupture (BUI, 2013).	24
Figure 2.19	a) Test de Gazzola et coll. (GAZZOLA, 1985) ; b) mode de rupture (GAZZOLA, 1985)	25
Figure 2.20	Résistances en flexion en fonction de l'angle des joints (GAZZOLA et coll., 1985)	25
Figure 2.21	Modes de rupture obtenues numériquement pour θ de : a) 0° ; b) 15° ; c) 45° ; d) 75° ; e) 90° (GAZZOLA et coll., 1986)	26
Chapitre 3		
Figure 3.1	Essai de l'absorption des briques (photos prises par les auteurs)	29
Figure 3.2	Presse universelle (photos prises par les auteurs).	30
Figure 3.3	Courbe granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli	31
Figure 3.4	Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier	32
Figure 3.5	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (BUI, 2013)	33
Figure 3.6	Dispositif pour l'essai de résistance à la compression (BUI, 2013)	34
Figure 3.7	Programme d'essai pour la flexion	34
Figure 3.8	Programme d'essai pour la compression	35
Figure 3.9	Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $10 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$ (F_x)	35
Figure 3.10	Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $10 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$ (F_y)	36
Figure 3.11	Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $10 \times 60 \times 80 \text{ cm}^3$	36
Figure 3.12	Outils utilisés pour l'auto-construction par les étudiants (photo prise par les auteurs)	36
Figure 3.13	Scie à Béton (photo prise par les auteurs)	37
Figure 3.14	Transpalette (photo prise par les auteurs)	37

Figure 3.15	Dispositif pour la confection (photo prise par les auteurs)	38
Figure 3.16	Respecter l'épaisseur des joints des murets (photo prise par les auteurs)	38
Figure 3.17	Etalement du mortier (photo prise par les auteurs)	38
Figure 3.18	Vérification de la planéité à l'aide du niveau à bulle (photos prise par les auteurs)	39
Figure 3.19	Vérification de la planéité du mur avec la règle en bois (photos prise par les auteurs)	39
Figure 3.20	Cure et stockage des murs (photos prise par les auteurs)	40
Figure 3.21	L'ensemble du dispositif d'essai (photos prise par les auteurs)	41
Figure 3.22	Essai de flexion du muret-test (photos prise par les auteurs)	41
Figure 3.23	Dispositif de l'essai de flexion (photos prise par les auteurs)	42
Figure 3.24	Muret sous charge de compression (photos prise par les auteurs)	42
Chapitre 4		
Figure 4.1	Variation de la résistance à la flexion (f_{xk}) des murets	47
Figure 4.2	Résistance à la flexion selon les deux plans de rupture	48
Figure 4.3	Mode de rupture des murets F_x	49
Figure 4.4	Rupture par division en milieu	50
Figure 4.5	Rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme denté	50

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableaux 2.1	Valeurs de f_{xk1} pour un plan de rupture parallèle aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU, 1985).	19
Tableaux 2.2	Valeurs de f_{xk2} pour plan de rupture perpendiculaire aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU, 1985)	19

Chapitre 3

Tableaux 3.1	Caractéristiques physiques des briques creuses en terre cuite utilisées	28
Tableaux 3.2	Résultats de l'essai de l'absorption des briques testées	29
Tableaux 3.3	Résistance à la compression des briques testées	30
Tableaux 3.4	Composition des mortiers utilisés	31
Tableaux 3.5	Résultats des essais mécaniques sur les mortiers	32
Tableaux 3.6	Agés normalisés pour les essais mécaniques sur mortier (BUI, 2013)	33

Chapitre 4

Tableaux 4.1	Contraintes de flexion des murets (f_{xk})	45
Tableaux 4.2	Contraintes de compression des murets	45

NOMENCLATURE

F_X	: Murets où les charges sont parallèles au lit de joint
F_Y	: Murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint
M1	: Mortier en ciment (1 : 4)
M2	: Mortier en ciment (1 : 6)
M3	: Mortier bâtard (1 : 2 : 9)
FM1 X	: Muret F_X en mortier de ciment (1 : 4) testé à la flexion
FM2 X	: Muret F_X en mortier de ciment (1 : 6) testé à la flexion
FM3 X	: Muret F_X en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la flexion
FM1 Y	: Muret F_Y en mortier de ciment (1 : 4) testé à la flexion
FM2 Y	: Muret F_Y en mortier de ciment (1 : 6) testé à la flexion
FM3 Y	: Muret F_Y en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la flexion
CM1	: Muret en mortier de ciment (1 : 4) testé à la compression
CM2	: Muret en mortier de ciment (1 : 6) testé à la compression
CM3	: Muret en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la compression
EC6	: L'Eurocode 6
φ	: Masse volumique apparente (kg/m^3).
M	: Masse des briques (kg)
V	: Volume net des briques
Cap	: Capillarité des briques
S	: Surface horizontale mouillée en cm^2 incluant ou non les vides
t	: Temps d'immersion en minutes
m_2	: La masse de la brique humide
m_1	: La masse de la brique sèche (g)
σ_b	: Résistance à la compression (MPa).
ρ_s	: Masse volumique
ES	: Equivalent sable

R_c	: Résistance à la compression
f_r	: Force de flexion à la rupture
f_c	: Force de compression
f_{xk}	: Résistance à la flexion (N/mm^2).
f_{xk1}	: Résistance à la flexion des murets F_x (N/mm^2)
f_{xk2}	: Résistance à la flexion des murets F_y (N/mm^2)
L	: Longueur du mur
b	: Largeur du mur
e	: Epaisseur du mur.

INTRODUCTION GENERALE

La maçonnerie est largement utilisée comme un matériau de construction pour sa solidité, ses qualités esthétiques et sa souplesse d'emploi. Mais elle présente en général un comportement mécanique très complexe dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants.

La maçonnerie de remplissage peut être soumise à des contraintes négligeables dont l'ingénieur ne prend pas en compte, tel que celles produites par le fléchissement des poutres. Cependant ce dernier cause la flexion de la maçonnerie.

Donc le dimensionnement des structures en maçonnerie nécessite une bonne compréhension de leur comportement sous ces différentes contraintes, et pour les différents types de brique-mortier.

La résistance à la flexion de la maçonnerie est estimée sur la base de relations techniques déduites grâce à différentes recherches expérimentales qui ont été réalisées sur des murs en vraie grandeur ou prototypes. Elles ont permis de bien comprendre le comportement de la maçonnerie, différents critères de rupture de la maçonnerie pour un état de flexion ont été déterminés.

L'objectif de notre travail est de réaliser des essais expérimentaux, sur des murs en maçonnerie en utilisant des briques en terre cuite creuses. Ces essais tiendront compte des caractéristiques d'hétérogénéité de la maçonnerie et des différents mécanismes de rupture sous sollicitation de flexion.

Notre travail a été organisé 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. Et quelques travaux effectués sur la flexion.

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

Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation et l'exploitation des résultats des essais expérimentaux réalisés sur des murs tests. Et la comparaison des résultats obtenus avec les travaux cités dans la bibliographie.

On termine par une conclusion générale en identifiant quelques perspectives.

Chapitre 1 : Les différents types de maçonnerie

1.1. INTRODUCTION:

La maçonnerie est largement utilisée comme un matériau de construction pour sa solidité, ses qualités esthétiques et sa souplesse d'emploi. Dû essentiellement à son hétérogénéité, elle présente, en général, un comportement mécanique très complexe.

Le comportement mécanique de la maçonnerie est fonction des caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs ainsi que de l'interaction entre ses différents constituants. De plus, elle est très influencée par la nature de la sollicitation appliquée et par les conditions de mise en œuvre. Les procédés de fabrication, les conditions de séchage et de cuisson et la composition granulométrique des matériaux constitutifs jouent un rôle prépondérant et engendrent un comportement aléatoire des éléments qui rend l'expérimentation délicate.

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

1.2. MAÇONNERIE:

1.2.1. Définition:

On appelle maçonnerie un ouvrage composé de matériaux (bloc de béton, briques, pierres, etc.) unis par un liant (mortier, ciment, plâtre, etc.), le plus souvent dans le but de construire un mur, et se comportant comme un tout :

- Discontinuité dans les matériaux.
- La cohésion entre les joints est négligée et la résistance à la traction est considérée comme nulle.

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue (DESTRAC et coll., 2003).

1.2.2. Domaine d'application:

Les fonctions assurées par les murs (ici en maçonnerie, mais cela reste valable pour tous les types de murs) concernent principalement (HOUTI, 2002) :

- La stabilité mécanique sous sollicitations normales.
- L'étanchéité à la pluie pour les parois extérieures (les murs de façade).
- La satisfaction aux exigences thermiques et acoustiques.
- La tenue au feu de la paroi.
- Assemblage facile, dimensions et poids permettant un travail aisé.

Les ouvrages courants de maçonnerie traditionnelle peuvent être classés suivant leur rôle dans l'ouvrage :

- Maçonneries porteuses.
- Maçonneries de remplissage.
- Maçonneries de façade non porteuse ou en doublage
- Maçonneries de cloison.

1.3. LES DIFFERENTS TYPES DE MAÇONNERIE:

La résistance caractéristique ainsi que le mode de fabrication de la maçonnerie, peuvent être classées en quatre catégories:

- Maçonnerie de pierre naturelle.
- Maçonnerie en agglomérés de béton.
- Maçonnerie en briques d'argile cuite.
- Maçonnerie en briques silice-calcaire.

1.3.1. Maçonnerie de pierre naturelle

La construction en pierre naturelle reste la base de la maçonnerie d'une façon générale. La pierre offre un matériau résistant présentant certains avantages économiques lorsque le lieu d'utilisation est proche du lieu d'extraction (Figure 1.1).



Figure 1.1 : Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990).

1.3.2. Maçonnerie en agglomérés de béton:

Les agglomérés sont constitués d'agrégats (lourds ou légers) dont la cohésion est assurée par un liant hydraulique (voir Figure 1.2).

Les agglomérés doivent satisfaire à certaines conditions et obéir à certaines exigences :

- Une bonne résistance mécanique.
- Une bonne résistance au gel.
- Une bonne isolation thermique et phonique.
- Assemblage facile dimensions et poids permettant un travail aisé.

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 1.2: Les différents types de parpaing (BALANDIER, 1990)

1.3.3. Maçonneries en briques silico-calcaire :

La brique silico-calcaire (Figure 1.3) est composée d'un mélange de chaux (8 – 10%), sable siliceux (90 – 92%) et d'eau, sans adjuvant chimique, presse et durci. Lors de la fabrication des briques, la température de durcissement s'élève à 160 - 200° C (POURRAT, 2009).



Figure 1.3 : Brique silico-calcaire (POURRAT, 2009).

1.3.4. Maçonnerie en briques d'argile cuite:

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000° C. Par combinaison chimique à partir de 700° C, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques (BENMESSAOUD et CHEMROUK, 2008).

En général, la fabrication des briques suit les opérations indiquées sur la figure 1.4.

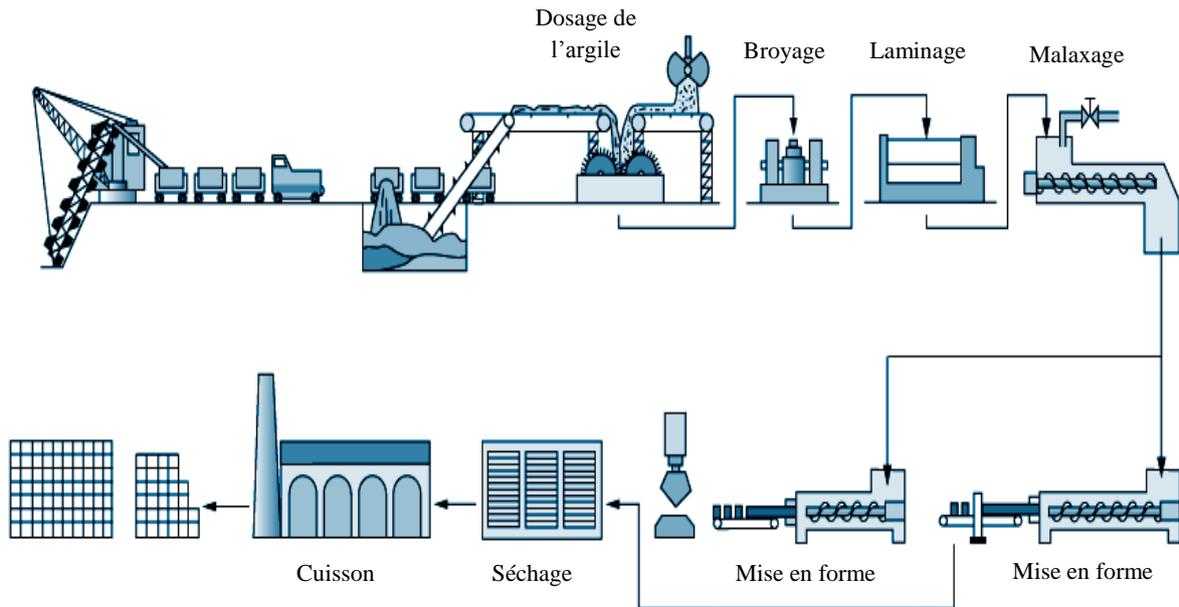


Figure 1.4 : Processus de fabrication des briques en terre cuite creuses (HABER et SMITH, 1987).

Il existe 3 types de briques :

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

1.3.4.1 Briques pleines:

Les briques pleines ordinaires constituent d'excellents éléments pour les murs porteurs, spécialement fabriquées pour l'exécution des façades et des parements (Figure 1.5).

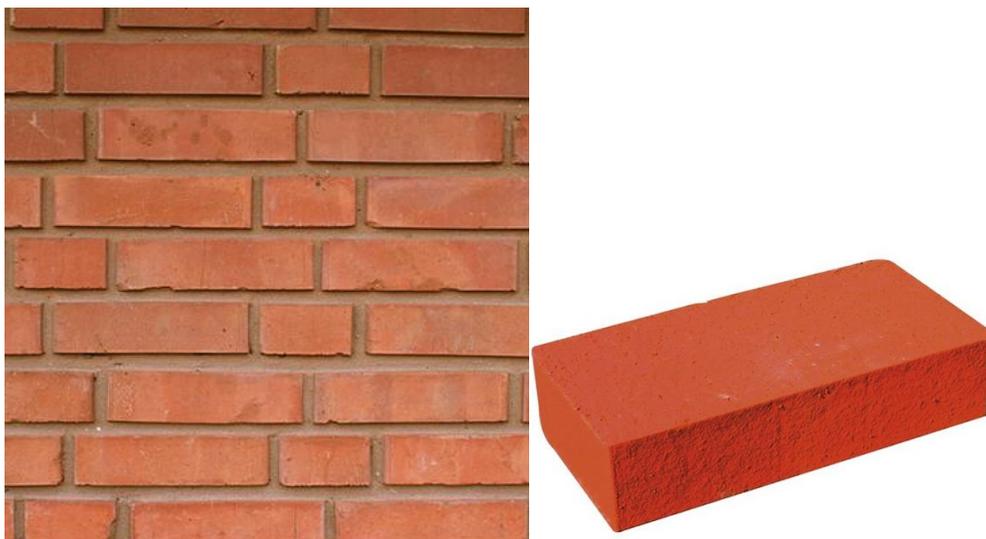


Figure 1.5: Briques pleines (www.bricoman.fr)

1.3.4.2. Les briques perforées:

Les briques perforées sont des briques où la perforation, apparaît sur les grandes faces. De plus, leur format permet une mise en œuvre rapide (Figure 1.6).



Figure 1.6: Mur en briques perforées (www.wienerberger.fr)

1.3.4.3 Les briques creuses:

Les briques creuses (Figure 1.7) sont beaucoup plus légères, et de plus grandes dimensions ; elles permettent la réalisation de murs spécialement isolants. En revanche leur résistance à la compression est faible.

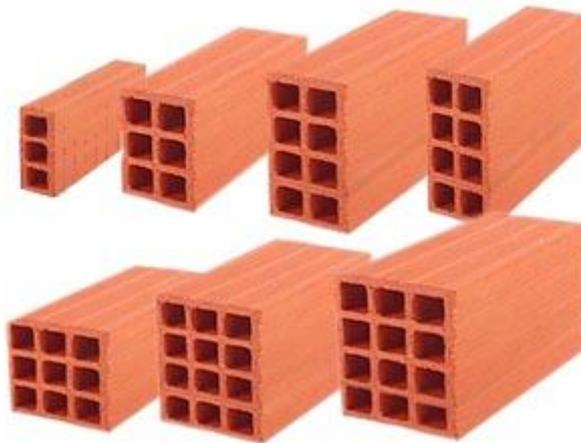


Figure 1.7: Briques creuses de différents formats (www.ecopram.ma)

1.4. LES MORTIERS:

Le mortier est un mélange de liant « chaux et/ou ciment », de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants (Figure 1.8).

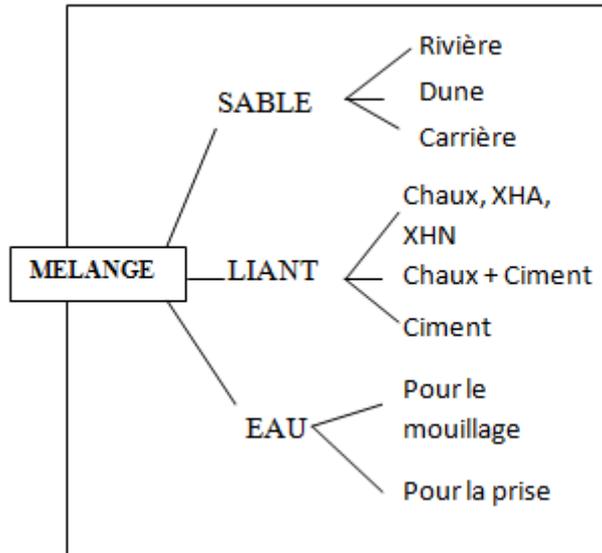


Figure 1.8 : Constituants d'un mortier (CHERIF et KARA, 2013)

1.4.1 Types de mortier :

1.4.1.1 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.

1.4.1.2 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.

1.4.2. Les mortiers de liaison:

Le mortier assure également la liaison facile "collage" des éléments unitaires entre eux, conduisant ainsi à un monolithisme favorable, s'opposant aux déformations. Il permet à ces structures de résister au plombage ou au cisaillement et aux effets dynamiques. Les qualités mécaniques d'un mortier doivent être telles qu'il n'assure qu'une très faible déformation sous les charges.

L'isolation thermique d'un mortier devrait être égale à celle des matériaux employés.

Le mortier composé de : sable, d'un liant et d'eau, doit être réalisé en fonction des remarques suivantes:

- i. le sable entrant dans la composition des mortiers doit être propre, sans limons ni impuretés organiques. Un bon sable doit "crisser" lorsqu'on le prend dans la main. La granulométrie des sables employés doit être étudiée soigneusement. Le diamètre des plus gros grains ne doit pas dépasser la moitié de l'épaisseur des joints.

- ii. les liants employés doivent répondre aux caractéristiques mécaniques exigées. Le ciment portland ou ciment artificiel offre une très bonne résistance à la compression et d'excellentes qualités hydrauliques. En revanche, avec des dosages lutant le retrait, on obtient un mortier moins souple et moins maniable qu'avec la chaux hydraulique.
- iii. l'eau de gâchage des mortiers doit être propre, sans impuretés (eau potable) ou autres produits nuisibles. L'eau de mer ou l'eau pure et celle contenant des matières chimiques ou organiques sont à exclure de la préparation des mortiers.

