
RESUME

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : LES TYPES DE MACONNERIE 2

1.1 Introduction 2

1.2 Définition 2

1.3 Types de maçonnerie 2

1.3.1 Maçonnerie en terre cuite 2

1.3.2 Maçonnerie en briques silico calcaire 4

1.3.3 Maçonnerie en agglomérés de béton 5

1.3.4 Maçonnerie en moellons de pierres 5

1.4 Le mortier 7

1.4.1 Définition 7

1.4.2 Composition 7

1.4.3 Types de mortiers 8

1.4.4 Caractéristiques principales 9

1.5 Pathologie de la maçonnerie 9

1.5.1 Pathologies structurelles 9

1.5.2 Les pathologies non structurelles 10

1.6 Conclusion: 11

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTERATURE 12

2.1 Introduction 12

2.2 Comportement sismique de la maçonnerie non armée 12

2.2.1 Modes de rupture de la maçonnerie en un seul plan 12

2.2.2 Modes de rupture de la maçonnerie de remplissage dans des cadres rigides.. 14

2.2.3 Interaction panneau - poteau dans le plan du portique 15

2.3 Travaux effectués sur le cisaillement 19

2.3.1 Les travaux de Malyszko: 19

2.3.2 Travaux de Milosevic et col. 20

2.3.3 Travaux de GHARIB et col 22

2.3.4 Travaux effectués par KARA ALI et HAMZA CHERIF 23

2.3.5	Travaux effectués par RAMDANI et ACHOURI	24
2.3.6	Travaux de Tomazevic	25
2.4	Comportement de la maçonnerie en compression	27
2.5	Travaux effectués sur la compression	27
2.5.1	Travaux de HOUTI	27
2.5.2	Travaux effectués par RAMDANI et ACHOURI	29
2.6	Travaux effectués sur les mortiers	30
2.6.1	Travaux de CHAIB et col.	30
2.6.2	Travaux de BENKADDOUR et col.	31
2.7	Les codes de calcul	32
2.7.1	La norme ASTM E 519-02	32
2.7.2	La résistance au cisaillement de la maçonnerie selon l'EUROCODE 6	34
2.7.3	Calcul au cisaillement (DTR CNERIB)	36
2.7.4	Calcul de la compression (DTR CNERIB)	36
2.8	Conclusion	37

CHAPITRE 03: PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES UTILISÉS AU LABORATOIRE..... 38

3.1	Introduction	38
3.2	Matériaux utilisés	38
3.2.1	PROVENANCE DES MATÉRIAUX	38
3.2.2	Planning du programme expérimental	39
3.2.3	CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX	40
3.2.4	Caractéristiques des mortiers	45
3.2.5	Caractéristiques du sable	46
3.2.6	Caractéristique du ciment	48
3.2.7	Caractéristiques de la pouzzolane	49
3.2.8	Caractéristique de l'eau de gâchage :	50
3.2.9	Formulation des mortiers testés	51
3.2.10	Essais mécaniques sur les mortiers.....	52
3.2.11	Comparaison entre le support et le mortier	56
3.3	Programme des essais sur les murets	57

3.3.1	Introduction.....	57
3.3.2	La nature des murets à tester	57
3.3.3	La construction des murets	59
3.3.4	Dispositif d'essai.....	63
3.4	Conclusion	66
Chapitre 04 : Résultats et interprétations		67
4.1	Introduction.....	67
4.2	RÉSULTATS DES MURETS SOUMIS AU CISAILLEMENT.....	67
4.2.1	Calcul de la résistance des murets soumis au cisaillement	67
4.2.2	Résistance des murets soumis au cisaillement	67
4.2.3	Influence de la pouzzolane sur les murets soumis au cisaillement	68
4.2.4	Modes de rupture	69
4.2.5	ESSAI DE CISAILLEMENT SUR LES TRIPLETS.....	71
4.3	RÉSULTATS DES MURETS SOUMIS A LA COMPRESSION	72
4.3.1	Résistance des murets à la compression	72
4.3.2	Modes de ruptures.....	73
4.4	Les études comparatives	74
4.4.1	ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSISTANCES AU CISAILLEMENT AVEC L'EUROCODE 6 ET LE DTR DU CNERIB.....	74
4.4.2	ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSISTANCES AU CISAILLEMENT DES MURETS AVEC LES TRAVAUX EFFECTUES AU LABORATOIRE EOLE	74
4.5	Conclusion	75
CONCLUSION GENERALE.....		76

Listes des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1: Illustration des constituants d'une maçonnerie [DUCO 2012]	2
Figure 1.2: Fabrication de la brique en terre cuite (BAUD, 1990) cité par [HAMZA CHERIF et KARA ALI 2014]	3
Figure 1.3: maçonnerie en brique pleines [www.systemed.fr]	3
Figure 1.4: Maçonnerie en briques perforées [mur.ooreka.fr]	4
Figure 1.5: les différentes formes de briques creuses [RAMDANI et ACHOURI 2016]	4
Figure 1.6: maçonnerie en briques de silico calcaire [jevaisconstruire.levif.be]	5
Figure 1.7: Maçonnerie en bloc d'agglomérés de béton [www.maisonbrico.com]	5
Figure 1.8: Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990) cité par [HAMZA CHERIF et KARA ALI 2014]	6
Figure 1.9: Mur en moellons de pierres [www.batisevre.fr]	6
Figure 1.10: Types de renforcement des maçonneries, maçonnerie armée [HUREZ et col 2009]	7
Figure 1.11: Maçonnerie armé [www.storemat.com]	7
Figure 1.12: Fissure en escalier [www.maconnerie-doyle.com]	10
Figure 1.13: Dislocation des briques [www.bricoleurdudimanche.com]	10
Figure 1.14: Fissure en coup de sabre [www.securiteinterieure.fr]	10
Figure 1.15: Moisissure sur un mur extérieur [www.leroymerlin.fr]	10
Figure 1.16: dislocation des briques [www.bricoleurdudimanche.com]	11

Chapitre 2 :

Figure 2.1: Modes de rupture en plan d'un mur de maçonnerie non armée :(a) traction diagonale ; (b) glissement ; (c) balancement ; (d) écrasement [ElGawady et col 2007].	13
Figure 2.2: Modes de rupture typique de la maçonnerie de remplissage [AIT RAMDANE 2014]	14
Figure 2.3: Modes de rupture en plan d'un mur de remplissage en maçonnerie insérer dans un cadre rigide [Shing et Mehrabi 2002]	15
Figure 2.4: Mécanisme de ruine des ossatures par jeu avec leur remplissage de maçonnerie [GERTIN 2014]	16
Figure 2.5: a) Déformé d'un cadre avec remplissage sous chargement latéral b) bielle comprimée équivalente diagonal [Ait RAMDANE 2014].	16
Figure 2.6: Définition des paramètres caractérisant la bielle comprimée équivalente [Ait RAMDANE 2014].	17
Figure 2.7 : a) Portique avant l'action sismique, b) Sous l'action sismique formation d'une diagonale comprimée et d'une diagonale tendue c) Changement de direction du séisme : inversion des sollicitations des diagonales d) Après séisme, le panneau en maçonnerie se trouve avec une fissuration en X [DAVIDOVICI 2003]	18

