

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN-

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENI CIVIL



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER

OPTION : INGENIERIE DES STRUCTURES

Thème

**INFLUENCE DES ADDITIONS FILLERS
CALCAIRES SUR LE COMPORTEMENT DES
MURS EN MAÇONNERIE SOUS CHARGEMENT
DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT**

Présenté par :

M^r. RAMDANI Abdelhamid

M^{lle}. ACHOURI Nassima

Soutenu en : 25 Mai 2016

Composition du jury

M ^r	M.A.	BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r	A.	BEZZAR	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	O.	TALEB	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	F.	GHOMARI	PR	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r	F.B.	HOUTI	MAA	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2016 – 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM-FACULTE DE
TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENI CIVIL



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER
OPTION : INGENIERIE DES STRUCTURES

Thème

INFLUENCE DES ADDITIONS FILLERS
CALCAIRES SUR LE COMPORTEMENT DES
MURS EN MAÇONNERIE SOUS CHARGEMENT
DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT

Présenté par :

M^r. RAMDANI Abdelhamid

M^{elle}. ACHOURI Nassima

Soutenu en : 25 Mai 2016

Composition du jury

M ^r	M.A.	BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r	A.	BEZZAR	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	O.	TALEB	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	F.	GHOMARI	PR	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r	F.B.	HOUTI	MAA	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2016 – 2017

DÉDICACES

A nos parents pour leur dévouement, leurs sacrifices, et
leur grande disponibilité.

Merci

A nos frères Abdelaziz et Younes et nos sœurs

« Salima, Imen, et Meriem ».

A nos collègues « Abderahim et Rajaa » et à tous ceux
qui nous connaissent.

A tous les membres de nos familles « ACHOURI-
RAMDANI-BILLAMI-BOUBEKEUR ».

A tous nos ami(e)s de master 2 génie civil-ingénierie
des structures 2016/2017.

REMERCIEMENTS

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite et à l'aboutissement de cette étude

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Eau et Ouvrage dans Leur Environnement « EOLE » de génie civil de la faculté de technologie de l'université Aboubakr Belkaid de Tlemcen.

Il n'aurait pu être mené à bien sans l'aide de personnes à qui nous voudrions adresser nos remerciements, nos sincères gratitude et en particulier à :

- Professeur GHOMARI Fouad pour nous avoir assistés, conseillés, examinés et aidés à bien mener ce travail.
- Monsieur HOUTI Farid qui était présent tout au long de notre travail et qui su nous encadrer et aider à surmonter toutes les difficultés.

Nous exprimons aussi toute notre gratitude au Dr BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine d'avoir accepté d'honorer la présidence de ce jury.

Aux membres assistants Mr TALEB Omar et Mr BEZZAR Abbdelatif pour l'intérêt qu'ils ont porté en acceptant d'examiner ce travail.

Enfin, toute nos gratitude, nos reconnaissance et nos très vifs remerciement a l'entreprise SOGERWHIT, briqueterie de Tafna et en particulier à Mr HENAOUI Mustapha et Madame Souhila.

RÉSUMÉ

Beaucoup d'études se sont penchés sur le comportement mécanique des structures en maçonnerie porteuse sont rendue très complexe et difficile dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants.

Ce document s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de recherche initiée au laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement «EOLE» qui vise à mieux connaître le comportement de la maçonnerie grâce aux tests effectués au laboratoire.

Il se consacre à une étude expérimentale de panneaux de maçonnerie en briques creuses de terre cuite dans une perspective d'amélioration de leur comportement mécanique. Nous visons de tester le comportement au cisaillement et à la compression de ces panneaux jusqu'à la rupture en utilisant deux types de mortier (1C: 4S et 1C : 6S) auxquels on ajoute des fillers calcaires par substitution proportionnelle au volume du ciment allant de 5 à 25% avec un palier de 5%.

Cette série de tests permettra d'aboutir à quelques améliorations concernant l'économie, la résistance, le comportement mécanique et la valorisation de ces ajouts minéraux.

Pour les besoins de cette étude, nous avons entrepris la construction de plus de soixante-douze murets en briques creuses de terre cuite de dimensions $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$ pour le cas de cisaillement et $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$ pour la compression.

Les résultats obtenus ont démontré que la résistance au cisaillement atteint son optimum à 5% et 10% respectivement pour le mortier 1 : 4 et 1 : 6.

Pour la compression, celle-ci diminue graduellement avec l'augmentation des fillers calcaires.

Mots clés : Muret, Maçonnerie, Brique creuses, Filler calcaire, Joint, Rupture, Résistance, Compression, Cisaillement.

SOMMAIRE

Résumé

Introduction général	1
-----------------------------------	---

Chapitre 1 : Les types de maçonneries.

1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Domaine d'application de la maçonnerie	3
1.4. Les différents types de maçonnerie	4
1.4.1. Maçonnerie en brique de terre cuite	4
1.4.2. Maçonnerie en brique de silico-calcaire	8
1.4.3. Maçonnerie en agglomère de béton	8
1.4.4. Maçonnerie en moellon	9
1.4.5. Maçonnerie non armée	10
1.4.6. Maçonnerie armée	10
1.5. Mortier	11
1.5.1. Définition	11
1.5.2. Domaine d'application de mortier	11
1.5.3. Les types de mortier	12
1.5.4. Les différentes utilisations du mortier	12
1.6. Joint d'un mortier	12
1.7. Pathologies des maçonneries en brique	13
1.7.1. Mortier	13
1.7.2. Brique	13
1.8. Diagnostic et restauration des maçonneries de brique	15
1.9. Conclusion.....	16

**Chapitre 2 : Les Etat de l'art de comportement des structures en maçonnerie en
compression-cisaillement.**

2.1. Introduction	17
2.2. Comportement des murs en maçonnerie sous différentes sollicitations	17
2.2.1. comportement de la maçonnerie en cisaillement	17
2.2.2. Travaux effectués sur le cisaillement	18
2.2.3. comportement de la maçonnerie en compression	26

2.2.4. Travaux effectués sur la compression.....	27
2.2.5. Comportement de la maçonnerie en flexion.....	30
2.2.6. Comportement de la maçonnerie en traction	31
2.3. Les différents codes de calcul	31
2.3.1. En compression	31
2.3.2. En cisaillement	32
2.4. Analyse bibliographique	35
2.5. Conclusion.....	35
Chapitre 3 : Présentation des matériaux et des techniques expérimentales utilisées au laboratoire.	
3.1. Introduction	36
3.2. Matériaux utilisés	36
3.2.1. Provenance des matériaux	36
3.2.2. Caractéristiques des matériaux	37
3.3. Programme des essais sur les murets	51
3.3.1. Introduction	51
3.3.2. Nature des murets tests	52
3.4. Confection des murets	53
3.4.1. Matériel utilisé	53
3.4.2. Méthodologie de la confection des murets	54
3.5. Dispositif des essais	61
3.5.1. Essai de cisaillement :	61
3.5.2. Essai de compression	63
3.5.3. Essai de cisaillement sur des triplets	64
3.6. Conclusion	66
Chapitre 4 : Résultats et interprétations.	
4.1. Introduction	67
4.2. Résultats des murets tests sous sollicitations de cisaillement	67
4.2.1. Calcul de la contrainte	67
4.2.2. Résistance des murets tests	67
4.2.3. Influence des pourcentages des fillers sur la résistance des murets	68
4.2.4. Etude comparative des contraintes avec L'EUROCODE 6 et CNERIB	69
4.2.5. Mode de rupture	70

4.3. Essai de cisaillement d'un triplet en brique	73
4.4. Résultats des murets sous sollicitations de compression	74
4.4.1. Calcul de la contrainte	74
4.4.2. Résistance des murets tests	74
4.4.3. Influence des pourcentages des fillers sur la résistance des murets	75
4.4.4. Comparaison des contraintes avec L'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB	75
4.4.5. Mode de rupture	76
4.5. Conclusion	78
Conclusion général	79

Références bibliographiques.

Annexes.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1	Maçonnerie en brique pleine	5
Figure 1.2	Maçonnerie en brique perforée	5
Figure 1.3	Les différentes formes de briques creuses	6
Figure 1.4	Processus de fabrication des briques creuses de terre cuite	7
Figure 1.5	Maçonnerie en briques silico-calcaire	8
Figure 1.6	Fabrication des parpaings	8
Figure 1.7	Maçonnerie en moellons de pierre	9
Figure 1.8	Maçonnerie non armée	10
Figure 1.9	Maçonnerie armée	10
Figure 1.10	Composition d'un mortier	11
Figure 1.11	Les deux façons de faire les joints d'un mortier	13
Figure 1.12	Les différents types de pathologies des maçonneries	14
Figure 1.13	Restauration des maçonneries en briques	15

Chapitre 2

Figure 2.1	Modes de rupture pour un mur de maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement	18
Figure 2.2	Glissements des joints	19
Figure 2.3	Ruptures généralisées de la paroi	19
Figure 2.4	Essai de compression en diagonale	20
Figure 2.5	Dispositif de l'essai selon ASTM E 519	20
Figure 2.6	Résultats de la norme ASTM A 519 test de défaut de la tension diagonale	21
Figure 2.7	Compression diagonale : contrainte de cisaillement-déformation du mur	22
Figure 2.8	Résistance des murets avec et sans joint vertical	22
Figure 2.9	Modes de rupture des murets en parpaings	23
Figure 2.10	Rupture des murs non confinés	24
Figure 2.11	Les modes de rupture des murets en briques creuses	24
Figure 2.12	Présentation schématique de l'épreuve initiale de résistance au cisaillement selon la norme EN 1502-3	25
Figure 2.13	Premier test de résistance au cisaillement selon la norme EN 1502-3 dans le laboratoire	25

Figure 2.14	Résultats obtenus sur les blocs	25
Figure 2.15	Essai de compression	27
Figure 2.16	Dispositif de l'essai de compression	28
Figure 2.17	Dimensions des murets en briques creuses de terre cuite	28
Figure 2.18	Les modes de rupture de l'essai de compression uniaxiale	29
Figure 2.19	Essai de compression des murs en brique pleine	30
Figure 2.20	Courbes contrainte-déformation de compression pour la maçonnerie	30
Figure 2.21	Modes de rupture sous flexion uniaxiale	31
Figure 2.22	Dispositif de l'essai ASTM E519 et plan de rupture potentiel à travers un joint d'assise	33
 Chapitre 3		
Figure 3.1	Plan de situation du gisement des matériaux	37
Figure 3.2	Dimension de la brique creuse	37
Figure 3.3	Pied à coulisse	38
Figure 3.4	Mètre pliant	38
Figure 3.5	Surfaçage de la brique sur les deux cotés	39
Figure 3.6	Stockage, à l'air libre, des briques soumises à l'essai de compression	40
Figure 3.7	Ecrasement de la brique à l'aide de la presse universelle	40
Figure 3.8	Etuve	41
Figure 3.9	Tamis de 2 mm	41
Figure 3.10	Les étapes de la méthode utilisée pour la détermination du coefficient d'absorption du sable	43
Figure 3.11	Série de tamis	43
Figure 3.12	Tamiseur électrique	43
Figure 3.13	Courbe granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli	44
Figure 3.14	Le sac du ciment provenant de la cimenterie de Beni-Saf	45
Figure 3.15	Matériels utilisés	47
Figure 3.16	La confection des éprouvettes	48
Figure 3.17	La conservation des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm ³	48
Figure 3.18	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	49
Figure 3.19	L'essai de résistance à la flexion à l'aide du banc d'essai didactique	50
Figure 3.20	Dispositif pour l'essai de résistance à la compression	50

Figure 3.21	L'essai de résistance à la compression à l'aide du banc d'essai didactique	51
Figure 3.22	Programme des essais sur les murets	52
Figure 3.23	Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$	52
Figure 3.24	Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$	53
Figure 3.25	Outils utilisés pour la construction des murets	53
Figure 3.26	Scie à béton	54
Figure 3.27	Transpalette	54
Figure 3.28	Dispositif de l'essai pour la confection des murets	55
Figure 3.29	Mélange à sec du mortier	55
Figure 3.30	Pose des premières briques en respectant l'épaisseur des joints	56
Figure 3.31	Remplissage des joints verticaux ensuite l'étalement de la première couche du mortier	56
Figure 3.32	La pose des briques selon la même technique en tapotant le dessus de la brique avec le maillet tout en l'ajustant à la hauteur du fil	56
Figure 3.33	La confection d'un muret de cisaillement $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$	57
Figure 3.34	Vérification de la planéité à l'aide d'un fil à plomb et du niveau à bulle	57
Figure 3.35	Confection d'un muret de compression $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$ selon les mêmes techniques	57
Figure 3.36	Surfaçage d'un muret de cisaillement	58
Figure 3.37	Surfaçage d'un muret de compression	58
Figure 3.38	Quelques défauts des briques utilisées	59
Figure 3.39	Cure et stockage des murets soumis au cisaillement, finis et prêts à l'écrasement	60
Figure 3.40	Cure et stockage des murets soumis à la compression, finis et prêts à l'écrasement	60
Figure 3.41	Banc didactique pour l'essai de cisaillement	62
Figure 3.42	Référence de chaque muret	63
Figure 3.43	Banc didactique pour l'essai de compression	64
Figure 3.44	Barres de transmission des charges	64
Figure 3.45	Cure et stockage des triplets finis et prêts à l'écrasement	65
Figure 3.46	L'essai de résistance au cisaillement à l'aide de la machine universelle de traction	65

Chapitre 4

Figure 4.1	Influence des fillers calcaires sur la résistance au cisaillement des murets tests	69
Figure 4.2	Rupture en coup de sabre	70
Figure 4.3	Eclatement en haut du muret	71
Figure 4.4	Eclatement en pied du muret	71
Figure 4.5	Rupture en dents de scie	72
Figure 4.6	Décollement au niveau du joint	72
Figure 4.7	Rupture par glissement	72
Figure 4.8	Mode de rupture des triplets hourdés au mortier 1 : 4 et 1 : 6	73
Figure 4.9	Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression	75
Figure 4.10	Coup de sabre	77
Figure 4.11	Eclatement de la base du muret	77
Figure 4.12	Eclatement de la partie supérieure du muret	77

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2.1	Les valeurs expérimentales de f_{vko} selon TOMAZEVIC	26
Tableau 2.2	Valeurs de f_{vko} selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB	26
Tableau 2.3	Résultats des murets en briques creuses de terre cuite	28

Chapitre 3

Tableau 3.1	La masse volumique des briques creuses testées	38
Tableau 3.2	Résistances à la compression des briques creuses testées	40
Tableau 3.3	Caractéristiques physiques du sable	41
Tableau 3.4	L'analyse granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli	44
Tableau 3.5	Propriétés chimiques du ciment	45
Tableau 3.6	Propriétés chimiques des fillers calcaires	46
Tableau 3.7	Caractéristique chimique de l'eau	46
Tableau 3.8	Le rapport E_g/L pour les différents mortiers à consistance normale	47
Tableau 3.9	Les résultats des mortiers testés à consistance normale	51
Tableau 3.10	Résultats du mortier après confection des murets	59

Chapitre 4

Tableau 4.1	Résultats de la résistance au cisaillement des murets tests	68
Tableau 4.2	Comparaison des résistances au cisaillement avec l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB	69
Tableau 4.3	Les résultats des résistances au cisaillement τ_0	73
Tableau 4.4	Résultats expérimentaux de la résistance à la compression des murets tests	74
Tableau 4.5	Comparaison des contraintes de compression avec celles de l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB	76

NOMENCLATURE

A_b	: Coefficient d'absorption.
A_n	: Superficie nette de l'échantillon, en mm^2 .
b_b	: Largueur de la brique, en cm.
d_b	: Hauteur de la brique, en cm.
E	: Module de Young, en MPa.
E_g	: Eau de gâchage.
E_{SP}	: Equivalent sable du piston, en %.
E_{SV}	: Equivalent sable visuel, en %.
F	: Pourcentage des fillers calcaires, en %.
f_b	: Résistance à la compression de la brique, en MPa.
f_m	: Résistance à la compression du mortier, en MPa.
F_b	: Charge maximale de rupture, en kN.
F_f	: Charge appliquée au milieu du prisme jusqu'à la rupture, en N.
F_c	: Charge de rupture, en N.
f_{vko}	: Résistance au cisaillement avec une contrainte de compression nulle, en MPa.
f_{vk}	: Résistance au cisaillement, en MPa.
F_M	: Résistance à la compression de la maçonnerie, en MPa.
G	: Module de rigidité, en MPa.
H	: Hauteur de l'échantillon, en mm.
K	: Coefficient fonction du groupe de blocs, en MPa.
L	: Liant : ciment +fillers.
l	: Valeur de la diagonale, en mm.
M	: Masse des briques, en kg.
M_1	: Murets testés en compression diagonale.
M_2	: Murets testés en compression.
M_a	: Masse de l'échantillon imbibé, en g.
M_c	: Masse des refus cumulés, en g.
M_i	: Masse des refus, en g.
M_s	: Masse de l'échantillon sec, en g.
m_0	: Mortier témoin.
m_1	: Mortier utilisé pour la confection des murets testés en compression diagonale.

m_2	: Mortier utilisé pour la confection des murets de compression.
n	: Pourcentage de la superficie brute de l'unité.
P	: Charge appliquée, en kN.
P_r	: Pourcentage des refus cumulés, en %.
P_t	: Pourcentage des tamisas cumulés, en %.
R_M	: Résistance moyenne de rupture en compression, en MPa.
R_f	: Résistance en flexion, en MPa.
R_T	: Résistance à la traction, en MPa.
S	: Section effective moyenne du muret, en m^2 .
S_n	: Section nette moyenne de la brique, en cm^2 .
t	: Epaisseur totale de l'éprouvette, en mm.
t_b	: Epaisseur la brique, en cm.
V_n	: Volume net des briques, en dm^3 .
V_v	: Volume des vides de la brique, en dm^3 .
σ_d	: Contrainte de compression de conception perpendiculaire au cisaillement dans l'élément au niveau considéré, en MPa.
ρ	: Masse volumique apparente, en kg/m^3 .
ΔL	: Déplacement diagonal, en mm.
ΔV	: Déplacement vertical, en mm.
τ	: Contrainte de cisaillement, en MPa.
$\tau_{1/3}$: Contrainte de cisaillement correspondant au tiers de la charge maximale, en MPa.
$\gamma_{1/3}$: Déformation tangentielle correspondant au 1/3 de la charge de rupture maximale, pour mille.
σ_c	: Résistance à la compression du muret, en MPa.
$\sigma_{c1/3}$: Contrainte de compression correspondant au tiers de la charge maximale, en MPa.
$\varepsilon_{1/3}$: Déformation longitudinale correspondant au 1/3 de la charge de rupture maximale, pour mille.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les développements récents dans le domaine des matériaux cimentaires, montrent que l'incorporation d'additions minérales fines conduit généralement à l'augmentation de la compacité du matériau qu'il soit mortier ou béton [BOUDCHICHA 2007].

L'étude que nous proposons, consiste à introduire des fillers calcaires en substitution au ciment dans un mortier de jointoiment et tester ainsi la résistance des murets construits avec des briques creuses en terre cuite.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un programme expérimental réalisé depuis plus d'une décennie au sein de l'équipe matériaux granulaires appartenant au laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement «EOLE» qui consiste à étudier le comportement des murs en maçonnerie à diverses sollicitations : compression et cisaillement. La construction de ces murets se fera à l'aide d'un joint horizontal et vertical de 1 cm puisque cette épaisseur a offert la résistance optimale dans le cas des travaux antérieurs sur des maçonneries ayant comme support la brique creuse (Rochet 1985, Djaali et coll. 1996 et Houti 2002).

En proposant d'étudier l'action des fillers calcaires, nous avons réfléchi à leur valorisation dans le domaine de la maçonnerie puisque pour le moment, ces fines sont plutôt utilisées pour améliorer la compacité du béton. Cette action de valorisation de matériaux naturels, locaux et à faible coût, actuellement sous-utilisés, revêt un caractère économique. Afin d'évaluer l'apport de ces additions, en substitution volumique du ciment portland, nous proposons de mener au laboratoire un programme d'essais sur les murets prédéfinis, hourdés avec un mortier dont le liant est un mélange de ciment et de fillers calcaires afin d'évaluer leur comportement mécanique sous chargement de compression et de cisaillement.

La substitution du ciment à faible charge d'addition dans les mortiers de jointoiment (5 à 25% du volume) pourrait-elle garantir la stabilité et la résistance de la maçonnerie en brique creuse de terre cuite ?

Afin de répondre à cet objectif, notre mémoire est constitué de quatre chapitres :

- L'introduction générale présente la problématique, sujet de notre étude, ainsi que les hypothèses de notre travail expérimental.

- Le premier chapitre introduit la maçonnerie dans sa définition globale, ses constituants et les pathologies qui l'affectent.
- Concernant le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique des différents travaux menés sur le comportement de la maçonnerie sous chargement de compression et de cisaillement.
- Le troisième chapitre s'articule autour des matériaux et des techniques expérimentales que nous avons utilisés au laboratoire pour l'élaboration de notre programme expérimental.
- Les résultats expérimentaux réalisés sur les murets tests sous compression et cisaillement, leur interprétation et leur comparaison avec les travaux cités dans la bibliographie sont présentés dans le quatrième chapitre.
- Une conclusion générale clôt le mémoire de fin d'études, où nous tenterons de répondre à la problématique posée au niveau de l'introduction générale.

CHAPITRE 1

LES TYPES DE MAÇONNERIES

1.1. INTRODUCTION :

La maçonnerie utilise différents types de composants dans leur fabrication, leur préparation, où leur agencement nécessite un certaine maîtrise voir même une science bien étudiée. Dans ce chapitre, nous allons définir les différents types de matériaux utilisés couramment et leur mode de préparation ou fabrication.

1.2. DÉFINITION :

Ouvrage en pierres, briques, moellons liés au moyen d'un mortier à base de ciment ou plâtre [HACHETTE 2010].

A cet égard, la maçonnerie se compose de divers supports : briques, blocs de béton, pierres, etc., hourdés à l'aide d'un mortier de jointoiement.

1.3. DOMAINE D'APPLICATION DE LA MAÇONNERIE :

Les fonctions assurées par les murs en maçonnerie concernent principalement [HOUTI 2002, LAGIER et PARRET-F REAUD 2006]:

- La stabilité mécanique sous sollicitations normales.
- L'étanchéité à l'eau de pluie pour les parois extérieures.
- La satisfaction aux exigences thermiques et acoustiques.
- La tenue au feu de la paroi.

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.

1.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAÇONNERIE :

1.4.1. MAÇONNERIE EN BRIQUE DE TERRE CUITE :

La construction durable est devenue un véritable enjeu de société. A cet effet, le matériau utilisé par excellence qui contribue à un environnement bâti sain, durable et performant en matière de confort reste la brique de terre cuite. Plusieurs types d'appareillages peuvent être utilisés [voir annexe 1].

La norme NF EN 771-1 définit une brique en terre cuite comme un matériau de maçonnerie fait d'argile ou d'autre matière argileuse, avec ajout ou non de sable, combustible ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique.

1.4.1.1. Classification basée sur la méthode de fabrication :

Les briques peuvent être classées sur la base de la façon dont elles sont manufacturées [RANGWALA 2015]:

- a. Briques non calcinées:** les briques moulées sont séchées au soleil,
- b. Briques calcinées :** ces briques sont introduites dans un four pour y être cuites à des températures élevées.

Ces deux types peuvent être encore classifiés dans quatre catégories :

- **Briques de première classe :** ces briques sont faites à partir des matières premières de bonne qualité et de couleur uniforme. Ces briques sont employées pour le travail de qualité supérieure de nature permanente.
- **Brique de deuxième classe :** la qualité des briques de ce type est moindre que celle de la première classe. Ces briques sont utilisées généralement dans des endroits où la brique doit être équipée de manteau de plâtre.
- **Briques de troisième classe :** ce type de brique n'est pas uniforme dans la taille et la forme. Elles sont employées pour les structures sans importance et provisoires et dans des endroits où les précipitations ne sont pas importantes.
- **Briques de Quatrième classe :** ce type de brique a une forme irrégulière et une couleur foncée. Ces briques sont employées comme agrégat pour le béton dans les fondations, les planchers, les routes, etc.

Il existe différentes formes de briques de terre cuite :

- **La brique pleine** : c'est l'élément traditionnel de construction le plus connu. Elle existe sous ses deux formes : brique pleine utilisée pour les éléments porteurs apparents (figure 1.1.a), et brique de parement fabriquée à différents formats pour la maçonnerie apparente grâce à ses faces adoucies et son calibrage précis (figure 1.1.b).



Figure 1.1 : Maçonnerie en brique pleine.

- **La brique perforée** : brique qui porte des trous perpendiculaires aux plans de pose, on l'utilise pour les éléments porteurs et isolants (figure 1.2).



Figure 1.2 : Maçonnerie en brique perforée.

- **La brique creuse** : brique avec des trous parallèles au lit de pose (figure 1.3). La surface des vides est plus importante que la surface de la matière ; utilisée pour les cloisons et les doublages, en raison de sa légèreté et de son isolation thermique.



Figure 1.3 : Les différentes formes de briques creuses.

1.4.1.2. Propriétés des briques :

La brique a beaucoup de qualités qui font d'elle le matériau de construction le plus populaire [voir annexe 1]. Les propriétés communes des briques sont :

- Résistance (résistance à la compression, aux intempéries, à l'usure, et au feu),
- Absorption d'eau,
- Porosité,
- Isolation phonique et thermique,
- Esthétique, etc.

1.4.1.3. Processus de fabrication des briques :

Le procédé de fabrication des briques et autres produits de constructions en terre cuite sont les mêmes (figure 1.4) : extraction de la terre, préparation, façonnage/moulage, séchage, cuisson, conditionnement, expédition.



Figure 1.4 : Processus de fabrication des briques creuses de terre cuite [Briqueterie Bendimerad à Remchi 2016].