La résistance maximale du mortier est obtenue grâce à une faible teneur en eau ; le mortier ne doit jamais être inondé (HOUTI, 2002).

1.4.3. Les classes de mortier:

Trois classes de mortier sont connues : le mortier M30, le mortier M5 et le mortier colle.

Les mortiers M30 et M5 conformément à la norme Européenne 998.2, sont destinés au montage de maçonneries de blocs de béton et le mortier colle au montage des maçonneries de blocs de béton cellulaire. Ces mortiers se distinguent par leurs composition en ciment, chaux et sable et donc par leurs résistance mécanique:

- mortier M30 : il est caractérisé par une résistance à la compression supérieure à 30 MPa.
- mortier M5: caractérisé par une résistance à la compression supérieure à 5 MPa.
- mortier colle: il s'agit d'un mortier prêt à l'emploi adapté au montage des Blocs de béton cellulaire. Ses constituants principaux sont : ciment blanc, chaux grasse, sable siliceux et un réteneur d'eau cellulosique.

1.4.4. Épaisseur des joints de mortier :

La nature du mortier conditionne l'épaisseur des joints (voir figure 1.9). La maçonnerie traditionnelle à joints épais met en œuvre un mortier courant. D'apparition plus récente, la maçonnerie « collée » à joints minces est rendue possible par des produits dont la tolérance de hauteur est plus réduite. Le mortier pour joints minces s'apparente à une colle fluide. La pose à joints collés consomme environ 7 kg/m² de mortier au lieu de 80 kg en pose à joints épais (MARCEL et coll., 2009).

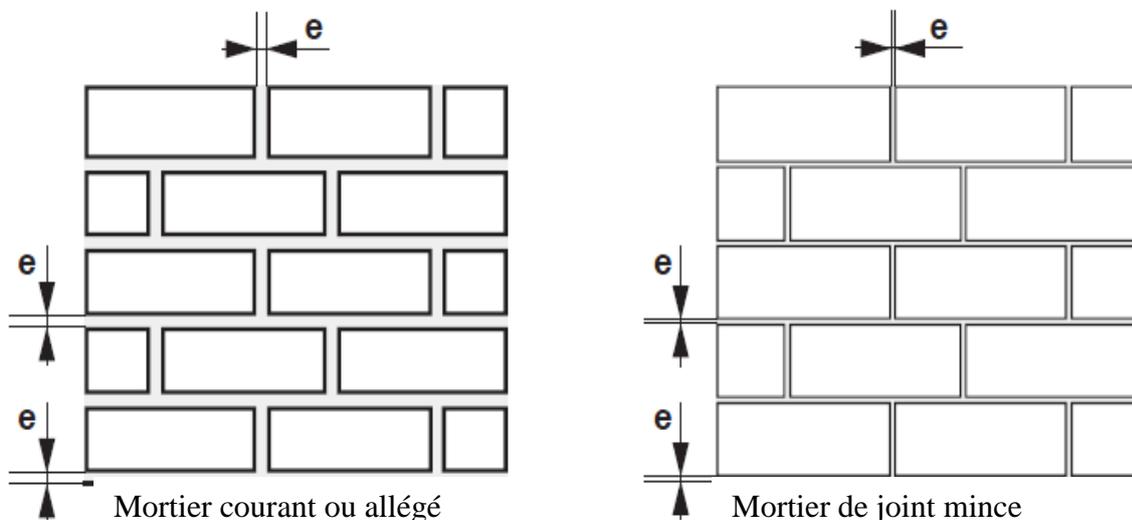


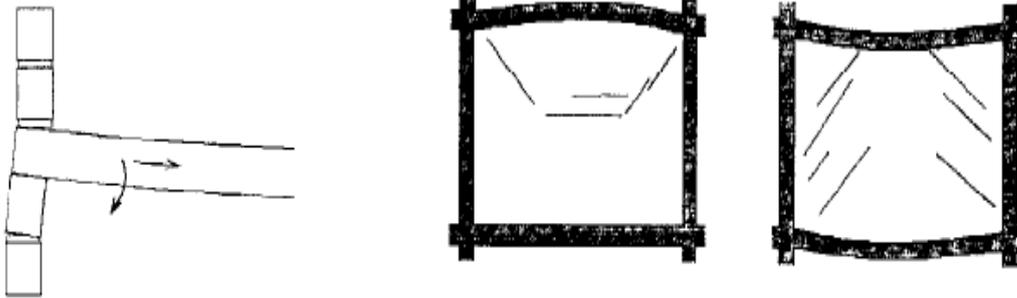
Figure 1.9 : Epaisseur des joints de mortier épais (MARCEL et coll., 2009).

- Pour les mortiers courants ou allégé : $6 \text{ mm} < e < 15 \text{ mm}$.
- Pour les mortiers de joint mince : $0,5 \text{ mm} < e < 3 \text{ mm}$.

1.5. DEFAUTS DANS LA MAÇONNERIE:

Le dimensionnement de la maçonnerie doit assurer sa résistance contre les sollicitations sous charge et actions indirectes qu'il cause des défauts dans la maçonnerie, parmi ci défauts:

a) Mouvement des dalles.



Retrait de dalles posées à l'état frais

Fléchissement des dalles

Figure 1.10 : Défauts causés par le Mouvement des dalles (www.paysdecernes.org)

b) Mouvements de dilatation thermique

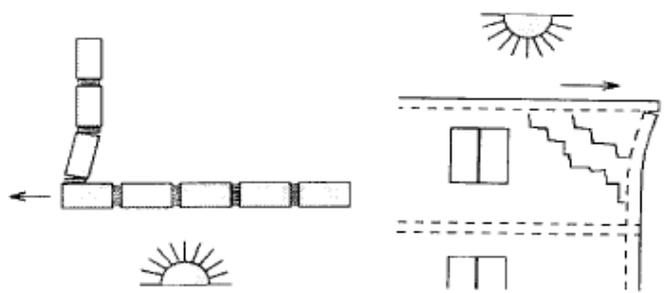


Figure 1.11 : Mouvements de dilatation thermique (www.paysdecernes.org)

c) Fissures le long des fenêtres

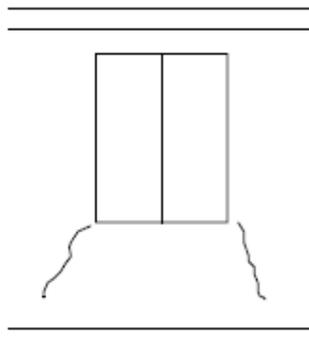


Figure 1.12 : Fissure le long des fenêtres (www.paysdecernes.org)

1.6. PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE:

La fonction « paroi » est, elle, victime de fréquents problèmes d'origines diverses :

- Des erreurs de conception et de choix des matériaux.
- Mauvaise qualité des matériaux.
- Infiltrations d'eau.
- Des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes.
- Des poussées horizontales perpendiculaires au plan des murs, causées par les vents.

Ceci introduit des sollicitations de flexion, compression et cisaillement, qui nécessite l'étude de son comportement suivant les deux directions perpendiculaire et parallèle au joint de mortier.

1.7. CONCLUSION :

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue. Elle est applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan « maçon ». Elle se caractérise par ses matériaux supports ; brique, parpaing, mortier où chacun d'entre eux présentent des avantages, particulièrement le cout de réalisation et la facilité de transport sur les chantiers. Les divers matériaux fabriqués (pleins, perforés ou creux) permettent la réalisation de structures porteuses et de remplissage. Le soin avec lequel, les matériaux constitutifs de la maçonnerie sont choisis et les structures sont construites, permet d'éliminer un nombre important de défauts et de pathologies observées sur ce type de construction.

Notre intérêt dans cette étude est de prédire le comportement des structures de remplissage par rapport à la flexion.

CHAPITRE 2

COMPORTEMENT MECANIQUE DES STRUCTURES EN MACONNERIE ET LES TRAVAUX EFFECTUES SUR LA FLEXION

2.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons un état des connaissances sur :

- Mode de rupture de la maçonnerie.
- Comportement des murs soumis aux charges horizontales.
- Comportement des murs vis-à-vis de la charge concentrée.
- Influence des charges latérales sur une structure en général.
- Comportement en cisaillement des murs en maçonnerie.
- Comportement en traction des murs en maçonnerie.
- Comportement en flexion des murs en maçonnerie
- Travaux effectués sur la flexion.

La maçonnerie soumise à différents chargements présentés sur la figure 2.1, réagit comme le béton ordinaire, elle possède une bonne résistance en compression, modérée jusqu'à mauvaise en cisaillement ; mais faible en traction.

Etant donné l'hétérogénéité des matériaux, il n'est pas possible de déterminer les caractéristiques de la maçonnerie à partir de l'étude isolée des matériaux qui la composent. C'est pourquoi les règlements proposent la réalisation d'essais, sur de petits prismes ou des murs composés de quelques pièces (HOUTI, 2002).

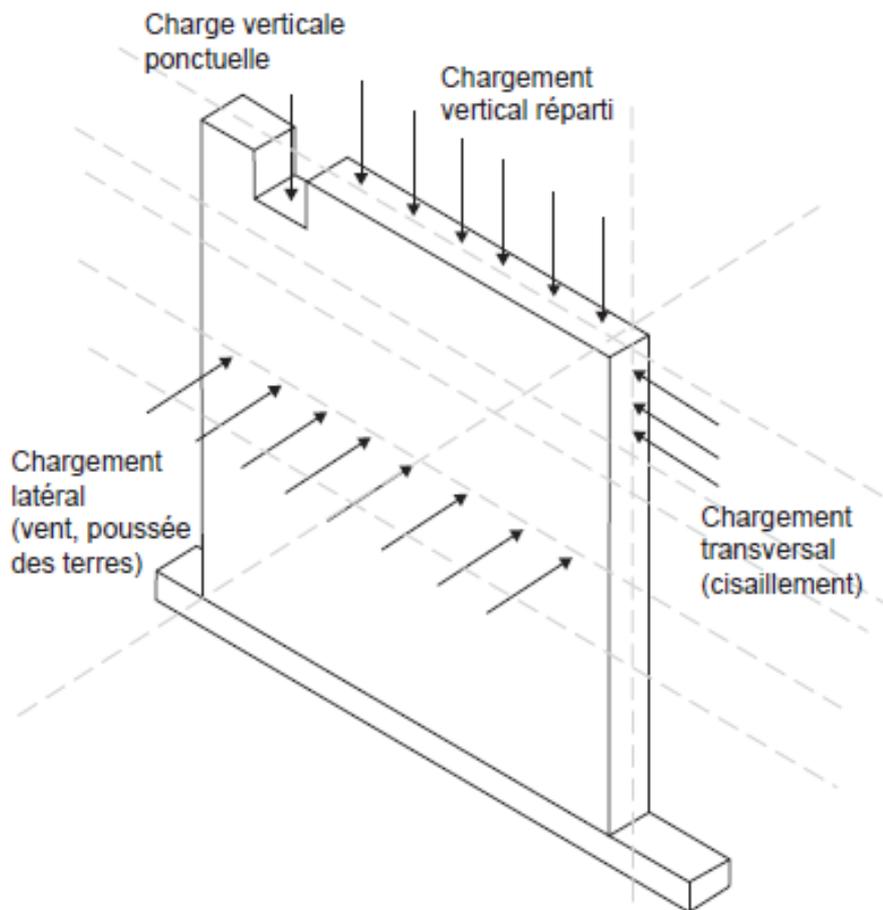


Figure 2.1 : Types de chargement appliqués sur les murs (MARCEL et coll., 2009).

2.2 MODE DE RUPTURE DE LA MAÇONNERIE :

Dans l'étude du comportement de la maçonnerie, l'identification des différents modes de rupture se révèle d'une importance considérable. Plusieurs approches peuvent être considérées pour comprendre la rupture de la maçonnerie sous chargement. D'une part, une étude locale des modes de rupture liés à la fissuration le long des joints de mortier et au travers des briques, et d'autre part, liés à l'écrasement par compression, traction ou cisaillement de ces mêmes blocs. De façon générale, les modes de rupture de la maçonnerie sont étudiés selon qu'ils s'agissent des ruptures en plan ou des ruptures hors plan du mur. Le mode de rupture réel d'un élément peut être une combinaison de ces modes cités précédemment (GERTIN, 2014).

Les différents modes de rupture des murs en maçonnerie, soumises à un chargement biaxial, sont présentés dans ce qui suit (voir figure 2.2) :

2.2.1 Rupture par glissement :

L'alternance de l'action sismique peut être à l'origine de cette forme de rupture à cause de la formation dans les joints, de fissures horizontales en traction. 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 et de l'interface joint-bloc.

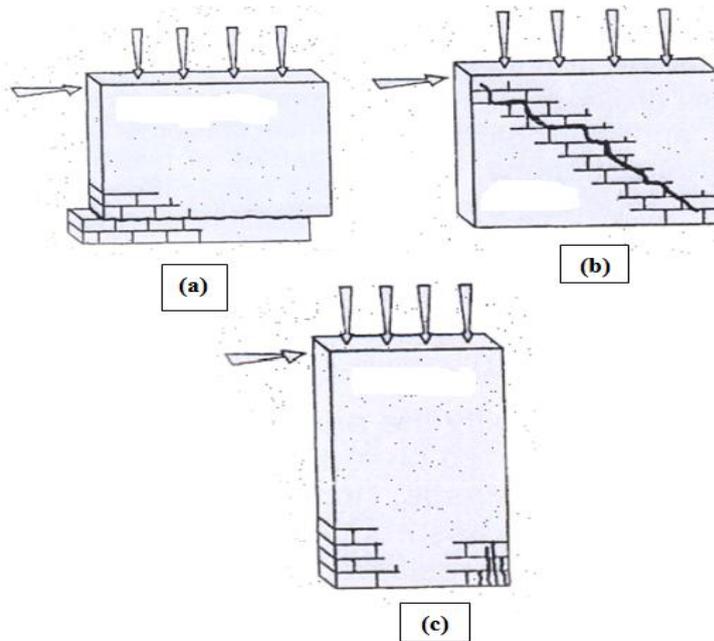


Figure 2.2 : Trois modes de ruine sous sollicitations agissant dans le plan : (a) glissement le long d'un joint horizontal, (b) cisaillement, (c) rupture par excès de flexion (TOMAZEVIC, 2003).

2.3. COMPORTEMENT DES MURS SOUMIS AUX CHARGES HORIZONTALES ET SOUS DES CHARGES LATÉRALES MONOTONES :

Quand un panneau en maçonnerie est sujet à des charges horizontales, telles que celles provenant des séismes et du vent, leur comportement est différent, selon qu'il s'agisse de murs isolés ou porteurs. Les derniers présentent un comportement plus ductile que les premiers ; mais ils présentent un réseau de fissuration similaire (Carter et Stafford, 1969).

Les modes de rupture qui peuvent avoir lieu sont :

- Rupture par traction diagonale.
- Rupture par glissement.
- Rupture par flexion : la fissuration se produit dans des zones voisines de la base encadrée
- Rupture mixte, caractérisée par l'apparition de fissures diagonales qui tantôt traversent les pièces, tantôt suivent la direction des joints.
- Ecrasement du matériau dans les zones en compression.

2.4 COMPORTEMENT DES MURS VIS-A-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 2.3 (PAGE et HENDRY, 1987).

Il n'y a aucune augmentation de contrainte pour les charges concentrées appliquées à l'extrémité d'un mur (KIRTSCHIG et KASTEN, 1979). Les charges concentrées ont montré que le mode de rupture pour ce type de chargement se produit dans les fentes des blocs plutôt que par une rupture verticale (PAGE et ALI, 1987).

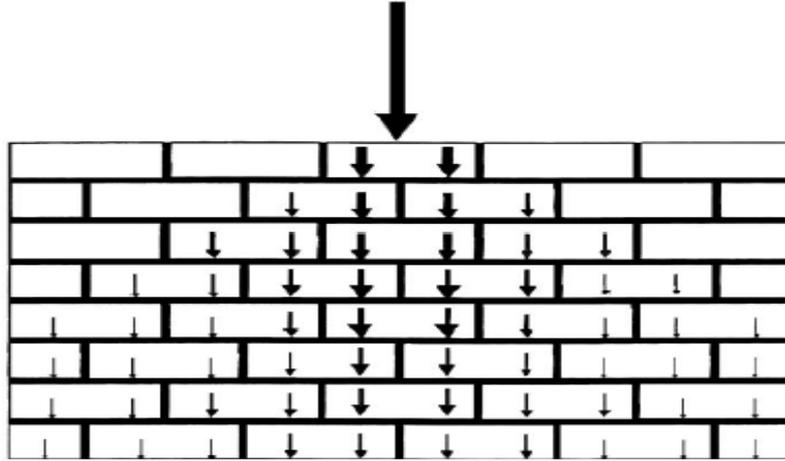


Figure 2.3: Propagation de la charge concentrée d'un mur (ASTME519-02, 2002)

2.5 COMPORTEMENT AU CISAILLEMENT DES MURS EN MAÇONNERIE :

L'évaluation de la résistance au cisaillement est requise pour les murs en maçonnerie soumis aux actions horizontales, tel que le séisme et le vent. Les actions horizontales sont généralement combinées avec les actions gravitaires du poids propre ou des surcharges normales aux joints de mortier (MEZIGHECHE, 2010).

Les murs en maçonnerie dans les structures soumises aux actions horizontales présentent généralement deux modes de rupture :

- rupture par cisaillement : lorsque les fissures apparaissent le long du joint de mortier horizontal.
- rupture par tension diagonale : qui est généralement caractérisée par une fissuration par tension diagonale.

En conséquence, la résistance au cisaillement de la maçonnerie dépend surtout de :

- L'intensité du chargement vertical.
- La résistance au cisaillement qui peut être assumée par les joints horizontaux.
- La résistance à la traction des briques.

La résistance à la compression de la maçonnerie.

2.6 COMPORTEMENT EN TRACTION DES MURS EN MAÇONNERIE :

La maçonnerie construite 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.

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 est normalisé par ASTM C952-76 et illustré dans la figure 2.4. 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 (HOUTI, 2002).