Figure 2.8: Destruction de l'extrémité du panneau du fait de la compression de la diagonale qui se forme dans le mur DAVIDOVICI 2003]	18
Figure 2.9 : modes expérimentales de fissuration des panneaux en maçonnerie a) Fissuration par tension diagonale b) et c) combinaison de tension diagonal et glissement des joints d) domination de la compression [Malyszko 2003].	19
Figure 2.10: :(à gauche) Mode de fissuration (à droite) Effondrement. Les spécimens en maçonnerie: (a) échantillon W4 (b) échantillon W3 [Milosevic et col 2012].	21
Figure 2.11: (à gauche) Mode de fissuration (à droite) Effondrement. Les spécimens en maçonnerie: (a) échantillon T1 (b) échantillon T7 [Milosevic et col 2012].	22
Figure 2.12:Compression diagonale : contrainte de cisaillement-déformation du mur non renforcés [GHARIB et col 2015]	23
Figure 2.13: Variation de la résistance des murets avec et sans joint vertical [KARA ALI et HAMZA CHERIF 2014].	23
Figure 2.14: Mode de rupture des murets hourdés au mortier A [KARA ALI et HAMZA CHERIF 2014].	24
Figure 2.15: Influence des fillers calcaires sur la contrainte de cisaillement [RAMDANI est ACHOURI 2016].	25
Figure 2.16: Les modes de rupture des murs : a) en briques creuses b) briques perforées [Tomazevic 2008].	26
Figure 2.17: a) Présentation schématique du test de résistance au cisaillement initial selon EN 1502-3 b) Essai de résistance au cisaillement initial selon EN 1502-3 en laboratoire [Tomazevic 2008].	26
Figure 2.18:modes de ruptures des maçonneries sollicitées en compression dans son plan a)compression simple verticale dans la direction perpendiculaire au lit de mortier ; b) compression horizontale parallèle au lit de mortier ; c) compression biaxiale dans le plan du mur [P'KLA 2002]	27
Figure 2.19:Dimensions des murets en briques de terre cuite creuses [HOUTI 2002].	28
Figure 2.20: Mode de rupture des briques en terre cuite [HOUTI 2002].	28
Figure 2.21: Influence de l'orientation du joint sur la résistance de la maçonnerie.	29
Figure 2.22: Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression [RAMDANI est ACHOURI 2016].	29
Figure 2.23:Evolution de la résistance à la compression des mortiers binaires en fonction de l'âge a) conservation à l'air b) conservation dans l'eau [CHAIB et col 2015]	30
Figure 2.24: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de la pouzzolane [CHAIB et col 2015]	30
Figure 2.25: Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers (PA et PN) en fonction de l'âge [BENKADDOUR et col 2009].	32
Figure 2.26: appareillage permettant de déterminer la contrainte de compression diagonal pour les murs en maçonnerie [ASTM E 519-02]	33
Figure 2.27: Joints verticaux remplis (conditions à respecter)	35

Chapitre 3 :

Figure 3.1: Plan de situation indiquant les gisements des matériaux utilisés (Google Maps).	39
Figure 3.2: Planning du programme expérimental	40
Figure 3.3: Dimensions des briques creuses utilisées en tant que support.	41
Figure 3.4: Pied à coulisse	41
Figure 3.5: Mètre pliant.	41
Figure 3.6 : Surfaçage des briques (Photos prises par les auteurs).	44
Figure 3.7 : Essai de compression des briques creuses (Photos prises par les auteurs).	44
Figure 3.8: Courbe granulométrique du sable de carrière, sujet d'étude.	47
Figure 3.9: Sac de ciment (photo prise par les auteurs).	48
Figure 3.10: Dispositif permettant la mesure de la masse volumique apparente du liant.	49
Figure 3.11: Broyeur utilisé (photo prise par les auteurs).	49
Figure 3.12: a) Pouzzolane brute b) Pouzzolane broyée et tamisée à 125 μm (photo prise par les auteurs).	50
Figure 3.13: Dispositif de l'essai de flexion 3 points et les éprouvettes de mortier 4x4x16 (photos prises par les auteurs).	52
Figure 3.14: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression (photo prise par les auteurs).	53
Figure 3.15: Résistance à la compression des éprouvettes du mortier 1:4 à consistance normale.	54
Figure 3.16: Résistance à la traction par flexion des éprouvettes du mortier 1:4 à consistance normale.	55
Figure 3.17: Résistance à la compression des éprouvettes du mortier 1:6 à consistance normale.	55
Figure 3.18: Résistance à la traction par flexion des éprouvettes du mortier 1:6 à consistance normale.	56
Figure 3.19: Schéma du programme expérimental.	58
Figure 3.20: Géométrie des murets en briques creuses en terre cuite pour l'essai de cisaillement: 60x60x10 cm^3 .	59
Figure 3.21: Géométrie des murets en briques creuses en terre cuite pour l'essai de compression: 60x80x10 cm^3 .	59
Figure 3.22: Préparation du support en assurant sa planéité (photo prise par les auteurs).	61
Figure 3.23: Préparation du joint vertical (photo prise par les auteurs).	61
Figure 3.24: Vérification de l'épaisseur du joint vertical et le remplissage de ce dernier (photo prise par les auteurs).	61
Figure 3.25: Pose du joint horizontal (photos prises par les auteurs).	62
Figure 3.26: Vérifier la planéité et la verticalité entre les deux lignes horizontales par le biais d'une règle et du niveau à bulle.	62
Figure 3.27: Surfaçage des deux coins du muret de cisaillement avec du plâtre pour caler correctement le faitage du muret lors de l'essai (photos prises par les auteurs).	62
Figure 3.28: Surfaçage des murets soumis à la compression (photos prises par les auteurs).	63

Figure 3.29: Dispositif pour l'essai de cisaillement selon ASTM E 519-02 [Achouri et Ramdani 2016]	64
Figure 3.30: Essai de compression des murets (photo prise par les auteurs).	65
Figure 3.31: Cure et stockage des triplets prêts au cisaillement (photo prise par les auteurs).	65
Figure 3.32: Essai de cisaillement d'un triplet (photo prise par les auteurs).	66
Chapitre 4 :	
Figure 4.1: résistance au cisaillement des murets à base de mortier 1:4	68
Figure 4.2: résistance au cisaillement des murets à base de mortier 1 :6	68
Figure 4.3: Glissement au long du lit du joint horizontal.	70
Figure 4.4: Rupture selon la diagonale.	70
Figure 4.5: Eclatement de l'appui supérieur.	70
Figure 4.6 : Eclatement de l'appui inférieur.	71
Figure 4.7 : Rupture en dents de scie.	71

Liste des Tableaux

Chapitre2

Tableau 2.1: Valeurs moyennes de la résistance au cisaillement initiale de la maçonnerie, f_{vo} , obtenues en testant les triplets selon EN 1502-3 [Tomazevic, 2008].	26
Tableau 2.2: Calcul de la résistance caractéristique au cisaillement f_{vk} selon les normes EN 1052-3 ou EN 1052-4.	35
Tableau 2.3: Valeur de la résistance initiale au cisaillement f_{vk0} (EN 1996-1-1, 2006).	35

Chapitre3

Tableau 3.1: Masses volumiques des échantillons de briques creuses testées.	42
Tableau 3.2: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des échantillons de briques creuses testées.	43
Tableau 3.3: Résistance à la compression des échantillons de briques creuses.	45
Tableau 3.4 : Propreté du sable utilisé.	46
Tableau 3.5:Composition chimique du ciment de Béni-Saf [TALEB, 2009].	48
Tableau 3.6 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle du gisement de Bouhmidi [BENKADDOUR et col., 2009].	50
Tableau 3.7 : Composition chimique de l'eau de Chetouane (mg/l) [BOUKLI, 2009].	50
Tableau 3.8: Tableau récapitulatif des rapports E/L après les essais de consistance des mortiers testés.	51
Tableau 3.9: Résistances des mortiers à la flexion et à la compression	54

Chapitre4

Tableau 4.1: Résistance des murets au cisaillement.	67
Tableau 4.2 : Différents modes de rupture recensés sur les murets cisailés	69
Tableau 4.3:Résultats des résistances au cisaillement F_{vk0}	72
Tableau 4.4 : Résistance des murets à la compression	72
Tableau 4.5: Comparaison des résistances au cisaillement avec l'EUROCODE 6 et le DTR du CNERIB	74
Tableau 4.6: Comparaison des résistances au cisaillement des murets avec substitution de pouzzolane et de fillers calcaires	74