1.4.2. MAÇONNERIE EN BRIQUE SILICO-CALCAIRE :

La brique silico-calcaire est obtenue par un mélange de sable, de chaux et d'eau à un dosage précis (figure 1.5). Le durcissement se fait à la vapeur à une température supérieure à 170°C dans un milieu fermé (autoclave).



Figure 1.5 : Maçonnerie en brique silico-calcaire.

1.4.3. MAÇONNERIE EN AGGLOMÉRÉS DE BETON :

Le bloc de béton, désigné couramment sous le nom de parpaing est un matériau qui traverse toute l'épaisseur du mur à construire, il est de forme parallélépipédique et creux (figure 1.6.a) ou plein (figure 1.6.a) fabriqué en ciment à l'aide d'une machine appelée pondeuse (figure 1.6).



Figure 1.6 : Fabrication des parpaings (Sogerhwit 2016) (photos prises par les auteurs).

1.4.4. MAÇONNERIE EN MOELLONS DE PIERRE :

Il s'agit de la pierre naturelle pour la construction, en général pierre calcaire plus au moins tendre ; mais on peut distinguer d'autres pierres extraites (principalement de roches sédimentaires). Les moellons sont de dimension variable et de forme irrégulière (sauf cas de la pierre taillée). La construction d'un mur avec ce matériau est donc forcément plus délicate que lorsqu'il s'agit de bâtir avec des matériaux standards comme les briques ou les parpaings. Il faudra être particulièrement vigilant pour assurer l'aplomb et l'alignement correct du mur (figure 1.7).

On distingue deux types de maçonnerie en moellons :

- Maçonnerie en moellons sec (figure 1.7.a) : sans emploi de mortier dans les joints.
- Maçonnerie en moellons à joint avec utilisation d'un mortier pour jointement (figure 1.7.b).



Figure 1.7 : Maçonnerie en moellons de pierre.

1.4.5. MAÇONNERIE NON ARMÉE:

La maçonnerie non armée (figure 1.8) est généralement utilisée dans les constructions à l'horizontal où le ferrailage n'est pas nécessaire. C'est une maçonnerie où les sollicitations sont modérées.



Figure 1.8 : Maçonnerie non armée.

1.4.6. MAÇONNERIE ARMÉE :

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

Leurs armatures peuvent être:

- Horizontales uniquement (figure.1.9.a-b).
- Horizontales et verticales (figure.1.9.c-d-e).

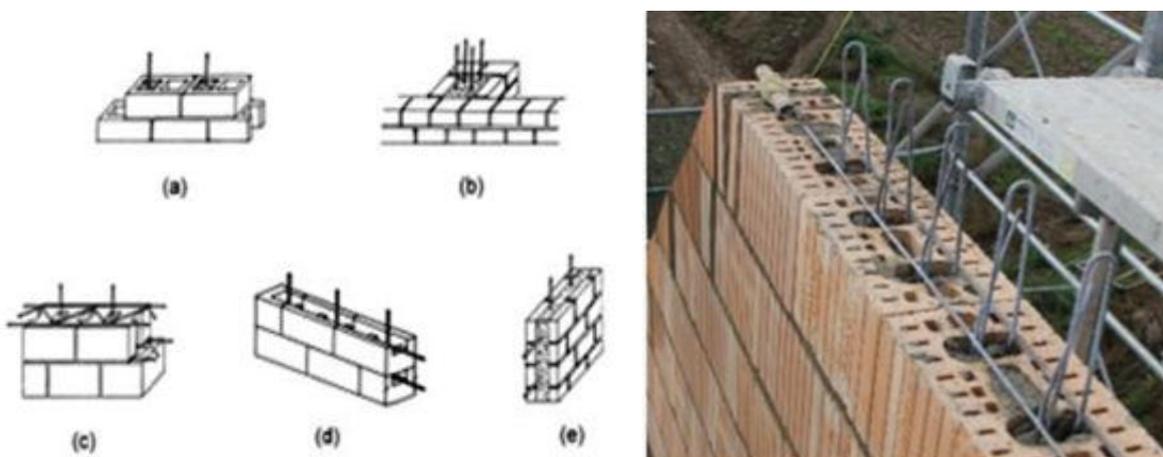


Figure 1.9 : Maçonnerie armée.

1.5. MORTIER :

1.5.1. DÉFINITION :

Le mortier est un mélange (figure 1.10) d'un liant (ciment et/ou chaux) et d'agrégat (sable), utilisé comme élément de liaison ou de scellement (jointement) et comme enduit.

Les caractéristiques mécaniques du mortier dépendent essentiellement de la phase de préparation pour sa mise en œuvre et de la phase finale, c'est-à-dire après le durcissement.

Le mortier doit avoir une certaine viscosité, être facile à écarter avec une truelle et coller impérativement sur les surfaces verticales.

D'autres matériaux peuvent y être incorporés :

- Adjuvant : produit chimique incorporé à faible dose.
- éventuellement des pigments pour donner de la couleur.

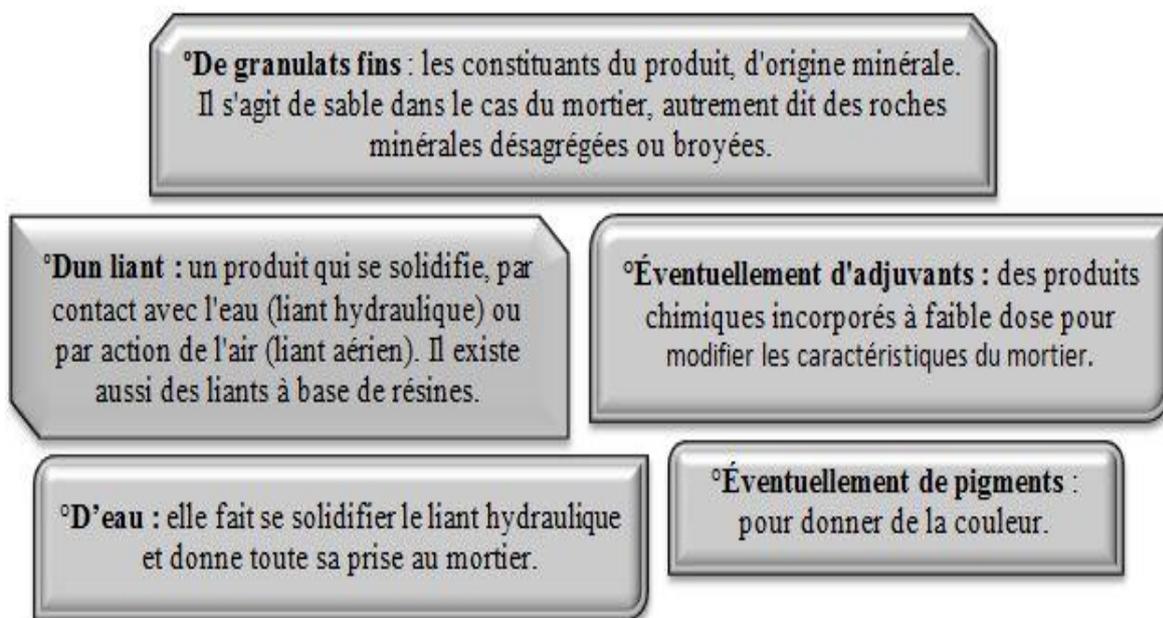


Figure 1.10 : Composition d'un mortier.

1.5.2. DOMAINE D'APPLICATION DES MORTIERS :

Il existe trois domaines d'utilisation dans le domaine du génie civil pour les mortiers :

- Jointement des maçonneries (liaison, compense les inégalités, répartit les charges).
- Chapes.
- Crépis et enduits.

1.5.3. LES TYPES DE MORTIERS :

1.5.3.1. Mortier de ciment : ce mortier est composé essentiellement de ciment, sable et d'eau, sa résistance est proportionnelle à la qualité du ciment incorporé.

1.5.3.2. Mortier bâtard : est un mélange de ciment, de chaux et sable. Le ciment et la chaux sont généralement utilisés avec des proportions égales ; ce type de mortier durcit plus lentement que le mortier de ciment.

1.5.3.3. Mortier de chaux : composé essentiellement de chaux. Il sert à lier les éléments de maçonnerie entre eux ou enduire les murs supports (enduit à la chaux) ou encore dans la réalisation de chape à base de chaux.

1.5.3.4. Mortier de résine ou mortier colle : regroupe la famille des mortiers adhésifs destinés à coller un revêtement au sol comme : le carrelage, la céramique aux murs, le dallage et certains blocs de maçonnerie.

Conformément à la norme NBN EN 998-2, d'autres types de mortiers sont définis selon leur performance et leur utilisation [voir Annexe 1].

1.5.4. LES DIFFÉRENTES UTILISATIONS DU MORTIER :

Parmi les nombreuses applications du mortier, les fabricants distinguent notamment [GRANGET 2015]:

- **Les mortiers-colles :** ils servent à poser du carrelage et de la céramique, au sol ou sur les murs.
- **Les mortiers de ragréage :** ils bouchent les trous et bulles, cachent les défauts de surface pour obtenir une surface plane.
- **Les mortiers de scellement :** ils s'utilisent pour sceller des éléments métalliques.
- **Les mortiers isolants :** ils permettent d'isoler thermiquement des façades par l'extérieur.

1.6. JOINT D'UN MORTIER :

Le joint joue un rôle de protection important et doit avoir un comportement irréprochable dans le temps, quelles que soit les conditions d'exposition. Sa dureté est à évaluer en fonction des sollicitations de l'ouvrage et doit s'harmoniser avec celle du mortier de pose et de la brique. Il y a deux façons de faire les joints [cf. l'annexe 1]:

- Soit "en montant" (figure 1.11.a), c'est-à-dire au fur et à mesure que le mur est monté, en utilisant le mortier de pose.

- Ou "postérieurement" (figure 1.11.b), c'est-à-dire après que le mur soit fini où le rejointoyage "à posteriori" permet au mortier de pose d'effectuer son séchage et son retrait, et limite ainsi les risques de fissuration des joints ; l'observation montre que les murs rejointoyés ainsi ont moins de problèmes d'infiltrations d'eau.



Figure 1.11 : Les deux façons de faire les joints d'un mortier.

1.7. PATHOLOGIES DES MAÇONNERIES EN BRIQUE :

En dehors des problèmes strictement structurels (tassements, fondations, séismes, etc.) on peut classer les pathologies en deux grandes catégories : celles liées à l'humidité et celles liées à la pollution atmosphérique [BABICS et Coll. 2006].

1.7.1. MORTIER :

Les causes de pathologies des mortiers peuvent être de 3 ordres :

- Causes mécaniques : tassement, séisme dépassant la résistance du mortier qui peut créer un phénomène d'effritement de joint (figure 1.12.a).
- Causes chimiques due à l'eau : la chaux et le ciment de nature basique sont sensibles à l'action des acides, ce qui se traduit par des chaînes de décomposition qui produisent des sels dont les chlorures et les nitrates.
- Causes biologiques : les micros organismes ; bactéries, champignons transforme l'azote atmosphérique en acide nitrique qui provoque des altérations.

1.7.2. BRIQUE :

Le principal facteur pathologique de la brique est l'eau ; sa présence permanente peut causer deux formes d'altération :

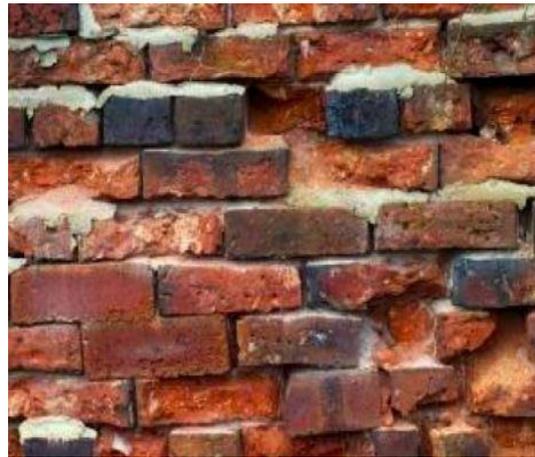
- Altération mécanique : lorsqu'elle est apparente, la brique se désagrège sous l'action des chlorures présents dans l'eau.

Lorsqu'elle est enduite d'un mortier de forte étanchéité ceci empêche l'eau contenue dans la brique de migrer dans le mortier et s'évaporer ; ce phénomène provoque la dislocation et émiettement de la brique (figure 1.12.b).

- Altération chimique : le parement des briques présente des traces de salissures noires, des traces de moisissures (figure 1.12.c) ou des traces d'efflorescences et des traces de salpêtre (blanches et cotonneuses) (figure 1.12.d). On retrouve ces pathologies dans les régions humides et côtières.



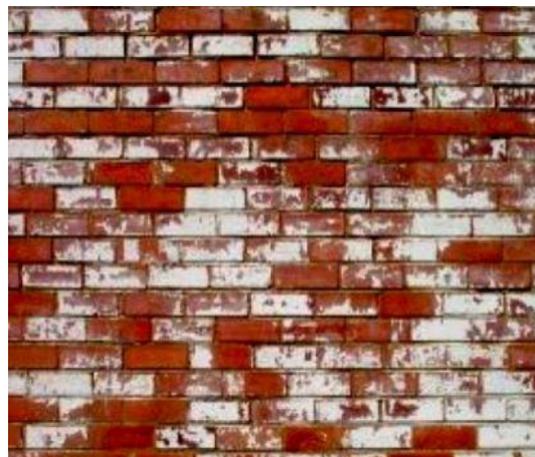
(a)- effritement de joint.



(b)- dislocation et émiettement de la brique.



(c)- salissures noires et moisissures.



(d)- traces de salpêtre
(blanches et cotonneuses).

Figure 1.12 : Les différents types de pathologies des maçonneries.

1.8. DIAGNOSTIC ET RESTAURATION DES MAÇONNERIES EN BRIQUES [BABICS et Coll. 2006] :

- Injection de coulis (figure 1.13.a),
- Traitements de surface,
- Rejointoiment (figure 1.13.b),
- Hydrofugation,
- Sablage (figure 1.13.c),
- Nettoyage par micro-sablage et hydro-gommage (figure 1.13.d),
- Comblement de zones manquantes,
- Remplacement de brique.



(a)- Injection de coulis.



(b)- Rejointoiment.



(c)- Sablage.



(d)- Nettoyage par micro-sablage et hydro-gommage.

Figure 1.13 : Restauration des maçonneries en briques.

1.9. CONCLUSION :

La maçonnerie est un composite anisotrope constitué de mortier, brique, bloc ou pierre que nous avons tenté de définir au niveau de ce chapitre introductif à travers ce que nous avons pu trouver dans la littérature relative au domaine de la maçonnerie.

Pour donner un sens plus large à certains phénomènes liés à la maçonnerie, nous allons aborder, dans le second chapitre, le comportement de la maçonnerie sous sollicitations mécaniques de compression et de cisaillement.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART DU COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE EN COMPRESSION-CISAILLEMENT

2.1. INTRODUCTION :

La maçonnerie est l'art qui consiste à assembler des pierres, blocs ou briques à l'aide d'un mortier. Son comportement mécanique, dépend des caractéristiques des matériaux qui la composent. Dans ce chapitre, nous aborderons les points suivants :

- Un état de connaissance sur le comportement des murs en maçonnerie sous différentes sollicitations : compression, cisaillement, flexion et traction.
- Les travaux menés en compression et cisaillement et les différents codes de calcul.

2.2. L'ÉTAT DE L'ART SUR LA MAÇONNERIE :

2.2.1. Comportement de la maçonnerie en cisaillement [MCKENZIE 2001] :

La résistance au cisaillement est la propriété mécanique de la maçonnerie qui définit la résistance du mur de maçonnerie à des charges latérales dans le plan. Il existe plusieurs modes de rupture :

- Dans le cas du mécanisme de cisaillement par glissement qui se caractérise par la formation de fissures horizontales, les éléments de maçonnerie glissent vers le haut sur l'un des lits-joints (figure 2.1.a),
- Dans le cas du mécanisme de cisaillement caractérisé par la formation des fissures en diagonale, les fissures de cisaillement sont provoquées par les contraintes principales de traction, développées dans la paroi sous la combinaison de charge verticale et latérales (figure 2.1.b),
- Rupture en traction des unités : ce type de rupture se met en place sous l'effet d'un chargement vertical important et en présence de briques moins résistantes en traction. Dans ce cas-là la résistance au cisaillement dans le joint horizontal augmente uniquement pour une bonne résistance de frottement (figure 2.1.c),
- Rupture de la maçonnerie en compression : un chargement vertical important conduit à la ruine de la maçonnerie. A cause de l'importance des contraintes axiales qui se développent sur les briques individuellement, et qui ont dépassé la résistance à la compression de la maçonnerie (Figure 2.1.d).

La figure 2.1 représente les différents modes de rupture sous l'effet d'un effort de cisaillement [MANN et MULLER 1985].

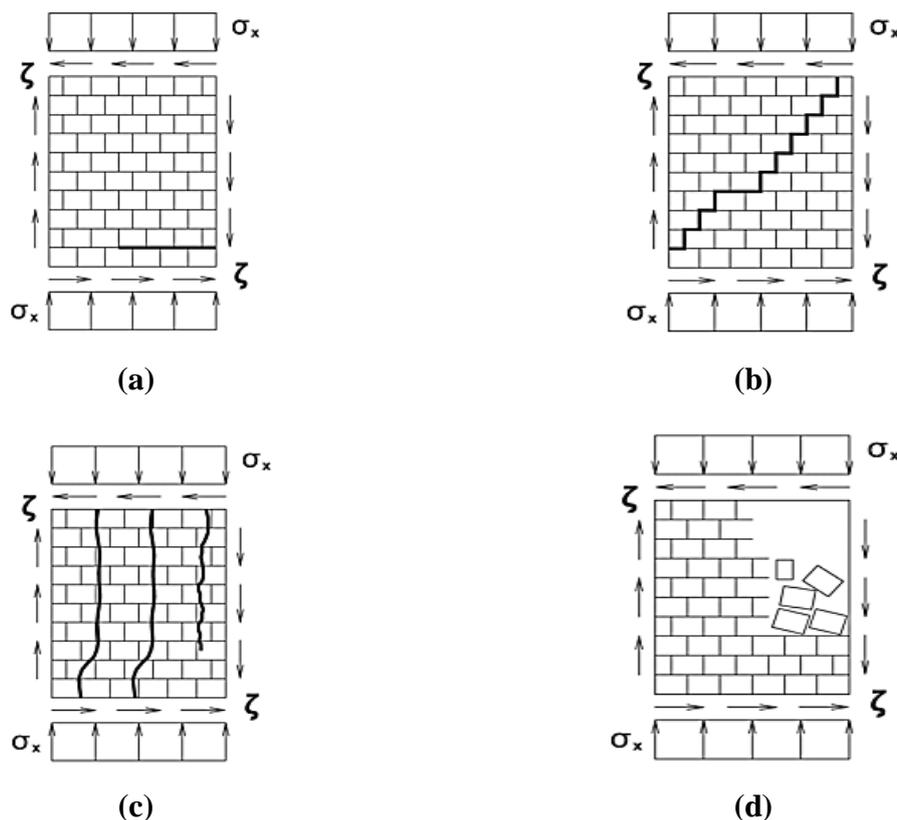


Figure 2.1 : Modes de ruptures pour un mur de maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement [MANN et MULLER 1985 cité par FOUCHAL 2006].

2.2.2. Travaux effectués sur le cisaillement :

2.2.2.1 Les Travaux de GABOR :

Dans son étude GABOR [GABOR et Coll. 2005] explique comment la contrainte de cisaillement se produit ; en effet, cette contrainte est la combinaison de deux autres contraintes : la compression et la traction.

Si l'on considère un élément homogène de maçonnerie carré dans une position en diagonale, c'est-à-dire incliné à 45° , sur lequel on applique une charge, les contraintes principales créées sont la compression et l'autre la traction. Donc du point de vue expérimental, la compression et la traction simultanée le long de la diagonale de la paroi produisent un cisaillement, entraînant une rupture par fissuration le long de la diagonale comprimée.

Le test a été mené sur une seule diagonale, pour exclure la charge de traction (le test bi-axial est difficile à mettre en place), à l'aide d'un vérin de 1000 kN. La force appliquée et le déplacement le long des deux diagonales sont mesurés respectivement en utilisant la cellule

de charge et l'extensomètre LVDT. La charge est augmentée jusqu'à la rupture. Dans ce cas, deux murets construits en brique creuse ont été testés. Pour le premier une rupture localisée a été obtenue avec un net glissement dans les joints et à l'écrasement de l'une des zones d'appuis (figure 2.2).

Dans le second cas, il a été remarqué une rupture soudaine généralisée sans fissure prédictive sur la surface de la paroi. Néanmoins l'analyse de l'échantillon après rupture, révèle que les fissures se sont propagées le long de la diagonale et qu'ils étaient présents dans les joints de mortier et les briques (figure 2.3).

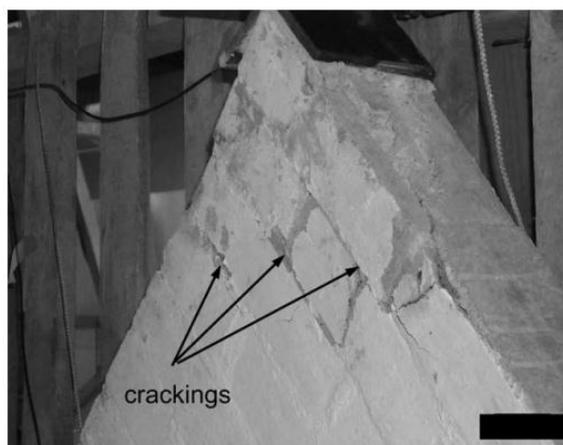


Figure 2.2 : Glissement des joints
[GABOR et Coll. 2005].



Figure 2.3 : Rupture généralisée de la paroi
[GABOR et Coll. 2005].

2.2.2.2 Les travaux de CORRADI:

Le test a pour [CORRADI et Coll. 2003] a pour but de déterminer la contrainte de cisaillement et a été effectué sur une partie de paroi de maçonnerie construite en brique avec un mortier à base de chaux de dimension de 120x120 cm². Le panneau a été découpé de la paroi et reste ancré au reste de mur de maçonnerie à travers une partie de 70 cm du bord horizontal inférieur.

Cet essai consiste à transmettre la charge à travers l'une des deux diagonales à l'aide d'éléments métalliques fixés aux deux coins de la diagonale du panneau. La charge est transmise à l'aide de deux vérins placés dans des coins opposés et entretenir une liaison rigide de telle manière d'avoir un système fermé dans lequel les vérins compriment le panneau. Le test consistait en des couples égaux de cycles de chargement et de déchargement, avec des augmentations de 10 kN, jusqu'au point de rupture (figure 2.4).

La résistance était de l'ordre de 0.069 MPa, les fissures se sont propagées le long du lit de joint.

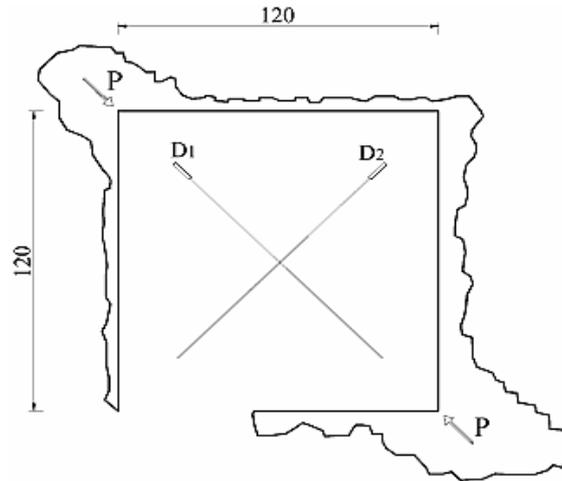


Figure 2.4 : Essai de compression en diagonale [CORRADI et Coll. 2003].

2.2.2.3 Les travaux de CODY :

Dans ce modèle d'essai, l'auteur [CODY et Coll. 2008] a appliqué une charge sur un muret de 1.20 m de côté placé à 45° par rapport à l'horizontal (Figure 2.5) en utilisant la formule de la norme ASTM 519-5 pour évaluer ce type de comportement.

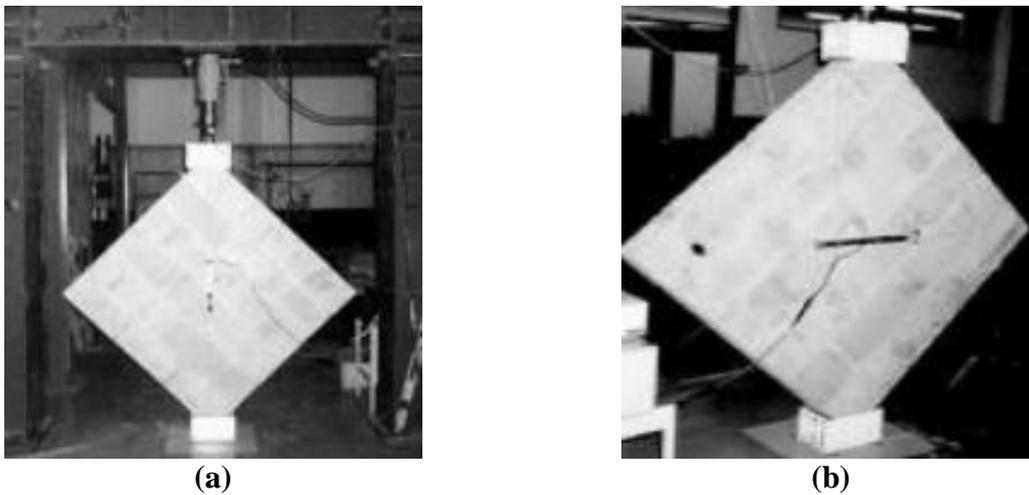


Figure 2.5 : Dispositif de l'essai selon ASTM E 519 [CODY et Coll. 2008]

a) avec le cadre de la réaction ; b) avec l'instrumentation et le chargement des sabots.