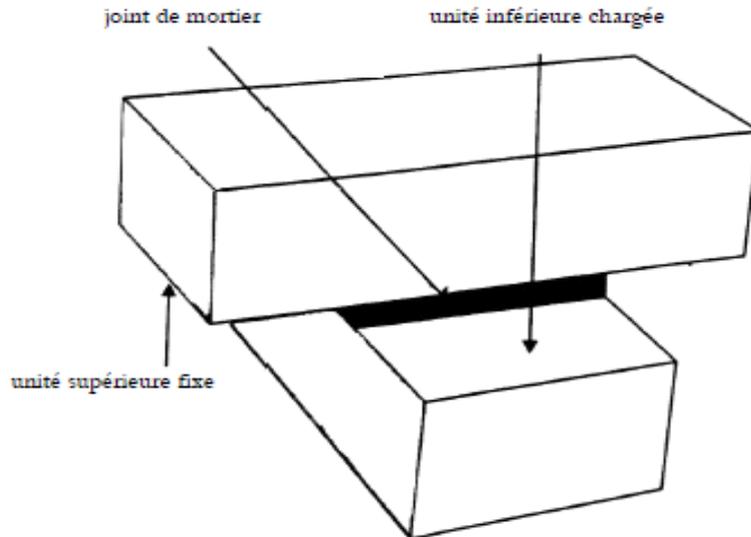


Figure 2.4 : Essai de traction (HOUTI ,2002)

2.7 COMPORTEMENT EN FLEXION DES MURS EN MAÇONNERIE :

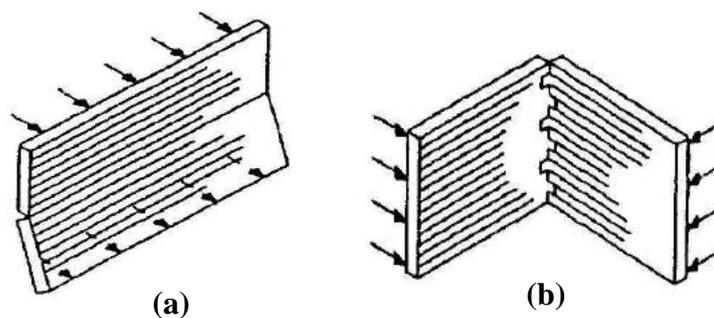
2.7.1 Flexion uni-axiale

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

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

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

Si un mur est appuyé horizontalement sur sa barre supérieure et inférieure, sa résistance latérale dépend de la résistance à la traction par flexion développée à travers le joint. Si en plus, il est appuyé latéralement sa résistance latérale dépend aussi de sa résistance à la traction par flexion développée le long de la direction perpendiculaire au lit de joint (voir figure 2.5). Cette résistance est généralement trois fois plus grande que celle à travers les joints si l'adhésion (mortier-brique) est bonne. La résistance à la flexion parallèle au lit du joint est conditionnée par la résistance à la traction par flexion des briques. Si l'adhérence est mauvaise, cette résistance est conditionnée principalement par la résistance au cisaillement développée dans le joint à l'interface brique-mortier (PAGE et HENDRY, 1987).



(a): Rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits des joints
 (b): Rupture le long de la ligne parallèle aux lits des joints

Figure 2.5 : Comportement à la flexion des murs en maçonnerie (NF EN 1996-1-1,2006).

En particulier le comportement de la maçonnerie dans la direction de la flexion verticale est très complexe. En effet, pour la flexion horizontale, on n'observe qu'un seul mode de rupture, la ligne de fissure apparaît dans les joints d'assises (joints horizontaux) (Figure. 2.6a). Tandis que pour la flexion verticale, deux modes de rupture, qui dépendent des résistances relatives des constituants de la maçonnerie, sont possibles. Le premier traduit une rupture ou « ligne de fissure » en adéquation avec une vision homogénéisée du milieu (Figure. 2.6c), l'hétérogénéité du milieu n'est pas mise en exergue. Le second se traduit par une ligne de rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme dentée (Figure. 2.6b). Ce second mode traduit clairement la discontinuité du matériau, l'échelle de la brique constitutive et celle du mortier sont clairement identifiées. Pour les murs dont la résistance d'adhérence du mortier est relativement forte par rapport à la résistance des briques constitutives, la ligne de rupture va avoir tendance à apparaître comme une fissure verticale au travers des briques et des joints verticaux (Figure. 2.6c). La rupture de type zigzag alterne la propagation de fissure le long d'un joint vertical puis le long d'un joint d'assise (Figure. 2.6b).

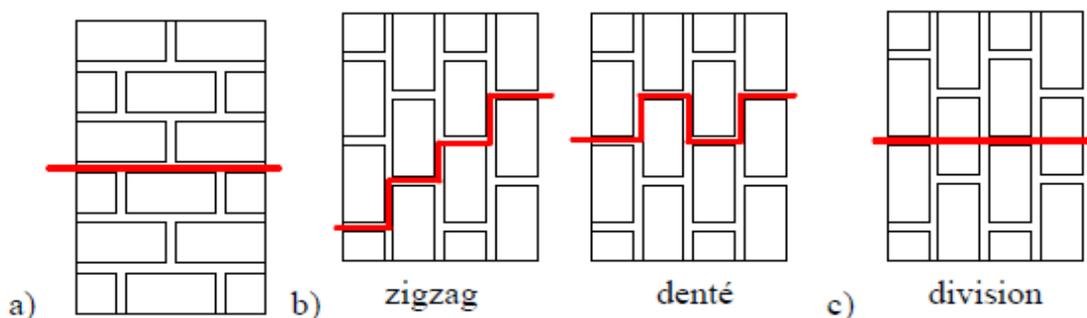


Figure. 2.6 : Modes de rupture sous flexion uni-axiale : a) flexion horizontale ; b) flexion verticale Zigzag, denté ; c) flexion verticale (division) (GAZZOLA, 1986)

2.7.2 Flexion bi-axiale

Un mur travaille à la flexion bi-axiale lorsqu'il est en appui sur 3 ou 4 de ses extrémités ou bords (Figure. 2.7) (DRYDSAKE et coll., 1988), ou bien lorsqu'il porte sur 2 bords adjacents. Le mécanisme de rupture des murs sous flexion bi-axiale est très complexe car sous cette condition de charge, la distribution du moment de flexion n'est pas monotone ; mais varie à travers le panneau. Les modes de rupture caractéristiques dépendent, des dimensions du panneau, des conditions aux limites, ainsi que des résistances relatives des unités (briques, blocs) et joint d'adhésion ou mortier.

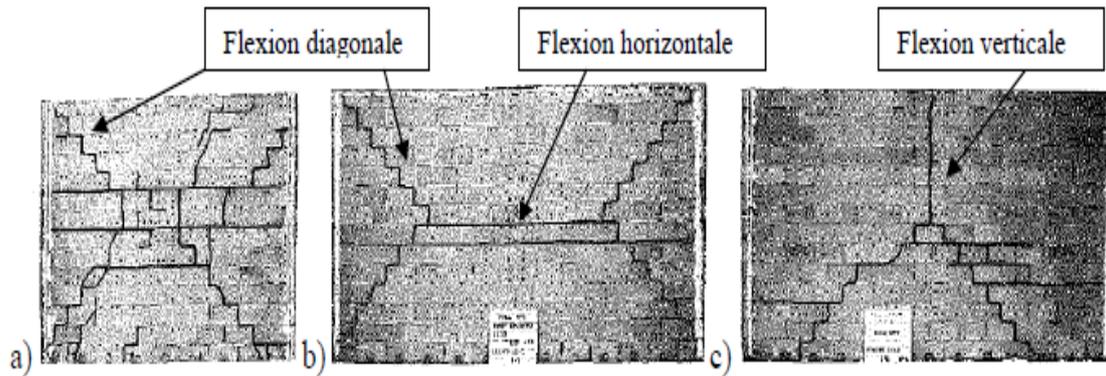


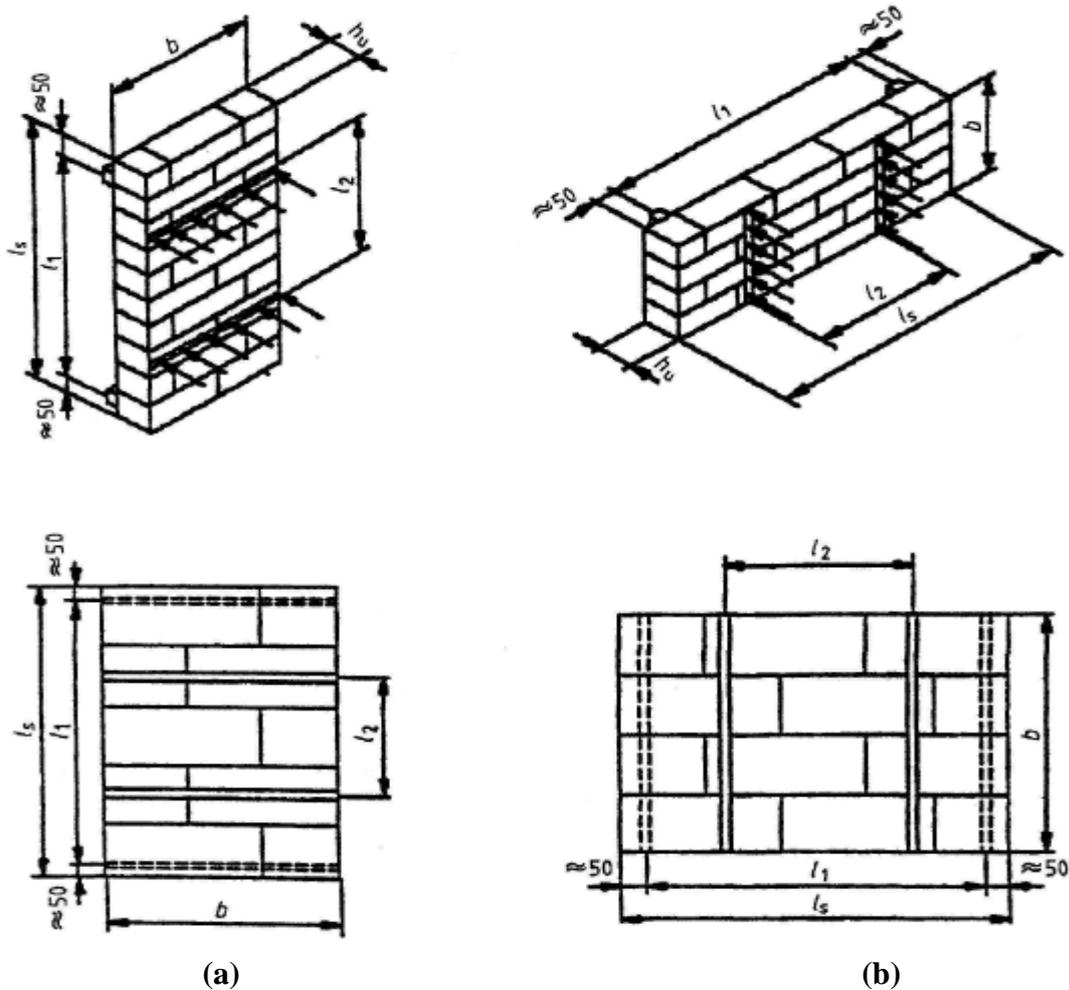
Figure. 2.7 : Modes de rupture des murs : a)et b) mur supportés sur 4 bords ; c) mur supportés sur 3 bords (DRYSDALE, 1988)

2.8 ESSAI DE RESISTANCE A LA FLEXION SUIVANT L'EUROCODE6 ET DTR C2.45

2.8.1. Essai de résistance a la flexion :

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

- flexion dont la déformée est verticale (appuis horizontaux - voir figure 2.8a).
- flexion dont la déformée est horizontale (appuis verticaux - voir figure 2.8b).



(a) : Plan de rupture parallèle au lit de pose (flexion horizontale)
 (b) : Plan de rupture Perpendiculaire au lit de pose (flexion verticale)
Figure 2.8: Test flexion 4 points (Eurocode 6) (EUROCODE6, 1996).

2.8.2 Résistance caractéristique à la flexion f_{xk} :

Deux plans de rupture privilégiés sont considérés pour déterminer la résistance caractéristique à la flexion f_{xk1} ou f_{xk2} (MARCEL et coll., 2009) ; (voir tableaux 2.1 et 2.2).

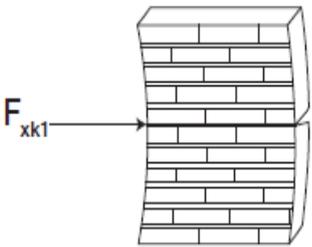
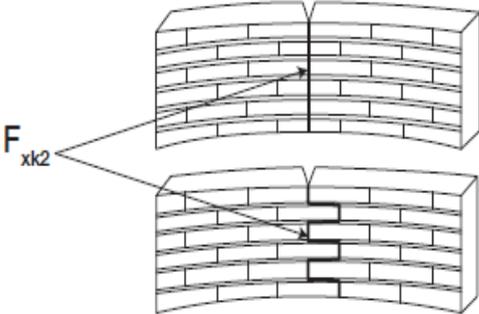
Plan de rupture parallèle au lit de pose	Plan de rupture perpendiculaire au lit de pose
	

Figure2.9 : Définition des résistances caractéristiques à la flexion (MARCEL et coll., 2009)

Tableau 2.1 : Valeurs de f_{xk1} pour un plan de rupture parallèle aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU, 1985).

Eléments De maçonnerie	f_{xk1} (N/mm ²)		
	Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces	Mortier allégé
	Fm 5 N/mm ² ou 10 N/mm ²		
Terre cuite	0,10	0,15	0,10
Silico-calcaire	0,10	0,20	Non utilisé
Béton de granulats Courant ou légers	0,10	0,20	Non utilisé
Béton cellulaire Autoclave	0,10	0,15	0,10
Pierre reconstituée	0,10	Non utilisé	Non utilisé
Pierre naturelle prétaillée	0,10	0,15	Non utilisé

Tableau 2.2 : valeurs de f_{xk2} pour plan de rupture perpendiculaire aux lits de pose suivant la norme XP P10 202 (DTU , 1985)

Eléments De maçonnerie	f_{xk2} (N/mm ²)		
	Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces	Mortier allégé
	Fm 5 N/mm ² ou 10 N/mm ²		
Terre cuite	0,40	0,15	0,10
Silico-calcaire	0,40	0,30	Non utilisé
Béton de granulats Courant ou légers	0,40	0,30	Non utilisé
Béton cellulaire autoclave	$\rho < 400 \text{Kg/m}^3$	0,20	0,20
	$\rho \geq 400 \text{Kg/m}^3$	0,40	0,30
Pierre reconstituée	0,40	Non utilisé	Non utilisé
Pierre naturelle prétaillée	0,40	0,15	Non utilisé

2.9 TRAVAUX EFFECTUES SUR LA FLEXION :

Diverses études ont été réalisées concernant le comportement de la maçonnerie sous sollicitation de flexion, nous présentons dans cette partie quelque travaux non exhaustives qui ont été développés dans la littérature.

2.9.1 Les travaux de Graça:

Pour la détermination expérimentale de la résistance à la flexion de la maçonnerie en parpaing il a utilisé la norme EN 1052-2 (EN 1052-2,1999), en considérant une configuration de test de charge à quatre points (voir Figure 2.10a). La charge est appliquée généralement selon le schéma indiqué dans la Figure 2.10b pour obtenir la résistance à la flexion dans la direction parallèle et perpendiculaire aux lits des joints.

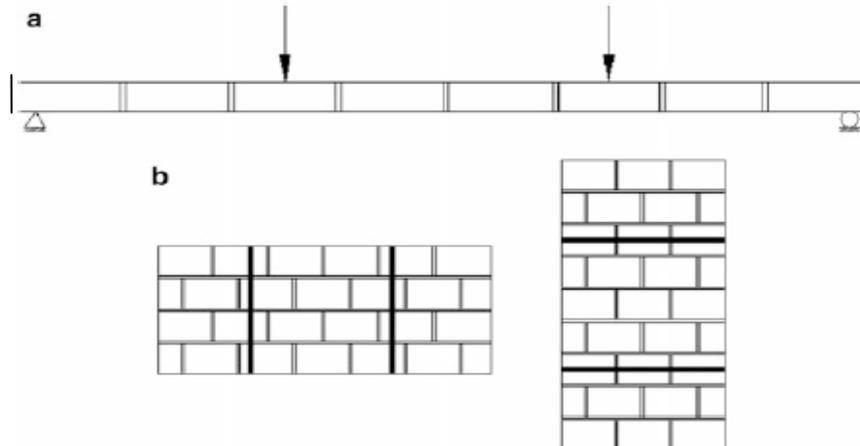
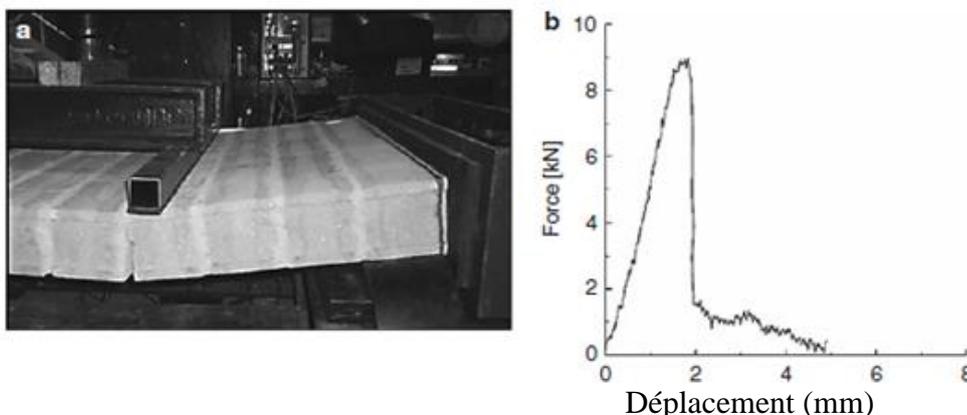


Figure.2.10 : Type de chargement pour la détermination expérimentale de la résistance à la flexion de la maçonnerie (EN 1052-2, 1999).

• Résultats :

- La résistance à la flexion dépend du type de mortier, notamment sur la résistance à la traction et à la résistance d'adhésion parpaing-mortier.
- La maçonnerie non armée en flexion est caractérisée par un comportement très fragile, qui est associé par une fissure centrale impliquant la rupture de l'interface mortier et les blocs (voir Fig. 2.11a).
- Le schéma de principe force-déplacement relatif à la charge verticale appliquée et le déplacement maximal mesuré à mi-portée, présenté dans la figure. 2.11b, confirme le caractère fragile de la maçonnerie en flexion.



(a) Modèle de fissure en flexion dans la direction normale aux articulations de lit
(b) Diagramme force-déplacement typique (direction parallèle aux articulations de lit)
Figure 2.11 : Détails sur le comportement de flexion de maçonnerie non armée (GRAÇA, 2014).

2.9.2 Les travaux de Morton J.:

Pour trouver les modes de défaillance causés par la force de flexion, des panneaux muraux à l'échelle vraie grandeur ont été construits (voir Figure 2.12)

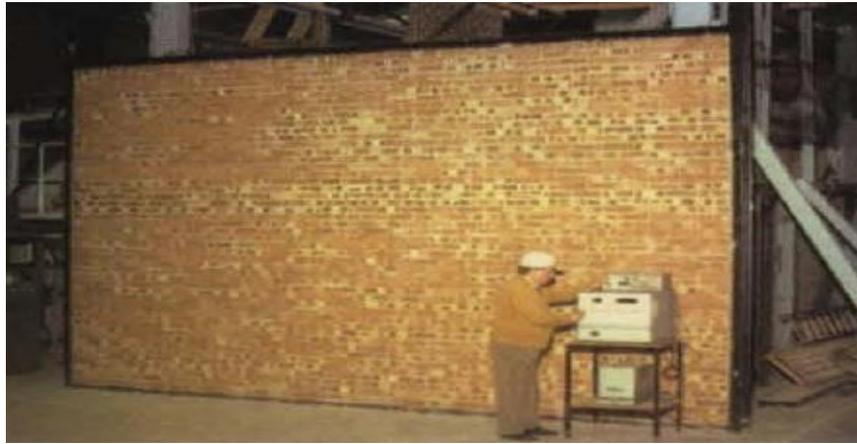


Figure.2.12 : Panneaux muraux à pleine échelle construits dans des bancs d'essai (MORTON, 1986)

La figure 2.13 présente les différents modes de rupture observés :

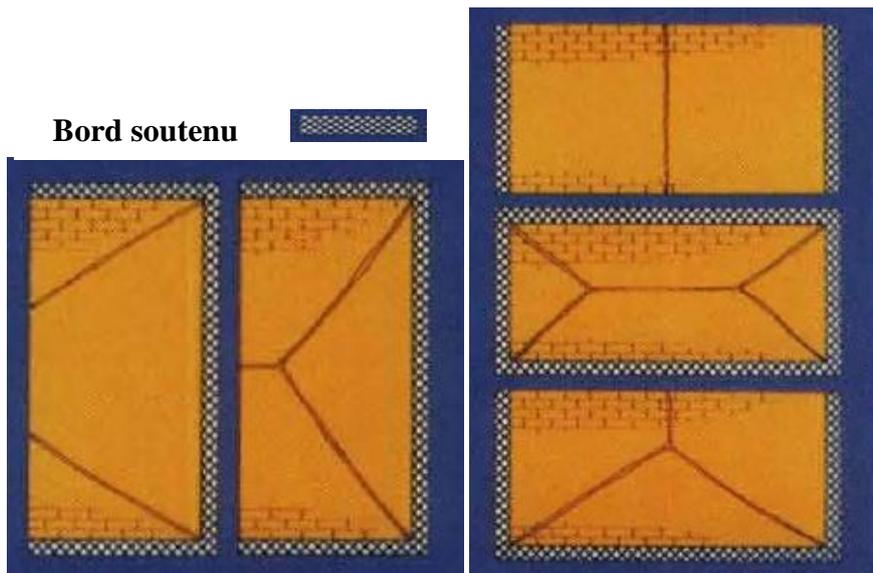


Figure 2.13 : Modes de ruptures (MORTON, 1986)

2.9.3 Les travaux de Sachin B.K. et coll. :

a. Principe de l'Essai :

Le comportement de la maçonnerie est testé dans les deux directions de flexion (Figure 2.14), soumis à une charge normale (SACHIN et coll., 2014). Deux types de murs : armé et non armé URM sont testés (voir figure 2.15).