Nomenclature

A_n	: Surface nette du mur
B	: Coté latéral du prisme
C	: coefficient d'absorption
D	: Épaisseur du mur
E_m	: Module d'élasticité de la maçonnerie
E_c	: Module d'élasticité du béton du cadre
f_v	: Résistance au cisaillement de la maçonnerie
f_c	: Résistance à la compression de la maçonnerie pour un chargement axial perpendiculaire aux joints
f_{vk0}	: Résistance caractéristique initiale au cisaillement
F_M	: Résistance à la compression de la maçonnerie
f_b	: Résistance moyenne normalisée de l'élément de maçonnerie.
f_m	: Résistance à la compression du mortier
F_c	: Force de rupture à la compression
F_f	: Force de rupture à la flexion appliquée au milieu du prisme.
G	: Module de rigidité
h	: Hauteur du mur
H	: Hauteur de l'échantillon test
I_{col}	: Inertie du poteau en béton armé
I_M	: Moment d'inertie de la section transversale
K	: Coefficient en fonction du groupe de blocs
ΔL	: Déplacement diagonal
l	: Longueur de la diagonale
L	: Distance entre appuis
M	: Masse de la brique
n_c	: Rapport des résistances à la compression pour les résistances parallèles et normales aux joints des lits.
N	: Surface brute du bloc, en pourcentage.
P	: Charge de compression appliquée
Q	: Effort tranchant exprimé dans le mur
R_f	: Résistance à la flexion
R_c	: Résistance à la compression
R_M	: Résistance moyenne de rupture en compression
S_n	: Section nette moyenne de la brique
S	: Section effective moyenne du muret
S_m	: Surface horizontale mouillée
T	: Temps d'immersion en minutes
t	: Epaisseur de l'échantillon
V	: Volume net de la brique
ΔV	: Déplacement vertical
W	: Largeur de l'échantillon
λ	: Coefficient qui permet de lier la longueur de contact entre le mur et le cadre.
σ_c	: Contrainte de compression normale aux joints.

τ	: Contrainte de cisaillement sur la surface
σ_d	: Contrainte verticale moyenne s'exerçant sur la partie comprimée
S_m	: Moment statique de la section transversale du mur exprimée en
σ_c	: Résistance à la compression du muret
σ_m	: Résistance à la compression du mortier
σ_b	: Résistance à la compression du bloc ou de la brique
ρ	: Masse volumique apparente
$\tau_{1/3}$: Contrainte de cisaillement correspondant au tiers de la charge
$\gamma_{1/3}$: Déformation tangentielle correspondant au tiers de la charge de rupture

INTRODUCTION GENERALE

La valorisation des déchets et des ressources naturelles dans les ciments est devenue une activité d'actualité dans le domaine de l'industrie cimentaire pour pallier le déficit environnemental lié à la production. Les recherches ont montré que l'incorporation de ces ajouts mène à des avantages non seulement écologiques mais aussi à une amélioration des propriétés mécaniques des bétons notamment des mortiers.

Cette étude s'inscrit dans la suite du programme de travail expérimental, réalisé par l'équipe matériaux granulaires qui évolue au sein du laboratoire Eau Ouvrage dans Leur Environnement « EOLE » et qui consiste à étudier le comportement des murs en maçonnerie sous diverses sollicitations. Ce travail donc se propose d'étudier l'influence de l'apport d'additions minérales locales (pouzzolane naturelle), que l'on substitue au ciment, dans le mortier de jointement de murets en maçonnerie de briques en terre cuite sur leur comportement mécanique aux sollicitations de cisaillement et de compression. Les murets sont réalisés selon les règles de l'art en utilisant deux types de mortier respectivement 1 :4 et 1 :6 (un volume de ciment pour 4 ou 6 volumes de sable). Les joints verticaux et horizontaux ont une épaisseur optimale de 1 cm [HOUTI 2002].

La question que l'on s'est posée au début de ce travail de recherche est de savoir si la substitution volumique du ciment (5 à 25 %) par la pouzzolane naturelle dans le mortier de jointement garantira-t-elle une stabilité et une résistance de la maçonnerie réalisée avec des briques en terre cuite creuses ?

Pour répondre à cette problématique, on a structuré le mémoire en quatre chapitres :

- Le premier chapitre définit la maçonnerie et ses types les plus utilisés, ainsi que les pathologies les plus courantes.
- Le deuxième chapitre consiste à présenter une revue de la littérature sur le comportement de la maçonnerie sous chargement de cisaillement et de compression et les mécanismes de ruptures associés.
- Le troisième chapitre décrit les matériaux et techniques utilisées et met en exergue le programme expérimental réalisé au laboratoire.
- Le quatrième chapitre met en revue les résultats obtenus. Une discussion s'en suit permettant l'analyse et l'interprétation de ces résultats, en les comparant aux travaux précédents de l'équipe et d'autres auteurs ayant travaillé sur la question.
- Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats et propose de nouvelles perspectives de recherche.

CHAPITRE 1 : LES TYPES DE MAÇONNERIE

1.1 Introduction :

Malgré l'hégémonie du matériau béton et des armatures en acier dans la construction, la maçonnerie constitue encore une des « pierres angulaires » de l'art de bâtir.

Un ouvrage en maçonnerie est réalisé à partir de composants résistants et selon les règles de l'art préconisées.

1.2 Définition :

La maçonnerie est un assemblage d'éléments de maçonnerie posés selon un appareillage spécifiée et hourdés ensemble à l'aide d'un mortier (voir figure 1.1) [EUROCODE 6]

On peut dire aussi que la maçonnerie résulte de la juxtaposition de matériaux solides : pierres, briques ou agglomérées liées ou non entre eux en formant un ensemble stable, de forme et de dimensions déterminées [BRIGAUX 1968]

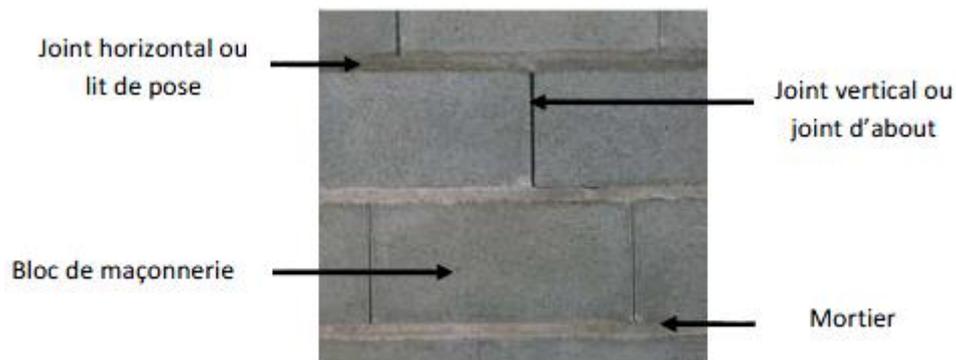


Figure 1.1: Illustration des constituants d'une maçonnerie [DUCO 2012]

1.3 Types de maçonnerie :

1.3.1 Maçonnerie en terre cuite :

Au départ d'une matière première naturelle : l'argile, la brique de terre cuite est un matériau de construction des plus performants, qui permet de répondre à toutes les exigences de confort thermique et acoustique, de sécurité, de durabilité, de flexibilité du bâtiment et respectueux de l'environnement.

une brique en terre cuite est définie 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 [NF EN 771-1].

Le processus de fabrication est tel que représenté sur Figure 1.2.