Le mode de rupture typique de ce test est la formation d'une fissure diagonale le long du muret entre les charges appliquées plutôt que sur un plan parallèle au lit de joint (figure 2.6).

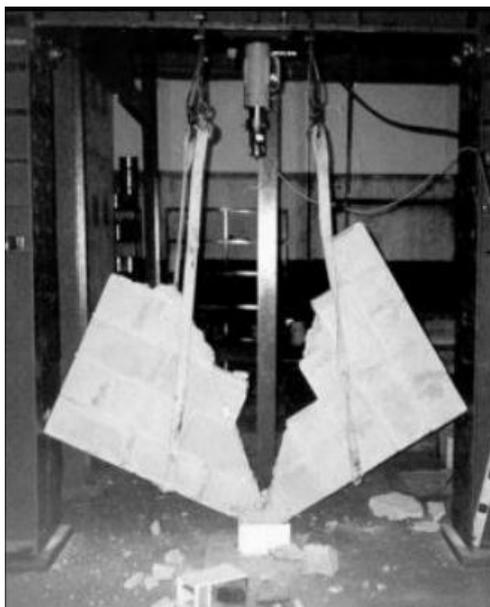


Figure 2.6 : Résultats de la norme ASTM A 519, test de défaut de la tension diagonale [CODY et Coll. 2008].

2.2.2.4 Les travaux de TURATH :

Dans cette expérience, les auteurs [TURATH et Coll. 2015] utilisent la maçonnerie en pierre naturelle calcaire de 20 cm de hauteur et d'une masse volumique 2.68 T/m^3 , un mortier bâtard constitué de ciment, de chaux et de granulat.

Les murs testés possèdent une longueur moyenne de 600 mm et une épaisseur de 85 mm. Chaque mur est composé de cinq rangés de pierres, chaque rangé est constituée de trois pierres. Les joints de mortier ont une épaisseur de 15 mm. Les murs sont fixés sur les extrémités de la diagonale par deux supports métalliques ayant la forme d'un angle. Le chargement est appliqué par la base d'un vérin hydraulique de capacité de 500 kN. Les mesures de déplacement (d'allongement et de compression) se sont effectuées par deux capteurs de déplacement LVDT fixés sur les deux diagonales.

- **Comportement des murs :**

La valeur expérimentale de la résistance moyenne de cisaillement est calculée pour les trois murs (figure 2.7). La résistance a une valeur de 1,26 MPa (figure 2.7) correspondant à une force moyenne de 89,4 kN. La rupture des murs s'est produite par fissuration de joints horizontaux et verticaux.

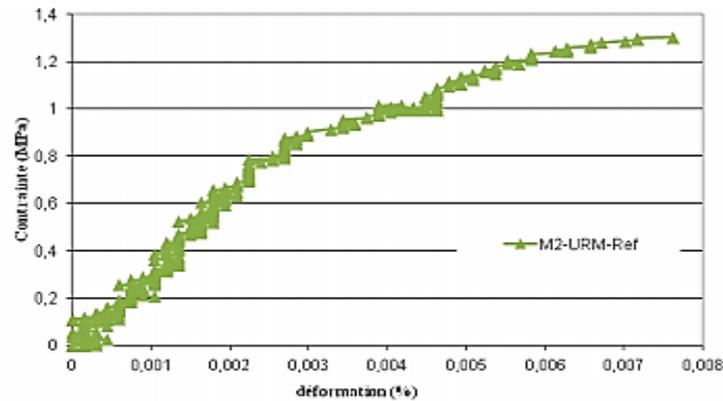


Figure 2.7 : Compression diagonale : contrainte de cisaillement-déformation du mur [TURATH et Coll. 2015].

2.2.2.5 Travaux de HAMZA CHERIF et KARA :

Dans ce travail [HAMZA CHERIF et KARA 2014], nous allons reprendre les résultats obtenus dans les essais de cisaillement en diagonale sur des murets en bloc de parpaing de dimension $60 \times 60 \text{ cm}^2$ avec variation de joint de mortier de 0,5, 1 et 1,5 cm et trois types de mortiers; les deux premiers sont à base de ciment (1/4 et 1/6) et le troisième est un mortier bâtard (1/2/9).

- **Analyse de l'influence de la nature et l'épaisseur du joint de mortier :**

Les murets aux joints verticaux remplis présentent une variation de résistance de l'ordre de 17 à 70% par rapport aux murets sans le joint vertical. Cela explique que le remplissage des joints influe sur la résistance; plus le nombre de joints verticaux diminue plus la résistance de la maçonnerie diminue aussi (figure 2.8).

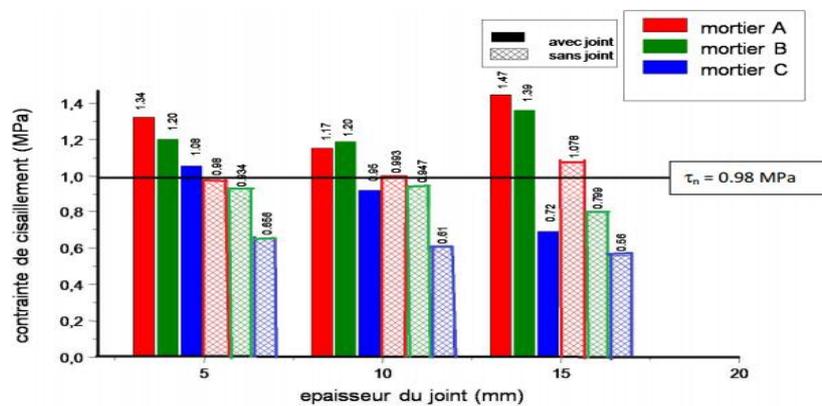


Figure 2.8 : Résistance des murets avec et sans joint vertical [HAMZA CHERIF et KARA 2014].

Les murets en mortier de ciment avec joints verticaux remplis présentent une rupture brutale avec éclatement du muret : les blocs en parpaing cèdent en premier en suivant l'axe de chargement (figure 2.9).



Mortier 1/4 et 1/6



Mortier 1/2/9

Figure 2.9 : Les modes de rupture des murets en parpaings
[HAMZA CHERIF et KARA 2014].

2.2.2.6 Les travaux de LAFUENTE et GENATIOS:

Les murs en maçonnerie non-confinés [LAFUENTE et GENATIOS 1993], soumis à des charges latérales monotones, présentent les mécanismes de rupture typiques montrés sur la figure 2.10. La plupart des règlements de calcul proposent d'utiliser des critères simples pour estimer leur résistance. Ces critères sont fondés sur l'utilisation des valeurs nominales de la résistance de la maçonnerie en compression (f_m), en traction (f_t) et en cisaillement (V_m), obtenus à partir d'essais simples. La résistance au cisaillement, en particulier, est donnée par une expression du type :

$$V_m = u + f S_c \quad (2.1)$$

Où:

S_c : charge verticale, exprimée en kN ; u et f sont des coefficients d'adhérence et de friction, trouvés expérimentalement.

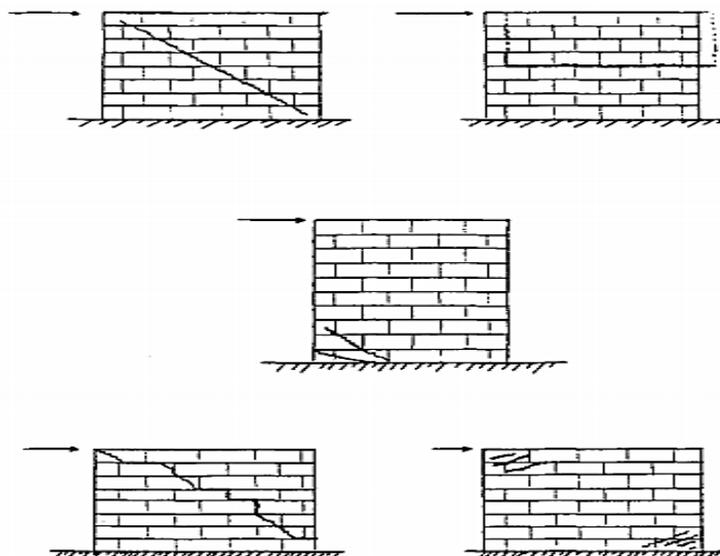


Figure 2.10 : Rupture des murs non confinés [LAFUENTE et GENATIOS 1993].

2.2.2.7 Travaux de TOMAZEVIC :

Les résultats trouvés par TOMAZEVIC [TOMAZEVIC 2008] en testant des murets en briques de terre cuite, creuse et perforée sous contrainte de cisaillement, révèlent deux types de rupture : dans le premier cas de brique creuse les fissures passent à travers les unités (figure 2.11.a). Dans le deuxième cas en brique perforée, les fissures passent en partie à travers les joints et en partie dans les unités (figure 2.11.b). Dans les deux cas, les fissures de traction et l'écrasement d'unités à l'appui ont été observées avant la rupture par cisaillement.

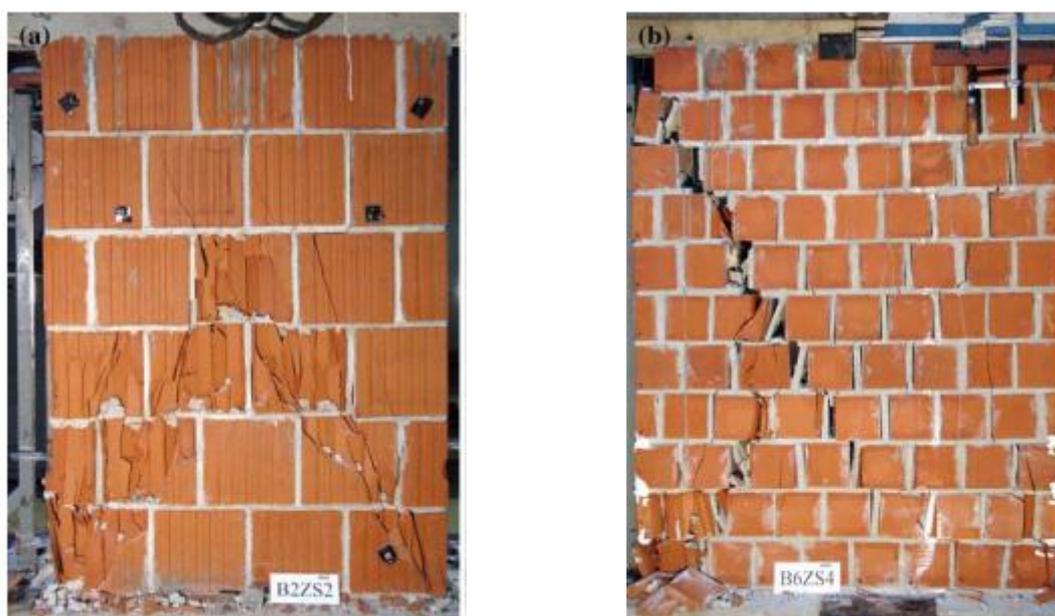


Figure 2.11 : Les modes de rupture des murets en briques creuses [TOMAZEVIC 2008].

- **Essai de triplet :**

TOMAZEVIC [TOMAZEVIC 2008] a réalisé un test sur la résistance au cisaillement (f_{vk0}) avec une contrainte de compression nulle. Celle-ci est déterminée en testant des échantillons en trois unités de maçonnerie selon la norme EN 1052-3 (figures 2.12 et 2.13). Dans la contrainte de cisaillement, il faut veiller à ce que la rupture se développe dans le plan de liaison entre les unités et le mortier, à condition que tous les joints soient complètement remplis de mortier.

Six échantillons de chaque type ont été testés. Les résultats de f_{vk0} trouvés sont présentés dans le tableau 2.1. La figure 2.14 indique les plans de rupture après les essais de résistance au cisaillement initiaux. A titre comparatif, nous présentons ci-dessous les valeurs f_{vk0} selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB (tableau 2.2).

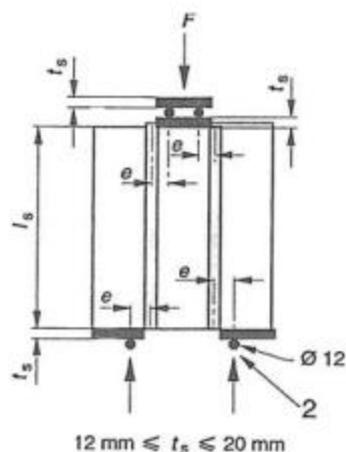


Figure 2.12 : Présentation schématique de l'épreuve initiale de résistance au cisaillement selon la norme EN 1502-3.



Figure 2.13 : Premier test de résistance au cisaillement selon la norme EN 1502-3 dans le laboratoire.



Figure 2.14 : Résultats obtenus sur les blocs [TOMAZEVIC 2008].

Tableau 2.1 : Les valeurs expérimentales de f_{vko} selon TOMAZEVIC.

Unités	σ_c de la brique (kN)	Résistance au cisaillement (MPa)			
		σ_c du mortier 5 MPa		σ_c du mortier 10 MPa	
		f_{vko}	$f_{vk}^{(1)}$	f_{vko}	f_{vk}
B1	20.7	0.17	0.23	0.19	0.27
B2	13	0.19	0.26	0.21	0.26
B3	14.6	0.16	0.2	0.16	0.2
B4	12.2	0.26	0.31	0.22	0.38
B5	11.5	0.5	0.6	0.55	0.66
B6	30.3	0.28	0.34	0.28	0.33

Tableau 2.2 : Valeurs de f_{vko} selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB.

Unité de maçonnerie	Mortier	f_{vko} (MPa)
Terre cuite (Groupe 1)	M10 à M20	0.3
	M2,5 à M9	0.2
	M1 à M2	0.1

2.2.3. Comportement de la maçonnerie en compression [MCKENZIE 2001] :

Le mode de rupture de la maçonnerie en compression est habituellement celui dans lequel une fissure se propage à travers la pièce par traction dans la direction de la charge appliquée. Des contraintes de traction induisant la fissure (figure 2.15) sont développées au niveau des interfaces de mortier-pièce au niveau des joints de lits et sont dues à la déformation retenue du mortier.

⁽¹⁾ f_{vk} : résistance au cisaillement, exprimée en MPa.

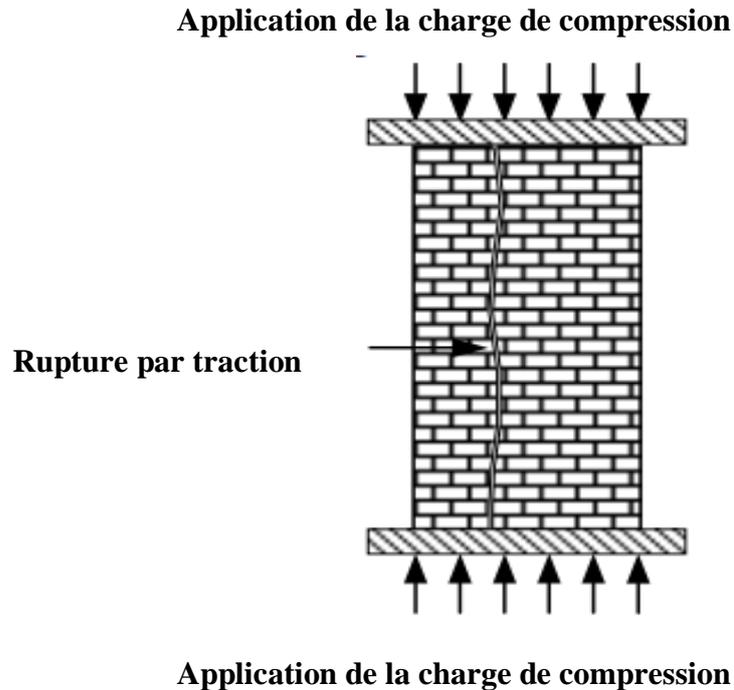


Figure 2.15 : Essai de compression [MCKENZIE 2001].

2.2.4. Travaux effectués sur la compression :

2.2.4.1 Les travaux de CORRADI:

Les tests de compression menés par CORRADI [CORRADI et Coll. 2003] ont pour objectif de déterminer le module de Young. C'est un test réalisé sur des panneaux de maçonnerie de 90x180 cm² obtenus à partir de structures frappées par l'Ombrie-Marchigiano, Tremblement de terre de 1997-1998 qui consiste en trois cycles de chargement et de déchargement avec augmentation des valeurs maximales de contrainte de compression verticale respectivement de 0.1, 0.2 et 0.3 MPa. Ces valeurs sont aussi nécessaires pour élaborer les données des essais de cisaillement-compression. Le mécanisme de chargement est composé de deux plaques métalliques; l'une placée sur le panneau et l'autre placée sur les deux vérins hydrauliques interposés parallèlement entre les plaques afin de permettre que le panneau soit soumis à une compression uniformément répartie (figure 2.16).

La valeur moyenne du module de Young d'élasticité mesurée au cours des essais de compression est de 1124 MPa.

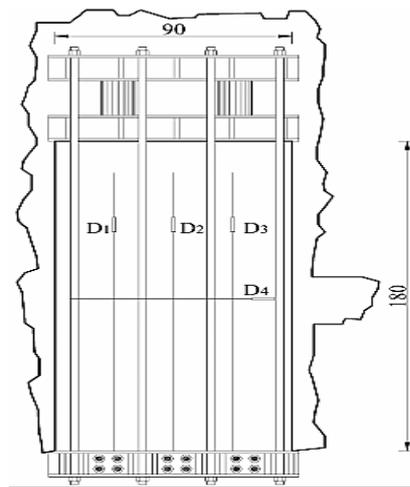


Figure 2.16 : Dispositif de l'essai de compression [CORRADI et Coll. 2003].

2.2.4.2 Les travaux de HOUTI:

HOUTI [HOUTI 2002] a étudié les panneaux de maçonneries de dimensions 10x93x104 cm³, hourdés à l'aide d'un mortier de ciment (1/3) et un mortier bâtard (1/1/6) (figure 2.17), en faisant varier l'épaisseur des joints de 5, 10 et 15 mm et leurs orientations 0, 45 et 90°.

Les murets ont été testés à la compression uniaxiale jusqu'à la rupture (figure 2.18).

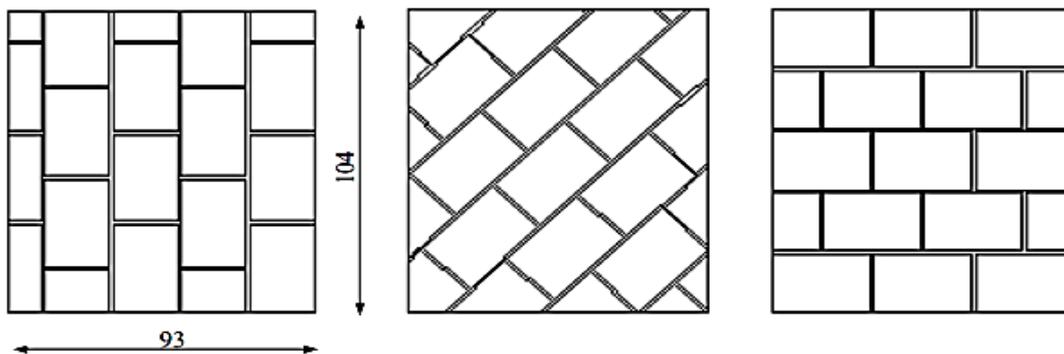


Figure 2.17 : Dimensions des murets en briques creuses de terre cuite [HOUTI 2002].

Tableau 2.3 : Résultats des murets en briques creuse de terre cuite [HOUTI 2002].

	Nature du mortier	Epaisseur = 1.0 cm		
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$
Contrainte de rupture (MPa)	Ciment	-	1.744	1.353
	Bâtard	1.722	1.353	1.206

Les résultats trouvés (tableau 2.3) sur des murets en briques de terre cuite montrent qu'à la fois l'épaisseur du joint, l'orientation de la charge par rapport au joint et la nature du joint agissent sur la résistance des murets.

• **Influence de l'épaisseur du joint :**

L'épaisseur du joint du mortier de 1 cm offre la meilleure la résistance à la compression optimale. Un joint plus mince diminue la résistance de la maçonnerie. Ceci s'explique par une concentration des efforts de traction dans le mortier, aussi un joint plus épais soumettrait la brique à plus concentration de traction.

• **Influence de l'orientation du joint :**

Pour les murets en briques de terre cuite nous pouvons noter que la rigidité de la maçonnerie et sa résistance augmente lorsque θ diminue de 90° à 0° . Ceci s'explique par le fait que les alvéoles de la brique sont parallèles au chargement cas où $\theta = 0^\circ$.

• **Influence de la nature de joint :**

Les résultats des tests montrent que la résistance de la maçonnerie en mortier de ciment est plus forte que celle de mortier bâtard.

- Pour le mortier de ciment c'est la brique en terre cuite qui cède la première par apparition de fissures ce qui provoque la ruine du muret,
- Pour le mortier bâtard la résistance de la maçonnerie est plus faible ; le joint cède en premier puis il y a apparition de fissures sur la brique.



Figure 2.18 : Les modes de rupture de l'essai de compression uniaxiale [HOUTI 2002].

2.2.4.3 Travaux de HEMANT :

L'étude expérimentale menée par HEMANT [HEMANT 2007] pour obtenir des courbes de contrainte-déformation à la compression pour la maçonnerie a nécessité la réalisation de 84 spécimens de prisme, construits en briques pleines fait d'argile brulé moulées à la main, issues de quatre fabricants différents. Les briques sont de dimension de 230x110x75 mm respectivement longueur, largeur et hauteur. Les prismes sont construits à l'aide d'un mortier de 3 dosages différents : faible (1C:0CH:6S), intermédiaire (1C:0CH:3S), fort (1C: ½CH: 4½S) avec un joint de 10 mm. La charge et le déplacement ont été mesurés à travers trois joints de mortier en utilisant un extensomètre Epsilon relié à un ordinateur qui enregistre le résultat en temps réel (figure 2.19).

Le test de compression a été réalisé selon la norme ASTM spécifications 3. Les courbes de contrainte-déformation obtenues à partir de ce test (figure 2.20) montrent que la maçonnerie avec un faible mortier a été jugée moins rigide que celle réalisé avec les deux autres degrés de mortier.



Figure 2.19 : Essai de compression des murs en brique pleine : (a) essai de compression sur prisme ; (b) et (c) modes de rupture des prismes [HEMANT 2007].

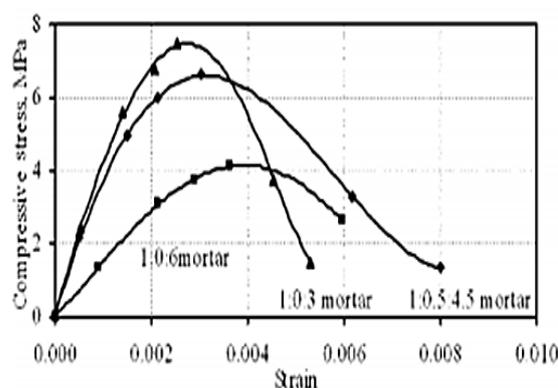


Figure 2.20 : Courbes contrainte-déformation de compression pour la maçonnerie [HEMANT 2007].

2.2.5. Comportement de la maçonnerie en flexion [MCKENZIE 2001] :

La nature non-isotrope de la maçonnerie doit être prise en compte ; la rupture en flexion se fait en deux modes principaux (figure 2.21) :

- Rupture parallèle aux lits-joints (figure 2.21.a).
- Rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme dentée (figure 2.21.b).
- Rupture perpendiculaire aux lit-joints (figure 2.21.c).

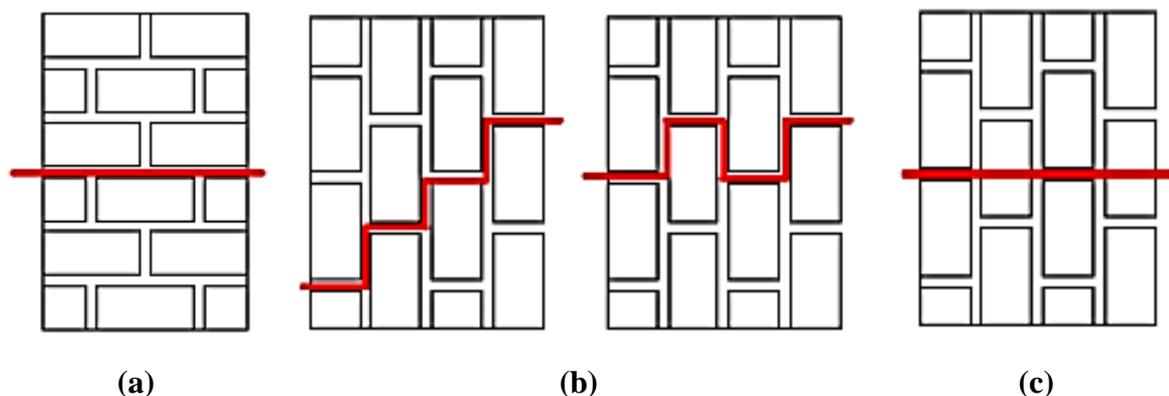


Figure 2.21 : Modes de rupture sous la flexion uniaxiale :

a) flexion horizontale ; b) flexion verticale Zigzag ; c) flexion verticale (division)

[GAZZOLA 1986].

2.2.6. Comportement de la maçonnerie en traction [MCKENZIE 2001] :

La résistance à la traction de la maçonnerie est généralement ignorée dans la conception, cette contrainte est induite par la flexion. La traction directe est induite par les forces résultant de charges du vent sur les structures élancées, ou par les effets probables de la mauvaise utilisation ou les dommages accidentels.

2.3. LES DIFFÉRENTS CODES DE CALCUL :

2.3.1. En compression :

- **Résistance à la compression de la maçonnerie non armée (EUROCODE 6) :**

$$F_M = K \cdot f_b^{0.65} \cdot f_m^{0.25} \quad (2.2)$$

Où :

F_M : résistance à la compression de la maçonnerie, en MPa.