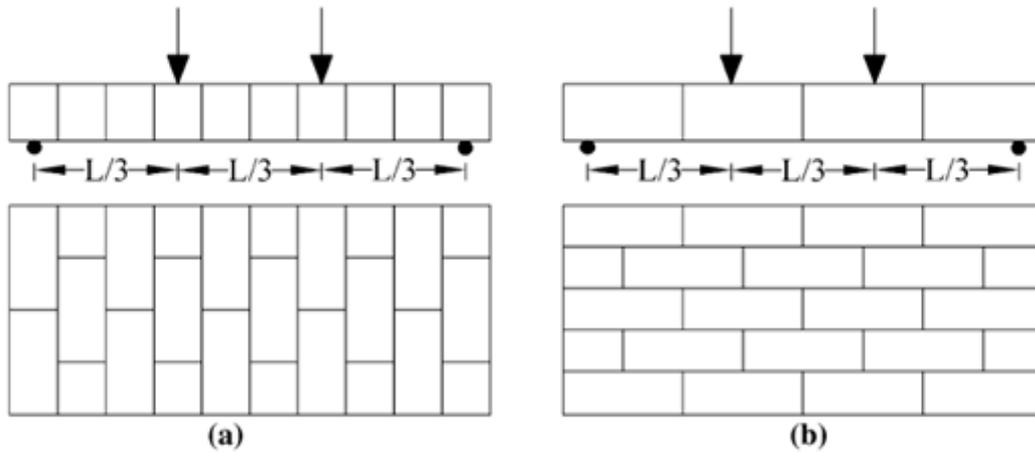


Figure 2.14 a. Tension normale au lit de joint et **b** Tension parallèle au lit de joint (SACHIN et coll., 2014).

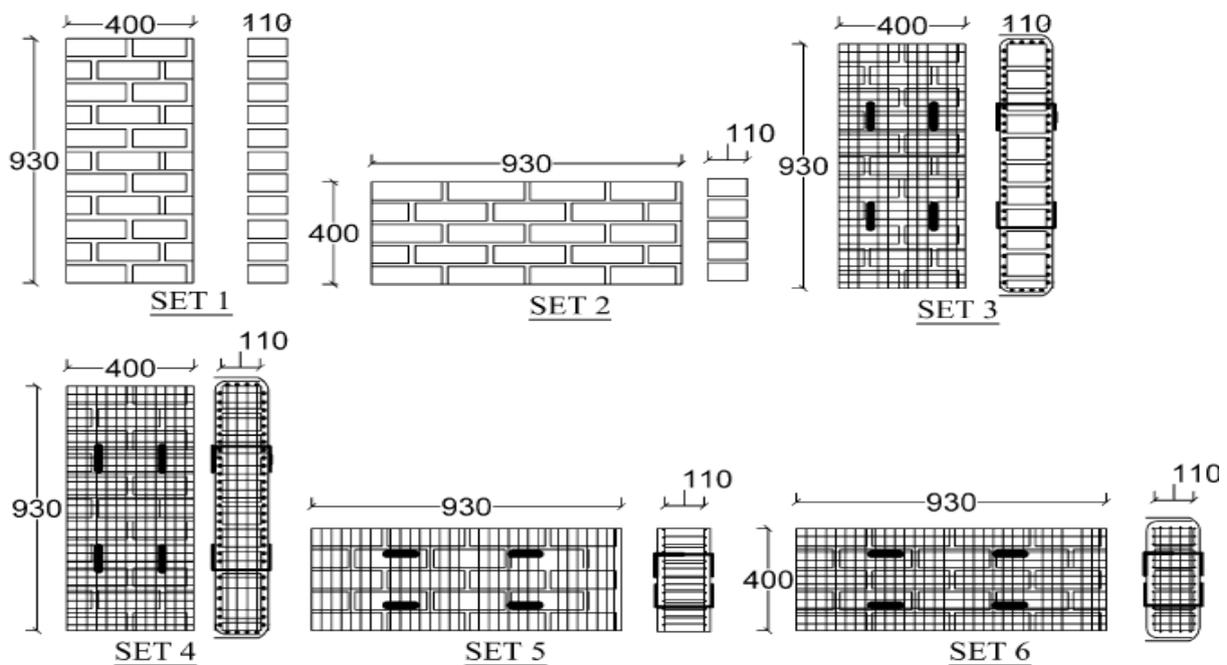


Figure.2.15 : Géométrie de l'éprouvette et les détails de ferrailage (SACHIN et coll, 2014).

• **Résultats :**

Les contrôles hors-plan flexion sur panneaux de maçonnerie montrent une augmentation significative de la résistance à la flexion et la ductilité après avoir renforcé avec WWM (treillis métallique soudé) et micro-béton. L'augmentation de la résistance est de 10 fois plus pour seulement 0,29% d'armature dans la direction longitudinale. Il est intéressant de noter que la résistance à la flexion des panneaux de URM (maçonnerie non armée) dépend de la direction de chargement en cours, pour la tension de flexion normale ou parallèlement au lit de joints, alors que dans le cas des panneaux renforcés, la capacité de flexion est indépendante du sens de chargement.

L'étude expérimentale démontre que la technique de rénovation appliquée à l'aide WWM et micro béton est tout à fait efficace dans l'amélioration de la raideur et la force des parois URM en dehors du plan. La résistance et la ductilité des panneaux modernisés peuvent être

estimées analytiquement avec une précision raisonnable, justifiant l'utilisation de la théorie du faisceau ordinaire pour la conception et le renforcement des murs URM.

2.9.4 Les travaux de BUI:

Il a proposé deux modèles numériques (voir figure 2.16) qui permettent de simuler les essais de flexion 4 points décrits dans EN 1052-2 (BUI, 2013).

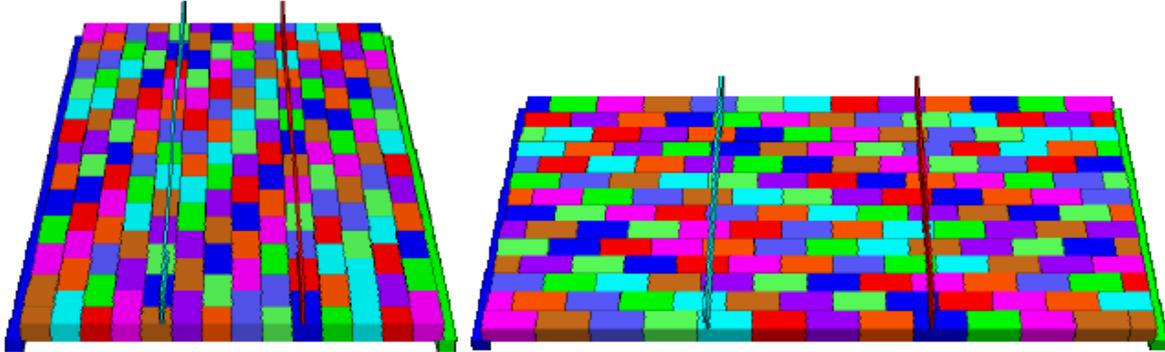


Figure. 2.16 : Maillage 3DEC : a) plan de rupture parallèle au lit de pose ; b) plan de rupture perpendiculaire au lit de pose (BUI, 2013).

Les murs modèles sont constitués de blocs creux en béton et joint de mortier d'épaisseur 10 mm avec la résistance à la compression de l'ordre de 15,54 MPa.

Le mur est supporté par deux lignes d'appuis simples (lignes bleue et verte) et soumis à des chargements pilotés en déplacement imposé sur les deux lignes intérieures conformément au schéma du maillage de la figure 2.16. Après avoir calculé les forces de rupture, il a déterminé la résistance de traction par flexion grâce à la formule ci-dessous :

$$f_{xk} = \frac{3 \cdot F \cdot d}{b \cdot h^2}$$

Où :

F est la force maximale (N)

d : est la distance entre un appui et un vérin (mm).

b : est la longueur de chargement (mm)

h : est l'épaisseur du mur (mm).

Les courbes de résistance à la flexion /déplacement des deux cas de chargement sont illustrées dans la figure 2.17.

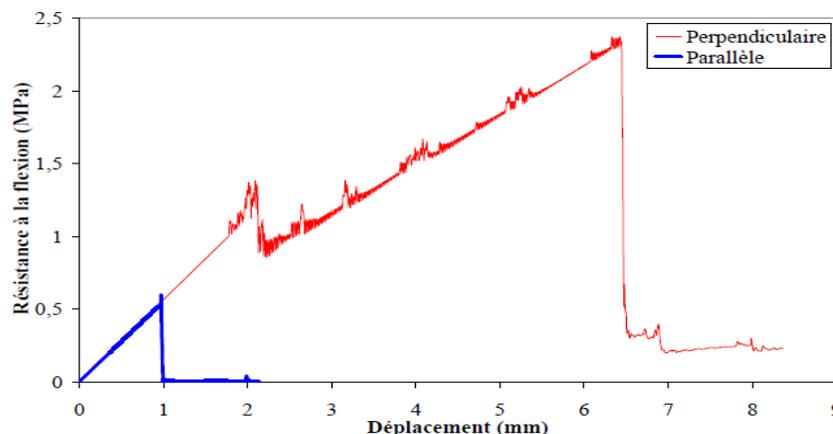


Figure. 2.17 : Résistance à la flexion (BUI, 2013).

BUI a obtenu les résistances caractéristiques à la flexion de la maçonnerie f_{xk1} , f_{xk2} soit 0,597 MPa et 2,372 MPa. Il a proposé aussi une synthèse des résistances à la flexion dans les deux directions en se basant sur les études de la littérature (BUI, 2013).

Les résultats regroupés sur la figure 2.18, sont issus d'essais réalisés entre 1974 et 1999 (SIN, 1974) (GAZZOLA, 1985) (WEST, 1977) (SINHA et coll., 1978) (HAMID et coll., 1988) (CHEN, 1996) (PLUIJM, 1999).

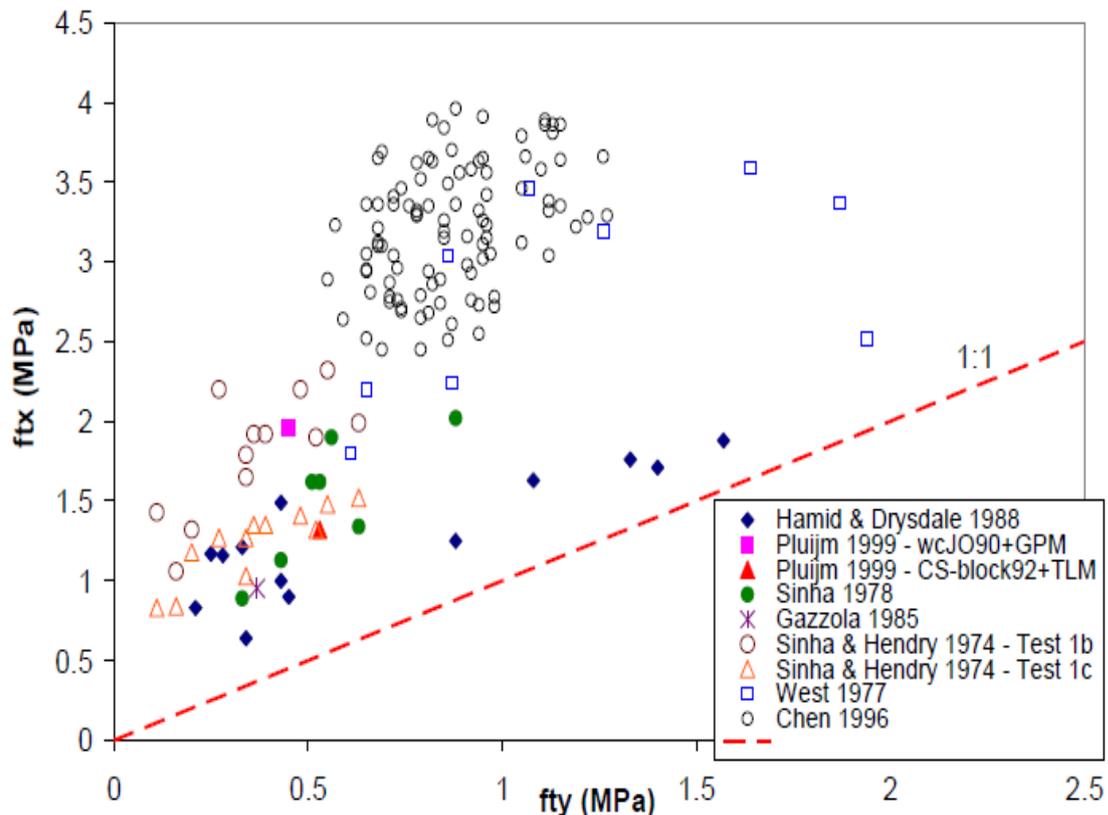


Figure. 2.18 : Résistance à la flexion uni-axiale selon les deux plans de rupture (BUI, 2013).

Les résultats qu'il a obtenus par la synthèse de quelques essais disponibles dans la littérature, nous permettent de constater une variabilité significative du ratio des résistances dans les deux directions caractéristiques. On peut cependant confirmer que f_{tx} (f_{xk2}) est supérieure à f_{ty} (f_{xk1}) car tous les points sont à gauche de la diagonale $y=x$ (voir Figure 2.18).

2.9.5 Les travaux de GAZZOLA et DRYSDALE:

Une série des 25 murets de 790mm×1600mm ont été testés expérimentalement par Gazzola et Drysdale (GAZZOLA et coll., 1985) (GAZZOLA et coll., 1986). Ces murets sont constitués de blocs creux en béton sont soumis à flexion quatre points (Figure. 2.19a). Les blocs constitutifs sont de dimensions 390×190×150 mm³ et joint d'épaisseur de 10 mm.

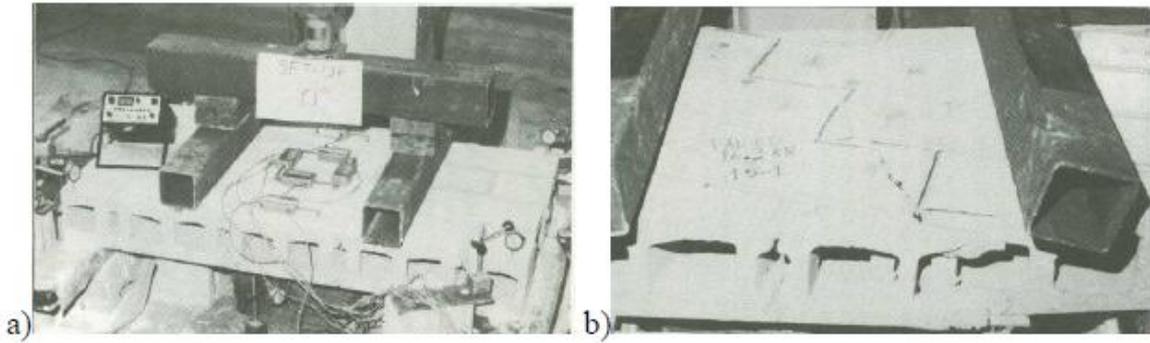


Figure 2.19 : a) Test de Gazzola et coll. (GAZZOLA, 1985) ; b) mode de rupture (GAZZOLA, 1985)

Les valeurs obtenues des résistances en flexion sont comparées avec les résultats expérimentaux et les résultats issus des modèles de calcul de Lourenço (LOURENÇO, 1997b) et de Milani G. et coll., (MILANI et coll., 2006) (Figure 2.20).

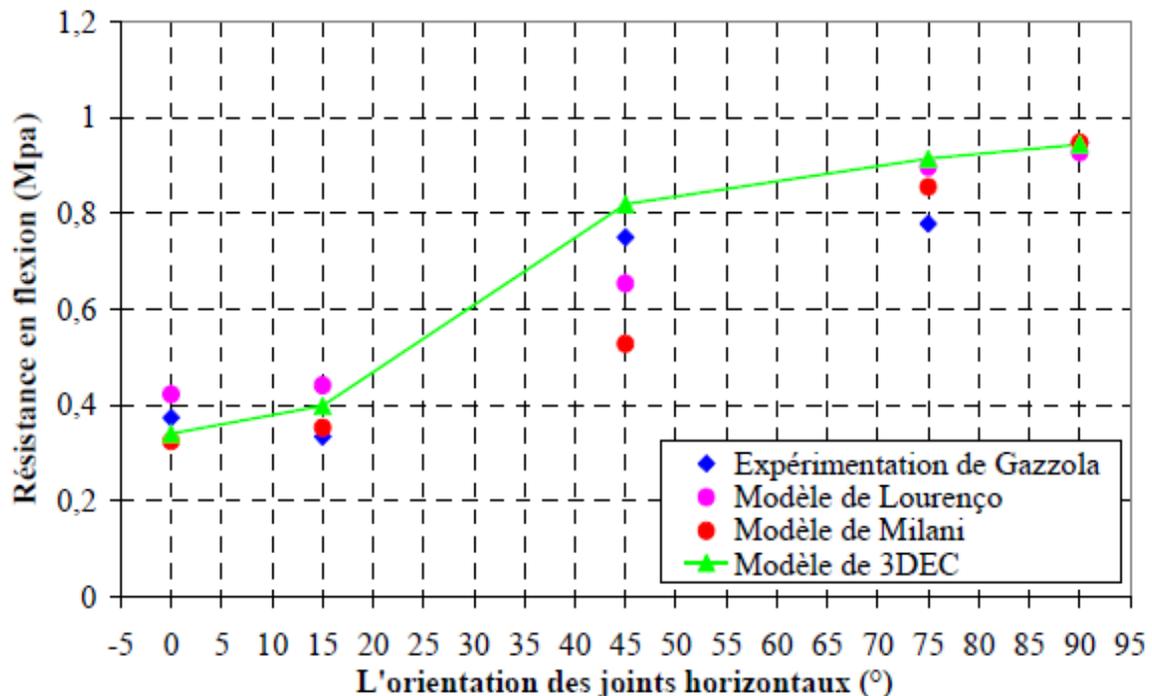


Figure. 2.20 : Résistances en flexion en fonction de l'angle des joints (GAZZOLA et coll., 1985)

La résistance en flexion est plus grande dans le cas où $\theta=90^\circ$. Les valeurs différentes (selon les directions des joints) des résistances de la maçonnerie sous flexion, décrites par la figure 2.20, montrent que le comportement de la maçonnerie sous charge latérale est complexe même dans le cas d'une même condition aux limites. En conséquence, la prise en compte du caractère orthotrope est nécessaire dans toute approche homogénéisée du calcul de structure en maçonnerie soumise à des chargements latéraux. Les modes de rupture obtenus numériquement (Figure. 2.21) sont bien représentatifs de ceux mis en exergue expérimentalement dans l'étude de Gazzola et coll., (GAZZOLA et coll., 1986).