Figure 1.2: Fabrication de la brique en terre cuite (BAUD, 1990) cité par [HAMZA CHERIF et KARA ALI 2014]

Elles sont classées selon leurs modes de fabrication :

Briques non calcinées: après le moulage, elles sont séchées au soleil.

Briques calcinées : elles sont cuites au four pour à des températures élevées. On distingue trois (3) types, selon la forme :

1.3.1.1 Brique pleine :

C'est la plus connue dans ce type de construction ; ce sont des parallélépipèdes rectangles obtenus par pressage. On distingue les :

- Briques pleines pour des éléments porteurs (cf. figure 1.3),
- Briques pleines destinées à rester apparentes pour la décoration de façades,
- Briques de réfraction pour des conduites de fumée ou pour la construction de fours.



Figure 1.3: maçonnerie en brique pleines [www.systemed.fr]

1.3.1.2 Brique perforée :

Avec des perforations perpendiculaires au lit de pose, cette brique est plus légère que la brique pleine (perforation inférieure à 40% de la section totale). Elle résiste bien à la compression et assure une bonne isolation thermique (figure 1.4).



Figure 1.4: Maçonnerie en briques perforées [mur.ooreka.fr]

1.3.1.3 Brique creuse :

C'est une brique plus légère avec des dimensions plus grandes. Les trous sont parallèles au plan de pose (figure 1.5), elle offre une meilleure isolation et ventilation au mur ; mais avec une faible résistance à la compression. Elle est utilisée pour les cloisons et les doublages et peut servir notamment pour renforcer une structure contre la torsion si elle est remplie de coulis et dotée de barres de renforcement.



Figure 1.5: les différentes formes de briques creuses [RAMDANI et ACHOURI 2016]

1.3.2 Maçonnerie en briques silico calcaire :

Ces briques sont obtenues en mélangeant un sable siliceux (90 à 92 %), de la chaux (8% à 10%) et de l'eau. Elles sont pressées et durcies dans un autoclave, à une température supérieure à 170 °C (voir figure 1.6).

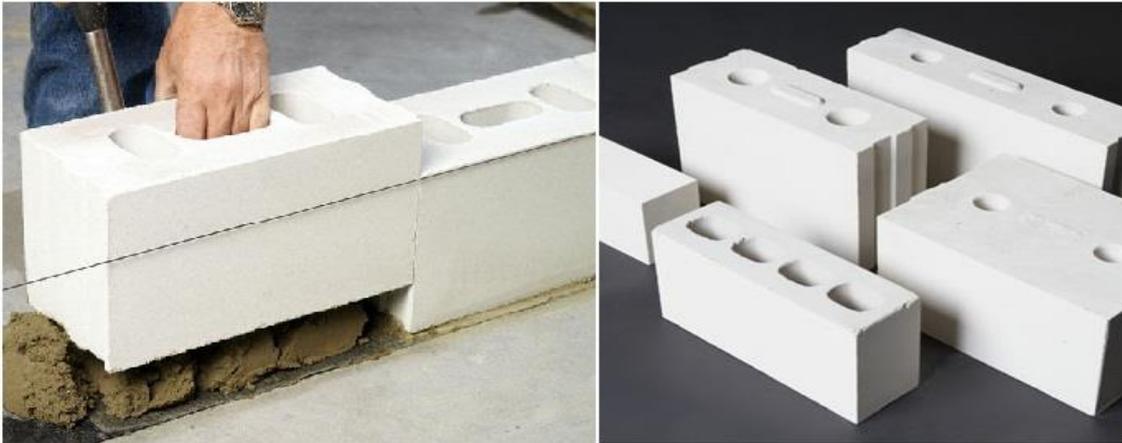


Figure 1.6: maçonnerie en briques de silico calcaire [jevaisconstruire.levif.be]

1.3.3 Maçonnerie en agglomérés de béton :

Les agglomérés de béton constituent des blocs parallélépipèdes creux ou pleins (voir figure 1.7), réalisés par l'association des granulats, du ciment, de l'eau et éventuellement d'adjuvants. L'ensemble ainsi formé est coulé en une seule masse, qui donne à tout l'ouvrage les propriétés d'un monolithe. Ce type de maçonnerie est destiné pour construire des murs extérieurs, des murs de clôtures et il peut être couvert d'un enduit. Il est résistant, peu couteux et d'une forme régulière.

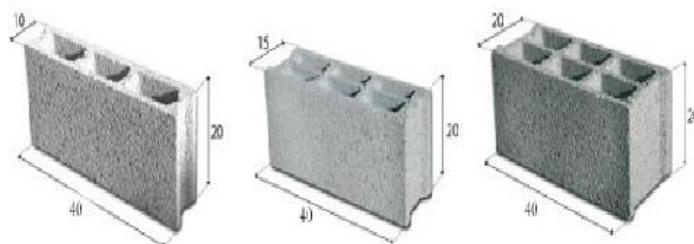


Figure 1.7: Maçonnerie en bloc d'agglomérés de béton [www.maisonbrico.com]

1.3.4 Maçonnerie en moellons de pierres :

Une maçonnerie de moellons est un ouvrage réalisé avec des éléments de pierre pouvant être manipulés par un seul homme. Les moellons se présentent dans la maçonnerie à l'état de pierres brutes ou taillées selon l'aspect désiré. En général, la production des pierres calcaires, ne consomme pas beaucoup d'énergie car elles ne subissent pas de grandes transformations. Elles sont jointées avec une largeur variable qui ne dépasse pas les quatre

(4) centimètres (cf. figure 1.8). L'épaisseur des murs de ces éléments dépend des pierres employées (inférieure à 40 cm) pouvant être recouvert d'un crépissage. La mise en œuvre est plus difficile qu'avec des éléments standards, surtout pour l'aplomb et l'alignement [GUY BRIGAUX, 1968].

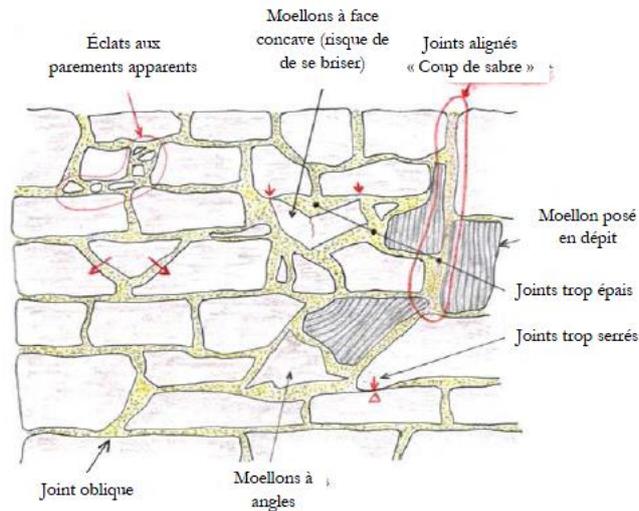


Figure 1.8: Mur en pierre naturelle (BAUD, 1990) cité par [HAMZA CHERIF et KARA ALI 2014]



Figure 1.9: Mur en moellons de pierres [www.batisevre.fr]

On distingue deux types de structures en maçonnerie :

Maçonnerie non armée : maçonnerie sans armature ou ne présentant pas une armature suffisante pour être considérée comme un ouvrage en maçonnerie armée [HUREZ et col 2009].

On regroupe plusieurs catégories des murs en maçonnerie non armée selon leurs fonctions.

- Le mur porteur plein : il est assez épais et peut être construit avec différentes unités de maçonnerie.
- le mur porteur creux : L'espace a pour but d'améliorer l'isolation thermique de l'ouvrage et d'ouvrir une barrière à la pénétration de l'eau.
- le mur de partition : il sert à délimiter les espaces de la structure selon sa fonction.
- le mur de remplissage : généralement en façade contournant ou ceinturant la structure.