K : coefficient en fonction du groupe de blocs, en MPa.

f_b : résistance à la compression de la brique, en MPa.

f_m : résistance à la compression du mortier, en MPa.

- **Résistance moyenne de rupture à la compression (le DTR du CNERIB) :**

La résistance à la compression expérimentale du muret sera donnée par :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \quad (2.3)$$

Où :

σ_c : résistance à la compression du muret, en MPa.

F_c : charge de rupture, en N.

S : section effective moyenne du muret, en m².

Le module de Young est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$E = \frac{\sigma_{c1/3}}{\varepsilon_{1/3}} \quad (2.4)$$

Où :

E : module de Young exprimé en MPa, où $\sigma_{c1/3}$ est la contrainte de compression en MPa correspondant au tiers de la charge maximale et $\varepsilon_{1/3}$ est la déformation longitudinale correspondante pour mille.

Avec:

$$\varepsilon_{1/3} = \frac{\Delta V}{H} \quad (2.5)$$

Où [voir annexe 2] :

ΔV : déplacement vertical, en mm.

H : hauteur de l'échantillon, en mm.

- Application de la formule connaissant les résistances des matériaux (blocs, mortier) de la maçonnerie:

$$R_M = 0.55 \cdot \sqrt[3]{\sigma_m \cdot \sigma_b^2} \quad (2.6)$$

Où :

R_M : résistance moyenne de rupture en compression, exprimée en MPa.

σ_m : résistance à la compression du mortier, exprimée en MPa.

σ_b : résistance à la compression du bloc ou de la brique, exprimée en MPa.

2.3.2. En Cisaillement :

- **La norme ASTM E 519-02:**

La norme ASTM de calcul des charges de cisaillement, utilise comme test des murets de 1.20x1.20 m². Les essais sont effectués à l'aide d'une machine (figure 2.24) ayant une capacité d'appliquer des charges croissantes jusqu'à rupture, en continu et sans choc (figure 2.22).

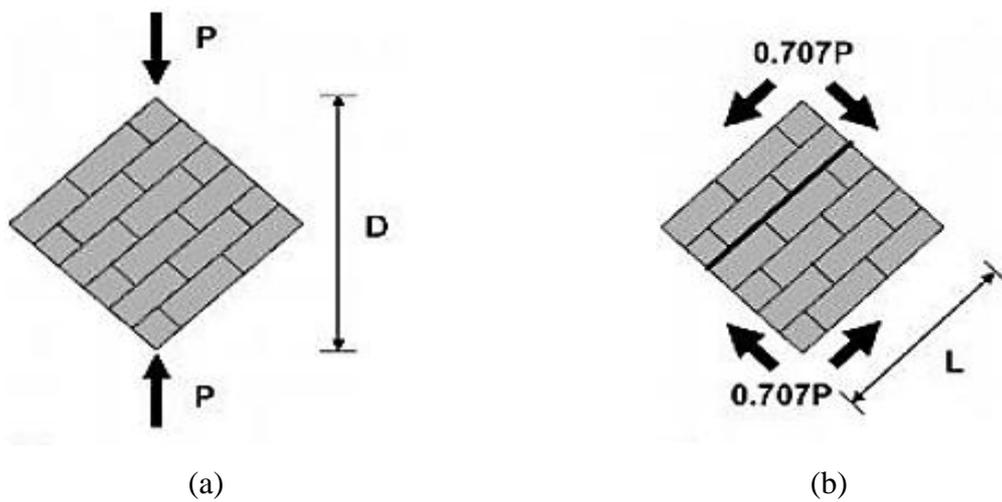


Figure 2.22 : Dispositif de l'essai [ASTM E 519-02 2012]

a) essai ASTM E519 d'un assemblage de maçonnerie ; b) plan de rupture potentiel à travers un joint d'assise.

- **Calcul de la résistance :**

La contrainte de cisaillement de l'échantillon est calculée comme suit:

$$\tau = \frac{0.707 P}{A_n} \quad (2.7)$$

Où:

τ : contrainte de cisaillement sur la surface nette, en MPa.

P : charge appliquée, en kN.

A_n : superficie nette de l'échantillon, en mm^2 , calculée comme suit :

$$A_n = \left(\frac{w + h}{2} \right) t \cdot n \quad (2.8)$$

Où:

w : largeur de l'échantillon, en mm.

h : hauteur de l'échantillon, en mm.

t : épaisseur totale de l'échantillon, en mm.

n : pourcentage de la superficie brute de l'unité.

Le module de rigidité est calculé à l'aide de la formule suivante (module d'élasticité en cisaillement) :

$$G = \frac{\tau_{1/3}}{\gamma_{1/3}} \quad (2.9)$$

Où:

G : module de rigidité, en MPa.

$\tau_{1/3}$: Contrainte de cisaillement correspondant au tiers de la charge maximale, en MPa.

Avec :

$\gamma_{1/3}$: déformation tangentielle correspondant au 1/3 de la charge de rupture maximale, pour mille.

$$\gamma_{1/3} = \frac{\Delta L}{l} \quad (2.10)$$

Où [voir annexe 2] :

ΔL : déplacement diagonal, en mm.

l : longueur de la diagonale, en mm.

- **La résistance au cisaillement de la maçonnerie non armée (EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB):**

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4 \sigma_d \quad (2.11)$$

Où:

f_{vk0} : résistance au cisaillement avec une contrainte de compression nulle selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB.

σ_d : est la contrainte de compression de conception perpendiculaire au cisaillement dans l'élément au niveau considéré, en MPa.

$$f_{vk0} = \tau_0 = \frac{P}{b d} \quad (2.12)$$

Où:

P : force appliquée, en kN.

b : largeur du bloc, en mm.

d : hauteur du bloc, en mm.

- **Calcul de la contrainte de cisaillement (le DTR du CNERIB) :**

La contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{Q \cdot S_m}{I_m \cdot d} \quad (2.13)$$

Où:

Q : effort tranchant dans le mur, exprimé en MN,

S_m : moment statique de la section transversale du mur, exprimée en m^3 ,

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

d : épaisseur du mur exprimé, exprimé en m,

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

2.4. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE :

Compte tenu des variations notables dans la nature de la maçonnerie (brique, bloc de parpaing ou pierre) et le type de mortier (ciment ou bâtard), nous constatons que les différents modes de ruptures dans les travaux précités (TOMAZEVIC [TOMAZEVIC 2008], GABOR [GABOR et Coll. 2005], HEMANT [HEMANT et Coll. 2007], etc.), le joint reste l'élément clé dans tous les cas. C'est dans le joint où réside toute la pathologie c'est-à-dire rupture ou effondrement. Cependant, d'autres critères entrent en jeu dans la prévision de la résistance de la maçonnerie :

- L'épaisseur du joint
- L'orientation du joint par rapport au type de chargement.
- La nature du joint.
- La nature du support.

Aussi malgré la diversité des normes utilisées, les modes de ruptures observés soit dans la compression ou le cisaillement sont sensiblement les mêmes quel que soit les critères ou les matériaux utilisés.

2.5. CONCLUSION :

L'analyse bibliographique nous a permis de constater que les travaux sur les différents comportements mécaniques de la maçonnerie avec les principaux matériaux utilisés [plus de travaux sont présentés dans un tableau récapitulatif, cité dans l'annexe 2] qu'ils soient de type brique ou bloc, insistent sur un composant important qui est le mortier. C'est dans ce cadre que nous allons intégrer, dans notre étude, un mortier composé de fillers calcaires en substitution de 0 à 25% du volume du ciment portland et analyser son influence sur le comportement du maçon.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES UTILISÉES AU LABORATOIRE

3.1. INTRODUCTION :

Le second chapitre nous a permis de constater que la résistance de la maçonnerie à la compression est fonction de la résistance à la compression du mortier, de la résistance à la traction de la brique et du nombre de joints. Quant au comportement en cisaillement de la maçonnerie, il a été montré qu'il est influencé par la résistance à la compression de la maçonnerie, l'adhérence entre brique et mortier (nature de l'interface) et la résistance à la traction de la brique.

Notre étude consiste à optimiser la résistance du mortier en y incorporant comme ajout minéral, les fillers calcaires tout en optimisant leur dosage. A cet effet, nous avons procédé à la variation de la quantité de fillers introduite par rapport au dosage du ciment dans l'intervalle 5 à 25% avec un joint horizontal et vertical de 1 cm d'épaisseur. Il faut signaler que chaque paramètre quantifié est la moyenne de trois mesures ayant nécessité la fabrication de trois murets.

Le programme expérimental mené dans le cadre de notre étude a nécessité, la réalisation de 72 murets ayant subis soit un chargement de compression, soit un chargement de cisaillement jusqu'à la rupture.

3.2. MATÉRIAUX UTILISÉS :

3.2.1. PROVENANCE DES MATÉRIAUX :

- Le sable : est un granulat calcaire concassé, provenant de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'entreprise nationale des granulats «ENG». Elle se situe à 28 km au nord-est de la Wilaya de Tlemcen.

- Les fillers calcaire : sont obtenus d'une roche de nature calcaire dolomitique qui provient de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'entreprise nationale des granulats «ENG».

- Le ciment : il s'agit d'un ciment portland composé (CPJ-CEM II/A 42.5) de la Société des ciments de «Béni-Saf» appartenant à la wilaya d'Aïn Temouchent.

- La brique : ce sont des briques creuses de $09 \times 20 \times 28 \text{ cm}^3$, provenant de la briqueterie de Bendimered à Remchi appartenant à la Wilaya de Tlemcen.

ii. Caractéristiques physiques :

La masse volumique des briques testées est déterminée après avoir calculé leurs volumes dont les distances sont mesurées à l'aide d'un pied de coulisse (figure 3.3) pour les dimensions intérieures et un mètre pliant (figure 3.4) pour les dimensions extérieures et les profondeurs.

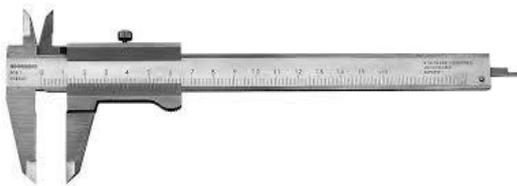


Figure 3.3 : Pied à coulisse.

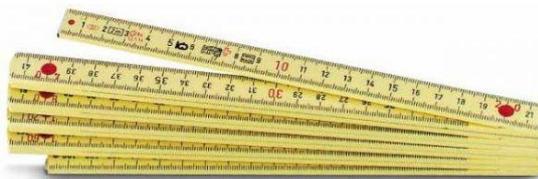


Figure 3.4 : Mètre pliant.

Les mesures sont effectuées sur une série de neuf briques bien choisies (ne présentant pas de défauts apparents). La masse volumique d'une brique ρ (kg/m^3) est calculée par l'expression 3.1.

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

Où :

ρ : masse volumique apparente, en kg/m^3 .

M : masse des briques, en kg.

V_n : volume net des briques égal 2.688 dm^3 .

Avec :

$b_b = 2.8 \text{ dm}$.

$d_b = 2.0 \text{ dm}$.

$t_b = 0.9 \text{ dm}$.

$v_v = 2.352 \text{ dm}^3$.

Les résultats de la masse volumique sont récapitulés dans le Tableau 3.1 :

Tableau 3.1 : La masse volumique des briques creuses testées.

N°	Masse (kg)	ρ (kg/m^3)
1	3.3478	1245.46
2	3.2442	1206.92
3	3.2918	1224.63
4	3.2706	1216.74
5	3.2828	1221.28
6	3.3060	1229.91
7	3.2890	1223.59
8	3.3740	1255.21
9	3.3356	1240.92
	MOYENNE	1229.41

iii. Caractéristiques mécaniques :

Les panneaux de maçonnerie sont confectionnés à partir de briques creuses de petits formats assemblées par un mortier à base de ciment et des fillers calcaires. Il nous a semblé très important d'étudier les propriétés des matériaux constituant la maçonnerie, en particulier les caractéristiques mécaniques. Celles-ci peuvent avoir une grande influence sur le comportement mécanique de la maçonnerie et pour la composition volumique de notre mortier.

- Résistance à la compression des briques :

Des essais de compression uniaxiale simple ont été effectués, sur neuf briques choisies qui ont été surfacées (figure 3.5) par un mortier de ciment (1 : 2), suivant les directions parallèle et perpendiculaire aux alvéoles jusqu'à la rupture.

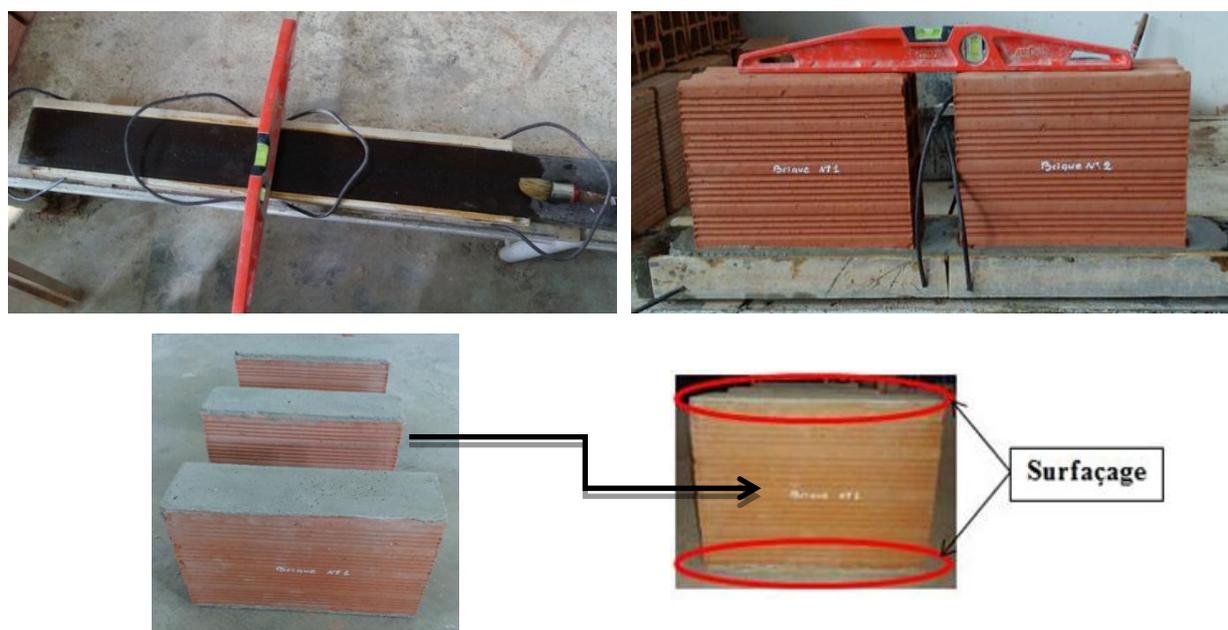


Figure 3.5 : Surfaçage des briques sur les deux cotés
(photo prise par les auteurs).

Après 28 jours de cure selon les conditions du laboratoire (figure 3.6), les essais de compression ont été effectués sur une presse universelle, de charge statique maximale de 2000 kN (figure 3.7). Au cours des essais, les forces ont été mesurées dans les directions parallèles et perpendiculaires aux alvéoles. La résistance en MPa est calculée selon l'expression 3.2 :

$$\sigma_c = \frac{F_b}{S_n} \cdot 10 \quad (3.2)$$

Où :

σ_c : résistance à la compression, en MPa.

F_b : charge maximale de rupture, en kN.

S_n : section nette moyenne de la brique, en cm^2 .

Les résultats de la résistance à la compression des briques testées sont récapitulés dans le Tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : Résistances à la compression des briques creuses testées.

N°	Force (kN)	σ_c (MPa)
1	69.20	2.75
2	60.80	2.42
3	49.70	1.98
4	46.20	1.84
5	76.10	3.02
6	71.90	2.85
7	60.30	2.39
8	63.80	2.53
9	62.40	2.48

$\sigma_{c \text{ moy}} = 2.47 \text{ MPa}$



Figure 3.6 : Stockage, à l'air libre, des briques soumises à l'essai de compression (photos prises par les auteurs).



Figure 3.7 : Écrasement de la brique à l'aide de la presse universelle (photo prise par les auteurs).

Le but de la réalisation des essais de compression est de déterminer le comportement mécanique de la brique utilisée et de décrire le mode de rupture de celle-ci. Ces valeurs de résistance nous sont utiles pour le calcul de la résistance du muret, en utilisant des formules empiriques [SHAAN 1987].

3.2.2.2. MORTIERS :

Pour étudier le comportement mécanique de la maçonnerie, il est nécessaire d'étudier préalablement les caractéristiques mécaniques des deux types de mortiers choisis pour la confection des joints:

- Un (1) volume de ciment plus fillers calcaires (5 à 25%) pour 4 volumes de sable.
- Un (1) volume de ciment plus fillers calcaires (5 à 25%) pour 6volumes de sable.

i. CARACTERISATION DU SABLE :

Le sable utilisé est un granulat calcaire concassé, étuvé pendant 24 h (figure 3.8) ensuite écrêté à 2 mm (figure 3.9).



Figure 3.8 : Etuve.



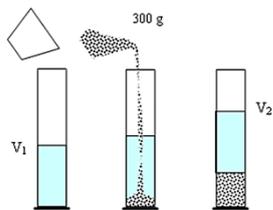
Figure 3.9 : Tamis de 2 mm.

(photos prises par les auteurs)

a. Caractéristiques physiques :

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques du sable.

Mv apparente (kg/m ³)	Mv absolue (kg/m ³)		Equivalent de sable (%)		Coefficient d'absorption (%)
	(1)	(2)	E _{SV}	E _{SP}	
1507	2722.43	2655.83	73.89	67.56	0.6



(1) Méthode de l'éprouvette graduée.



(2) Méthode du pycnomètre
(dite du ballon).

- Selon les Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX, notre sable est entre $70 < PS < 80$ donc le sable est propre. Selon la norme P 18-541, ce sable répond aux exigences qui fixent les limites à $E_{SV} \geq 65\%$ et à $E_{SP} \geq 60\%$, pour les sables concassés ou broyés.

b. L'absorption de l'eau par le sable :

Selon la norme NF P 18-555, on détermine le coefficient d'absorption (A_b) qui est défini selon l'expression 3.3 :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} 100 \quad (3.3)$$

Où :

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à $105^\circ C$.

M_a : masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

Après imbibition de 500 g de sable dans l'eau pendant 24 heures à $20^\circ C$, on étale l'échantillon sur une surface plane non absorbante qu'on soumet à un flux d'air chaud à l'aide d'un séchoir. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Ces grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire. On vérifie que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. Enfin, on vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant afin de déterminer son affaissement (figure 3.10).



Figure 3.10 : Les étapes de la méthode utilisée pour la détermination du coefficient d'absorption du sable (photos prises par les acteurs).

c. Analyse granulométrique :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis de 2 mm jusqu'au 0.063 mm (figure 3.11), emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure de la colonne et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis (figure 3.12).



Figure 3.11 : Série de tamis.



Figure 3.12 : Tamiseur électrique.

L'analyse granulométrique du sable concassé utilisé est présentée dans le tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : L'analyse granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli.

Tamis	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
Ouverture des tamis (mm)	M_i	M_c	$P_r = (M_c/M)*100$	$P_t = 100 - P_r$
2,5	/	/	/	/
2	179,8	179,8	21,29	78,71
1,6	98	277,8	32,89	67,11
1,25	46	323,8	38,33	61,67
1	47,3	371,1	43,93	56,07
0,8	33,2	404,3	47,86	52,14
0,63	19	423,3	50,11	49,89
0,5	80,6	503,9	59,65	40,35
0,4	/	503,9	59,65	40,35
0,315	85,6	589,5	69,79	30,21
0,25	0	589,5	69,79	30,21
0,2	22,6	612,1	72,46	27,54
0,16	19,2	631,3	74,74	25,26
0,125	45,6	676,9	80,13	19,87
0,1	12,4	689,3	81,60	18,40
0,08	16,6	705,9	83,57	16,43
0,063	23,8	729,7	86,39	13,61
Fond	115	844,7	100,00	0,00

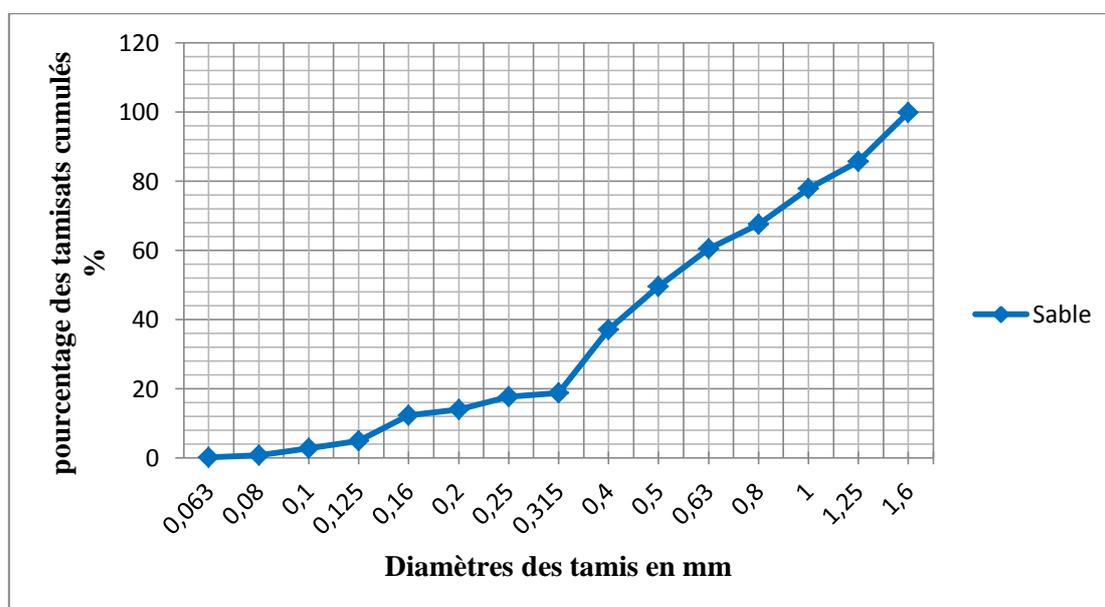


Figure 3.13 : Courbe granulométrique du sable de l'ENG Sidi Abdelli.

L'analyse granulométrique (figure 3.13) obtenue a révélé que la teneur en fines est de 16,4%.

ii. CARACTERISATION DU CIMENT :

Le ciment de Béni-Saf (figure 3.14) est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 et qui répond aux exigences de la norme NA 442/2001. L’ajout minéral est constitué de pouzzolane naturelle du gisement de Sidi Safi [Cimenterie de Béni Saf 2016].

- Minimum de 80-94 % de clinker.
- 6 – 20 % de pouzzolane naturelle.



Figure 3.14 : Le sac du ciment provenant de la cimenterie de Béni-Saf (photos prises par les auteurs).

a. Caractéristiques chimiques [Cimenterie de Béni Saf 2016] :

- Teneur en $SO_3 \leq 3,5 \%$.
- Teneur en Chlorure $\leq 0,1 \%$.
- Teneur en $MgO < 5.0 \%$.

Ses composantes sont récapitulées dans le tableau 3.5 :

Tableau 3.5 : Propriétés chimiques du ciment [BELHOCINE et NAGOUDI 2014].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
18.13	4.42	3.03	60.78	1.84	2.34	0.64	0.13	0.10	0.23

b. Caractéristiques physico mécaniques [Cimenterie de Béni Saf 2016] :

- Les ciments sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours.
- Résistance au jeune âge (02 jours) : limite inférieure (Li) ≤ 12.5 MPa.
- Résistance normale (28 jours) : limite inférieure (Li) ≤ 42.5 MPa ; Limite supérieure (Ls) ≤ 62.5 MPa.
- Retrait du CPJ-CEM II (28 jours) $\mu m/m : \geq 60$ min.
- Temps de début de prise (min) : ≥ 60 min.
- Stabilité (mm) : ≤ 10 mm.

La masse volumique apparente du ciment est de 1034.73 kg/m³ déterminée conformément à la norme NF P 18-558; notre résultat répond aux exigences imposées par la norme NA 231 dont l'intervalle est compris entre 900 et 1100 kg/m³.

La surface spécifique Blaine du ciment CPJ-CEM II est de 3670 cm²/g [HADDOU 2015].

iii. CARACTÉRISATION DES FILLERS CALCAIRES :

Les fillers calcaires ou siliceux qui sont classés comme addition, sont définies comme granulats dans la plupart des grains passent au tamis de 0.063 mm et qui peuvent être ajoutées aux matériaux de construction.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. La composition chimique de ces derniers est récapitulée dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Propriétés chimiques des fillers calcaires [TALEB 2009].

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CO ₃	Anhydrite carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4.73	33.81	18.59	0.49	93.64	41.2	0.49	41.69
Max %	5.64	34.09	20.06	0.54	96.97	42.67	0.56	43.23
Moy %	5,18	33,95	19.32	0.51	95.30	41.93	0.52	42.46

La masse volumique apparente des fillers calcaires obtenue est égale à 856 kg/m³.

La surface spécifique Blaine des fillers calcaires est de 5122 cm²/g [TALEB 2015].

iv. CARACTERISATION D'EAU DE GACHAGE :

C'est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec du mortier. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mortier. L'eau utilisée doit être propre et exempte d'impuretés. L'eau potable convient toujours.

La composition chimique de l'eau utilisée est récapitulée dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Caractéristiques chimiques de l'eau (mg/l) [BOUKLI 2009].

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	pH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

v. COMPOSITION DES MORTIERS :

a. Formulation du mortier de jointoiement :

Le mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1 (figure 3.15) qui décrit de manière détaillée, le mode opératoire concernant cet essai.



Figure 3.15 : Matériels utilisés.