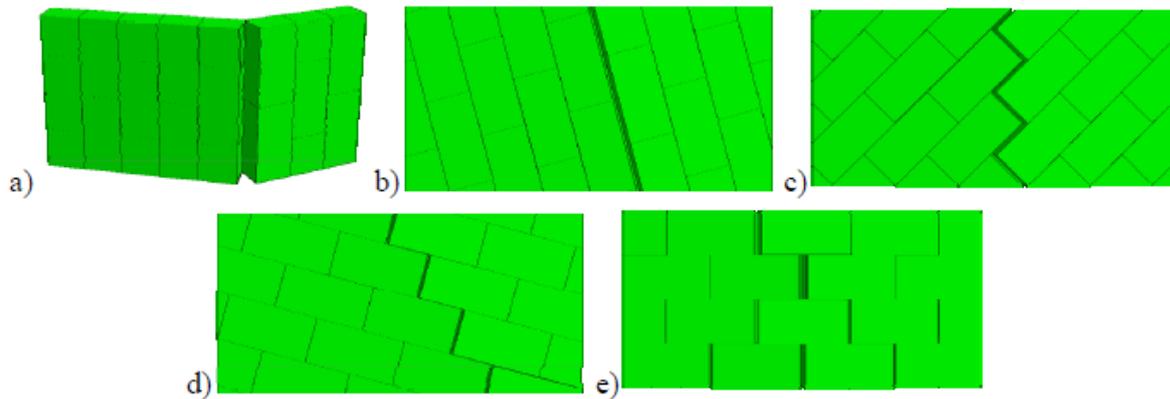


figure. 2.21 : Modes de rupture obtenues numeriquement pour θ de : a) 0° ; b) 15° ; c) 45° ; d) 75° ; e) 90° (GAZZOLA et coll., 1986).

2.10 CONCLUSION :

Lors de l'élaboration de cette synthèse bibliographique, nous nous sommes rendu compte que la maçonnerie réagit comme le béton ordinaire ; elle possède une bonne résistance en compression, modérée jusqu'à mauvaise en cisaillement mais faible en traction. Étant donné l'hétérogénéité des matériaux, il n'est pas possible de déterminer les caractéristiques de la maçonnerie à partir de l'étude isolée des matériaux qui la composent. C'est pourquoi les règlements proposent la réalisation d'essais, sur de petits prismes ou des murs composés de quelques pièces.

Les résultats obtenus de notre recherche nous permettent de retenir les enseignements suivants :

- Influence de la nature du support,
- Influence de l'épaisseur du joint.
- Influence de la nature du joint de mortier.
- Influence de l'angle du joint par rapport au type de chargement

Les modes de ruptures montrent que la résistance de l'ensemble, dépend des résistances des constituants (support et joint) et des conditions aux limites. En effet, dans le cas d'un joint plus résistant que les briques, ces dernières sont traversées par les fissures qui 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. De plus, un bord soutenu, introduit des effets de cisaillement et donc l'apparition des fissures en diagonale. Des modèles sont actuellement en vogue utilisant des logiciels comme le 3DEC utilisant la méthode des éléments distincts et qui présente des résultats se rapprochant de ceux obtenus de manière expérimentale.

Pour notre programme expérimental, on prévoit la réalisation de murets-tests en vue de vérifier l'influence de l'épaisseur et la nature du joint sur le comportement de la maçonnerie sous sollicitation en flexion. On va s'intéresser aux mortiers à base de ciment et mortier bâtard avec variation de l'épaisseur du joint (5, 10 et 15 mm) en soumettant les corps d'épreuve aux deux directions : murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y) et murets où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X).

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DES MATERIAUX ET DES TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES

3.1 INTRODUCTION

Le dimensionnement des structures en maçonnerie nécessite une bonne compréhension du composite brique-mortier sous l'effet de différents types de charges.

La maçonnerie de remplissage peut être soumise à des contraintes négligeables dont l'ingénieur ne prend pas en compte, tel que celles produites par le fléchissement des poutres. Cependant ce dernier cause la flexion de la maçonnerie.

Notre étude concerne des panneaux de maçonnerie en brique de terre cuite creuse soumis à un effort de traction par flexion. Nous avons utilisé pour ce faire, différents types de mortier de jointement (mortier à base de ciment et l'autre bâtard). L'épaisseur du joint utilisé est variée de : 5, 10 et 15 mm.

3.2 MATÉRIAUX UTILISES

3.2.1 Provenance des matériaux

Le sable : le sable utilisé est un sable concassé provenant de la carrière de l'ENG¹ (Carrière de Sidi el Abdelli – Wilaya de Tlemcen),

Le ciment : ciment portland composé (CPJ-CEM II/A 42.5) provenant de la cimenterie de «BENI-SAF»,

La chaux Hydraulique : Cette chaux provient de l'usine de « HASSASNA » fabriquée dans la Wilaya de Saïda,

La brique utilisée est une brique creuse de 10x20x30 cm³, provenant de la briqueterie de Bendimerad (Remchi - Wilaya de Tlemcen).

3.2.2 Caractéristiques des matériaux

3.2.2.1 Les briques

Briques en terre cuite creuses : 10 x 20 x 30 cm³

• Caractéristiques physiques :

La masse volumique (tableau 3.1) des éléments est déterminée par la méthode géométrique.

Les mesures sont effectuées sur neuf briques. La masse volumique d'une brique ρ (kg/m³) est calculée par l'expression 1.

$$\rho = \frac{M}{V} \dots \dots \dots (1)$$

Où :

ρ : masse volumique apparente (kg/m³).

M : masse des briques (kg).

V : volume net des briques.

¹ ENG : Entreprise Nationale des Granulats

Tableau 3.1 Caractéristiques physiques des briques creuses en terre cuite utilisées.

N°	Masse (kg)	Volume net (dm ³)	ρ (kg/m ³)
1	3.3281	2.414	1378.66
2	3.3311	2.482	1342.10
3	3.275	2.424	1351.07
4	3.2705	2.017	1621.47
5	3.2938	2.415	1363.89
6	3.2700	2.380	1373.00
7	3.3536	2.116	1584.70
8	3.1900	2.370	1345.99
9	3.2379	2.443	1325.23
Moyenne			1409.57

• **Essai d'absorption d'eau par capillarité suivant le D.T.R. C2-45 :**

L'essai a pour objectif la détermination d'un critère permettant d'apprécier le pouvoir de succion d'un matériau au contact de l'eau. L'essai est exécuté dans un local à la température de 20° C sur un échantillon composé de 5 échantillons au minimum. Ces derniers sont séchés à l'étuve et portés à la température de 105° C ± 5° C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La masse m₁ de chaque échantillon séché est déterminée avec une précision égale à 0,020% près.

Le produit est ensuite immergé pendant 10 minutes suivant sa face de pose dans un récipient placé dans un plan horizontal et rempli d'eau de telle manière que la face à immerger du produit se trouve à 5 mm au-dessus du niveau d'eau (voir figure 3.1).

L'échantillon est ensuite pesé à 0.02% près, soit m₂ (IDIR et coll., 2005). Le coefficient d'absorption est calculé par l'expression 2.

$$\text{Cap} = \frac{(m_2 - m_1) * 100}{S \sqrt{t}} \dots \dots \dots (2)$$

S : surface horizontale mouillée en cm² incluant ou non les vides,

t : temps d'immersion en minutes

m_2 : la masse de la brique humide en g,
 m_1 : la masse de la brique sèche en g (voir tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Résultats de l’essai d’absorption des briques testées

Brique N°	t (min)	S (cm ²)	m_1 (g)	m_2 (g)	Ca (%)
1	10	265,08	3328,1	3382,6	6,501
2	10	266	3331,1	3380	5,813
3	10	264,14	3275	3327,8	6,321
4	10	260,38	3270,5	3315,7	5,489
5	10	261,33	3293,8	3347,4	6,486
Moyenne :					6,122



Figure 3.1 : Essai de l’absorption des briques (Photos prises par les auteurs)

• **Caractéristiques mécaniques**

Résistance à la compression des briques :

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur 7 briques (voir figure 3.2) jusqu’à la rupture. Ces échantillons ont été surfacés dans le sens du chargement. La résistance en MPa est calculée selon l’expression 3.

$$R_c = \frac{F_b}{S_n} \dots \dots \dots (3)$$

Où :

R_c : Résistance à la compression (MPa).

F_b : Charge maximale de rupture en (kN).

S_n : Section nette moyenne de la brique (cm²).

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Résistances à la compression des briques testée

Brique N°	Surface (cm ²)	Force de rupture (kN)	R _c (MPa)
1	254.7	28	1.099
2	256.5	37	1.442
3	260.36	37.9	1.456
4	257.53	23.7	0.924
5	259.47	30.4	1.172
6	251.87	43.7	1.735
7	259.47	32.1	1.237
R_c Moy			1.24



Figure 3.2: Presse universelle (photos prises par les auteurs).

3.2.2.2. Mortiers

Dans ce travail, qui s'inscrit dans la continuité des travaux initiaux au laboratoire d'université.

Nous avons utilisé 3 types de mortier : 2 mortiers à base de ciment (1 : 4) et (1 : 6) et mortier bâtard (1 : 2 : 9).

i. Caractéristiques du sable utilisé

Le sable utilisé est un sable concassé, caractérisé par une masse volumique apparente égale à $\rho_s = 1368 \text{ kg/m}^3$ et un Equivalent sable : ES = 51%.

La figure 3.3, présente la granulométrie du sable utilisé. Selon la classification du LPC, ce sable est propre mal gradué.

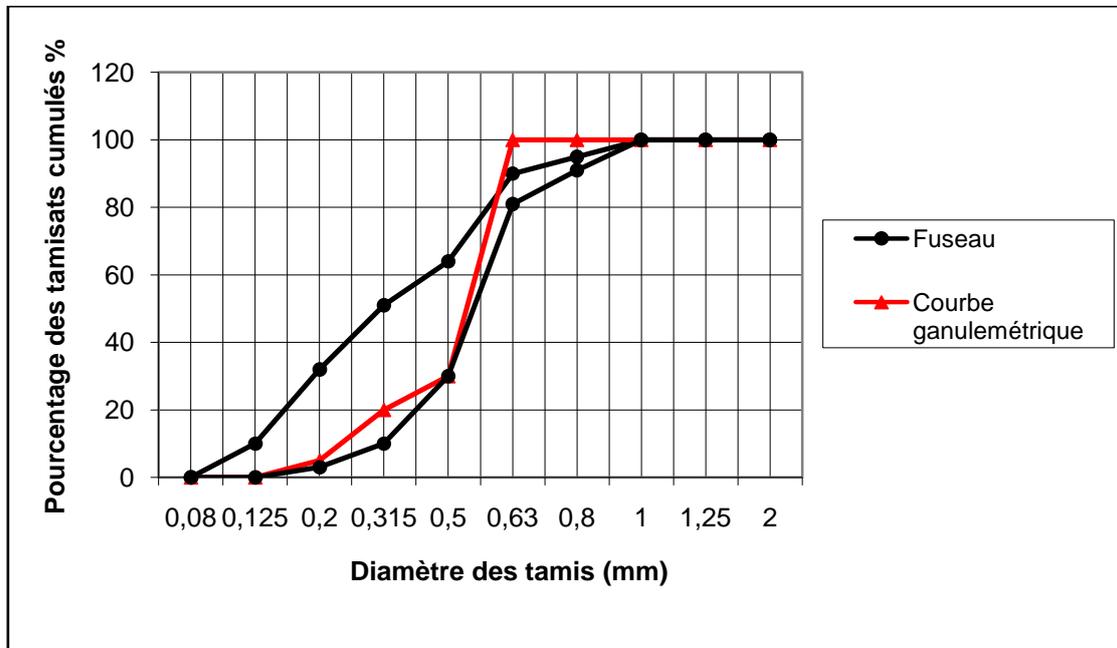


Figure 3.3 Courbe granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli

ii. Composition des mortiers utilisés

Le tableau 3.4, présente les différents dosages en liants, mélangés dans 1 m^3 de sable sec. La quantité d'eau de gâchage est obtenue par l'essai de consistance normale.

Tableau 3.4 Composition des mortiers utilisés

Nature du mortier	Ciment (kg)	Chaux hydraulique (kg)	Eau/Liant
Mortier en ciment (1 : 4)	350	-	0.95
Mortier en ciment (1 : 6)	250	-	1.23
Mortier bâtard (1 : 2 : 9)	120	100	0.111

➤ Essais sur les mortiers (EN 196-1)

Des essais ont été réalisés sur les mortiers pour définir les résistances à la compression et à la traction (norme EN 196-1). 24 éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été confectionnés et soumises à la L'essai de traction par flexion de trois points et à la compression. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.5 et sont le résultat de la moyenne de 24 échantillons.

Tableau 3.5 : Résultats des essais mécaniques sur les mortiers

Nature du mortier	Résistance à la traction par flexion(MPa)	Résistance à la compression(MPa)
Mortier en ciment (1 : 4)	4.2	12.15
Mortier en ciment (1 : 6)	3.9	7.32
Mortier bâtard (1 : 2 :9)	1.796	3.906

➤ **Équipement nécessaires pour l'essai :**

Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (figure 3.4). Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les déplaçant horizontalement de 15 mm± 0,3mm à la fréquence d'un choc par seconde, pendant 60 secondes.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 kN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s ± 10N/s et une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN.



a. Moule prismatique



b. Eprouvette

Figure 3.4 Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier.

➤ **Conduite de l'essai :**

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Le mortier préparé comme indiqué, on remplit les 3 compartiments du moule. Le serrage du mortier dans le moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches successives dans chaque compartiment et en appliquant 60 chocs. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle à la température ambiante ou dans une armoire humide.

Entre 20 et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ jusqu'au moment de l'essai. Le jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV197-1 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 des temps indiquées dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Ages normalisés pour les essais mécaniques sur mortier (BUI, 2013).

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

1. Résistance à la flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (3.5)

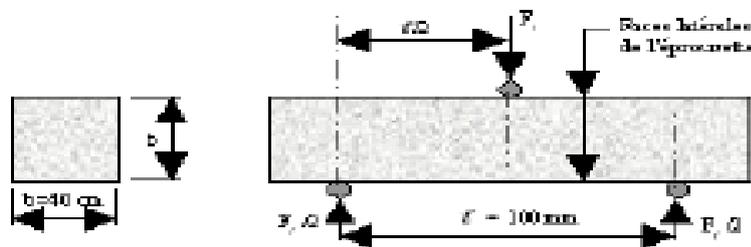


Figure 3.5 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (BUI, 2013).

Si Y est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f \cdot l/4$ et la résistance à la traction par flexion correspondante est écrite par l'expression 4.

$$R_f = \frac{F_f}{b^3} \dots \dots \dots (4)$$

Compte tenu des dimensions normalisées de b et l , Si F_f est exprimée en (N), cette résistance sera exprimée en (MPa) par l'expression (5).

$$R_f = 0.234 N_f \dots \dots \dots (5)$$

2. Résistance à la compression :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 3.6. Si F_c est la charge de rupture, la résistance à la compression est décrite par l'expression 6.

$$R_f = \frac{F_c}{B^2} \dots \dots \dots (6)$$

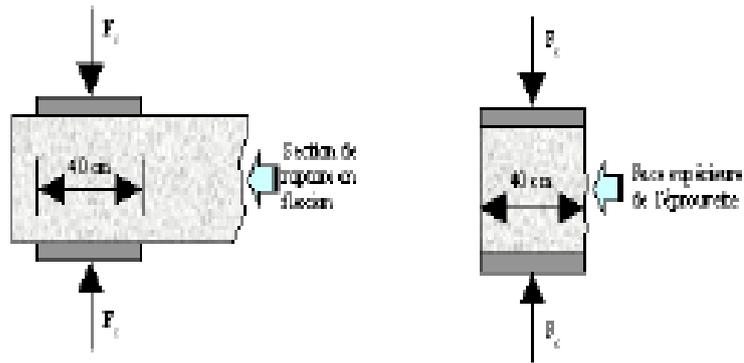


Figure 3.6 Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. (BUI, 2013)

Si F_c est exprimée en Newton, cette résistance exprimée en MPa, s'écrit :

$$R_C = \frac{F_c}{1600} \dots \dots \dots (7)$$

3.3 PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS

3.3.1 Introduction

Notre étude concerne les panneaux de maçonnerie en briques en terre cuite creuse testés sous chargement de flexion avec différentes épaisseurs des joints du mortier par rapport à : 0.5, 1.0 et 1.5 cm et différents types de mortier : mortier à base de ciment et mortier bâtard.

a) Pour les essais de flexion :

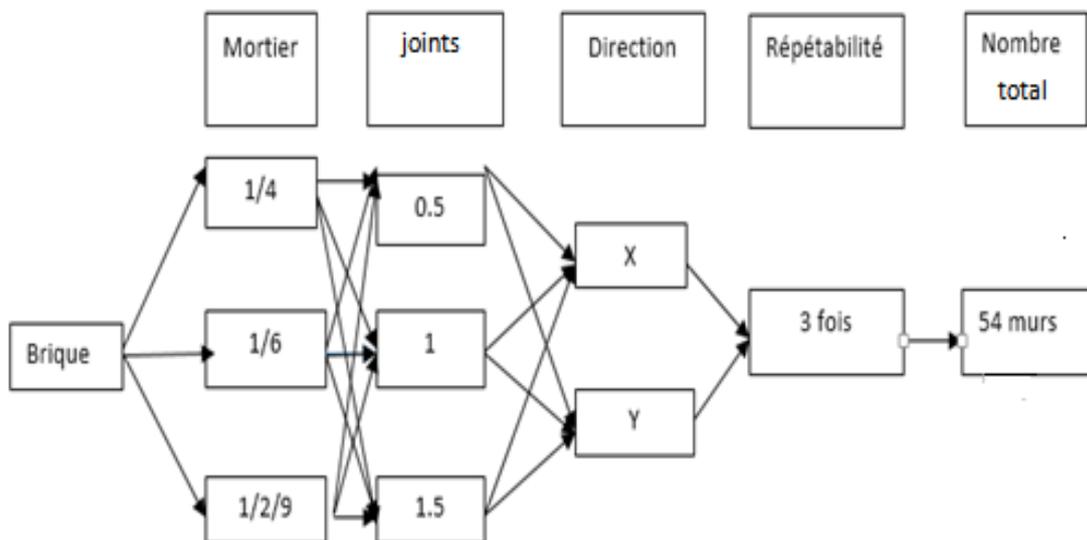


Figure 3.7 : Programme d'essai pour la flexion

b) Pour les essais de compression :