Maçonnerie armée : maçonnerie dans laquelle des barres ou treillis en acier sont enrobés dans du mortier ou du béton (figure 1.10 et 1.11) de telle manière que tous les matériaux agissent ensemble pour résister aux forces appliquées [HUREZ et col, 2009].

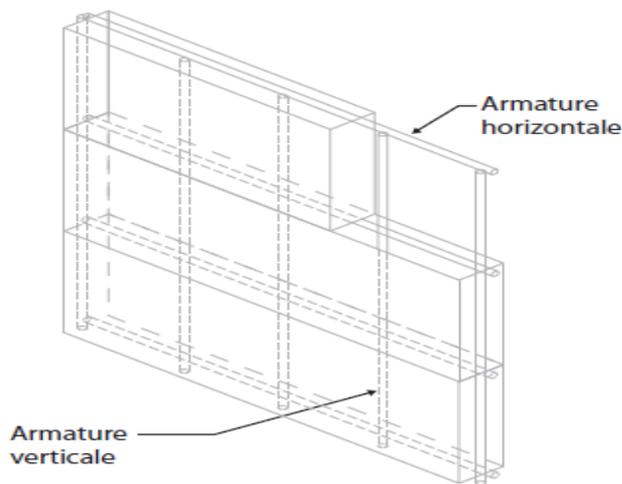


Figure 1.10: Types de renforcement des maçonneries, maçonnerie armée [HUREZ et col 2009]



Figure 1.11: Maçonnerie armée [www.storemat.com]

1.4 Le mortier :

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre les différents éléments (agglomérés de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de:

- solidariser les éléments entre eux,
- assurer la stabilité de l'ouvrage,
- combler les interstices entre les blocs de construction.

1.4.1 Définition :

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

1.4.2 Composition :

Les mortiers sont constitués de: Liant (ciment ou chaux), eau, sable, adjuvants et éventuellement des ajouts minéraux.

1.4.2.1 Les liants :

Ce sont des produits qui font prise et durcissent dans le temps en devenant une véritable roche artificielle. Ceux qui se solidifient en contact de l'eau, on les appelle des liants hydrauliques (les ciments normalisés, la chaux hydraulique), et ceux qui se solidifient par action de l'air sont des liants aériens (la chaux aérienne). On peut trouver aussi des liants à base de polymère.

1.4.2.2 Les sables :

Les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se mettent dans les intervalles laissés par les gros grains pour combler les vides.

Les sables jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume du sable humide.

1.4.2.3 Les adjuvants:

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

1.4.2.4 Les ajouts:

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..): peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du mortier.
- Fibres de différentes natures : améliore la résistance.
- Additions inertes telles que : les fillers calcaires, la farine de quartz, etc.
- Pigments : des colorants (naturels ou synthétiques) destinés pour les mortiers de décoration.

1.4.3 Types de mortiers :

Il existe différents types de mortier:

1.4.3.1 Les mortiers de ciment :

Ce sont des mortiers très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique avec des rapports de l'eau sur ciment (E/C) variables. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

1.4.3.2 Les mortiers de chaux :

Ils sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

1.4.3.3 Les mortiers bâtards :

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

1.4.3.4 Mortiers industriels :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Ces mortiers peuvent contenir des liants ou des colles, des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

1.4.4 Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

1.4.4.1 Ouvrabilité à l'état frais :

L'ouvrabilité est l'aptitude du mortier à s'étaler afin d'assurer un contact étroit entre les unités de maçonnerie et le mortier. Il se trouve que les mortiers de chaux ont une très bonne ouvrabilité en comparaison des mortiers de ciments.

1.4.4.2 Résistances mécaniques à l'état durci

Comme pour les bétons, plus le rapport E/L est faible, plus la résistance à la compression est grande. Et une quantité d'air entraîné trop importante conduit à une diminution de la résistance. Aussi, l'ajout de cendres volantes contribue à l'accroissement de la résistance mécanique finale.

1.5 Pathologie de la maçonnerie :

On peut différencier entre les problèmes en fonction du fonctionnement de la maçonnerie structurelle ou non. La présence des fissures est souvent l'indicateur d'une présence d'un désordre.

1.5.1 Pathologies structurelles :

- Une résistance insuffisante aux efforts verticales (plancher) ou horizontales (vent, terre) peut causer des fissures importantes.
- Des cloisons insérées dans des cadres en béton armé subissent des écrasements ou des éclatements des blocs sous l'effet du fluage ou du retrait de béton ou bien à cause du retrait des blocs eux-mêmes.
- L'enfoncement des murs à cause des contraintes de tassement ou de séisme (figure 1.14 et 1.12) qui dépassent la résistance du mortier.



- Une paroi composée de plusieurs éléments est susceptible de se fissurer à cause du comportement divergeant de ces derniers sous l'effet de la température et de l'humidité.

1.5.2 Les pathologies non structurelles [de Brandois, et col., 2006] :

Des pathologies destructives liées ou bien à l'humidité ou bien à la pollution atmosphérique et peuvent affecter soit la brique soit le mortier de pose, soit les deux à la fois. En outre, les joints peuvent être dégarnis et ne plus jouer leur rôle. Les problèmes rencontrés peuvent être de plusieurs types. La désintégration des unités (figure1.13), les taches, les moisissures (figure1.15), les fuites d'eau, l'écaillage, ou la fissuration.

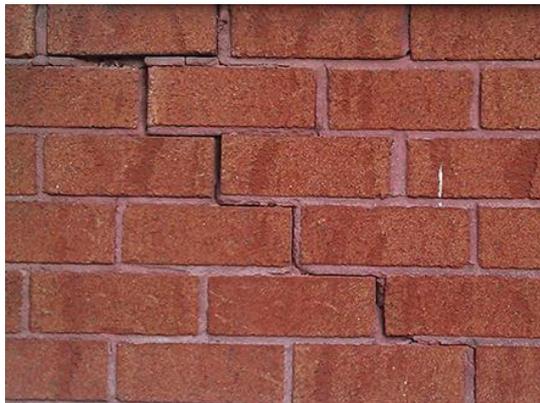


Figure 1.12: Fissure en escalier
[www.maconnerie-doyle.com]



Figure 1.13: Dislocation des briques
[www.bricoleurdudimanche.com]



Figure 1.14: Fissure en coup de sabre
[www.securiteinterieure.fr]



Figure 1.15: Moisissure sur un mur extérieur
[www.leroymerlin.fr]

1.6 Conclusion :

Ce chapitre est une sorte d'introduction dans le monde de la maçonnerie à travers une présentation exhaustive de ses constitutions et de ses types. Pour une présentation plus détaillée, un deuxième chapitre aborde les différents comportements mécaniques de la maçonnerie sous des sollicitations de cisaillement et de compression.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction :

Une distinction importante doit être rappelée entre la maçonnerie structurale qui assure la reprise des efforts gravitaires et latéraux d'un bâtiment et la maçonnerie de remplissage servant à la circonscription et l'insonorisation des enveloppes de locaux. Ces derniers, sont insérés dans les cadres structuraux, souvent en acier ou en béton armé. Leurs sollicitations par contact avec les cadres structuraux lors de charges extrêmes peuvent affecter le comportement dynamique du bâtiment ou mettre en danger la sécurité des occupants par une rupture inattendue. Cependant, on va se focaliser dans notre travail sur les murs de remplissage en briques de terre cuite car c'est le type le plus répandu comme système de partition et de remplissage [DAVIDOVICI 203]

La connaissance des caractéristiques mécaniques de la maçonnerie permet de s'approfondir dans la compréhension de son comportement et par-delà anticiper des problèmes liés à cet art de construire ancestral. Ce chapitre traitera :

- le comportement mécanique des murs en maçonnerie sous différentes sollicitations,
- les recherches effectuées sur le cisaillement et la compression des murs en maçonnerie,
- les différents codes de calcul.