Le rapport E_g/L est le paramètre qui contrôle la résistance du mortier. Nous avons réalisé des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ sur les deux types de mortiers 1 : 4 et 1 : 6 en variant la quantité de fillers calcaires de 5 à 25% avec un palier de 5%, ceci pour obtenir la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour avoir un mortier à consistance normale.

Le tableau 3.8, présente le rapport E_g/L pour les différents mortiers à consistance normale.

Tableau 3.8 : Rapport E_g/L pour les différents mortiers à consistance normale.

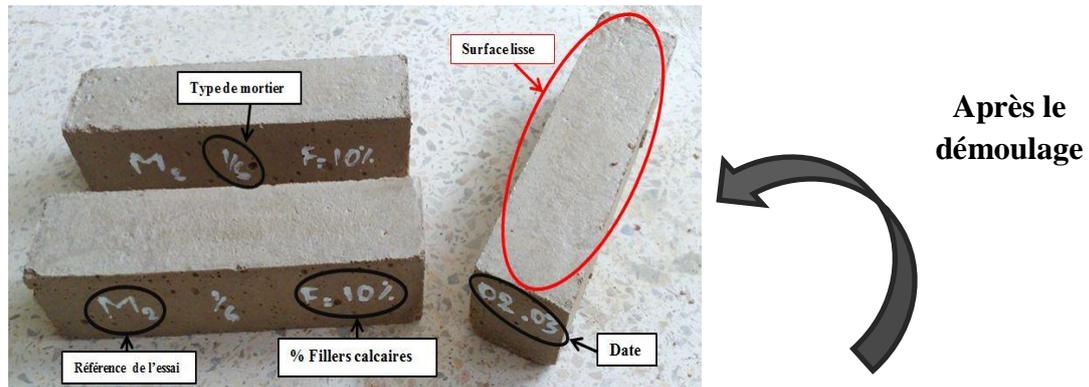
Consistance	E_g/L	E_g/L	S=1500g (1V)
Type de Mortier	1/4	1/6	
m_0	0.90	1.18	
$m_{0.05}$	0.93	1.18	
$m_{0.10}$	0.85	1.16	
$m_{0.15}$	0.84	1.14	
$m_{0.20}$	0.80	1.21	
$m_{0.25}$	0.87	1.28	

La demande en eau est plus grande dans le mortier 1 : 6 sans ajout par rapport au 1 : 4 à cause de la quantité élevée de sable. le besoin en eau augmente au fur et à mesure de l'ajout de fillers surtout dans le $m_{0.20}$ et $m_{0.25}$ dû à la capacité d'absorption des fillers qui présentent une surface spécifique plus importante que le ciment.

b. Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont de forme prismatique de dimension $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier. Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse est fermement fixée à la table à choc. On introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la truelle puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la truelle et serrée à nouveau

par 60 chocs. Dès que le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage (figure 3.16).



Moule prismatique 40x40x160 mm³



Figure 3.16 : La confection des éprouvettes (photos prises par les auteurs).

c. Conservation des éprouvettes :

Après 24 heures, les échantillons sont démoulés et conservés dans un bac d'eau pendant 28 jours (figure 3.17).

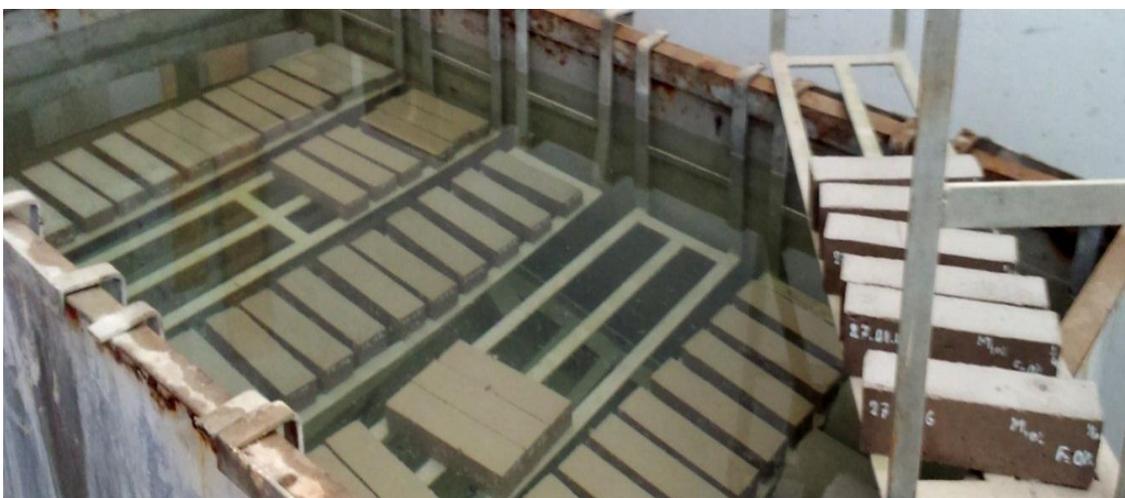


Figure 3.17 : La conservation des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm³ (photo prise par les auteurs).

vi. ESSAIS DE RÉSISTANCES MÉCANIQUES :

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé (type banc d'essai didactique), de charge maximum 160 kN (figure 3.19). Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion sont testées en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40x40 mm².

a. Résistance à la traction par flexion:

On place le prisme dans le dispositif de flexion (figure 3.18) avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à ceux-ci. Nous appliquons une charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme jusqu'à rupture. Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression.

La résistance en flexion R_f est calculée à l'aide de la formule 3.4 :

$$R_f = \frac{1.5 P l}{b^3} \quad (3.4)$$

Où :

R_f : résistance en flexion, en MPa.

b : côté de la section carrée du prisme, en mm.

F_f : charge appliquée au milieu du prisme jusqu'à la rupture, en N.

l : distance entre les appuis, en mm.

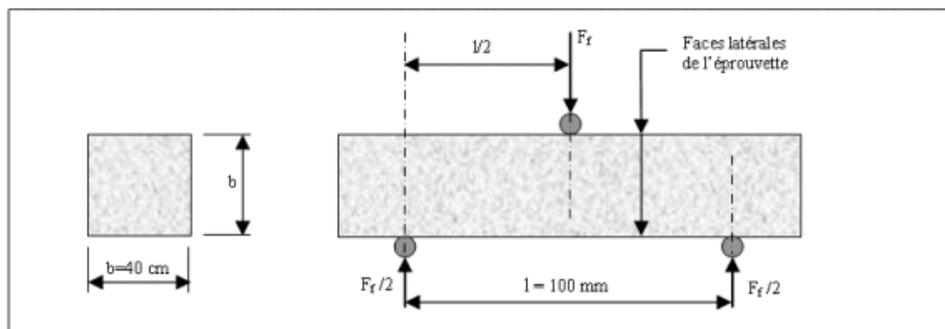


Figure 3.18 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

[DUPAIN et Coll. 2000].

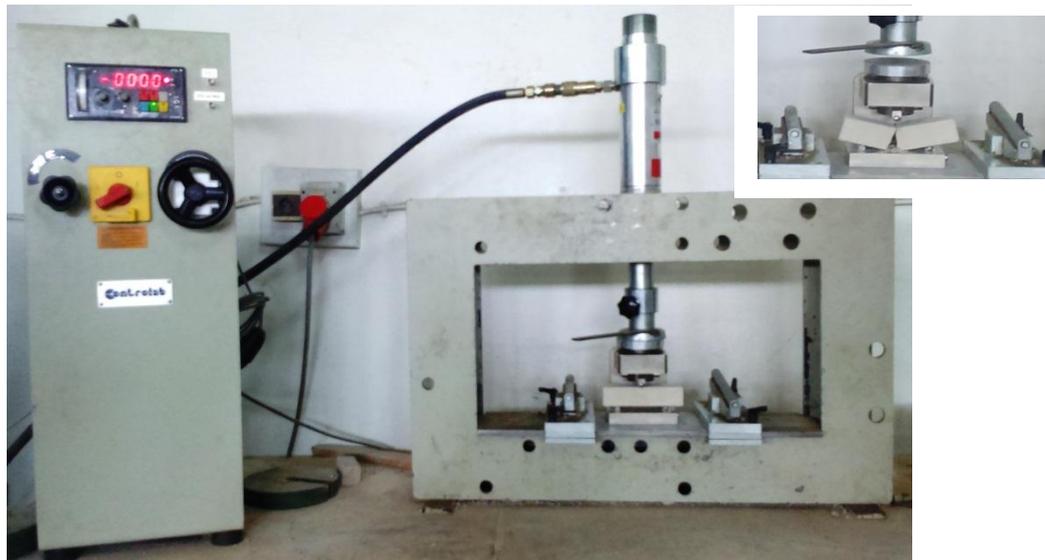


Figure 3.19 : L'essai de résistance à la flexion à l'aide du banc d'essai didactique (photo prise par les auteurs).

- Résistance à la compression :

On commence par centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm (figure 3.20). On augmente la charge avec une vitesse constante durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (figure 3.21).

La résistance en compression σ_c est calculée à partir de la formule 3.5 :

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

σ_c : résistance à la compression, en MPa.

F_c : charge de rupture, en N.

b : côté de la section carrée de l'éprouvette, est égale à 40 mm.

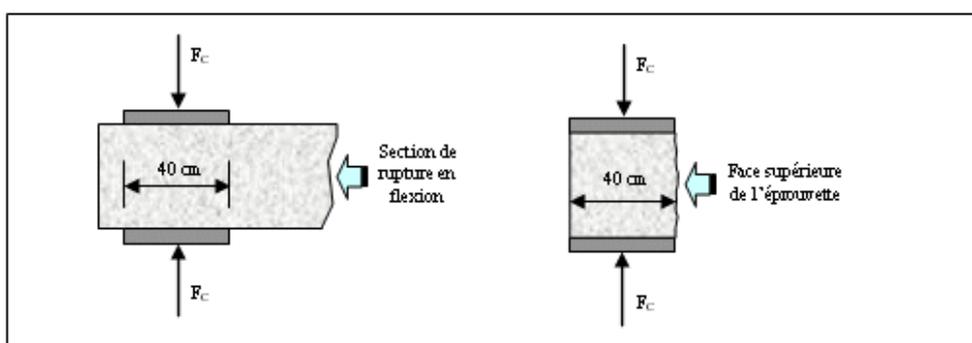


Figure 3.20 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression [DUPAIN et Coll. 2000].



Figure 3.21 : L'essai de résistance à la compression à l'aide du banc d'essai didactique (photo prise par les auteurs).

Les résultats obtenus sont la moyenne de 3 échantillons, ils sont regroupés dans le tableau 3.9 :

Tableau 3.9 : Les résultats des mortiers testés à consistance normale.

% des fillers calcaires	Mortier	(1 : 4)		(1 : 6)	
		R_T (MPa)	σ_c (MPa)	R_T (MPa)	σ_c (MPa)
F=0	m₀	1.97	20.02	1.30	10.78
F=5	m_{0,05}	2.21	20.67	0.93	10.26
F=10	m_{0,10}	1.83	18.63	0.50	8.08
F=15	m_{0,15}	1.43	19.03	0.63	6.88
F=20	m_{0,20}	1.80	16.56	0.73	8.22
F=25	m_{0,25}	1.37	15.40	0.60	7.03

m₀ : mortier témoin.

La résistance à la compression après une cure de 28jours montre que cette dernière diminue.

3.3. PROGRAMME DES ESSAIS SUR LES MURETS :

3.3.1. INTRODUCTION :

Notre programme expérimental est résumé par la figure 3.22. La confection de tous les murets est faite selon les règles de l'art.

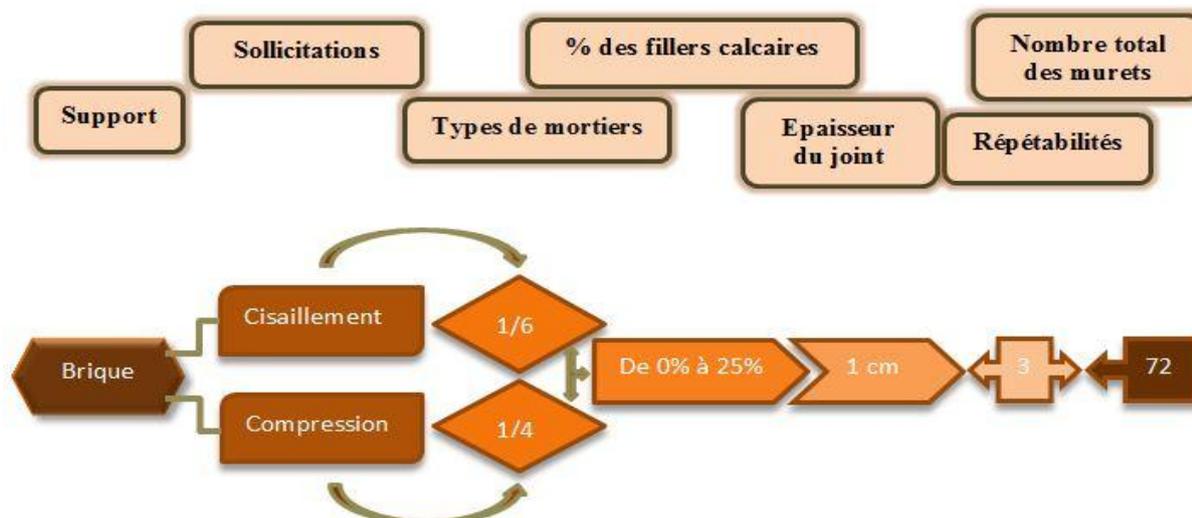


Figure 3.22 : Programme des essais sur les murets.

3.3.2. NATURE DES MURETS TESTS :

- La géométrie des murets :

Pour les besoins de notre étude expérimentale, nous avons confectionnés 36 murets en briques de terre cuite creuse de $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$ pour tester le comportement de la maçonnerie vis-à-vis du cisaillement au niveau de laboratoire de structures à la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen (figure 3.23). De la même manière, nous avons confectionné 36 murets en briques de terre cuite creuse de $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$ dans le cas de la compression (figure 3.24).

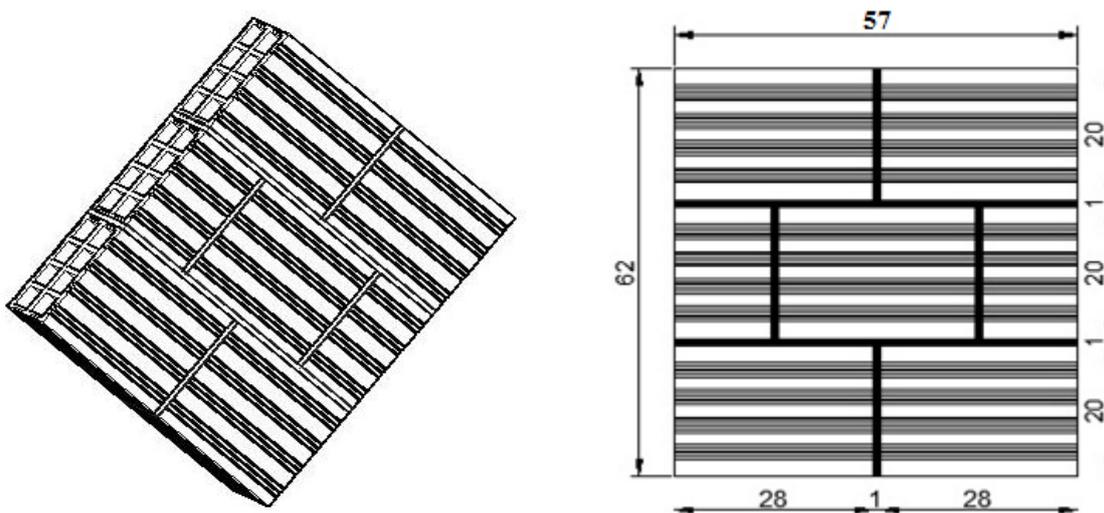


Figure 3.23 : Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$.

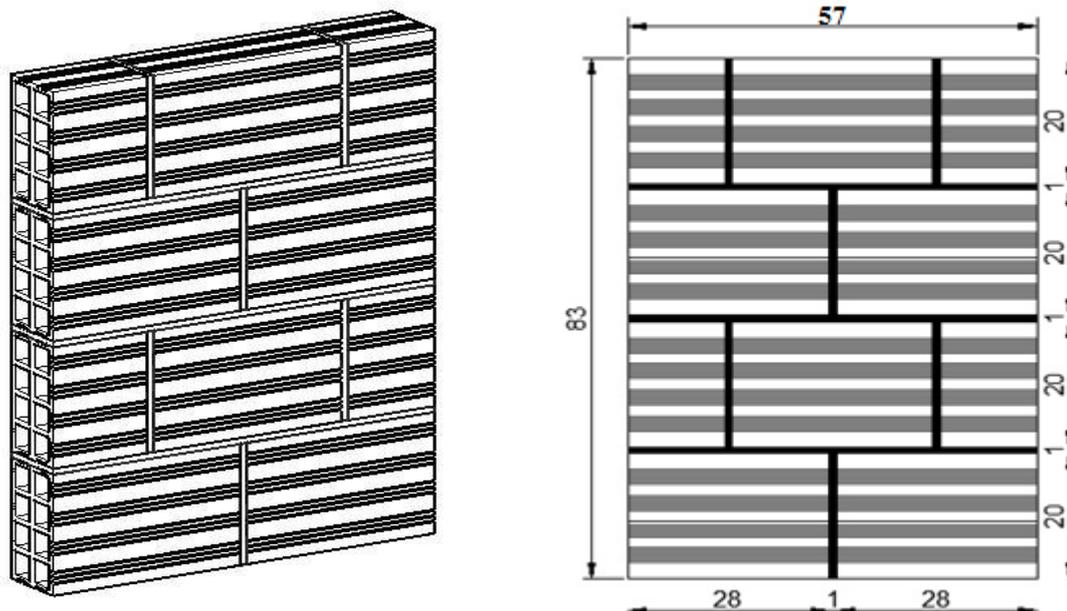


Figure 3.24 : Géométrie des murets en briques de terre cuite creuses: $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$.

3.4. CONFECTION DES MURETS :

3.4.1. Matériel utilisé :

La maçonnerie a pour vocation principale de permettre le positionnement et l'élévation des murs « à la main », on entend par ces propos que l'outillage lourd n'est pas nécessaire à l'élaboration de la maçonnerie [SEMLALI et JEROME 2008].

Nous avons besoins de (figure 3.25 à figure 3.27) :



Figure 3.25 : Outils utilisés pour la construction des murets

(photo prise par les auteurs).



Figure 3.26 : Scie à béton.



Figure 3.27 : Transpalette.

(photos prises par les auteurs)

3.4.2. Méthodologie de la confection des murets :

Pour assurer l'aplomb et l'alignement correct du mur, un temps était nécessaire pour réaliser cette opération ; environ 25 à 30 mn par muret. Certaines règles devaient être respectées :

- Découper les briques au laboratoire à l'aide de la scie à béton (figure 3.26).
- Humidifier préalablement l'auge et aussi les briques sur tous les côtés pour éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie.
- Poser le dispositif de bois pour délimiter à l'aide du niveau à bulle les lignes horizontale et verticale de montage des briques, qui seront nos points de repère pour la confection des murets (figure 3.28).
- Placer le fil avant la disposition des briques creuses en maçonnerie (figure 3.30).
- Mélanger le sable, ciment et fillers calcaire à sec ensuite on ajoute la quantité d'eau pesée (figure 3.29).
- Poser les premières briques (figure 3.30) et appliquer une couche de mortier entre les deux boutisses à l'aide de la truelle de façon qu'elle remplisse largement l'espace, on utilise des gabarits pour obtenir des joints verticaux de largeur égale entre les briques, jusqu'à ce que ce dernier ne fasse plus qu'1 cm d'épaisseur (figure 3.31).
- Etaler ensuite un lit de mortier sur la zone de pose (figure 3.31), à l'aide d'un gabarit en bois de 1cm d'épaisseur en fixant ainsi les dimensions du joint.
- Posez les briques suivantes selon la même technique. Il faut aligner chacune d'entre elles sur le fils et sur sa voisine. Utilisez le niveau à bulles pour contrôler cette horizontalité (figure 3.32).
- Tapoter le dessus de la brique avec le maillet (figure 3.32) pour enfoncer plus ou moins chaque élément dans le mortier et l'ajuster à la hauteur du fil pour avoir la bonne

épaisseur du joint (figure 3.33 et figure 3.35). A chaque rangée, enlevez le surplus de mortier à l'aide de la truelle et vérifiez immédiatement avec le niveau à bulle l'ajustement des briques.

- Vérifier la planéité du mur à l'aide du fil à plomb et du niveau à bulle (figure 3.34).
- Confection des éprouvettes de mortier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec celui préparé pour notre gâchée.
- Après 24 heures, effectuer un surfacage avec un mortier en ciment 1 : 2.
- Après de 7 jours, les murets sont ensuite transportés et stockés pour toute la durée de la cure.
- L'écrasement est effectué après 28 jours de cure aux conditions du laboratoire.



Figure 3.28 : Dispositif de l'essai pour la confection des murets
(photos prises par les auteurs).



Figure 3.29 : Mélange à sec du mortier (photos prises par les auteurs).

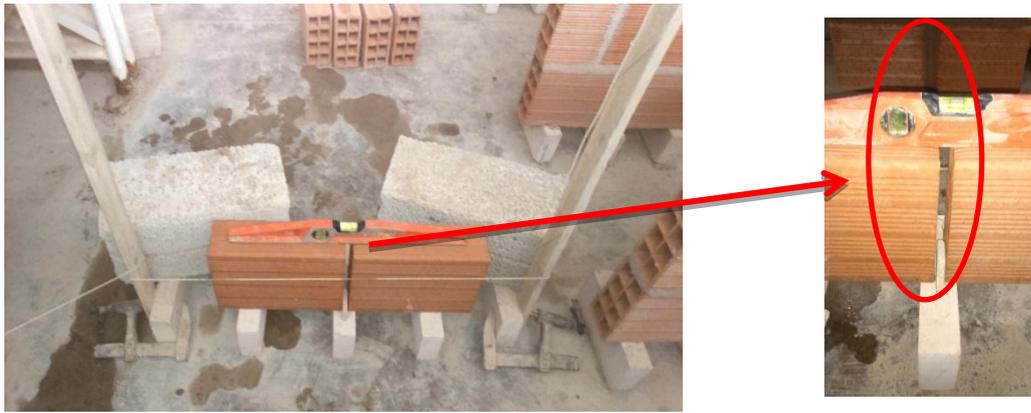


Figure 3.30 : Pose des premières briques en respectant l'épaisseur des joints.



Figure 3.31 : Remplissage des joints verticaux ensuite l'étalement de la première couche du mortier.

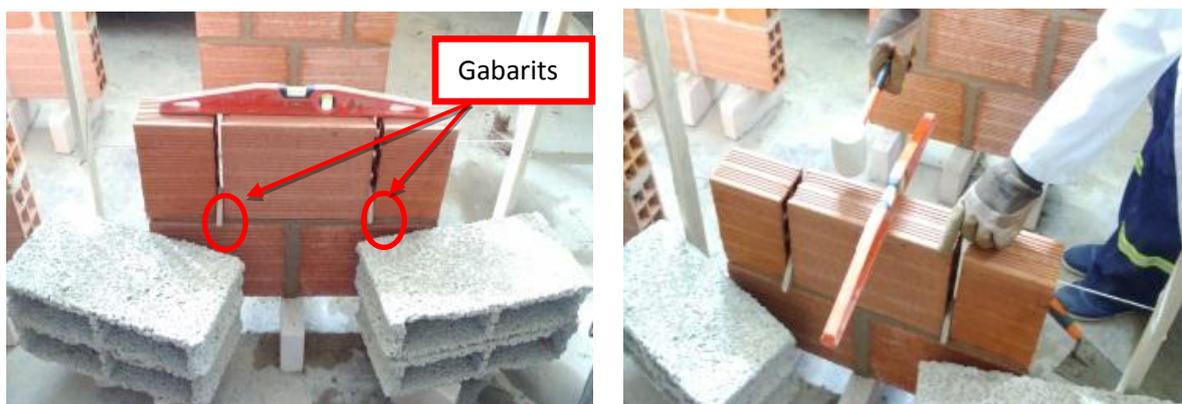


Figure 3.32 : Pose des briques selon la même technique en tapotant le dessus de la brique avec le maillet tout en l'ajustant à la hauteur du fil.

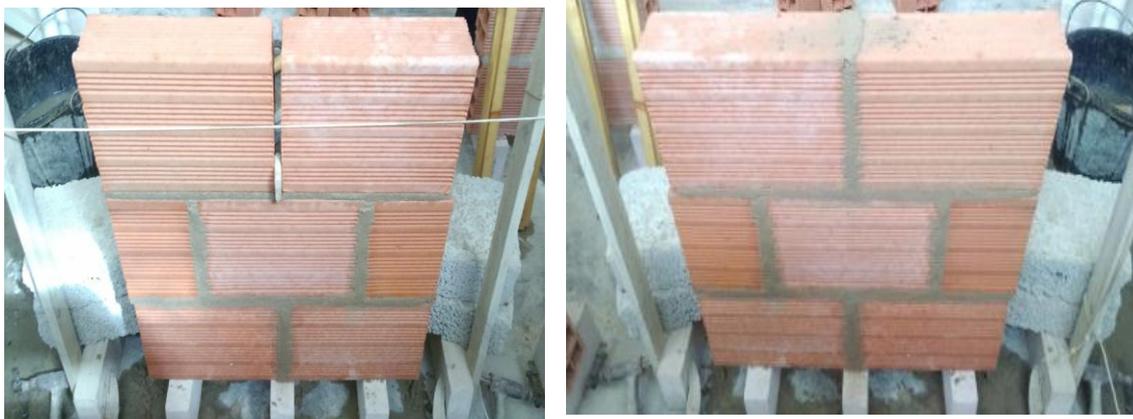


Figure 3.33 : Confection d'un muret de cisaillement de dimensions $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$.



Figure 3.34 : Vérification de la planéité à l'aide d'un fil à plomb et du niveau à bulle.