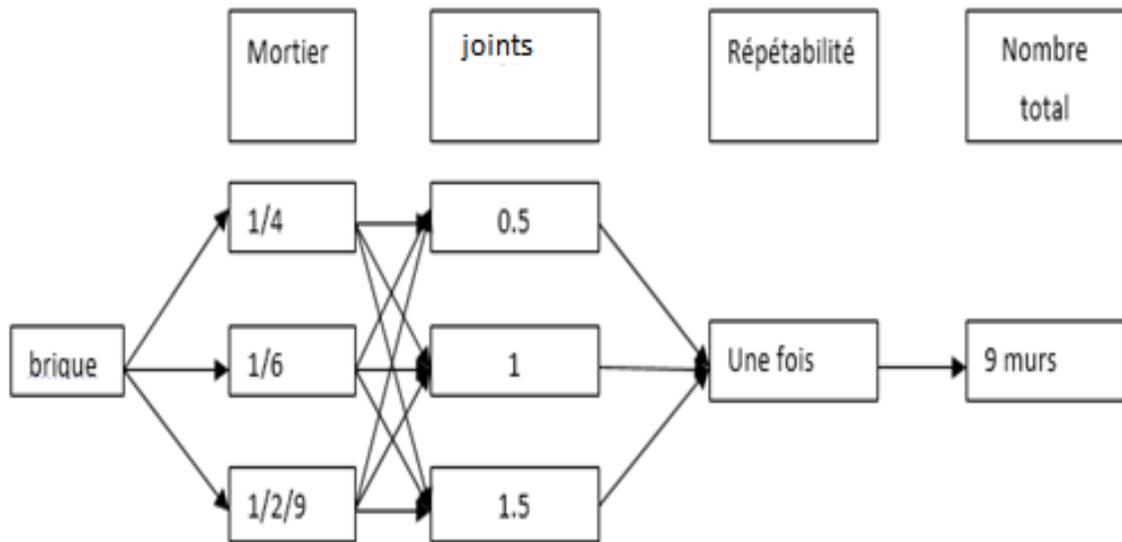


Figure 3.8 : Programme d'essai pour la compression

3.3.2 Nature des murets tests

a) Pour la flexion :

Murets test en brique de terre cuite creuse : $10 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$

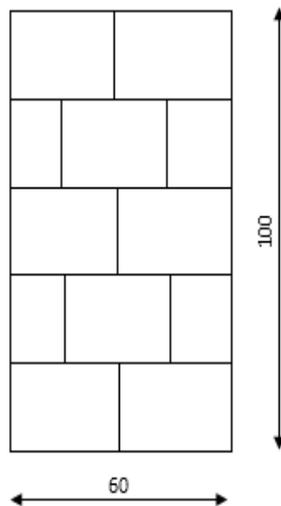


Figure 3.9 Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $10 \times 60 \times 100 \text{ cm}^3$ (F_X)

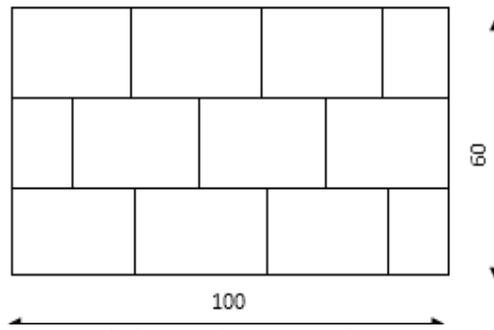


Figure 3.10 Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: 10 x 60 x 100 cm³ (F_Y)

b) Pour la compression :

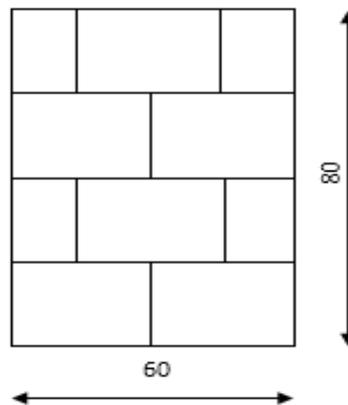


Figure 3.11 Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: 10 x 60 x 80 cm³

3.4 CONFECTION DES MURETS

Nous avons réalisé 63 murets pour les besoins de cette étude, confectionnés au laboratoire de résistance des matériaux de la faculté de Technologie de l'université de Tlemcen, Algérie.

3.4.1 Matériel utilisé

Le matériel utilisé pour la confection des murs est le suivant (Figures 3.12, 3.13 et 3.14) : truelles, auge, fil à plomb, mètre, niveau à, scie à béton, maillet et transpalette.



Figure 3.12 : Outils utilisés pour l'auto-construction par les étudiants (photo prise par les auteurs)



Figure 3.13 Scie à Béton (photo prise par les auteurs)



Figure 3.14 : Transpalette (photo prise par les auteurs)

3.4.2 Méthodologie de la confection des murets

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

1. Mouiller préalablement les briques pour éviter que le mortier ne grille pendant la réalisation de la maçonnerie,
2. Placer le fil avant la disposition des briques en maçonnerie (figure 3.15),
3. Etaler le mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide de différents gabarits fixant ainsi les dimensions du joint (figures 3.16 et 3.17),
4. Vérifier la planéité du mur avec la règle en bois et le fil à plomb, (figures 3.18 et 3.19),
5. Les murets sont ensuite transportés et stockés après 7 jours pour toute la durée de la cure (figure 3.20),
6. L'écrasement est effectué, après 28 jours de cure, aux conditions du laboratoire, Les mêmes opérations sont répétées, pour les tous les murs.



Figure 3.15 : Dispositif pour la confection (photo prise par les auteurs)



Figure 3.16 : Respecter l'épaisseur des joints des murets (photo prise par les auteurs)



Figure 3.17 Etalement du mortier (photos prise par les auteurs)



Figure 3.18 : Vérification de la planéité à l'aide du niveau à bulle (photos prise par les auteurs)



Figure 3.19 : Vérification de la planéité du mur avec la règle en bois (photos prise par les auteurs)

3.4.3 Cure et stockage des murs :





Figure 3.20 Cure et stockage des murs (photos prise par les auteurs)

3.5 DISPOSITIF D'ESSAI

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

- ✓ Un portique de 1.5 m x 1.7 m.
- ✓ Un portique de 0.8 m x 1.0 m.
- ✓ Un vérin de 160 kN de capacité.
- ✓ Un système hydraulique.
- ✓ Un système d'acquisition des données.
- ✓ Barres de transmissions des charges.
- ✓ Capteur de déplacement.
- ✓ Un ordinateur Pentium II.
- ✓ Un logiciel pour le traitement des données

3.5.1 Principe de l'essai

Les efforts sont transmis aux corps d'épreuve à l'aide de barres de transmissions rigides (**Figure 3.21**). Des plaquettes d'appui, assurent une meilleure distribution des efforts sans aucune excentricité. La mesure de la pression, faite à l'aide d'un capteur de pression, permet de déterminer la charge appliquée par le vérin. La mesure des déplacements est effectuée à l'aide d'un capteur de déplacement qui est installé au-dessus du muret.

L'ensemble des données, forces et déplacements, sont enregistrés automatiquement par un système d'acquisition des données. Ces derniers nous ont permis de tracer les courbes contraintes-déformations que nous présentons en annexe.

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



Figure 3.21 : L'ensemble du dispositif d'essai (photos prise par les auteurs)

3.5.2 Essai de flexion :

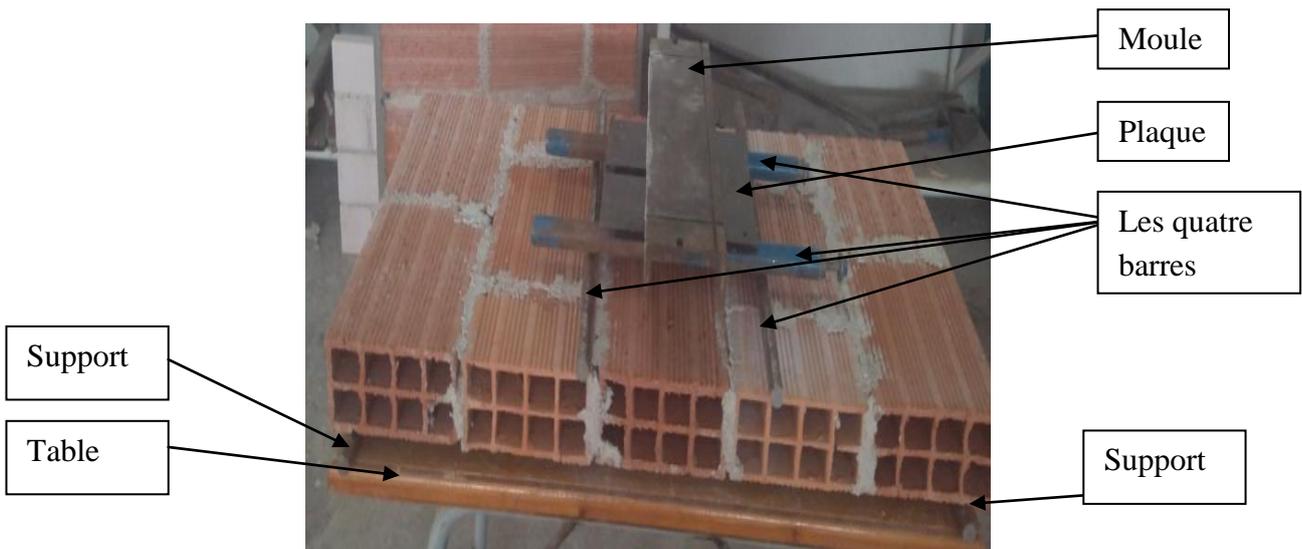
Le but de l'essai est de déterminer la contrainte de flexion dans les deux directions suivant X et suivant Y et comparer les résultats obtenus (figure 3.22).



Figure 3.22 : Essai de flexion du muret-test (photos prise par les auteurs)

➤ Dispositif d'essai et principe de l'essai

On a utilisé pour cet essai de flexion à 4 points, un moule en U de (10x5x40 cm), une plaque carré (20x1x 20 cm) et quatre barres lisses avec (deux barres de 20 mm et deux barres de 16 mm) pour une transmission uniforme des charges au muret-test et deux autres comme supports (de 16 mm) sous le mur que supporte une table dont la structure a été renforcée par des renforts en acier (voir figure 3.23). Cette dispositif est lourd de pois 19,5 Kg ce dernier doit apporter une contrainte avant même que le vérin ne commence à pousser (prenez en considération dans les calculs). Les supports sous le mur restent dans la même position et le passage d'une direction à l'autre fait passer l'angle du joint de 0 à 90 °. Selon la littérature, celle à 90° (muret F_Y) résiste mieux que le 0° (muret F_X)



3.5.3 ESSAI DE COMPRESSION

Afin d'élargir l'étude et procéder par une comparaison entre la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression, on a confectionné neuf murs de 80 x 60 cm² (figure 3.24).



Figure 3.24 : Muret sous charge de compression (photos prise par les auteurs)

3.6 CONCLUSION :

A travers ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour la réalisation de notre programme expérimental au laboratoire sur des corps d'épreuves en brique creuse de terre cuite qui ont été fabriquées avec tous les soins exigés par les règles de l'art.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus selon le programme préconisé, ensuite nous allons interpréter et comparer nos résultats avec les résultats de la littérature.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des différents essais réalisés sur les murets en brique de terre cuite creuse sous sollicitations de flexion et de compression. Nous montrons l'influence de chaque paramètre sur le comportement de la maçonnerie en flexion. Aussi, une comparaison entre les Contraintes de flexion et les Contraintes de compression, et nous décrirons les différents modes de rupture observées pour la flexion.

4.1 CALCUL DES CONTRAINTES

La contrainte de flexion est calculée par l'utilisation de la formule 4.1 (voir l'Annexe 1) :

$$f_{xk} = \frac{f_r \cdot L}{b \cdot e^2} \dots \dots \dots (4.1)$$

Où :

f_{xk} : Contraintes de flexion (MPa).

f_r : Force de flexion à la rupture.

L : Longueur du mur.

b : largeur du mur.

e : épaisseur du mur.

Pour le calcul de la résistance à la compression, on a utilisé la formule de EC6 (4.2).

$$R_c = \frac{f_c}{b \cdot e} \dots \dots \dots (4.2)$$

Où :

R_c : Résistance à la compression (MPa)

f_c : force exercée par le vérin (N)

b : largeur du mur.

4.2 RESISTANCE DES MURETS TESTES

4.2.1 Résistance des murets sous sollicitations de flexion

Nous présentons dans le tableau 4.1, les résultats respectifs des résistances à la flexion (f_{xk}) obtenues par la moyenne des trois murets en brique de terre cuite creuse, pour chaque types des murets : murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y) et murets où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X).

Les forces de ruptures et les dimensions des murets testés sont présentés en Annexe 2.

Tableau 4.1 : Contraintes de flexion des murets (f_{xk}).

Type de mur	Nature du mortier	Epaisseur =5(mm)		Epaisseur =10(mm)		Epaisseur =15(mm)	
		f_{xk} (MPa)	D (mm)	f_{xk} (MPa)	D (mm)	f_{xk} (MPa)	D (mm)
F_X	M1	0,06	1,46	0,26	2,18	0,21	3,13
	M2	0,11	0,09	0,24	3,04	0,23	3,19
	M3	0,05	0,77	0,11	1,06	0,10	1,5
F_Y	M1	0,51	6,47	0,60	8,42	0,58	9,78
	M2	0,48	6,74	0,58	7,48	0,57	8,84
	M3	0,29	3,08	0,57	9,39	0,37	5,38
F_Y/F_X	M1	8,5	-	2,31	-	2,76	-
	M2	4,36	-	2,42	-	2,48	-
	M3	5,8	-	5,18	-	3,7	-

Au vu de ces résultats, nous traçons respectivement sur la figure 4.1, la variation de la résistance à la flexion des murets testés selon :

- L'épaisseur du joint.
- Type de muret, murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y) et murets où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X).
- La nature du mortier.

4.2.2 Resistance des murets sous sollicitations de compression

Nous présentons dans le tableau 4.2 les résultats respectifs des contraintes de compression. Les forces de ruptures et les dimensions des murets testés sont présentes en Annexe 3.

Tableau 4.2 : Contraintes de compression des murets

Type de mur	Nature du mortier	Epaisseur =5(mm)		Epaisseur =10(mm)		Epaisseur =15(mm)	
		R_c (MPa)	D (mm)	R_c (MPa)	D (mm)	R_c (MPa)	D (mm)
C	M1	0,866	5,157	1,319	7,452	1,415	7,663
	M2	1,507	9,816	1,410	8,099	1,466	7,359
	M3	0,972	6,656	1,618	8,426	1,270	8,296
C/ F_X	M1	14,43	-	5,07	-	6,74	-
	M2	13,7	-	5,87	-	6,37	-
	M3	19,44	-	14,70	-	12,7	-

C/ F _Y	M1	1,69	-	2,19	-	2,44	-
	M2	3,14	-	2,43	-	2,57	-
	M3	3,35	-	2,84	-	3,43	-

Le but de l'essai de compression est de comparer les valeurs des résultats avec ceux obtenus en flexion. Pour chaque type de mortier on a construit un seul muret pour les trois épaisseurs (voire chapitre 3), en plus les briques utilisées sont de qualités médiocres et différentes, c'est pour cela qu'on a observé une telle variation des résultats :

- Le mortier M1 : valeur optimale pour une épaisseur de 1,5 cm.
- Le mortier M2 : valeur optimale pour une épaisseur de 0,5 cm.
- Le mortier M3 : valeur optimale pour une épaisseur de 1 cm.

Les différentes études expérimentales, nous citons à titre d'exemple ceux de Houti (HOUTI, 2002) et Bakhteri et coll. (BAKHTERI et coll., 2004), et de Hendry (HENDRY, 1978), ont montré que le joint de mortier de 10 mm présente la résistance maximale de la maçonnerie à la compression. Cette partie de l'étude gagnerait à être soutenue par un programme plus riche.

4.3 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION DES MURETS PAR L'INFLUENCE DE LA NATURE, L'ÉPAISSEUR DU JOINT DE MORTIER ET LE TYPE DE MURET :

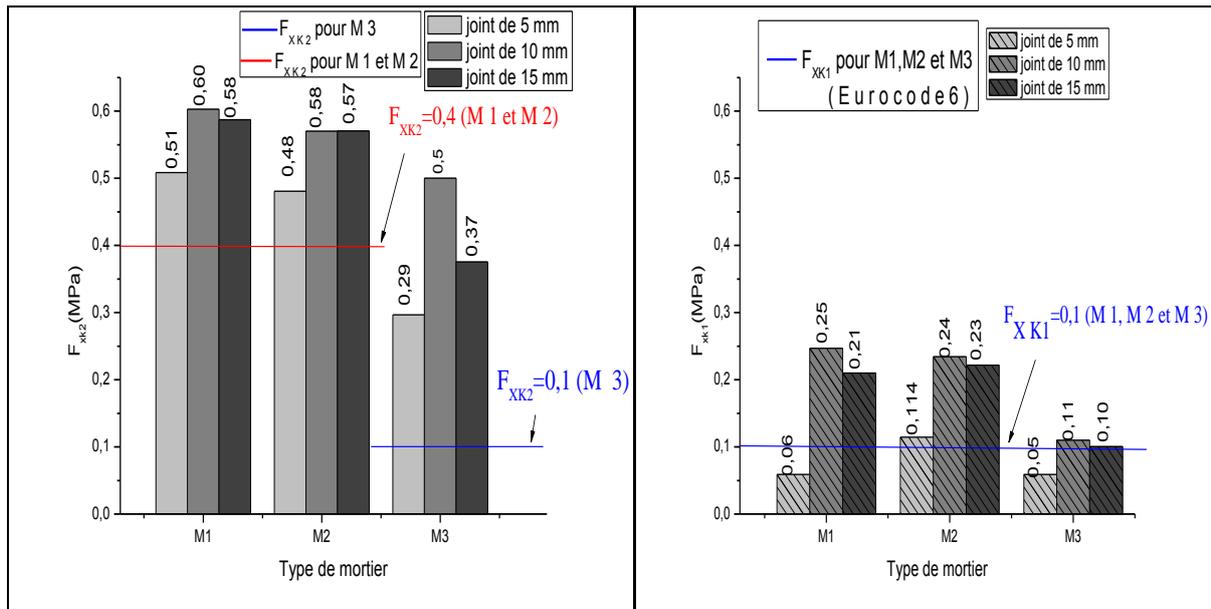
La figure 4.1 montre la variation de la résistance à la flexion des murets.

- L'épaisseur du joint de mortier de 10 mm offre la valeur optimale de la résistance à la flexion des murets pour les trois mortiers et pour les deux types des murets. Par contre, l'épaisseur du joint de mortier de 5 mm présente la résistance minimale pour tous les mortiers utilisés, car elle dépend de l'adhérence brique -mortier.

On remarque que la valeur optimale obtenue est la même que celle de la compression.

Les travaux de Hendry (Hendry, 1978), de Houti (Houti, 2002) et de Bakhteri et al (Bakhteri et al, 2004) ont montré que l'épaisseur du joint de mortier de 10 mm offre la valeur optimale pour la compression. En plus Bui (Bui, 2013) a utilisé un joint de mortier d'épaisseur 10mm, cela nous permet de déduire que l'épaisseur du joint de mortier de 10 mm offre la valeur optimale.