2.2 Comportement sismique de la maçonnerie non armé :

Ce type se comporte mal face aux efforts sismiques, les briques ou les blocs s'écaillent et tombent, les murs se fissurent et les revêtements extérieurs s'effondrent.

L'inspection des dommages lors d'un séisme nous permet d'identifier les modes de ruptures et de mieux comprendre le comportement de la maçonnerie sous des efforts sismiques. Les rapports d'inspection après les séismes des dernières années nous permettent aussi de mettre à jour les connaissances sur le comportement de la maçonnerie lors d'un tremblement de terre.

2.2.1 Modes de rupture de la maçonnerie en un seul plan :

Les modes de rupture en plan sont divisées en deux catégories : ruptures en cisaillement et ruptures par flexion.

La rupture en cisaillement est la plus fréquente et elle est facilement identifiable par l'apparition de fissures en croix, tel que présenté par la figure 2.1.a. Celle-ci peut également se présenter sous la forme d'une fissure horizontale traversant le mur (figure 2.1.b). Ceci est le résultat du glissement de deux sections de maçonnerie suite à la rupture en cisaillement du mortier [ELGAWADY et col. 2007].

Le comportement dans le plan des murs soumis à des actions sismiques peut se résumer en quatre mécanismes : de traction diagonale, de glissement, de balancement et d'écrasement

de la maçonnerie. On peut aussi avoir une combinaison de mécanismes (traction diagonale et glissement ou glissement et balancement).

La résistance à la traction et à la compression de la maçonnerie, de même que la résistance d'adhésion du mortier, sont des propriétés de la maçonnerie qui ont également un rôle à jouer dans le développement de ces mécanismes de rupture.

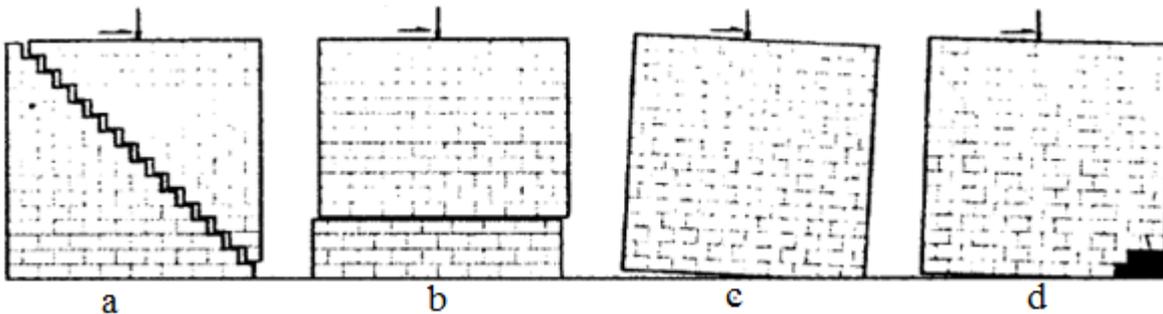


Figure 2.1: Modes de rupture en plan d'un mur de maçonnerie non armée : (a) traction diagonale ; (b) glissement ; (c) balancement ; (d) écrasement [ElGawady et col 2007].

➤ **Le mécanisme de traction diagonale :**

Quand la contrainte de traction diagonale résultant de l'état de contrainte normale et de cisaillement dépasse la résistance à la traction de la maçonnerie, une fissuration diagonale apparaît dans le mur. Si les unités de maçonnerie sont très résistantes, la fissuration passe dans les joints de mortier et produit un motif d'escalier. Si le mortier est plus résistant que les éléments de maçonnerie la fissuration diagonale les traverse

➤ **Le mécanisme de glissement :**

Quand la contrainte de cisaillement est supérieure à la résistance d'adhésion du mortier, une fissuration horizontale apparaît dans un joint, créant un plan de glissement le long du mur. Si la résistance à la friction du mortier est dépassée, il y a glissement des deux parties du mur, l'une sur l'autre.

➤ **Le mécanisme de balancement :**

Quand la contrainte en traction normale au joint horizontal à la base du mur est supérieure à la résistance en tension de la maçonnerie, il y a fissuration et séparation du mur et de la fondation. Sous l'effet du moment de renversement, un mouvement de balancement s'installe, limité par l'équilibre des forces verticales et horizontales.

➤ **Le mécanisme d'écrasement de la maçonnerie :**

L'écrasement de la maçonnerie se produit lorsque la concentration des contraintes de compression est plus grande que la résistance en compression de la maçonnerie. À la limite. Dans le cas d'une charge verticale très importante il peut y avoir écrasement de la maçonnerie avant que le mouvement de balancement s'installe.

2.2.2 Modes de rupture de la maçonnerie de remplissage dans des cadres rigides :

Le remplissage peut rompre de différentes façons suivant la rigidité des cadres et les sollicitations sismiques.

- **glissement horizontal:** le cisaillement du mur de remplissage cause une rupture horizontale (Figure 2.2.a)
- **Traction diagonale:** rupture par excès de compression diagonale (Figure 2.2.b)
- **Ecrasement des coins :** rupture par traction, suite à une flexion importante du mur (Figure 2.2.c).

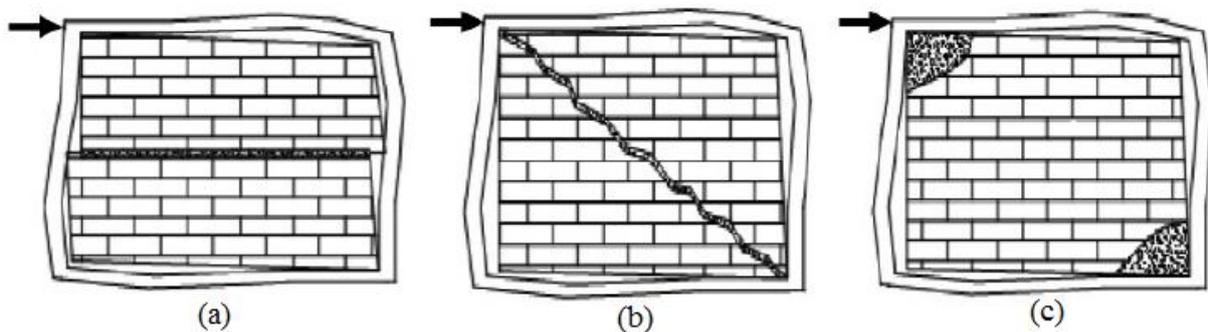


Figure 2.2: Modes de rupture typique de la maçonnerie de remplissage [AIT RAMDANE 2014]

Shing et Mehrabi [Shing et Mehrabi, 2002] ont identifié cinq principaux mécanismes de rupture des cadres remplis de murs de remplissage. La rupture peut provenir d'un mécanisme de flexion pure (A), d'un mécanisme de glissement (B, D), d'un mécanisme de tension diagonale (C), d'un mécanisme de compression diagonale (E) ou d'une combinaison de ces mécanismes présentés à la Figure 2. :

- Le mécanisme de flexion pur se produit par la séparation du panneau de remplissage et le cadre soumis à une charge modérée, s'ils ne sont pas solidement attachés,
- Le mode (B) est caractérisé par une fissure horizontale coulissante à mi-hauteur du cadre où une rotule plastique est susceptible d'apparaître. Les poteaux auront une forte tendance à développer une rupture par cisaillement,
- Pour le mécanisme de compression diagonale (mode C), des fissures diagonales se propagent d'un coin chargé à l'autre, le remplissage peut développer un mécanisme de tension diagonale qui conduit éventuellement à un broyage du béton de l'angle. Des rotules plastiques où une rupture par cisaillement apparaît dans les membres du cadre,
- Quant au mode D, il est caractérisé par le glissement de plusieurs lits de mortier (fissures horizontales) dans la maçonnerie de remplissage. Cela se produit souvent dans les remplissages avec de faibles joints,
- Enfin, le mode E présente un mécanisme de compression diagonale avec deux fissures parallèles. Il est souvent accompagné de broyage du béton du coin. Parfois, ce broyage peut également se produire au centre du remplissage.