Les mêmes opérations sont répétées, pour les autres murs, sauf pour les murets testés à la compression, les dimensions changent de $60 \times 60 \times 09 \text{ cm}^3$ à $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$, c'est-à-dire que nous rajoutons une rangée, selon les mêmes techniques (figure 3.35).



Figure 3.35 : Confection d'un muret de compression de dimensions $60 \times 80 \times 09 \text{ cm}^3$ selon les mêmes techniques (photos prises par les auteurs).

Surfaçage des murets :

Lors des essais d'écrasement les murs de cisaillement se placent en diagonale dans les sabots en acier, pour cela on a surfacé les coins des murets (figure 3.36). Le mortier de surfaçage utilisé est un mortier de ciment (1 : 2).

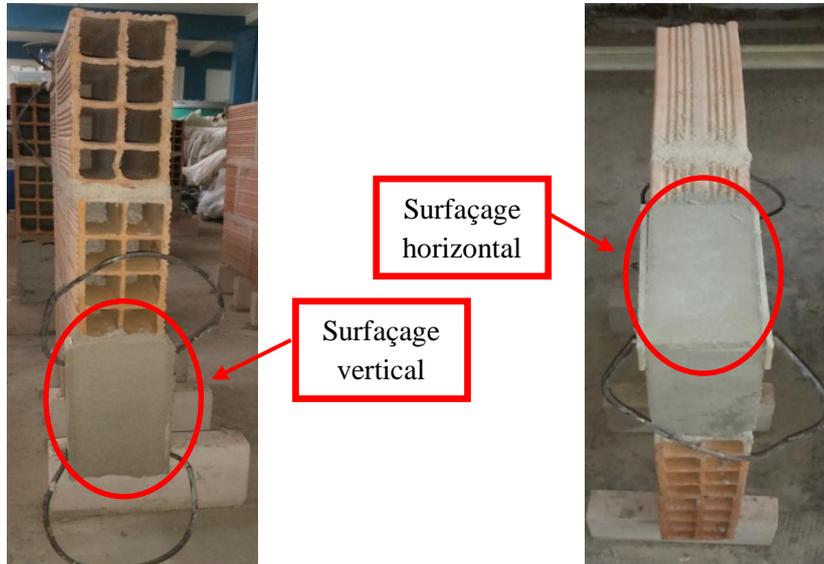


Figure 3.36 : Surfaçage d'un muret de cisaillement (photos prises par les auteurs).

De la même manière, on a surfacé les deux faces des murets de compression (figure 3.37).

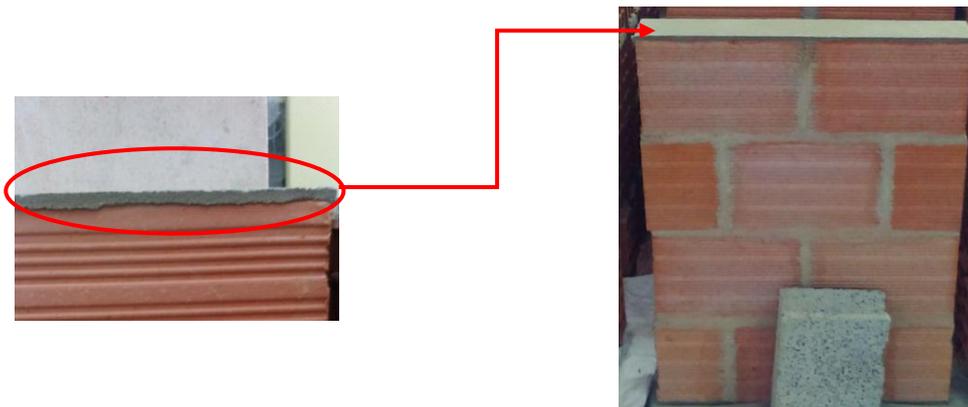


Figure 3.37 : Surfaçage d'un muret de compression (photos prises par les auteurs).

Pour chaque paramètre, nous avons réalisé des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ du mortier fabriqué lors de chaque gâchée. Les résultats obtenus sont la moyenne de 3 échantillons, ils sont regroupés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Résultats du mortier après confection des murets.

% des fillers calcaires	Mortier	(1 : 4)		(1 : 6)	
		R _T (MPa)	σ _c (MPa)	R _T (MPa)	σ _c (MPa)
F=0	m _{1,0}	1.47	15.22	0.77	9.83
	m _{2,0}	2.30	19.96	0.86	10.98
F=5	m _{1,05}	1.30	15.27	1.05	11.72
	m _{2,05}	2.97	20.83	1.10	10.47
F=10	m _{1,10}	1.10	11.78	1.30	10.50
	m _{2,10}	2.27	20.43	1.35	8.69
F=15	m _{1,15}	1.27	13.80	0.63	9.01
	m _{2,15}	1.90	16.77	1.05	7.88
F=20	m _{1,20}	1.30	13.10	0.80	7.62
	m _{2,20}	1.73	14.73	0.68	7.62
F=25	m _{1,25}	0.80	11.78	0.95	6.94
	m _{2,25}	1.53	13.07	0.80	6.79

m₁ : mortier utilisé pour la confection des murets testés en compression diagonale.
m₂ : mortier utilisé pour la confection des murets de compression.

Dans ce tableau nous remarquons que la résistance du mortier a chuté par rapport à ceux mélangés à l'aide d'un malaxeur de la figure 3.15 (tableau 3.9). Ces mortiers ont été prélevés des gâchées confectionnées à la bétonnière dont le mode de malaxage aère les mélanges.

Bien que le choix des briques a été fait par nos soins, ceci n'a pas empêché d'y trouver certains défauts (figure 3.38), comme :

- Alvéoles fissurées.
- Discontinuité dans la paroi.
- Fissures au niveau de la panneresse et la zone de pose.
- Fissures intérieures.

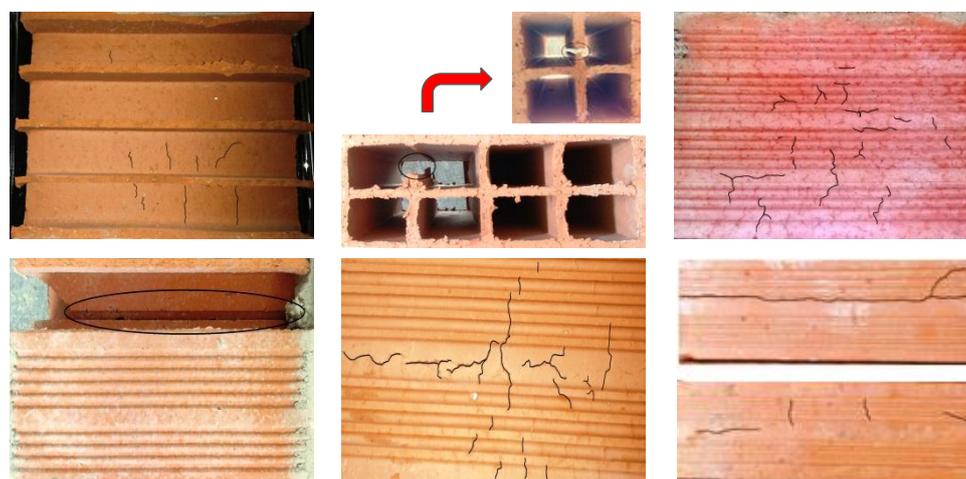


Figure 3.38 : Quelques défauts des briques utilisées
(photo prise par les auteurs).

Après 7 jours selon la norme ASTM E 519-02, les murs testés seront déplacés et stockés pendant 28 jours de cure selon les conditions du laboratoire à une température moyenne de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ (figure 3.39 et figure 3.40).



Figure 3.39 : Cure et stockage des murets soumis au cisaillement, finis et prêts à l'écrasement.



Figure 3.40 : Cure et stockage des murets soumis à la compression, finis et prêts à l'écrasement.

3.5. DISPOSITIF DES ESSAIS :

Une presse pilotée par ordinateur a été utilisée pour la réalisation des essais (figure 3.41), comprenant :

- Un portique de 1.5 m x 1.7 m,
- Un vérin de 160 kN de capacité,
- Un système hydraulique,
- Un système d'acquisition des données,
- Sabots (semelles) de transmission des charges,
- Capteur de déplacement vertical,
- Un ordinateur pentium II,
- Un logiciel pour le traitement des données,
- Une barre de transmission des charges.

3.5.1. ESSAI DE CISAILLEMENT :

3.5.1.1. Principe de l'essai :

Le mur (figure 3.42) est placé en diagonale dans les sabots en acier. Ces derniers permettent la transmission de la charge au mur. La mesure des déplacements est effectuée à l'aide du capteur de déplacements qui est installé au-dessus du mur.

L'ensemble des données, forces et déplacements, sont enregistrés automatiquement par un système d'acquisition des données. Les déplacements horizontaux sont déterminés manuellement par un capteur de déplacement. La mesure de pression, faite à l'aide d'un capteur de pression, permet de déterminer la charge appliquée par le vérin.

3.5.1.2. Dispositif d'essai :

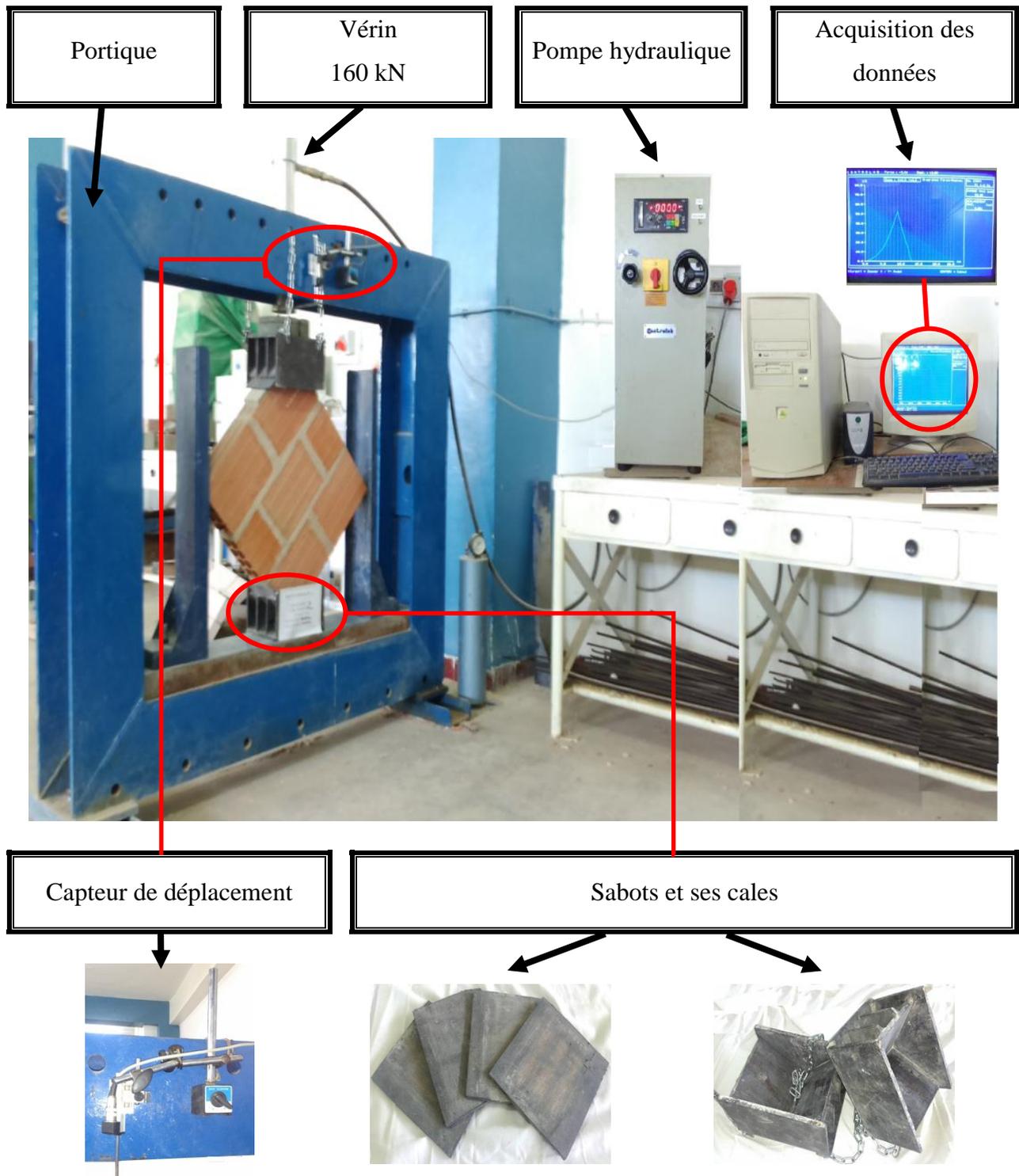


Figure 3.41 : Banc didactique pour l'essai de cisaillement
(photo prise par les auteurs).

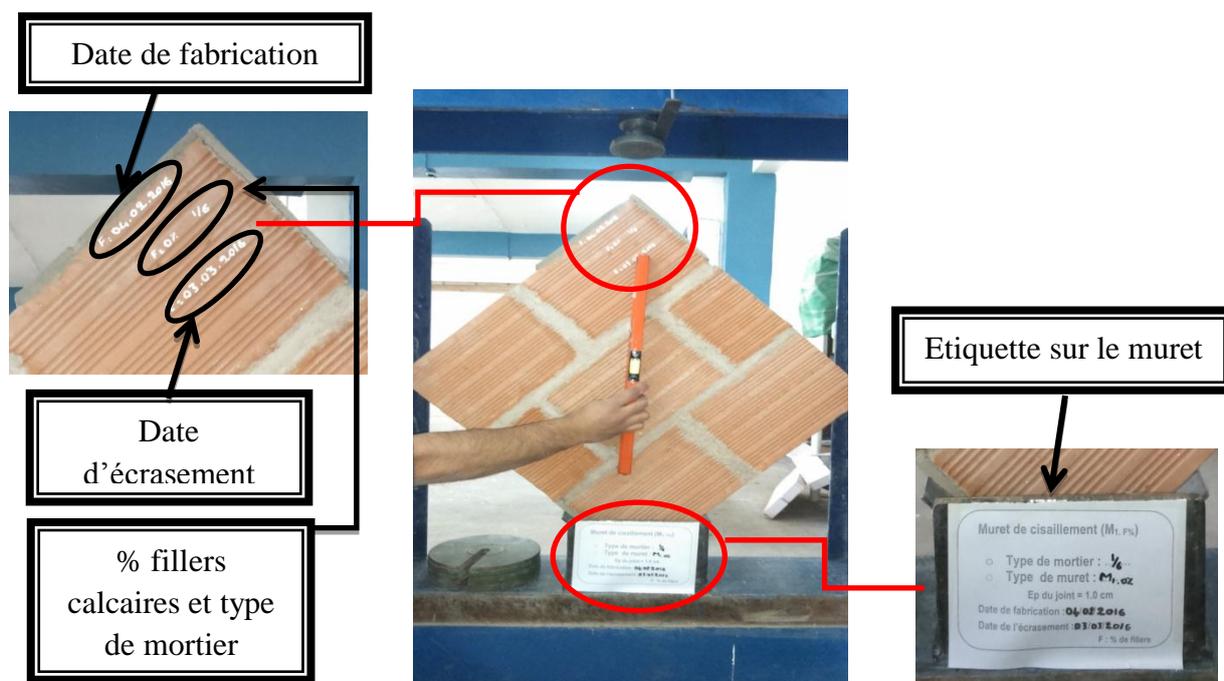


Figure 3.42 : Référence de chaque muret (photo prise par les auteurs).

3.5.2. ESSAI DE COMPRESSION :

3.5.2.1. Principe de l'essai :

Les efforts sont transmis par des barres de transmissions (figure 3.44). Des plaquettes d'appui assurent une meilleure distribution des efforts sans aucune excentricité.

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

La sollicitation est exercée suivant des paliers de pression d'une valeur moyenne de 2 kN/s jusqu'à la rupture.

3.5.2.2. Dispositif d'essai :

Le dispositif de l'essai (figure 3.43) est le même que celui utilisé pour le cisaillement, on y ajoutant les barre de transmissions de charges (figure 3.44).



Figure 3.43 : Banc didactique pour l'essai de compression.



Figure 3.44 : Barres de transmission des charges
(photos prises par les auteurs).

3.5.3. ESSAI DE CISAILLEMENT SUR DES TRIPLETS :

L'objectif consiste à déterminer expérimentalement la contrainte de cisaillement avec une contrainte de compression nulle (f_{vk0} ou τ_0) selon EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB en vue de déterminer la contrainte de cisaillement τ ou f_{vk} (selon la formule 2.8). A cet effet nous avons réalisé douze triplets avec deux types de mortier 1 : 4 et 1 : 6.

3.5.3.1. Principe de l'essai :

3 blocs en brique ont été jointoyés avec les 2 mortiers utilisés dans notre étude (1/4, 1/6) sous forme d'un triplet. Après 28 jours de cure (figure 3.45), nous avons testé le triplet en utilisant la machine universelle de traction de charge maximale 600 kN (figure 3.46) qui consiste à placer une plaque métallique de 10 mm d'épaisseur sous les deux moitiés externes et deux

plaques (figure 3.47) sur la pièce du milieu en séparant ces dernières par 2 barres de diamètre de 12 mm.



Figure 3.45 : Cure et stockage des triplets finis et prêts à l'écrasement (photo prise par les auteurs).

3.5.3.2. Dispositif d'essai :



Figure 3.46 : L'essai de résistance au cisaillement à l'aide de la machine universelle de traction (photo prise par les auteurs).

3.6. CONCLUSION :

La confection des murets ainsi que la caractérisation de leurs matériaux constitutifs ont été réalisées selon les règles de l'art en suivant les normes en vigueur.

L'interprétation des essais et leur comparaison avec d'autres travaux réalisés dans ce domaine seront décrites dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1. INTRODUCTION :

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les différents résultats trouvés des tests effectués sur les murets en brique creuse de terre cuite, construits avec un mortier aux fillers calcaires avec un joint horizontal et vertical de 1 cm sous chargement de compression et de cisaillement. Nous montrons l'influence de ces additions sur la résistance de la maçonnerie et les modes de rupture observés.

4.2. RÉSULTATS DES MURETS TESTS SOUS SOLLICITATIONS DE CISAILLEMENT :

4.2.1. CALCUL DE LA RÉSISTANCE :

Nous rappelons que la valeur de la contrainte de cisaillement τ , donnée précédemment par la formule 2.7 selon la norme ASTM E 519 – 02, est la valeur moyenne du rapport de la force en MPa sur la surface nette A_n (formule 2.8) de l'échantillon en mm^2 ; n étant le pourcentage de la superficie brute de l'unité exprimée sous forme décimale, dans notre cas $n = 0.53$ pour les briques de terre cuite creuses.

Pour le module de rigidité G (formule 2.9), c'est la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement $\tau_{1/3}$ correspondant au tiers de la charge maximale en MPa sur la déformation tangentielle $\gamma_{1/3}$ correspondante (formule 2.10), où l est la valeur moyenne des diagonales en mm.

4.2.2. RÉSISTANCE DES MURETS TESTS :

Nous présentons dans le tableau récapitulatif 4.1, les résultats des résistances de cisaillement τ , égales à la moyenne des résistances de trois murets avec variation de la quantité des fillers calcaires de 0 à 25% par un palier de 5% pour les deux types de mortier ainsi que la valeur moyenne du module de rigidité.

Le détail relatif aux forces de ruptures mesurées et les déplacements accusés par les murets lors des tests, sont présentés en Annexe 3.

Tableau 4.1 : Résultats de la résistance au cisaillement des murets tests.

% des fillers calcaires	Muret	Mortier 1 : 4				Mortier 1 : 6			
		τ_{moy} (MPa)	Ecart type	taux de variation (%)	G_{moy} (MPa)	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	taux de variation (%)	G_{moy} (MPa)
0	M _{1.0}	1.51	0.25	/	158.8	1.41	0.18	/	143.3
05	M _{1.05}	1.68	0.18	+10.92%	171.9	1.52	0.05	+7.86%	163.5
10	M _{1.10}	1.58	0.01	+4.47%	179.4	1.57	0.06	+10.97	146.1
15	M _{1.15}	1.51	0.15	+0.01%	192.8	1.42	0.12	+0.33%	124.7
20	M _{1.20}	1.38	0.18	-8.49%	177.3	1.33	0.04	-5.60%	91.43
25	M _{1.25}	1.25	0.18	-17.33%	180.8	1.25	0.10	-11.77%	108.7

4.2.3. INFLUENCE DES POURCENTAGES DES FILLERS SUR LA RÉSISTANCE DES MURETS :

Il s'agit de murets constitués de deux matériaux dont le comportement mécanique est différent. Nous avons mis en exergue (dans le chapitre 3), le fait que les briques utilisées comme support, présentent des résistances moyennes à la compression de l'ordre de 2.5 MPa. Quant aux mortiers étudiés, les résistances les plus faibles (correspondant au taux de substitution le plus important, i.e 25%) sont environ trois (3) fois plus élevées par rapport aux briques.

Bien que les résistances à la compression des mortiers seuls diminuent au fur et à mesure que l'on substitue le ciment portland par un taux de filler calcaire ; néanmoins les murets montrent une légère augmentation de la résistance pour les taux de substitution les plus faibles : 5% pour le mortier 1 : 4 et 10% pour le mortier 1 : 6 (figure 4.1).

Des travaux sur la microstructure des interfaces support/liant restent à réaliser pour comprendre le phénomène de manière globale.

Nous retenons à ce stade que la résistance optimale des murets tests pour les deux types de mortier est proche et ne dépasse guère les 10%. La faiblesse de cet écart entre les deux mortiers réside principalement dans la résistance du mortier qui est largement supérieure à celle de la brique utilisée (tableau 3.2 et 3.9) et qui cède la première (maillon faible).

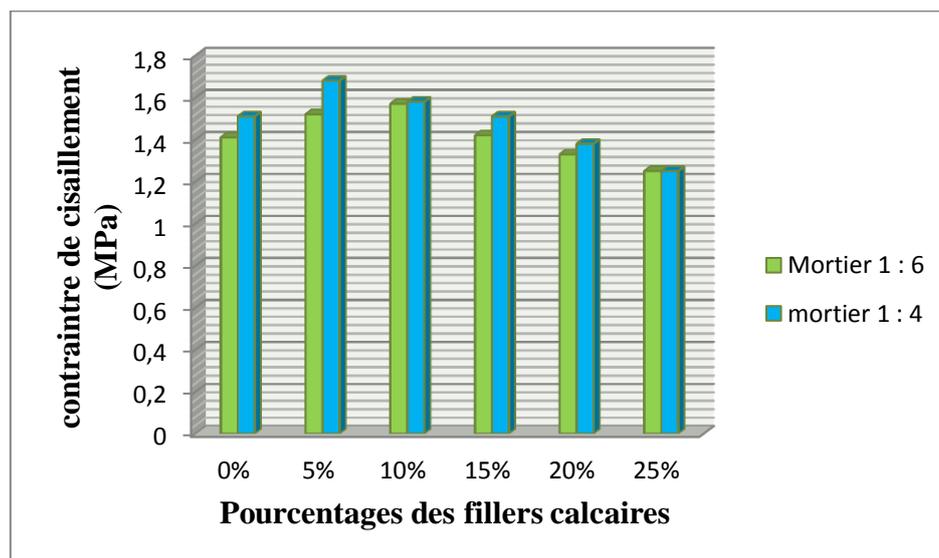


Figure 4.1 : Influence des fillers calcaires sur la contrainte de cisaillement.

4.2.4. ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSISTANCES AVEC L'EUROCODE 6 ET LE DTR DU CNERIB :

Le tableau 4.2, représente la résistance au cisaillement de la maçonnerie non armé f_{vk} calculée par la formule 2.11 selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB :

Tableau 4.2 : Comparaison des résistances au cisaillement avec l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB.

% des fillers calcaires	Muret	Mortier 1 : 4		Mortier 1 : 6	
		τ_{moy} expérimentale (MPa)	f_{vk} ou τ (MPa)	τ_{moy} expérimentale (MPa)	f_{vk} ou τ (MPa)
0	M _{1,0}	1.51	1,13	1.41	0,91
5	M _{1,05}	1.68	1,08	1.52	0,8
10	M _{1,10}	1,58	0,98	1.57	0,85
15	M _{1,15}	1.51	0,97	1.42	0,79
20	M _{1,20}	1.38	1,01	1.33	0,78
25	M _{1,25}	1.25	1,18	1.25	0,67

Au vu des résultats expérimentaux, la résistance au cisaillement proposée par l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB sont sous-estimées.

4.2.5. MODE DE RUPTURE :

Au cours de l'opération de l'écrasement des murets, plusieurs modes de ruptures ont été recensés. Les murets jointoyés avec les deux types de mortier (1 : 4 et 1 : 6), présentent généralement une rupture brutale et leurs modes sont presque identiques dans tous les murets :

- Le premier type de fissure obtenue est le « coup de sabre » (figure 4.2), formation des fissures qui se propagent le long de la diagonale dans les joints et les briques.
- Le deuxième type apparait dans l'éclatement des zones d'appuis de la brique (figures 4.3 et 4.4), ce sont les pièces qui ont cédées en premier avant le mortier.
- Le troisième mode de rupture est en « dents de scie » sous forme d'escaliers (figure 4.2) avec décollement au niveau du joint (figure 4.5).
- En dernier, un net glissement (figure 4.6) au niveau des lits-joints de la partie supérieure du muret.

Ces modes de ruptures sont comparables avec ceux des travaux effectués par GABOR [GABOR et Coll. 2005], TOMAZEVIC [TOMAZEVIC 2008] et CODY [CODY et Coll. 2008].



Figure 4.2 : Rupture en coup de sabre.