- La résistance à la flexion est plus faible dans le cas du mortier bâtard. que celle du mortier en ciment, elle dépend du type de mortier, notamment sur la résistance à la traction et à l'adhérence brique -mortier. Ceci a été confirmé par les travaux de Graca [Graça, 2014].
- Les résultats trouvés nous permettent de constater une variabilité significative des résistances dans les deux directions caractéristiques. La résistance à la flexion pour les murets f_Y (flexion verticale) est plus élevée que les murets f_X (flexion horizontale), et à partir de la figure 4.2 on peut confirmer que f_Y est supérieur à f_X car tous les points sont à gauche de la diagonale $y=x$, ce ratio varie de 2.3 à 8.5, ceci a été confirmé par les travaux de Bui [BUI, 1985] et les travaux réalisés entre 1974 et 1999 par Gazzola (GAZZOLA, 1975), West (WEST, 1977), Sinha (SINHA, 1978), (Ham, 1988), Chée (CHEE, 1996) et (PLUIJM, 1999).



(a) : Variation de la résistance à la flexion des murets F_Y

(b) : Variation de la résistance à la flexion des murets F_X

Figure 4.1 : Variation de la résistance à la flexion (f_{Xk}) des murets

Au vu de ces résultats de la résistance à la flexion des murets (figure 4.1) on observe que :

- Pour les murets F_X (voir figure 4.1a) :
 - Mortier 1 (M1) : les valeurs trouvées sont supérieures à celles de l’Eurocode 6 pour un joint de 10 et 15 mm. Par contre pour un joint de 5 mm elle est inférieure à 0,1 MPa
 - Mortier 2 (M2) : les valeurs trouvées sont supérieures à celles de l’Eurocode6 pour les trois joints.
 - Mortier 3 (M3) : les valeurs trouvées sont légèrement supérieures à celles de l’Eurocode6 pour un joint de 10 et 15 mm, Par contre pour un joint de 5 mm elle est inférieure à 0,1 MPa.

On remarque que les murets du joint de mortier de 5 mm sont très fragiles car leur résistance à la flexion est faible par rapport à la valeur du seuil des murs porteurs fournie par l’Eurocode6 (L’Eurocode6 donne le seuil minimum pour la résistance à la flexion).

- Pour les murets F_Y (voir figure 4.1b) :

Les valeurs trouvées pour les trois mortiers (M1, M2 et M3) sont supérieures à celles de l’Eurocode 6.

- $0,4 < f_{Xk2}$ (pour M1 et M2)
- $0,1 < f_{Xk2}$ (pour M3)

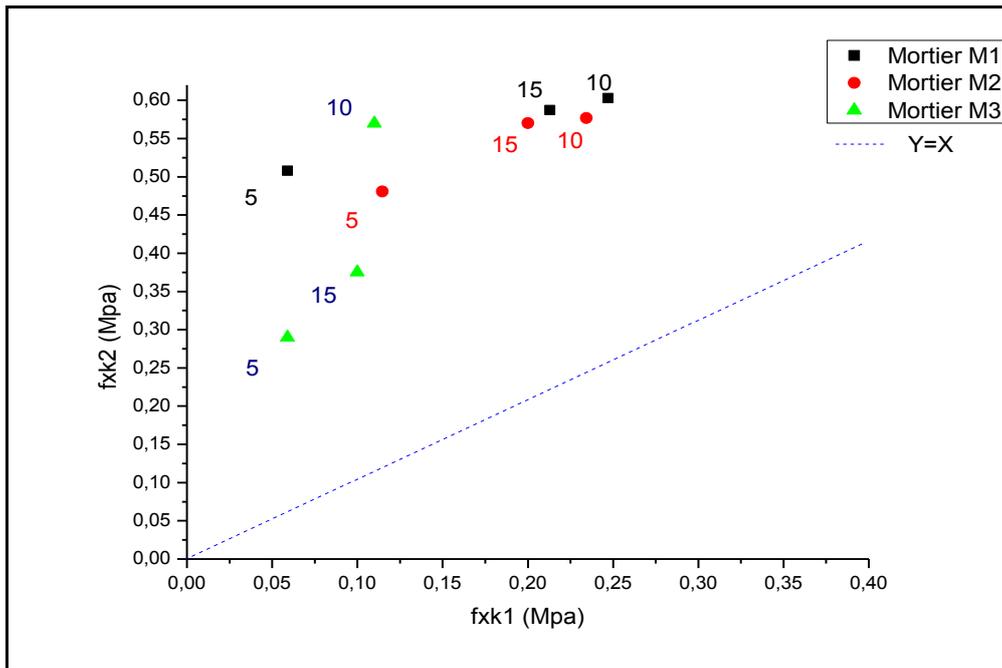


Figure 4.2 : Résistance à la flexion selon les deux plans de rupture.

On a tracé la figure 4.2 pour comparer les résultats obtenus des deux plans de rupture.

Au vu de celle-ci on peut confirmer que :

- La résistance à la flexion (f_{xk}) pour les murets F_Y est supérieure à F_X car tous les points sont à gauche de la diagonale $y=x$.
- Un joint de 10 mm offre la meilleure résistance pour les trois mortiers et pour les deux directions, suivi par le joint de 15 mm puis celui de 5mm. Cette succession est visible dans la figure.

4.4 MODE DE RUPTURE DES MURETS SOUS SOLLICITATION DE FLEXION

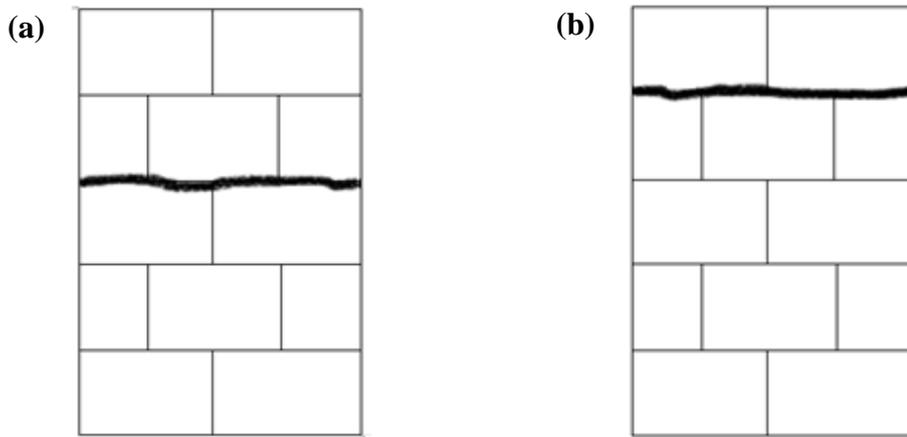
Lors des écrasements des murets, nous avons observé plusieurs modes de ruptures, qui sont presque identiques pour tous les mortiers (le mortier en ciment et le mortier bâtard). Par contre, les modes de ruptures changent pour les deux directions.

Après la comparaison de nos résultats de modes de ruptures avec ceux des travaux de Gazzola (GAZOLA, 1986), Graça (GRACA, 2014), et Morton (MORTON, 1986), nous observons que nous avons trouvé pratiquement les mêmes modes de rupture.

4.4.1 Mode de rupture des murets F_X (flexion horizontale) :

Pour la flexion horizontale (F_X), on n'observe qu'un seul mode de rupture, la ligne de fissure apparaît toujours dans les joints d'assises (Figure. 4.3), même dans le cas d'un mortier plus résistant que les briques utilisées.

Sur la plupart des essais effectués la ligne de fissuration s'est faite au milieu (figure 4.3a). Cependant nous avons noté quelques cas où celle-ci s'est faite vers le haut (figure 4.3b), car ces murets présentés des défauts (briques déformées).



Ligne de fissure apparaît dans les joints

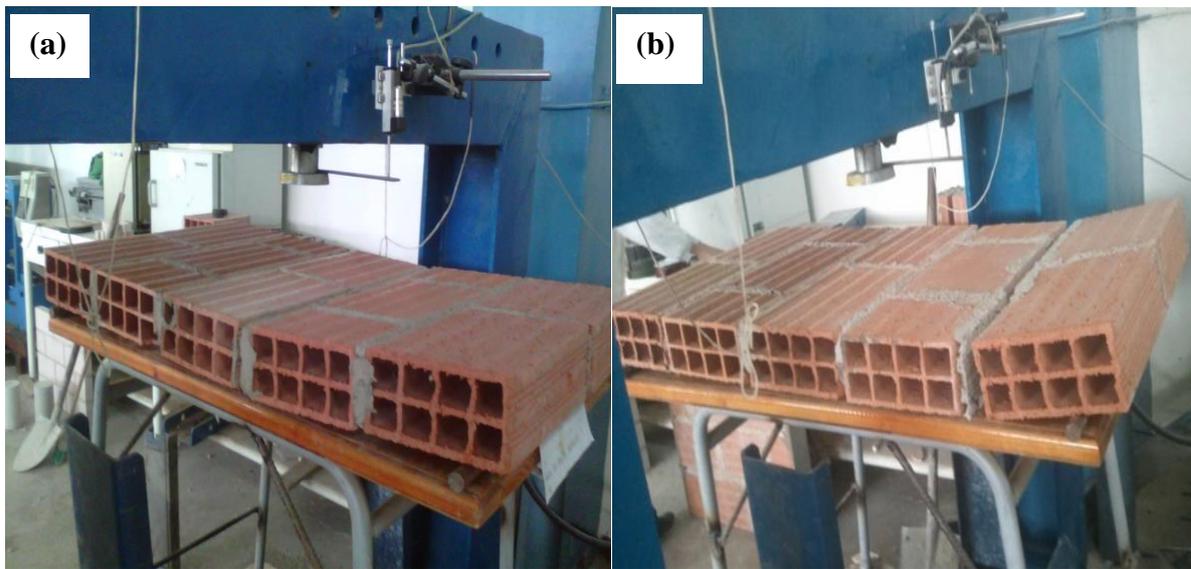


Figure. 4.3 : Mode de rupture des murets F_x

4.4.2 Mode de rupture pour les murets F_y (flexion verticale) :

Le comportement de la maçonnerie dans la direction de la flexion verticale (F_y) est très complexe. En effet, deux modes de rupture ont été observés, qui dépendent des résistances relatives des constituants de la maçonnerie. Le premier traduit une ligne de fissure en adéquation avec une vision homogénéisée du milieu (Figure. 4.4). Le second se traduit par une ligne de rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme dentée (Figure. 4.5). Ce second mode traduit clairement la discontinuité du matériau, l'échelle de la brique constitutive (car les briques utilisées sont de qualités médiocres et hétérogènes ; en témoigne les caractéristiques physiques et mécaniques dispersées (voir chapitre 3)) et celle du mortier.

Pour les murs dont la résistance d'adhérence du mortier est relativement forte par rapport à la résistance des briques constitutives, la ligne de rupture va avoir tendance à apparaître comme une fissure verticale au travers des briques et des joints verticaux (Figure. 4.4). La fissuration se fait de manière instantanée dans les deux matériaux, ce qui précise que le comportement est fragile.

La rupture de type zigzag alterne la propagation de fissure le long d'un joint vertical puis le long d'un joint d'assise (Figure. 4.5).

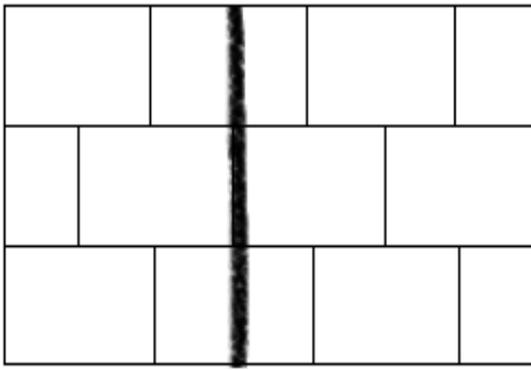
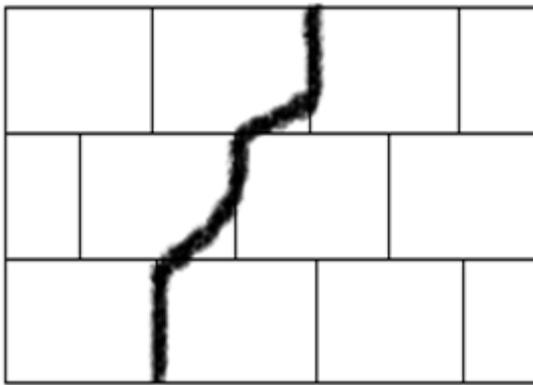
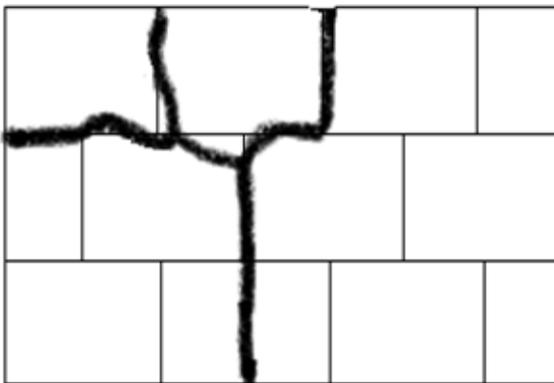


Figure. 4.4 : Rupture par division en milieu



(a) : Fissure en zigzag.



(b) : Ligne de fissure de forme denté.

Figure. 4.5 : Rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme denté.

4.5 CONCLUSION :

L'étude expérimentale sur les murets testés a permis de bien comprendre le comportement de la maçonnerie et particulièrement en flexion.

Nous avons constaté l'importance de l'influence de l'épaisseur et la nature du joint sur le comportement de la maçonnerie sous un chargement de flexion pour les deux directions (murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y) et murets où les charges sont

parallèles au lit de joint (F_X)), l'épaisseur optimale du joint pour la maçonnerie en brique de terre cuite creuse est de 10 mm suivie par celle de 15mm . Par contre, l'épaisseur du joint de mortier de 5 mm présente la résistance minimale car l'adhérence brique-mortier est faible. La résistance à la flexion est plus faible dans le cas du mortier bâtard utilisé.

Aussi, le type de murets influe considérablement sur la résistance à la flexion. Ce dernier résiste plus lorsque les charges sont verticales au lit de joint (flexion verticale) (F_Y).

L'ensemble des essais a permis de déduire que la flexion a un comportement très fragile par rapport à la compression. Ce comportement est plus sensible pour les murets où les charges sont parallèles au lit de joint (l'angle du joint de 0°) (F_X).

En concordance avec la littérature, nous avons observé les mêmes modes de rupture.

La résistance à la flexion est plus faible dans le cas du mortier bâtard. que celle du mortier en ciment

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail de recherche, nous nous sommes rendu compte que la maçonnerie a une faible résistance à la flexion, provoquant une rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits des joints ou une rupture parallèle aux lits des joints.

La comparaison des résultats avec celle de compression a confirmée le caractère fragile de la maçonnerie sous sollicitation de flexion.

Nous avons constaté que les murets présentent une résistance à la flexion supérieure à ceux proposées par l'EUROCODE 6 sauf pour quelques murets de type F_X dont le joint est de 5mm.

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

a) Influence de l'épaisseur du joint :

L'épaisseur du joint de 10 mm offre la meilleure résistance à la flexion pour les murets en brique de terre cuite creuse, suivi par le joint de 15 mm puis celui de 5mm. La résistance à la flexion de la maçonnerie est donc liée intimement à l'épaisseur du joint.

b) Influence de la nature du joint de mortier :

Nous avons constaté que le mortier à base de ciment (1/4) présente la meilleure résistance à la flexion. Par contre, la résistance à la flexion est plus faible dans le cas du mortier bâtard.

c) Influence de type de murets :

La résistance à la flexion pour les murets f_y (flexion verticale) est plus élevée que les murets f_x (flexion horizontale), ce ratio varie de 2.3 à 8.5.

Le comportement de la maçonnerie dans la direction de la flexion verticale (F_Y) est très complexe. En effet, deux modes de rupture ont été observés, qui dépendent des résistances relatives des constituants de la maçonnerie. En effet, dans le cas d'un joint plus résistant la ligne de fissure se traduit au milieu. Par contre, avec un joint moins résistant que le support la ligne de fissure apparaît le long du joint vertical puis le long du joint d'assise. Ce second mode traduit clairement la discontinuité du matériau, l'échelle de la brique constitutive (car les briques utilisées sont de qualités médiocres et hétérogènes).

Pour la flexion horizontale (F_X), on n'observe qu'un seul mode de rupture, la ligne de fissure apparaît toujours dans les joints d'assises, même dans le cas d'un mortier plus résistant que les briques utilisées.

Nous avons trouvé pratiquement les mêmes modes de rupture que ceux de la bibliographie.

Perspectives d'étude :

- Répéter le programme expérimental pour des supports de nature différente : briques silico-calcaire, agglomères de béton.
- Etudier l'incidence du renforcement de la maçonnerie à l'aide d'armatures, sous sollicitation à la flexion.
- Identifier des modèles de prédiction du comportement de la maçonnerie en faisant une simulation numérique sur la base de l'ensemble des résultats des programmes expérimentaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I. OUVRAGES ET PUBLICATIONS :

ASTM C 1314, Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, 2012.

ASTM E 519-02, Standard test for diagonal tension (shear) in masonry assemblage United States of America, 2002.

BALANDIER P., «Le séisme et les constructions béton armé et en maçonnerie», Materials and structures, vol.4, 1990.

BAUD G., «La construction du bâtiment : Maçonnerie et béton armé», Edition Dunod, 1990.

BENMESSAOUD S., CHEMROUK O., «La brique», Exposé, Soutenu en 2008, Ecole Polytechnique d'Architecture d'Urbanisme, Algérie, 62 p.

BS 5628: Th. Structural Use of Masonry _ Part 1: Unr. Lnfocad Masonry « conception de murs charges latéralement », J. Mortonn BSc, PhD, CEng MICE, MInstMThe, 1986.

BUI T.T., « Etude expérimentale et numérique du comportement des voiles en maçonnerie soumis à un chargement hors plan », Thèse de Doctorat, 2013, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France, 261 p.

CAETER C., STAFFORD SMITH B., “Structural behavior of masonry structural in filled Frames subjected to racking loads”, International conference on Masonry structural Systems, College of Engineering, University of Texas, Austin, USA, May, 1969, pp. 226-233.

CHEN L.N., “Expérimental and theoretical investigation of the behaviour of brickwork cladding panel subjected to lateral loading”, Thèse de doctorat, University of Edinburgh, College of Science & Engineering, School of Engineering & Electronics, Edinburgh, 1996.

CHERIF A., KARA A., « Comportement des structures en Maçonnerie sous sollicitation de cisaillement, » Mémoire de Master, 2013, Université AbouBekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 77 p.

CSA.S304. “Design of masonry structures”, CSA S304.1-04, 2004.

DESTRAC J.M., LEFAIVRE D., MALDENT, Y., VILA, S., "Memo Technique en Génie Civil", Editions Castilla, 2003.

DRYSDALE R., ESSAWY A., “Out-of-Plane Bending of Concrete Block Walls”, J. Struct. Eng., 114(1), 1988, 121–133.

DTR.C2-45 : « Règles de conception et de calcul des maçonneries », Document Technique Réglementaire, CNERIB, Alger, (1997) ,62 p.

DTU : « Parois et murs en maçonnerie de petits éléments », N°20.1, cahiers des clauses techniques, CSTB, Paris, France, septembre, (1985).

EN 1052–2., “Methods of test for masonry”, Part 2: determination of flexural strength, CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 1999.

EUROCODE6 : « Design of masonry structures », Part 1-1: Rules for reinforced and unreinforced masonry, (2009) ,51p.

FONSECA M., SILVA R.M., LOURENCO B.P., “The Behavior of Two Masonry Infilled Frames: A Numerical Study”, Federal University of Minas Gerais, School of Engineering, Departement of Structural Engineering, Portugal,2005, 126 p.