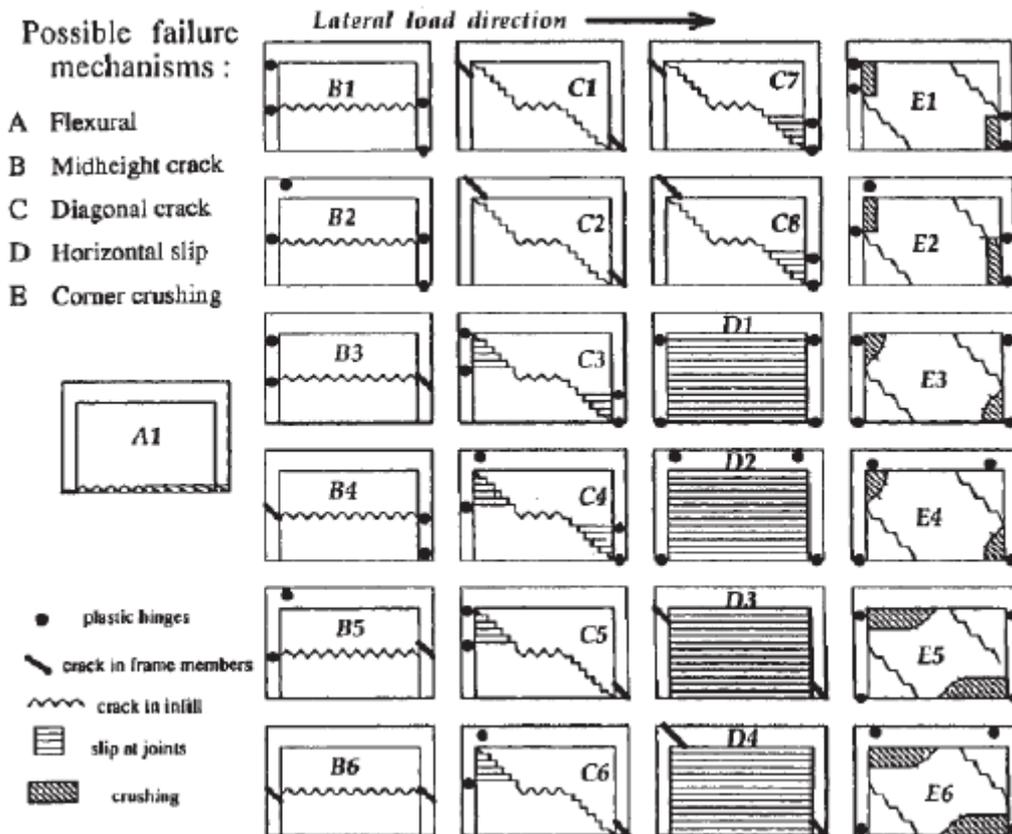


Figure 2.3: Modes de rupture en plan d'un mur de remplissage en maçonnerie insérer dans un cadre rigide [Shing et Mehrabi 2002]

2.2.3 Interaction panneau - poteaux dans le plan du portique :

2.2.3.1 Mode de fonctionnement :

Les structures en portiques (poteaux et poutres) en béton armé avec des remplissages en maçonnerie est le type le plus répandu dans notre pays. Lorsque la maçonnerie est mise en place après le décoffrage de la structure poteaux-poutres en béton armé, il y a forcément du « jeu » entre le béton et la maçonnerie. Sous l'effet des secousses, l'ossature en béton armé se déforme à la faveur du jeu. Même un très faible jeu suffit à ce que les deux matériaux s'entrechoquent au lieu de résister ensemble. Ce mouvement différentiel fait éclater la maçonnerie qui, avant de rompre, exerce une poussée sur la jonction poteau-poutre. Elle amorce ensuite la rupture de la tête du poteau et prépare l'effondrement de l'ossature. Alors les dislocations se produisent comme indiqué dans la Figure 2.4. C'est pourquoi on demande de couler les chaînages après la mise en œuvre de la maçonnerie : le béton se met parfaitement en place en suivant tous les contours des blocs et l'ensemble résistera de façon cohérente aux secousses.

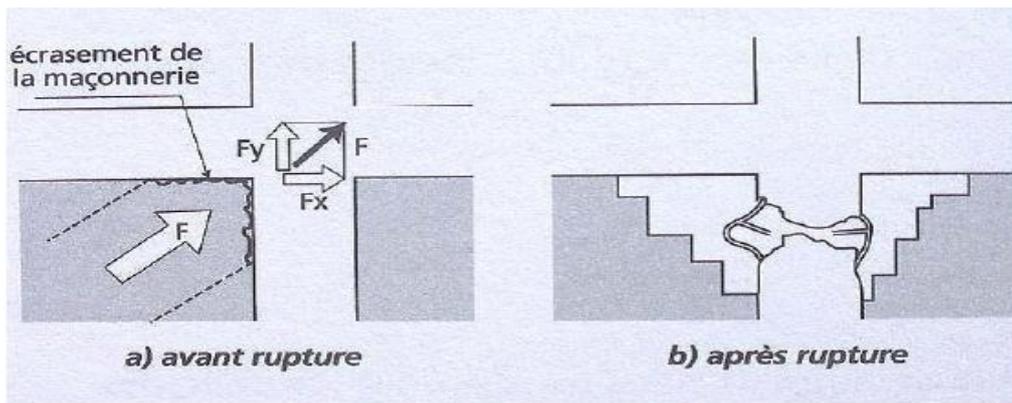


Figure 2.4: Mécanisme de ruine des ossatures par jeu avec leur remplissage de maçonnerie [GERTIN 2014]

2.2.3.2 La bielle équivalente :

Sous des forces latérales dues au séisme, le cadre tend à se séparer du remplissage dans deux coins diagonalement opposés ce qui provoque des contraintes de compression de contact entre le cadre et le remplissage dans les deux autres coins restants, cette séparation entre le cadre et le mur se produit dans les zones en tension et une diagonale de compression reprend alors seule les efforts [Paulay et Priestley, 1992]. Pour une analyse dynamique d'un bâtiment il est recommandé de considérer le mur de remplissage comme un contreventement par bielle de compression équivalente

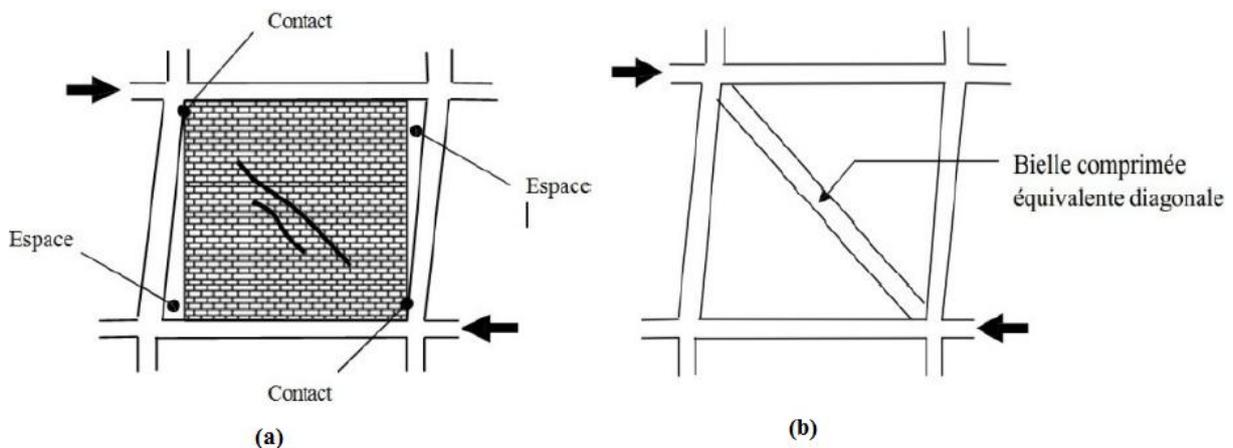


Figure 2.5: a) déformé d'un cadre avec remplissage sous chargement latéral b) bielle comprimée équivalente diagonale [Ait RAMDANE 2014].