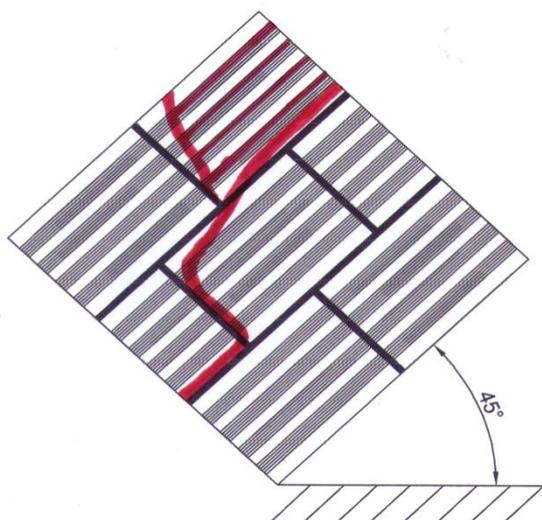


Figure 4.3 : Eclatement en haut du muret.

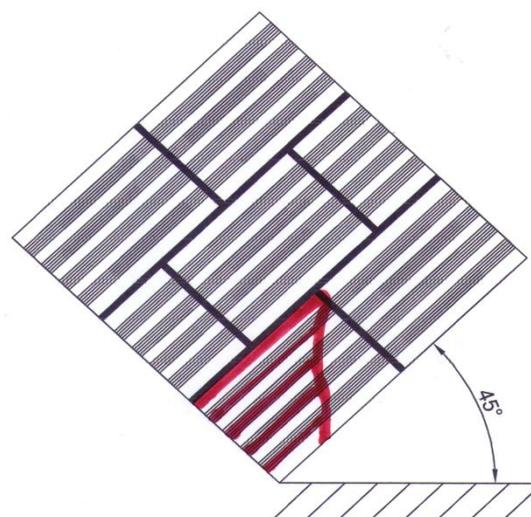


Figure 4.4 : Eclatement au pied du muret.

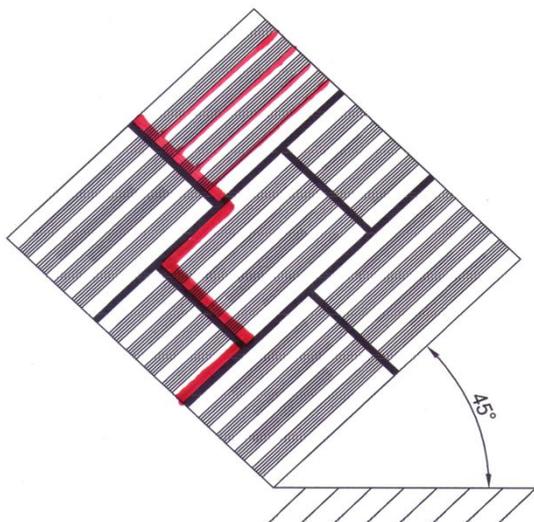


Figure 4.5 : Rupture en dents de scie.

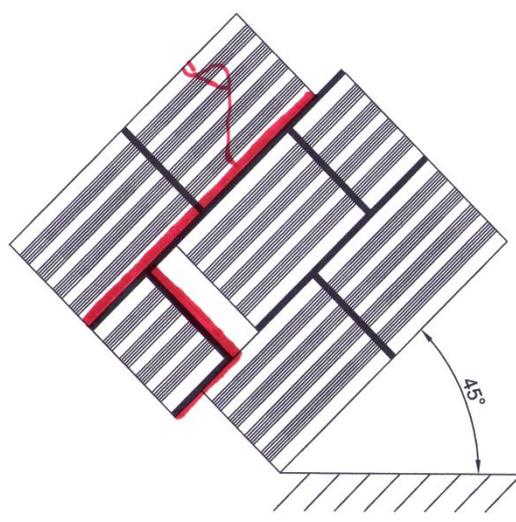


Figure 4.6 : Décollement au niveau du joint.

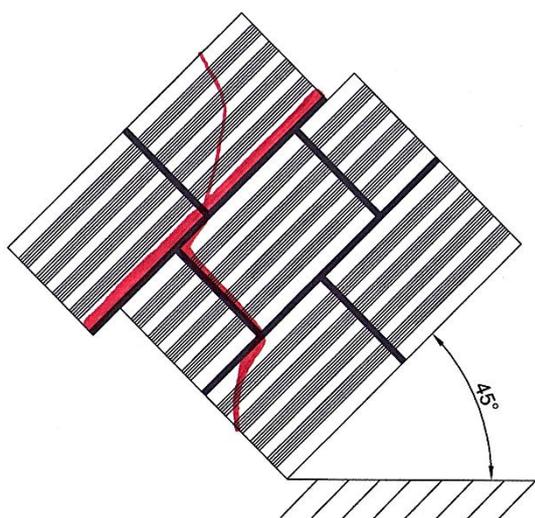


Figure 4.7 : Rupture par glissement.

4.3. ESSAI DE CISAILLEMENT D'UN TRIPLET DE BRIQUE :

Le calcul de la résistance aux avec une contrainte de compression nulle (f_{vko} ou τ_0) est fait par la formule 2.12, selon l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB.

On applique une charge de 600 kN sur des triplets jusqu'à la rupture (figure 4.8). Nous présentons les résultats moyens obtenus sur six pièces, ils sont regroupés dans le tableau 4.3.

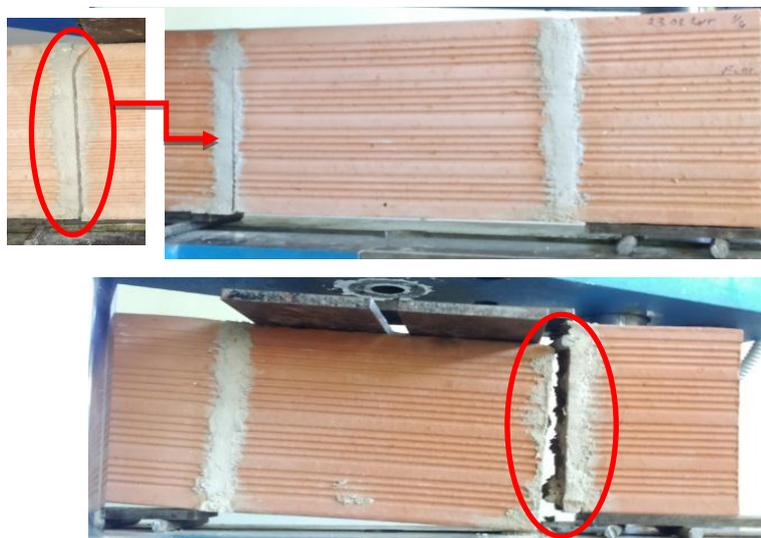


Figure 4.8 : Mode de rupture des triplets hourdés au mortier 1:4 et 1:6.

Tableau 4.3 : Résultats expérimental des résistances au cisaillement τ_0 .

% des fillers calcaires	Mortier 1 : 4			Mortier 1 : 6		
	τ_0 (MPa)	τ_0 moy	Ecart type	τ_0 (MPa)	τ_0 moy	Ecart type
0	0,29	0,26	0,10	0.11	0.09	0.05
05	0,39			0.17		
10	0,33			0.11		
15	0,24			0.08		
20	0,21			0.07		
25	0,10			0.01		

Les valeurs caractéristiques expérimentales trouvées sont compatibles, en comparant nos résultats trouvés dans le tableau (4.2) avec ceux des travaux effectués par TOMAZEVIC [TOMAZEVIC 2008]. Les résultats obtenus dans le cadre de notre programme expérimental répondent aux exigences recommandées par l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB (tableau 2.1 et 2.2).

4.4. RÉSULTATS DES MURETS SOUS SOLLICITATIONS DE COMPRESSION :

4.4.1. CALCUL DE LA RÉSISTANCE :

La résistance à la compression du muret est calculée en utilisant la formule 2.3 selon le DTR du CNERIB, où σ_c est la résistance moyenne à la compression du muret, en MPa.

Pour le calcul du module de Young E (formule 2.4), c'est la valeur moyenne de la contrainte de compression $\sigma_{c_{1/3}}$ correspondant au tiers de la charge maximale en MPa sur la déformation longitudinale $\varepsilon_{1/3}$ correspondant au 1/3 de la charge de rupture maximale (formule 2.5).

4.4.2. RÉSISTANCE DES MURETS TESTS :

Nous présentons dans le tableau 4.4, les résultats des résistances à la compression et du module d'élasticité des murets testés. Ces valeurs sont le résultat de la moyenne arithmétique de trois murets. Les forces de ruptures et les déplacements des murets testés, sont présentés en Annexe 3.

Tableau 4.4 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression des murets tests.

% des fillers calcaires	Muret	Mortier 1 : 4				Mortier 1 : 6			
		$\sigma_{C_{moy}}$ (MPa)	Ecart type	Taux de variation (%)	E_{moy} (MPa)	$\sigma_{C_{moy}}$ (MPa)	Ecart type	Taux de variation (%)	E_{moy} (MPa)
0	M _{2.0}	2.18	0.03	/	319.18	2.05	0.44	/	315.66
05	M _{2.05}	2.05	0.38	6.03	146.41	1.77	0.02	13.43	317.88
10	M _{2.10}	1.79	0.07	17.94	218.64	1.89	0.01	7.73	231.12
15	M _{2.15}	1.78	0.08	18.48	181.73	1.74	0.16	15.04	221.99
20	M _{2.20}	<u>1.87</u>	<u>0.05</u>	<u>14.47</u>	<u>158.20</u>	1.72	0.06	15.94	361.61
25	M _{2.25}	<u>2.30</u>	<u>0.15</u>	<u>-5.06</u>	<u>276.15</u>	1.46	0.07	28.58	380.91

L'essai de résistance à la compression concernant les ajouts de 20 et 25 % n'a pas été pris en considération car les briques avec lesquelles les murets ont été construits appartiennent à un autre lot où les résistances sont nettement supérieures à celles du lot utilisé.

4.4.3. INFLUENCE DES POURCENTAGES DES FILLERS SUR LA RÉSISTANCE DES MURETS :

Inversement par rapport au cisaillement la résistance à la compression a chuté proportionnellement à l'augmentation du taux de fillers calcaires substitué. Au cours de l'essai de compression, c'est la brique qui cède en premier lieu (90% des cas de rupture se produisent dans la base ou la partie supérieure des murets), contrairement au cisaillement, la plus part des cas c'est le joint qui cède le premier.

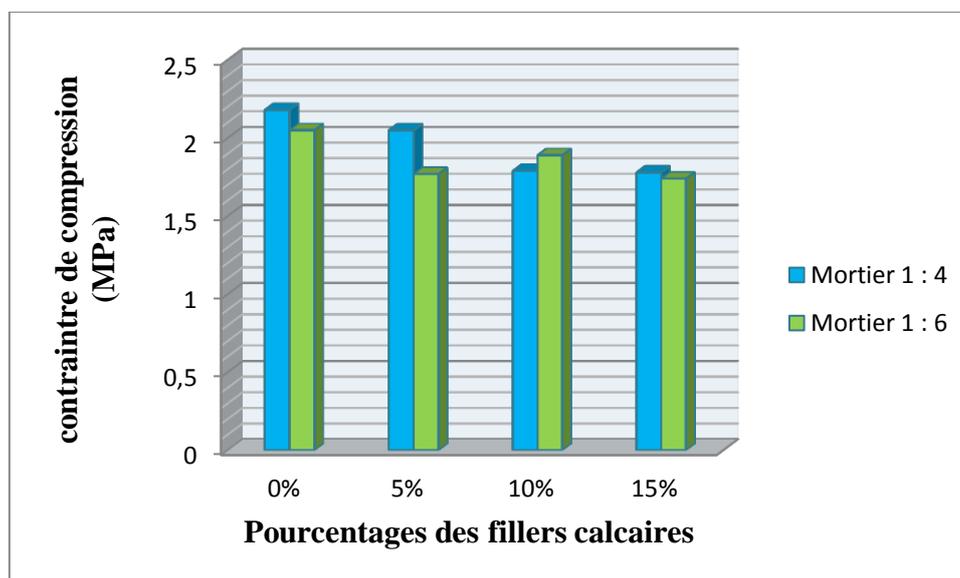


Figure 4.9 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression.

4.4.4. COMPARAISON DES RÉSISTANCES AVEC L'EUROCODE 6 ET LE DTR DU CNERIB :

Le tableau 4.5 représente la résistance à la compression de la maçonnerie non armé F_M et R_M calculé par la formule 2.2 et 2.6 selon les standards de l'EUROCODE 6 et du CNERIB :

Tableau 4.5 : Comparaison des contraintes de compression avec celles de l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB.

% des fillers calcaires	Muret	Mortier 1 : 4			Mortier 1 : 6		
		$\sigma_{C\text{moy}}$ expérimentale (MPa)	F_M (MPa)	R_M (MPa)	$\sigma_{C\text{moy}}$ expérimentale (MPa)	F_M (MPa)	R_M (MPa)
0	M _{2.0}	2.18	1,52	2,72	2.05	1,33	2,23
05	M _{2.05}	2.05	1,54	2,77	1.77	1,3	2,2
10	M _{2.10}	1.79	1,53	2,75	1.89	1,24	2,07
15	M _{2.15}	1.78	1,46	2,57	1.74	1,21	2
20	M _{2.20}	<u>1.87</u>	/	/	1.72	1,2	1,98
25	M _{2.25}	<u>2.30</u>	/	/	1.46	1,16	1,99

F_M est la résistance à la compression de la maçonnerie calculée par la formule 2.2 selon l'EUROCODE 6.

R_M est la résistance moyenne de rupture en compression calculée par la formule 2.6 selon le DTR du CNERIB.

Après analyse, nous constatons que nos résultats se situent à l'intermédiaire entre les recommandations de l'EUROCODE 6 et du CNERIB. Le CNERIB sur estime les valeurs de résistance à l'inverse de l'EUROCODE 6. Ces résultats sont confirmés par les travaux de HOUTI [HOUTI 2002].

4.4.5. MODE DE RUPTURE :

Deux modes de rupture ont été observés :

- La fissure se propage à travers la pièce par traction dans la direction de la charge appliquée « coup de sabre ». Des contraintes de traction induisant la fissure (figure 4.10) sont développées au niveau des interfaces du mortier-support au niveau des joints de lits.
- Eclatement du bloc dans la partie supérieure ou inférieure, ceci démontre le caractère fragile du comportement des briques (figure 4.11 et 4.12).

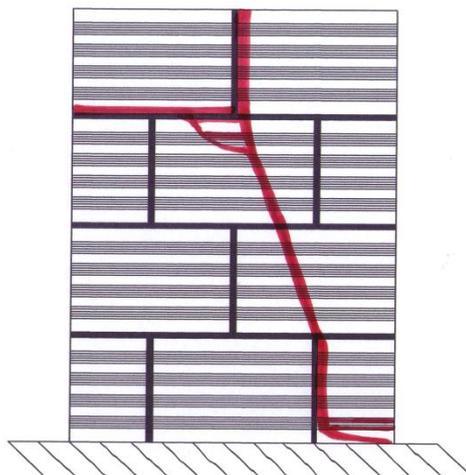


Figure 4.10 : Coup de sabre.

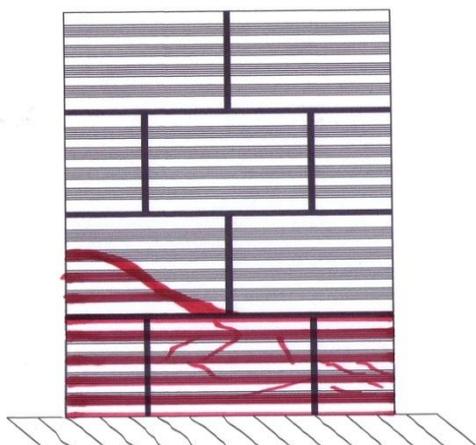


Figure 4.11 : Eclatement de la base du muret.

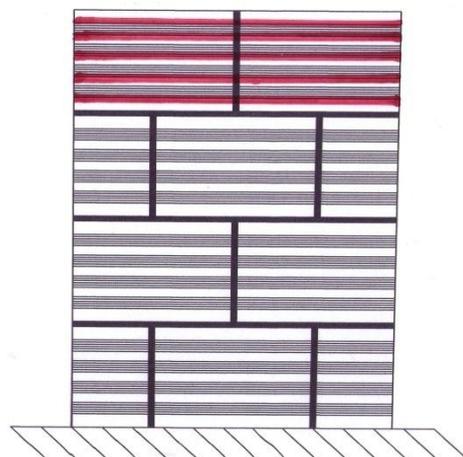


Figure 4.12 : Eclatement de la partie supérieure du muret.

4.5. CONCLUSION :

Nous avons constaté que l'addition de fillers calcaires dans le mortier en substitution au ciment présente deux facettes dans les deux types de chargements.

Pour le premier cas de chargement de cisaillement, les murets construits avec le mortier 1 : 4 atteignent leur résistance au premier seuil c'est-à-dire à 5%. Pour ceux construits avec le mortier 1 : 6 leur résistance progresse à la limite de 10%.

Par contre, pour le chargement sous compression, la résistance mécanique des murets diminue graduellement pour les deux types de mortier.

En concordance avec d'autres travaux, nous avons observé les mêmes modes de ruptures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail expérimental mené au laboratoire de recherche EOLE, s'est appuyé essentiellement sur des essais destinés à caractériser la résistance mécanique de murets en maçonnerie, construits avec un mortier à base de ciment portland et de fillers calcaires. Nous rappelons que l'ensemble des matériaux proviennent de la wilaya de Tlemcen.

En ajustant la quantité de fillers calcaires, nous avons déterminé la résistance mécanique après une cure de 28 jours, et nous avons évalué aussi l'apport de ces fillers et leur incidence sur la résistance des murets. La substitution du ciment par les additions minérales calcaires par progression ascendante, engendre une variation de la résistance des murets. Les enseignements que nous pouvons tirer des résultats obtenus, sont :

- **Cas du cisaillement :**

La résistance à la compression du mortier diminue au fur et à mesure de l'augmentation du taux de substitution des fillers, alors que l'on note une légère augmentation de la résistance des murets au cisaillement pour les taux de substitution les plus faibles, 5% pour le mortier 1 : 4 et 10% pour le mortier 1 : 6. Ce rapprochement dans la résistance des murets pour les deux types de mortier, est dû d'une part aux résistances des deux mortiers qui sont relativement proches et à la faiblesse de la résistance des briques utilisées.

- **Cas de la compression :**

Dans le cas de la résistance à la compression des murets, celle-ci diminue graduellement au fur et à mesure de la substitution du filler.

Pour les modes de rupture, les mêmes ont été observés tout au long des essais que ceux répertoriés dans la bibliographie. Pour les murets soumis au cisaillement, plusieurs cas ont été observés :

- Le mortier et la brique réagissent simultanément à la force et on obtient une rupture en coup de sabre.
- Décollement au niveau du joint.
- Eclatement de la pièce dans les deux coins.

Pour l'essai de compression deux cas ont été constatés :

- Rupture parallèle à l'axe de chargement on obtient une rupture en coup de sabre.
- Eclatement de la pièce dans la partie supérieure ou inférieure.

Ces différences de cas sont dues à l'hétérogénéité dans le comportement des murets en maçonnerie de briques.

• Perspectives :

Les essais effectués dans cette étude ont pris en compte la substitution du ciment par les fillers calcaires. Ceci servirait de base pour d'autres travaux qui seront menés au laboratoire EOLE en considérant d'autres paramètres pour arriver à valoriser ces additions, à l'exemple de :

- Utiliser des briques de diverses usines de la région (à titre comparatif),
- Utiliser d'autres supports à la place de la brique creuse,
- Utiliser des charges d'additions plus fortes (25 à 75% de substitution),
- Utiliser un adjuvant fluidifiant afin d'augmenter la compacité du mortier,
- Utiliser un liant naturel sans ciment portland à base d'amidon,
- Etudier l'incidence de divers mortiers avec une maçonnerie armée, renforcée à l'aide d'armatures (en acier ou autre).

ANNEXES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I. OUVRAGES ET ARTICLES :

BABICS F. et coll., «Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie», France, 2006, 292p., ISBN : 2110946636.

BELHOCINE A., NAGOUDI N., «Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux», Mémoire de Master, 2014, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 79 p.

BOUDCHICHA A., « Action des additions et superplastifiants sur les mortiers et bétons : étude des propriétés rhéologique et mécaniques», Constantine, Algérie, 2007, 266 p., ISBN : 9783841781857.

BOUKLI HACENE S.M., «Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons», Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.

CORRADI M. et coll., «Experimental study on the determination of strength of masonry walls», Construction and Building Materials, Florence, Italy, 2003, 325–337.

CODY K.P., et coll., «Evaluation of ASTM Methods to Determine Splitting Tensile Strength in Concrete, Masonry and Autoclaved Aerated Concrete». In TRIMBLE E.B et BRISCH H.J. «Masonry», ASTM Stock Number: STP1496, USA, 2008, 178 p., ISBN: 9780803134928.

DUPAIN R. et coll., «Granulats, sols, ciments et bétons», caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition Casteilla, France, 2000, 280 p., ISBN : 2713520649.

FOUCHAL F., «Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées», Thèse de Doctorat, 2006, Université des Sciences et de Technologie USTHB, Alger, Algérie, 199 p.

GABOR A. et coll., «Analysis and modeling of the in-plane shear behavior of hollow brick masonry panels», Construction and Building Materials, Lyon, France, 2005, 308–321.

GERTIN Y., «Comportement sismique d'un mur en maçonnerie armée entièrement rempli de coulis», Mémoire de Maîtrise et Sciences Appliquées, 2014, Université Sherbrooke, Québec, Canada, 159 p.

HACHETTE., Dictionnaires généralistes de français, Edit. Hachette live, 2010, 1747 p., ISBN : 9782012814219.

HADDOU H., «Comportement des mortiers a bases d'un ciment portland et ciment composé de Béni-Saf dans un milieu agressif», Mémoire De Master Académique, 2015, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 74 p.

HAMZA C.A et KARA A., « Comportement en cisaillement des murs en maçonnerie », Mémoire de Master, 2014, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, 78 p.

HEMANT B. et coll., « Uniaxial compressive stress–strain model for clay brick masonry », Research Articles, Kanpur, India, 2007, 497–501.

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

LAGIER F., PARRET-F REAUD A., « Les murs en maçonnerie », Eléments de cours, 2006, Lycée du bâtiment & des travaux publics “Saint-Lambert”, France, 36 p.

LAFUENTE M., et Coll., « Etudes analytiques sur le comportement de murs en maçonnerie sous sollicitations latérales monotones », Materials and Structures, Caracas, Venezuela, 1993, 387-394.

MANN W., MULLER H., « Schubtragfähigkeit von gemauerten windnachweises », Berlin: Ernst Sohn. In: Manerwerk-Kalender 10, 1985, 95-114.

MCKENZIE W.M.C. et coll., « Design of Structural Masonry », Palgrave, Napier University, Edinburgh, New York, 2001, 278 p., ISBN: 0333792378.

SEMLALI H., JEROME F., « Maçonnerie », Mémoire de Licence, 2008, Algérie, 90 p.

SHAAN R., « Etude du comportement mécanique de la maçonnerie en briques », Thèse de Doctorat, 1987, Université Lille Flandres Artois, France, 255 p.

TALEB O., « Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux », Mémoire de Magister, 2009, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.

TURATH G. et coll., « Analyse expérimentale du comportement au cisaillement des murs en maçonnerie de pierre renforcés par matériaux composites TRC & NSM FRP », Rencontres universitaires de génie civil, 2015, Université Claude Bernard, Lyon, France., <Hal-01167664>.

TOMAZEVIC M., « Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry », Materials and Structures, 2008, 889–907.

TOMAZEVIC M., « Earthquake-resistant design of masonry buildings », Imperial College Press, Covent Garden, London, 1999, 263 p., ISBN: 1860940668.

II. NORMES ET RÉGLEMENTS :

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

NA 231., “ Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse”, 1989.

NA 442/2001., “Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants”, 2001.

NBN EN 998-2., ”Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie, Partie 2 : mortiers de montage des éléments de maçonnerie”, Bruxelles, NBN, 2010.

NF EN 196-1., ”Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: détermination des résistances mécaniques, Indice de classement”, 2006.

P18-555., “Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables”, 1990.

P18-558., “Détermination de la masse volumique absolue des fines ”,1990.

P 18-541., “Spécifications des granulats”, 1994.

EN 771-1., Spécifications pour éléments de maçonnerie, Partie 1:“Briques de terre cuite, France”, 2011.

EUROCODE 6., Design of masonry structures, Part 1-1:“general rules for buildings Rules for reinforced and unreinforced masonry”, 1996, 128 p.

CNERIB.,” Règles de conception et de calcul des maçonneries”, Document technique réglementaire D.T.R. C2-45, , 2^{ème} édition, 2005, 62 p.

III. SITES CONSULTES SUR INTERNET :

GRANGET.,[consulté en 2016].<http://www.deco-travaux.com/enduits-mortiers/mortier.html>.

LESTUZZI P., «Comportement sismique des structures en maçonnerie», résonance ingénieurs-conseils SA.,[consultée 2016].www.crealp.ch.

BISWAS L.,[consulté en 2016].<http://www.wienerberger.be/fr/fa%C3%A7ade/prescriptions-de-pose/joints>

VARIN F.,[consulté en 2016].[http://mrc.iledorleans.com/stock/fra/conférence maonnerie.pdf](http://mrc.iledorleans.com/stock/fra/conférence%20maonnerie.pdf)

RANGWALA S.C.,[consulté en 2016]. <http://www.civileblog.com/category/construction-material/>.

www.brique.be., [consulté en 2016].

<https://www.google.dz/maps/dir///@35.1346684,-1.1228781,10z>., [consulté en 2016].

https://www.google.dz/search?q=mode+de+rupture+compression+muret&espv=2&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbnm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjf2techMHMAhUBWBoKHb5IBLIQ_AUIBigB#.,[consulté en 2016].