GAZZOLA E.A., DRYSDALE R.G., ESSAWY A.S., “Bending of concrete masonry Walls at different angles to the bed joint”, Proc. 3rd North. Amer. Mas. Conf., Arlington, TX, USA, Paper 27, 1985.

GAZZOLA E.A., DRYSDALE R.G., “A component failure criterions for blockwork in flexure”, Proc., Structures ASCE, S.C. Anand, éd., New Orléans, 1986, 134-153, 1986.

GERTIN, Y., Comportement sismique d’un mur en maçonnerie armée entièrement rempli de coulis, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées, 2014, Université Sherbrooke (Québec), Canada, 149 p.

GRAÇA V., «Masonry materials», Université of Minho, Guimarães, Portugal, (2014) ,17 p.

HABER R.A., SMITH P.A., «Overview of Traditional Ceramics», New Brunswick, New Jersey, Ceramic Casting Program, Rutgers, State University of New Jersey, USA, 1987.

HOUTI F.B., «Comportement des structures en Maçonnerie sous sollicitation uniaxiale», Mémoire de Magister, 2002, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 93 p.

IDIR M., HAKIMI L., «Règles de conception et de calcul des maçonneries », 2^{ème} édition, Algérie, 2005. ISBN : 9961-845-21-8.

KIRTSCHIG K., KASTEN D., « Partial surface load of masonry », Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, USA, 1979.

LEBRAZIDEK M., THIESSET J., ET COLL., «Précis de bâtiment», Edition Nathan, 2002.

LOURENÇO P.B., “An anisotropic macro-model for masonry plates and shells: Implementation and validation”. Rep. No. 03.21.1.3.07, Univ. of Delft, Holland and Univ. of Minho, Guimaraes, Portugal, 1997,210 p.

MARCEL H., NICOLAS J., ET COLL., «Dimensionner les ouvrages en maçonnerie», Guide d’application, Vol. 3, 12 p., 2009.

MEZIGHECHE N., «Comportement des remplissages dans les structures sous différentes sollicitations : cas de la maçonnerie», Mémoire de Magister, 2010, Université AbouBadji Mokhtar, Annaba, Algérie, 174 p.

MORTON J., « conception des murs charges latéralement », Structural Use of Masonry – Part 1: Unr. Lnforcad Masonry, BSc, PhD, CEng MICE, MInstM, 23 p 1986.

MILANI G., LOURENÇO P.B., TRALLI A., “Homogenization Approche for the Limit Analisis of Out-of-Plane Loaded Masonry Walls”. Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 10, October 1, 2006.

NF EN 1996-1-1 : mars 2006 – Eurocode 6 – Calcul des ouvrages en maçonnerie, Partie 1-1 : règles communes pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée.

PAGE A.W., HENDRY A.W., « Design rules for concentrated loads on masonry », Structural Engineer, 66 p, 1987.

PAGE A.W., ALI S., « Non linear finite element analyses of masonry », Proc. Inst. Civil Eng., Vol.83, 1987.

PLUIJM Vd., Material properties of masonry and its components under tension and shear. In: V.V. Neis S, Saskatchewan, editor. Proc 6th Canadian masonry symposium, p. 67586, Canada (1997).

PLUIJM Vd., Shear behavior of bed joints. In: Harris AAHaHG, editor. Proc 6thNorth American Masonry Conf. Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania, p. 12536, USA (1999).

POURRAT., «Ouvrage de maçonnerie», journal of structure, 2009.

SACHIN B.K., YOGENDRA S., BING Li., «Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened using ferro-cement overlay», 1 August 2014, 17 p., ISSN: 1527-014-03908.

SINHA B.P., HENDRY A.W., “Tensile Strength of Brickwork Specimens”. Proceedings of the British Ceramic Society, N° 24, September, 1975.

SINHA B.P., “A simplified ultimate load analysis of laterally loaded model orthotropic brickwork panels of low tensile strength”, The Struct. Engr., London, England, 56 (4), 81–84, 1978.

TOMAZEVIC M., «Design of earthquake resistant masonry structures », International short-course on Architectural and Structural design of masonry with a focus on retrofitting of masonry structures and earthquake resistant design, CEMA, 2003.

WEST H.W.H., HODKINSON H.R., HASELTINE B.A., “The Resistance of Brickwork to Lateral Loading, Part 1, Experimental Method and Results of Tests on Small Specimens and Full Sized Walls”, Struct. Engr., 55, p. 411-21, 1977.

WIELAND R., «Design of Masonry Structures According Eurocode 6», Technical University of Kaiserslautern, 136 p, 1996.

II. SITES WEB :

<http://www.bricoman.fr/default/brique-rouge-pleine-decorative.html>, (consulté le 20/05/2015).

http://www.ecopram.ma/prod4_briqueteries.html ,(consulté le 20/05/ 2015).

<http://www.paysdecernes.org/IMAGES/2007/La%20brique.pdf>, (consulté le 20/05/2015).

<http://www.wienerberger.fr/mise-en-oeuvre-terca.html>, (consulté le 20/05/2015).

ANNEXES

Annexe 1

Détermination de l'expression de la contrainte de traction par flexion

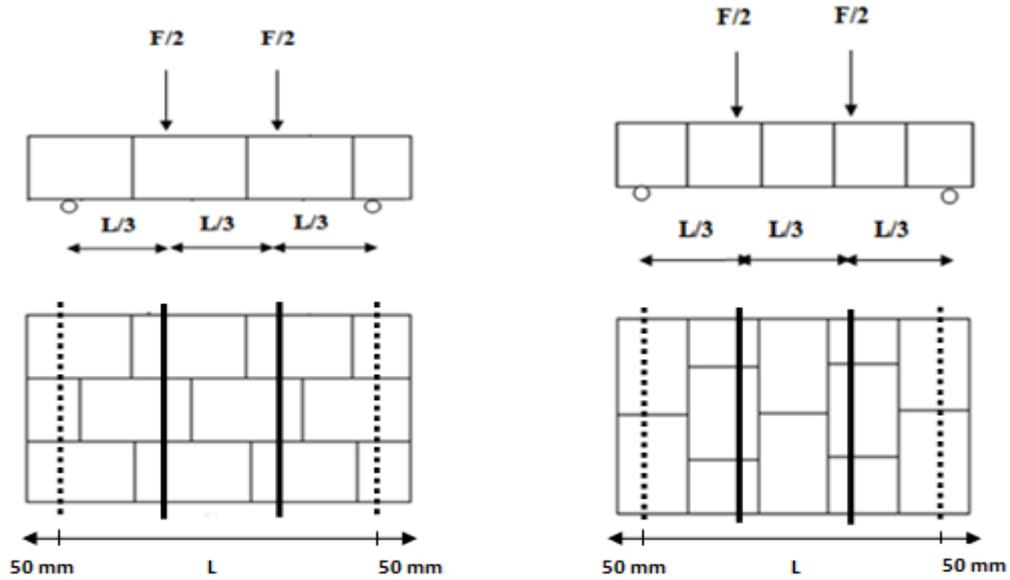
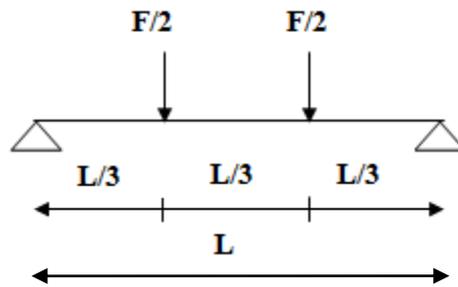
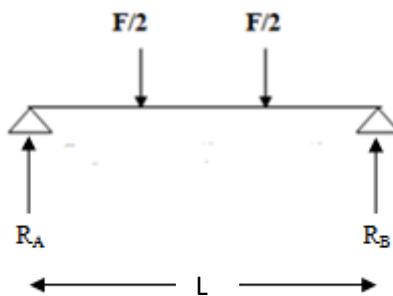


Schéma statique :



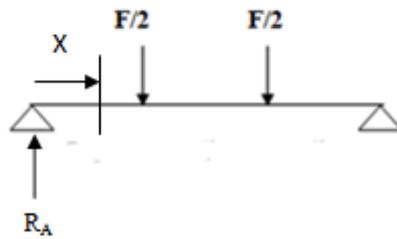
(Schéma statique)

Méthodologie de calcul



$$\sum M_B = R_A L - \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{3} - \frac{F}{2} \cdot \frac{2 \cdot L}{3} = 0$$

$$R_A = R_B = \frac{F}{2}$$



$$M(x) = R_A \cdot X$$

↗ $M(0) = 0$

↘ $M\left(\frac{L}{3}\right) = R_A \cdot \frac{L}{3} = \frac{FL}{6} = M_{\max}$

$$M_{\max} = \frac{F.L}{6} \dots \dots \dots (1)$$

La contrainte de flexion est :

$$F_{XK} = \frac{M}{I} \cdot V \dots \dots \dots (2)$$

Avec :

$$I = \frac{b.e^2}{12} \dots \dots \dots (3)$$

$$V = \frac{e}{2} \dots \dots \dots (4)$$

On remplace (2) et (3) et (4) dans (1)

On obtient :
$$F_{XK} = \frac{F.L}{b.e^2}$$

Où :

F_{XK} : Résistance à la flexion (N/mm²).

M : Moment fléchissant

I : L'Inertie du mur:

L : Longueur du mur

b : Largeur du mur.

e : Epaisseur du mur.

Annexe 2

Caractéristiques géométriques et mécaniques des murets sous sollicitation de flexion

Murs	D.C	D.E	e (mm)	L (m)	b (m)	D (mm)	Fr (KN)	$f_{xk moy}$ (MPa)	Écart type
Mortier (1/4)									
FM1a X	04 /03/2015	01/04/2015	5	1,03	0,57	0.6	0.30	0,059	0,01
FM1B X	04 /03/2015	01/04/2015	5	1,03	0,57	-	0.19		
FM1C X	04/03/2015	01/04/2015	5	1,03	0,57	0.80	0.38		
FM1a X	01 /03/2015	30/03/2015	10	1,04	0,58	0,52	0.58	0,247	0,16
FM1B X	02 /03/2015	30/03/2015	10	1,04	0,58	3,71	2.15		
FM1C X	02 /03/2015	30/03/2015	10	1,04	0,58	2,29	0.98		
FM1a X	03 /03/2015	31/03/2015	15	1,05	0,57	2,73	1.10	0,21	0,12
FM1B X	03 /03/2015	31/03/2015	15	1,05	0,57	1,72	0.43		
FM1C X	03 /03/2015	31/03/2015	15	1,05	0,57	4,91	1.60		
FM1a Y	10 /03/2015	07/04/2015	5	1,00	0,57	6,54	2.58	0,51	0,02
FM1B Y	10 /03/2015	07/04/2015	5	1,00	0,57	6,25	2.48		
FM1C Y	10/03/2015	07/04/2015	5	1,00	0,57	6,61	2.77		
FM1a Y	09 /03/2015	06/04/2015	10	1,02	0,62	11,20	4.14	0,60	0,14
FM1B Y	09 /03/2015	06/04/2015	10	1,02	0,62	7,27	3.06		
FM1C Y	09 /03/2015	06/04/2015	10	1,02	0,62	6,77	2.66		
FM1a Y	05 /03/2015	02/04/2015	15	1,02	0,62	7.04	2.73	0,58	0,09
FM1B Y	05 /03/2015	02/04/2015	15	1,02	0,62	7.23	3.15		
FM1C Y	05 /03/2015	02/04/2015	15	1,02	0,62	9,78	3.72		

D.C : Date de confection.

D.E : Date d'essai.

Murs	D.C	D.E	e (mm)	L (m)	b (m)	D (mm)	Fr (KN)	$f_{xk moy}$ (MPa)	Écart type
Mortier (1/6)									
FM2a X	10 /03/2015	07/04/2015	5	1,03	0,57	0.01	0.37	0,11	0,04
FM2B X	10 /03/2015	07/04/2015	5	1,03	0,57	0.18	0.52		
FM2C X	10 /03/2015	07/04/2015	5	1,03	0,57	0.01	0.81		
FM2a X	12 /03/2015	09/04/2015	10	1,03	0,58	2.52	0.19	0.23	0,06
FM2B X	12 /03/2015	09/04/2015	10	1,03	0,58	1.63	0.84		
FM2C X	12/03/2015	09/04/2015	10	1,03	0,58	4.95	1.53		
FM2a X	10 /03/2015	07/04/2015	15	1,05	0,62	3.14	1.38	0.23	0,05
FM2B X	10 /03/2015	07/04/2015	15	1,05	0,62	3.86	1.44		
FM2C X	10 /03/2015	07/04/2015	15	1,05	0,62	2.55	0.87		
FM2a Y	15 /03/2015	12/04/2015	5	1,03	0,57	7.75	2.69	0.48	0,09
FM2B Y	15 /03/2015	12/04/2015	5	1,03	0,57	5.14	1.87		
FM2C Y	15/03/2015	12/04/2015	5	1,03	0,57	7.33	2.64		
FM2a Y	15 /03/2015	12/04/2015	10	1,02	0,58	5.53	2.60	0.58	0,17
FM2B Y	15/03/2015	12/04/2015	10	1,02	0,58	10.59	3.98		
FM2C Y	15 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	6.32	2.26		
FM2a Y	12 /03/2015	09/04/2015	15	1,05	0,62	6.14	2.97	0.57	0,23
FM2B Y	12 /03/2015	09/04/2015	15	1,05	0,62	7.45	1.81		
FM2C Y	15 /03/2015	12/04/2015	15	1,05	0,62	11.42	4.32		

Murs	D.C	D.E	e (mm)	L (m)	b (m)	D (mm)	Fr (KN)	$f_{xk moy}$ (MPa)	Écart type
Mortier (1/2/9)									
FM3a X	16 /03/2015	13/04/2015	5	1,00	0,57	0.02	0.24	0,059	0,028
FM3B X	16 /03/2015	13/04/2015	5	1,00	0,57	1.53	0.46		
FM3C X	16 /03/2015	13/04/2015	5	1,00	0,57	-	0.16		
FM3a X	17 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	1.55	0.82	0.11	0,05
FM3B X	17 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	0.02	0.26		
FM3C X	17/03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	1.60	0.59		
FM3a X	17 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	1.55	0.82	0.11	0,05
FM3B X	17 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	0.02	0.26		
FM3C X	17/03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	1.60	0.59		
FM3a Y	17 /03/2015	14/04/2015	5	1,04	0,57	3.51	1.79	0.30	0,05
FM3B Y	17 /03/2015	14/04/2015	5	1,04	0,57	3.09	1.35		
FM3C Y	17 /03/2015	14/04/2015	5	1,04	0,57	2.64	1.25		
FM3a Y	17 /03/2015	14/04/2015	10	1,02	0,58	9.76	1,22	0.57	0,28
FM3B Y	18/03/2015	15/04/2015	10	1,02	0,58	5.50	0,65		
FM3C Y	18/03/2015	15/04/2015	10	1,02	0,58	12.93	0,88		
FM3a Y	17 /03/2015	14/04/2015	15	1,04	0,62	5.30	1.97	0.37	0,02
FM3B Y	17/03/2015	14/04/2015	15	1,04	0,62	4.57	1.92		
FM3C Y	18 /03/2015	15/04/2015	15	1,04	0,62	6.25	2.16		

Annexe 3

Caractéristiques géométriques et mécaniques des murets sous sollicitation de compression

Identité	D.C	D.E	e (mm)	Fc (KN)	D (mm)	R _c (MPA)
CM1	19 /03/2015	16/04/2015	5	49,39	5,15	0,86
CM1	19 /03/2015	16/04/2015	10	75,19	7,45	1,31
CM1	19 /03/2015	16/04/2015	15	80,68	7,66	1,41
CM2	19 /03/2015	19/04/2015	5	85,94	9,81	1,50
CM2	19 /03/2015	19/04/2015	10	80,38	8,09	1,41
CM2	19 /03/2015	19/04/2015	15	83,57	7,35	1,46
CM3	19 /03/2015	20/04/2015	5	55,41	6,65	0,97
CM3	19 /03/2015	20/04/2015	10	92,26	8,42	1,61
CM3	19 /03/2015	20/04/2015	1.50	72,4	8,29	1,27

RESUME

La maçonnerie présente un comportement mécanique très complexe dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants.

Le but de notre travail consiste à prédire le comportement de la maçonnerie grâce aux tests effectués au laboratoire. Nous nous proposons d'évaluer la résistance à la flexion des murs en brique de terre cuite creuse 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) sur deux types de murs (murs où les charges sont parallèles au lit de joint (F_X) et murs où les charges sont perpendiculaires au lit de joint (F_Y)).

Les tests expérimentaux effectués sur une cinquantaine de murs nous ont permis de montrer que l'épaisseur du joint de 10 mm offre la valeur optimale de la résistance à la flexion des murs pour les trois mortiers et pour les deux types de murs, tandis que le mortier bâtard offre la résistance la plus faible. La résistance à la flexion pour les murs (F_Y) est plus élevée que les murs (F_X).

Nous avons constaté que les murs présentent une résistance à la flexion supérieure à ceux proposées par l'EUROCODE 6 et DTR C2.45 sauf pour quelques murs de type F_X dont le joint est de 5 mm.

Mots clés :

Brique, flexion, joint, maçonnerie, mur, résistance.

ملخص

يتميز البناء بسلوكه الميكانيكي المعقد للغاية ويرجع ذلك أساساً إلى عدم تجانس مكوناته.

الغرض من عملنا هو التنبؤ بسلوك البناء من خلال التجارب المقامة في المختبر. نقترح لتقييم قوة انحناء الجدران المصنوعة من أجر الطين المجوف استخدام خليط الإسمنت والآخر من الجير «bâtard» و مع اختلاف سمك الوصلة (5 ، 10 و 15 ملم) على نوعين من الجدران (الجدران حيث الأحمال موازية للوصلة (F_X) و الجدران حيث الأحمال عمودية للوصلة (F_Y)).

سمحت لنا الاختبارات التجريبية على حوالي خمسين جدار أن نستنتج أن سمك الوصلة المقدر بـ: 10 ملم هو الأكثر مقاومة لقوة الانحناء في كل الخلطات و الجدران المستعملة ، في حين أن الخليط الذي أستعمل فيه الجير قدم أدنى مقاومة. كما أن مقاومة الجدران F_Y أعلى من الجدران F_X .

يمكننا أن نستخلص أن الجدران لها قوة انحناء أعلى من التي اقترحتها «DTR C2.45» و «EUROCODE 6» باستثناء البعض من النوع F_X الذي له سمك الوصلة 5 ملم.

الكلمات المفتاحية :

الأجر، الانحناء، الوصلة، البناء، حائط صغير، المقاومة.

ABSTRACT

Masonry has a very complex mechanical behavior essentially due to the heterogeneity of its constituents.

The objective of our work consists to predict the behavior of masonry through testing performed in the laboratory. We propose to evaluate the flexural strength of walls constructed with terracotta hollow brick, by using a cement mortar and bastard mortar with the variation of the joint thickness (5, 10 and 15 mm) on two types of walls (walls where loads are parallel to the joint bed (F_X) and low walls where loads are perpendicular to the joint bed (F_Y)).

Experimental tests on fifty walls allowed us to show that the joint thickness of 10 mm offers the optimum value of the flexural strength of the walls for the three mortars and for the two types of walls, while the bastard mortar provides the lowest resistance. The flexural resistance for walls (F_Y) is higher than the walls (F_X).

We found that the walls have flexural strength greater than those proposed by EUROCODE 6 and DTR C2.45 except for some type of F_X walls whose joint thickness is 5mm.

Key words:

Brick, Flexural, joint, masonry, wall, strength.