Annexe 1

- Appareillages de maçonnerie :

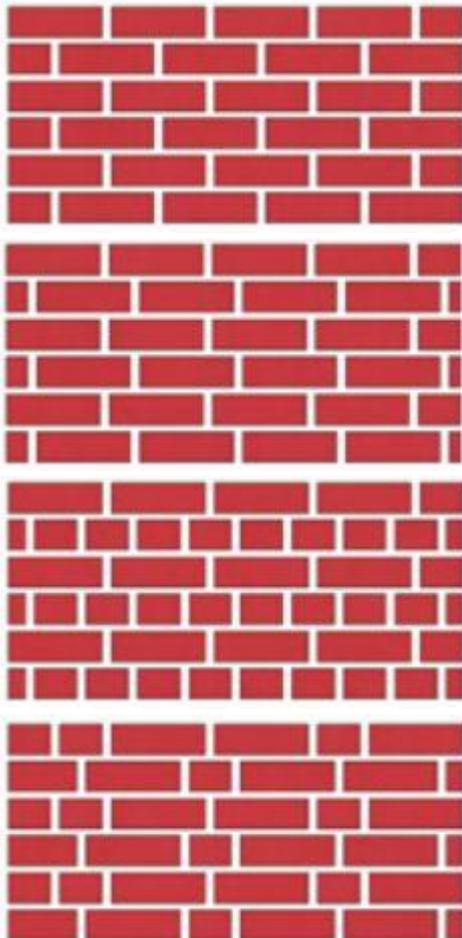
Actuellement, le monde de la construction utilise principalement l'appareillage en demi-briques. Cependant, d'autres appareillages peuvent être mis en œuvre. Une série de règles constructives pour les appareillages de maçonnerie découlent d'années de pratique du mur plein en maçonnerie.

L'identification et l'analyse de l'appareillage :

Pour identifier un patron de maçonnerie, il faudra donc regarder attentivement :

- La forme et le type de pierre.
- La taille et la finition de surface de la pierre.
- L'alignement des pierres.
- La régularité des assises.
- Le type et l'épaisseur du joint.

Quelques types d'appareillages :



Appareillage de paneresses ou appareillage en demi-briques ou appareillage grec :

Les joints verticaux sont décalés de la demi-longueur de la brique.

Appareillage en quart de brique :

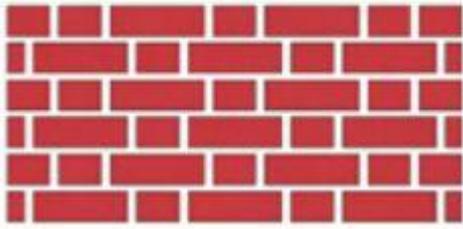
Les joints verticaux sont décalés d'un $\frac{1}{4}$ ou de $\frac{3}{4}$ de la longueur de la brique

Appareillage debout :

La maçonnerie se compose successivement de boutes et de paneresses.

Appareillage en chaîne :

Tous les tas sont composés d'une succession d'une bousse et de deux paneresses



Appareillage flamand :

Tous les tas sont composés d'une succession d'une boutisse et d'une panneresse.

Figure 1.1 : Les différents appareillages de la maçonnerie [VARIN 2013]

Appareillage libre :

La maçonnerie est composée d'une succession aléatoire de boutisses, panneresses et de quarts de briques.

- Propriétés des briques

La brique a beaucoup de bonnes propriétés qui font que ce soit le matériau de construction le plus populaire au niveau de l'industrie. Parmi eux, trois propriétés sont considérées comme importantes :

1/ Résistance :

La brique travaille bien à la compression. La résistance du mur de maçonnerie en briques dépend non seulement de la résistance de brique ; mais dépend également de la résistance du mortier, de la qualité de l'adhérence entre le mortier et les briques.

2/ Absorption :

Le caractère absorbant d'une brique est défini par un certain nombre de facteurs:

- Porosité accessible à l'eau,
- Porométrie,
- Liaisons entre les pores,
- Porosité globale (pores fermés et ouverts).

3/ Résistance aux intempéries :

La résistance des biques dépend essentiellement de la capacité de résistance de la pénétration de l'eau au niveau des briques. Ainsi que l'empêchement de la pénétration de l'eau dépend également de la bonne exécution. Le plus souvent on constate que l'eau pénètre par le joint de mortier entre les briques, donc un mur de maçonnerie bien exécuté, peut résister à la pénétration de l'eau durant une pluie battante de 24 heures accompagnées d'un vent d'une vitesse de 80 à 100 kilomètres à l'heure.

- Les types de mortier :

La norme NBN EN 998-2 [1] définit les types de mortier selon leur performance et leur utilisation conformément au tableau ci-dessus :

Tableau 1.1 : Les types de mortier selon la norme NBN EN 998-2.

Types de mortier	Symbole	Définitions		'Performance' Déclaration de f_m (1)	Adhérence (2) f_{wo} (3) [N/mm ²]
Mortier d'usage courant (4)	G	Mortier de montage sans caractéristique particulière	Spécifié selon sa composition	OUI	-
			Performanciel	OUI	0,15
Mortier de joints minces (4)	T	Mortier performanciel dont la dimension maximale des granulats est inférieure ou égale à une valeur spécifiée. La norme NBN EN 998-2 précise que : <ul style="list-style-type: none"> la dimension des granulats ne doit pas être supérieure à 2 mm le temps ouvert doit être déclaré d'autres exigences peuvent être nécessaires si l'épaisseur de joint prévue est inférieure à 1 mm. 		OUI	0,30
Mortier allégé (4)	L	Mortier performanciel dont la masse volumique sèche à l'état durci est inférieure ou égale à une valeur spécifiée. La norme NBN EN 998-2 précise que pour les mortiers de montage allégés, la masse volumique doit être inférieure ou égale à 1300 kg/m ³ .		OUI	0,15

(1) f_m est la résistance à la compression moyenne du mortier.
(2) Lorsque les mortiers performanciel ('G' performanciel, 'T' et 'L') sont destinés à être utilisés dans des maçonneries soumises à des exigences structurales, l'adhérence par cisaillement (f_{wo} (3)) du mortier doit être déclarée, soit sur la base d'une valeur par défaut, soit sur la base d'essais (cf. norme NBN EN 1052-3 [8]).
(3) f_{wo} est la résistance caractéristique initiale au cisaillement. Valeurs par défaut selon l'annexe C de la norme NBN EN 998-2.
(4) Lorsque la maçonnerie est soumise à des exigences thermiques, la conductivité thermique du mortier devra être déclarée. Le choix du mortier, par le biais de sa masse volumique et de son épaisseur, peut influencer la résistance thermique de la maçonnerie.

- Types de joint de mortier employés pour faire le mur de maçonnerie

Quand on réalise un mur en maçonnerie, on combine juste les briques ou les blocs de béton avec le mortier. Ce mortier peut être fait à base de ciment et/ou de chaux, etc. Le joint de mortier devrait être résistant, étanche, esthétique et durable. L'épaisseur du joint devrait être de 1/4 à 1/2.

On cite, ci-dessous, quelques types communs de joint de mortier employés pour construire en maçonnerie [BISWAS 2014] :

- Joint concave** : s'appelle également le joint de poignée de seau,
- Joint v** : En raison de sa forme de « V », il est appelé le joint de « V »,
- Joint frappé** : dans ce joint, le bord supérieur se juxtapose au bord de la brique et le rebord inférieur est enfoncé.
- Joint superficiel par les agents** : Ce joint est semblable au joint frappé sauf que le bord supérieur est enfoncé au lieu du rebord inférieur du joint.
- Joint ratissé** : Dans ce joint le mortier est légèrement enfoncé à partir des bords de la brique.

f) **Joint affleurant** : La surface du joint instantané affleure les bords de la brique.

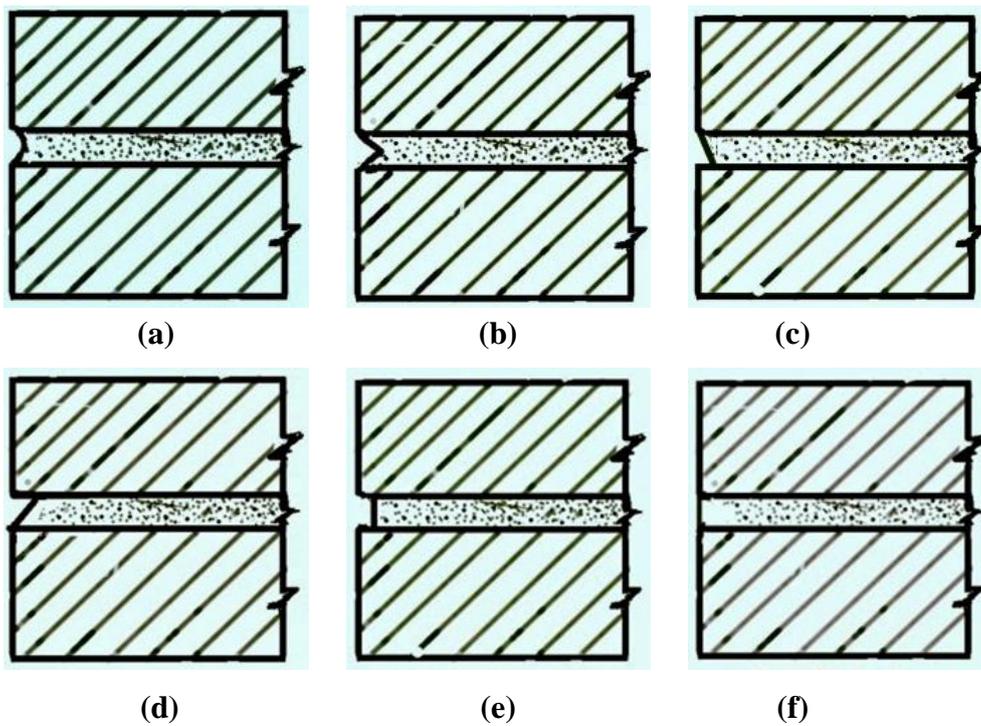


Figure 1.2 : Types de joints en mortier.

Avec ces derniers, il y a quelques autres joints employés pour former le mur de maçonnerie. Ceux-ci ne sont pas normalement employés dans la construction de bâtiments.

g) **Joint serré**

h) **Joint perlé**

i) **Joint de vigne**

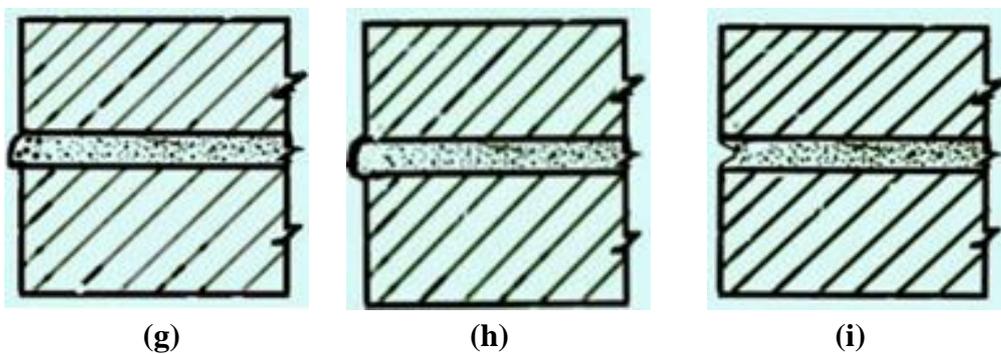


Figure 1.3 : Autres types de joint en mortier.

Annexe 2

Tableau 2.1 : Comportement de la maçonnerie en brique [SHAAN 1987].

Référence	Type d'étude	Type d'échantillon	Type de joints	Type de chargement (contraintes)	Résultats et observation
Benjamin et Williams 1958	Etude expérimentale sur un couplet de briques avec différentes orientations de joints (0°, 45°, 60°, 90°, 105°, 120°)	Deux briques et un joint de mortier	Trois différents mortiers utilisés	Traction uniaxiale	<ul style="list-style-type: none"> - La rupture survient au niveau du plan d'interface entre la brique et le mortier. - Lorsqu'on atteint la résistance d'adhérence de traction et de cisaillement.
Stafford et carter 1971	Etude expérimentale et analyse par la méthode des éléments finis.	Un triple de brique (trois briques entrecoupées par deux joints de mortier)	Un mortier de ciment-sable	Parallèle et perpendiculaire au plan du joint	<ul style="list-style-type: none"> - La rupture se produit dans le mortier par la traction. - Un comportement élastique – linéaire a été supposé pour la brique et le mortier.
Page 1978	L'influence de l'orientation des plans de joints par rapport à l'axe de chargement dans un panneau de maçonnerie en briques pleines.	Un panneau de dimension 500x240x54 mm	Un mortier de composition : 1 : ciment. 1 : chaux. 6 : sable.	Compression uniaxiale avec orientation du joint (70°, 60°, 45°, 30°)	<ul style="list-style-type: none"> - La rupture se produit par une traction dans un plan perpendiculaire à la surface libre du panneau. - Lorsque $\sigma_{n/\tau}$, petit, la rupture a lieu par cisaillement au niveau d'interface.
		Couplet des deux briques et un joint de mortier.	//	Traction uniaxiale	<ul style="list-style-type: none"> - La rupture au niveau de l'interface, brique-mortier.

Référence	Type d'étude	Type d'échantillon	Type de joints	Type de chargement (contraintes)	Résultats et observation
HENDRY 1978	Etude théorique basés sur plusieurs études expérimentales sur la maçonnerie en briques pleines.	Application sur différents types de panneaux	Un mortier de composition 1 : ciment. 0.25 : chaux. 3 : sable.	Contrainte de compression et du cisaillement.	- La rupture intervient par fissuration diagonale à travers les briques et le mortier, lorsque la pré-compression est importante. Mais si la pré-compression est faible la rupture a lieu par décollage des briques et du mortier horizontal et vertical. Une relation est proposée pour déterminer la résistance au cisaillement : $\tau_f^2 = \tau_0^2 + 1,1 \tau_0 \sigma_c + 0,0053 \sigma_c^2$
PAGE 1981	Etude expérimentale sur le comportement de la maçonnerie en variant l'orientation de joints du mortier (0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°)	Panneau de dimension 360x360 mm	Un mortier 1 : ciment. 1 : chaux. 6 : sable.	Compression biaxiale avec le rapport $\sigma_2/\sigma_1 =$ (0.5, 0.25, 0.1, 0)	- La rupture intervient pour une traction dans un plan parallèle à la surface libre lorsque σ_1/σ_2 pas très grand, et l'orientation du joint n'a pas influence sur le mode de rupture. - Si σ_1/σ_2 ou σ_2/σ_1 très grand la rupture intervient comme au [3].
PAGE, HENDRY, Samaeasinghe 1980	Analyse par une méthode des éléments finis d'un panneau de la maçonnerie soumis a une pré-compression et une contrainte de cisaillement.	Un panneau avec différents élancement H/L=1.49, 1.78, 2.08	Un mortier 1 : ciment. 0.25 : chaux. 3 : sable.	Pré-compression et une contrainte de cisaillement.	- La rupture a été constatée numériquement, au centre du panneau dans une zone (traction – compression), le critère de rupture est défini par $\sigma_1, \sigma_2, \theta$

Référence	Type d'étude	Type d'échantillon	Type de joints	Type de chargement (contraintes)	Résultats et observation
Samaeasinghe HENDRY et PAGE 1982	Etude expérimentales et analyse par la méthode des éléments finis, sur l'influence de l'orientation du joint de mortier.	Panneaux de maçonnerie 1) 150x150x 18 mm 2) 230x240x18 mm	Un mortier 1 : ciment. 0.25 : chaux. 3 : sable.	Contrainte biaxiale traction - compression.	- L'étude par des éléments finis est basée sur un comportement élastique isotrope. - Trois modes de rupture différentes ont été observés : Rupture par traction dans les joints Rupture due à la cohésion (traction-cisaillement) lorsque $b > 45^\circ$ Rupture de compression de la maçonnerie.
HENDRY 1981	Analyse théorique basée sur un comportement élastique isotrope linéaire de maçonnerie.	Brique pleines super posées et entrecoupées par des joints de mortier.		Contrainte de compression perpendiculaire au plan de joints	- Supposition d'une relation linéaire entre la résistance à la traction et à la compression de la brique. - Un critère de rupture a été proposé.
ROCHET	Etude expérimentale sur l'influence de la quantité de joint du mortier sur le comportement mécanique de la maçonnerie. Pour but de simuler le comportement de la roche	Pilier de brique entrecoupés par des joints : 1) 105x105x200 mm 2) 100x100x200 mm	Quatre types de mortier 1) 5% ciment. 72% sable. 23% chaux. 2) 2% ciment 98% sable 3) 100% sable. 4) Joint sec.	Contrainte de compression biaxiale et uniaxiale.	- La maçonnerie est plus résistante sans joint qu'avec un mauvais joint. - La présence des joints verticaux diminue la résistance à la compression - Lors d'une contrainte biaxiale avec une contrainte de confinement nulle la résistance est plus faible que celle du cas uniaxiale. Celle-ci augmente avec l'augmentation de la contrainte de confinement.
STAFFORD 1970	Etude expérimentale sur des essais particuliers type brésilien. A pour but de déterminer la résistance à la traction de la maçonnerie	Echantillon circulaire de 381 mm dia et 102 mm épaisseur.	Cinq différents mortier $E_b/E_m = 4 ; 2 ; 1 ; 0.8 \text{ à } 0.4$	Contrainte de compression type brésilien	- Ce type d'essai n'est pas adapté à la maçonnerie, mais permet d'avoir une idée sur la résistance à la traction de la maçonnerie.

Référence	Type d'étude	Type d'échantillon	Type de joints	Type de chargement (contraintes)	Résultats et observation
YOKET 1976	Etude expérimentales sur le comportement de la maçonnerie sous des sollicitations rotationnelles.	Panneau de section carrée.		Contrainte de compression verticale et contrainte de compression diagonale.	<ul style="list-style-type: none"> - Trois hypothèses ont supposées que la rupture a lieu par une traction. - La quatrième hypothèse a défini que la rupture intervient par une séparation des joints à l'interface.
PAGE 1980	Etude analytique pour déterminer la surface de rupture dans une région traction-traction, par modèle d'éléments finis.			Contrainte biaxiale (traction-traction)	<ul style="list-style-type: none"> - Le critère de rupture a été déterminé en trois dimensions $\sigma_1, \sigma_2, \theta$ - La forme de la rupture dépend du rapport de la résistance à la cohésion du cisaillement à la traction.
Dhanasekar, PAGE et KLEEMAN 1985	Etude analytique pour développer le critère de rupture. Le problème de la maçonnerie est analysé pour la méthode des éléments finis.	Panneau rectangulaire en briques pleines.	mortier : 1 : ciment. 1 : chaux. 6 : sable.	Contrainte de traction uniaxiale et de compression uniaxiale ainsi que contrainte biaxiale.	<ul style="list-style-type: none"> - On constate que le mortier affaiblit la résistance du panneau en général.

- **Caractéristiques géométriques des murets tests :**

Les figures si-dessous présentes les caractéristiques géométriques des murets pour les deux essais :

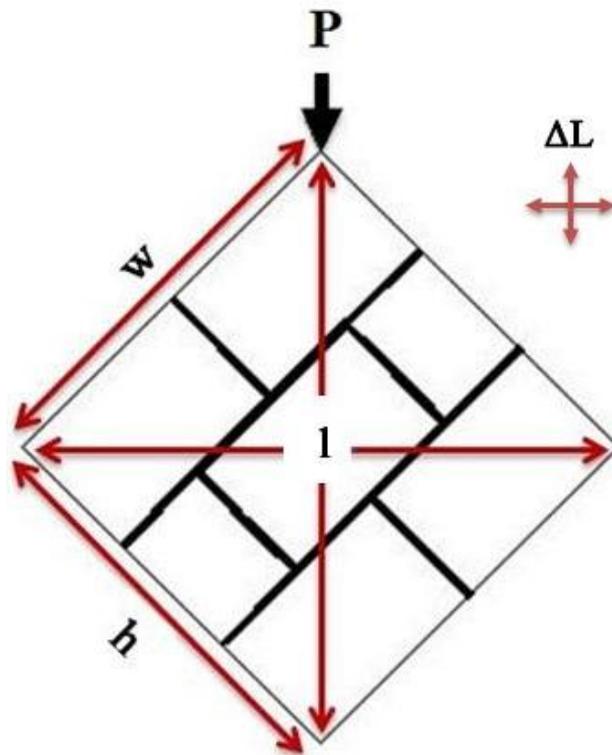


Figure 2.1 : Murets tests soumis à l'essai de cisaillement.

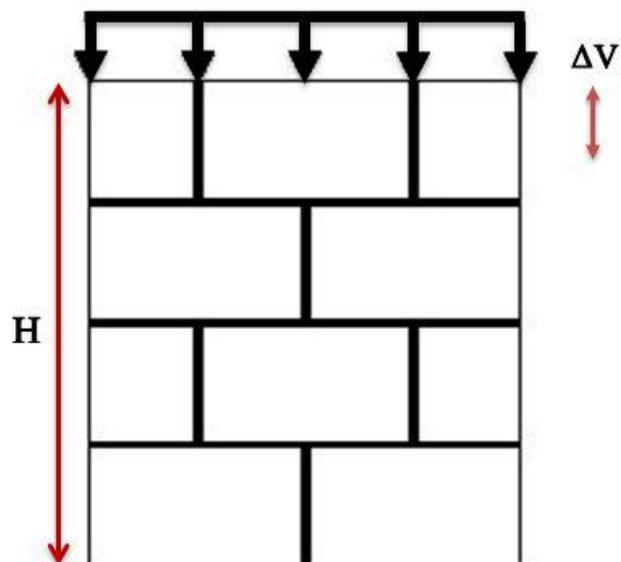


Figure 2.2 : Murets tests soumis à l'essai de compression.

Annexe 3

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats expérimentaux récapitulatifs moyennes des deux types de mortier 1 : 4 et 1 : 6 pour les différents pourcentages des fillers calcaires de 0% à 25% avec un palier de 5% :

- **EN CISAILLEMENT :**

Tableau 3.1 : Résultats expérimentaux des résistances au cisaillement des murets tests du mortier 1 : 4

% des fillers calcaires	Muret	Force moy (N)	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	ΔL (mm)	G_{moy} (MPa)	Date fabrication	Date écrasement
F = 0	M_{1.0}	61530	1.51	0.25	8.58	158.82	27.01.2016	25.02.2016
F = 5	M_{1.05}	68250	1.66	0.18	8.95	171.94	28.01.2016	28.02.2016
F = 10	M_{1.10}	64280	1.58	0.01	5.18	179.45	31.01.2016	29.02.2016
F = 15	M_{1.15}	61535	1.51	0.15	9.33	192.84	01.02.2016	29.03.2016
F = 20	M_{1.20}	56303	1.38	0.18	6.59	177.35	02.02.2016	01.03.2016
F = 25	M_{1.25}	50863	1.25	0.18	7.34	180.88	03.02.2016	02.03.2016

Tableau 3.2 : Résultats expérimentaux des résistances au cisaillement des murets tests du mortier 1 : 6

% des fillers calcaires	Muret	Force moy (N)	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	ΔL (mm)	G_{moy} (MPa)	Date fabrication	Date écrasement
F = 0	M_{1.0}	57580	1.41	0.18	9.31	143.37	04.02.2016	03.03.2016
F = 5	M_{1.05}	62103	1.52	0.05	8.46	163.55	07.02.2016	06.03.2016
F = 10	M_{1.10}	63895	1.57	0.12	8.22	146.11	08.02.2016	07.03.2016
F = 15	M_{1.15}	57770	1.42	0.12	8.76	124.79	08.02.2016	08.03.2016
F = 20	M_{1.20}	54355	1.33	0.04	7.54	91.43	10.02.2016	09.03.2016
F = 25	M_{1.25}	50800	1.25	0.11	8.50	108.75	11.02.2016	10.03.2016

- **EN COMPRESSION :**

Tableau 3.3 : Résultats expérimentaux des résistances à la compression des murets tests du mortier 1 : 4

% des fillers calcaires	Muret	Force moy (N)	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	ΔV (mm)	E moy (MPa)	Date fabrication	Date écrasement
F = 0	M_{2.0}	114033	2.18	0.03	7.92	319.18	15.02.2016	14.03.2016
F = 5	M_{2.05}	107155	2.05	0.38	8.79	146.41	16.02.2016	15.03.2016
F = 10	M_{2.10}	93575	1.79	0.07	7.76	218.64	17.02.2016	16.03.2016
F = 15	M_{2.15}	92955	1.78	0.08	6.65	181.73	21.02.2016	20.03.2016
F = 20	M_{2.20}	<u>102120</u>	<u>1.87</u>	<u>0.05</u>	<u>7.79</u>	<u>158.20</u>	22.02.2016	21.03.2016
F = 25	M_{2.25}	<u>119800</u>	<u>2.30</u>	<u>0.15</u>	<u>10.20</u>	<u>276.15</u>	24.02.2016	23.03.2016

Tableau 3.4 : Résultats expérimentaux des résistances à la compression des murets tests du mortier 1 : 6

% des fillers calcaires	Muret	Force moy (N)	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	ΔV (mm)	E moy (MPa)	Date fabrication	Date écrasement
F = 0	M_{2.0}	106923	2.05	0.44	7.79	315.66	29.02.2016	29.03.2016
F = 5	M_{2.05}	92565	1.77	0.02	8.20	317.88	01.03.2016	30.04.2016
F = 10	M_{2.10}	98660	1.89	0.01	10.35	231.12	01.03.2016	30.04.2016
F = 15	M_{2.15}	90847	1.74	0.16	10.73	221.99	02.03.2016	31.04.2016
F = 20	M_{2.20}	89880	1.72	0.06	7.08	361.61	03.03.2016	02.04.2016
F = 25	M_{2.25}	76360	1.46	0.07	6.43	380.91	06.03.2016	05.04.2016