Plusieurs équations ont été proposées afin de déterminer les propriétés de la bielle de compression équivalente. L'équation 2.1 tirée de [Paulay et Priestley, 1992] propose une valeur de la largeur w de la bielle basée sur la longueur de la diagonale d .

$$w=0.25d \quad (2.1)$$

FEMA-356 a adopté dans la pré-norme pour la réhabilitation des bâtiments une autre équation pour calculer la largeur de la bielle [FEMA, 2000]

$$w = 0.175(\lambda h)^{-0.4} d \quad (2.2)$$

h : la hauteur du mur

λ : coefficient qui permet de lier la longueur de contact entre le mur et le cadre

$$\lambda = \left(\frac{E_m t \sin 2\theta}{4E_c I_{col} h} t \right)^{1/4} \quad (2.3)$$

E_m : Module d'élasticité de la maçonnerie.

E_c : Module d'élasticité du béton du cadre.

I_{col} : Inertie du poteau en béton armé.

t : Epaisseur de la maçonnerie.

H, d, h et θ : sont définis sur la Figure 2.6

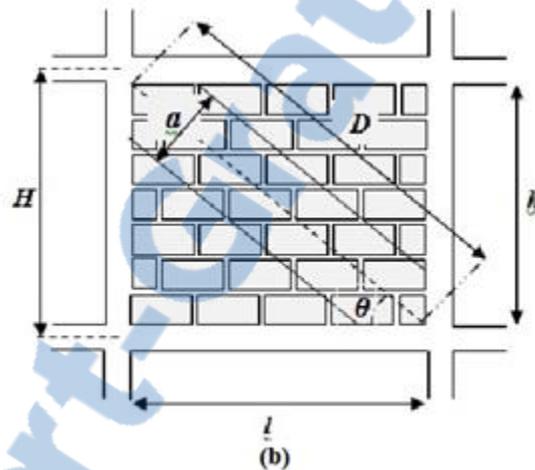


Figure 2.6: Définition des paramètres caractérisant la bielle comprimée équivalente [Ait RAMDANE 2014].

2.2.3.3 Rapport sur le séisme de Boumerdès 2003 [DAVIDOVICI 2003] :

Les bâtiments constitués par une structure en portiques en béton armé avec des remplissages en maçonnerie représentent entre 80 à 90 % des constructions réalisées dans la zone sinistrée par le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003. Qu'ils soient pris en compte ou non dans les justifications de résistance aux efforts sismiques, les panneaux de remplissage en maçonnerie développent, suivant leurs diagonales dans un sens puis dans l'autre, des bielles actives fonctionnant en compression et constituant avec l'ossature un système triangulé (Figure 2.7.a). Si l'on considère un panneau soumis à des forces agissant parallèlement à son plan (Figure 2.7.b), ce panneau a tendance à se déformer en parallélogramme (Figure 2.8). Il se découpe alors dans la maçonnerie une diagonale active comprimée et une diagonale active tendue ; cette dernière cède en donnant lieu à une fissure oblique. Lorsque les effets s'inversent, c'est au tour de l'autre diagonale de céder (Figure 2.7.c) et on retrouve la classique fissuration en X (Figure 2.7.d).

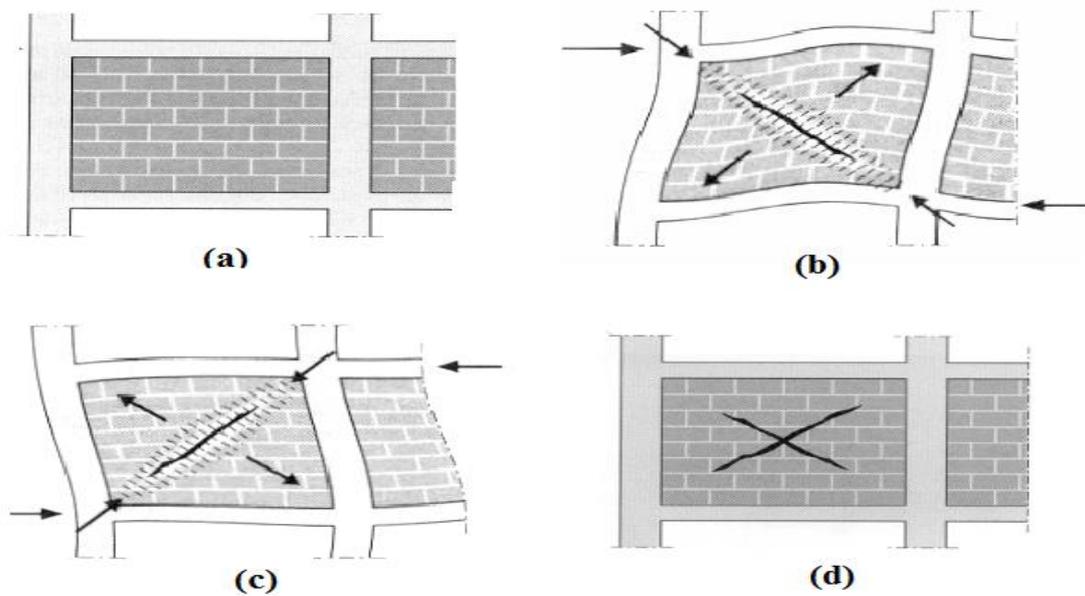


Figure 2.7 : a) Portique avant l'action sismique, b) Sous l'action sismique formation d'une diagonale comprimée et d'une diagonale tendue c) Changement de direction du séisme : inversion des sollicitations des diagonales d) Après séisme, le panneau en maçonnerie se trouve avec une fissuration en X [DAVIDOVICI 2003]



Figure 2.8: Destruction de l'extrémité du panneau du fait de la compression de la diagonale qui se forme dans le mur DAVIDOVICI 2003]

2.2.3.4 Le modèle expérimental :

A partir du comportement de la maçonnerie en interaction avec des cadres rigides, les chercheurs ont opté pour des méthodes d'essai permettant de mesurer la résistance à la compression diagonale (cisaillement) tel que le modèle de l'ASTM E 519-02. Ce calcul était possible avec d'autres méthodes disponibles ; mais pas assez représentatives d'un effort réel du séisme. La taille du spécimen a été choisie comme étant la plus petite qui peut illustrer raisonnablement un assemblage de maçonnerie et qui permettrait l'utilisation de machines d'essai telles que utilisées par de nombreux laboratoires. Un échantillon de taille plus petite pourrait être utilisé si l'équipement d'essai disponible ne peut pas accueillir les dimensions de la norme (1,2 m).

2.3 Travaux effectués sur le cisaillement :

2.3.1 Les travaux de Malyszko :

Dans ce travail, plusieurs essais de résistance ont été effectués sur des panneaux de maçonnerie de dimensions de (520 x 520 x 120 mm) notamment l'essai de compression diagonal [Malyszko, 2003].

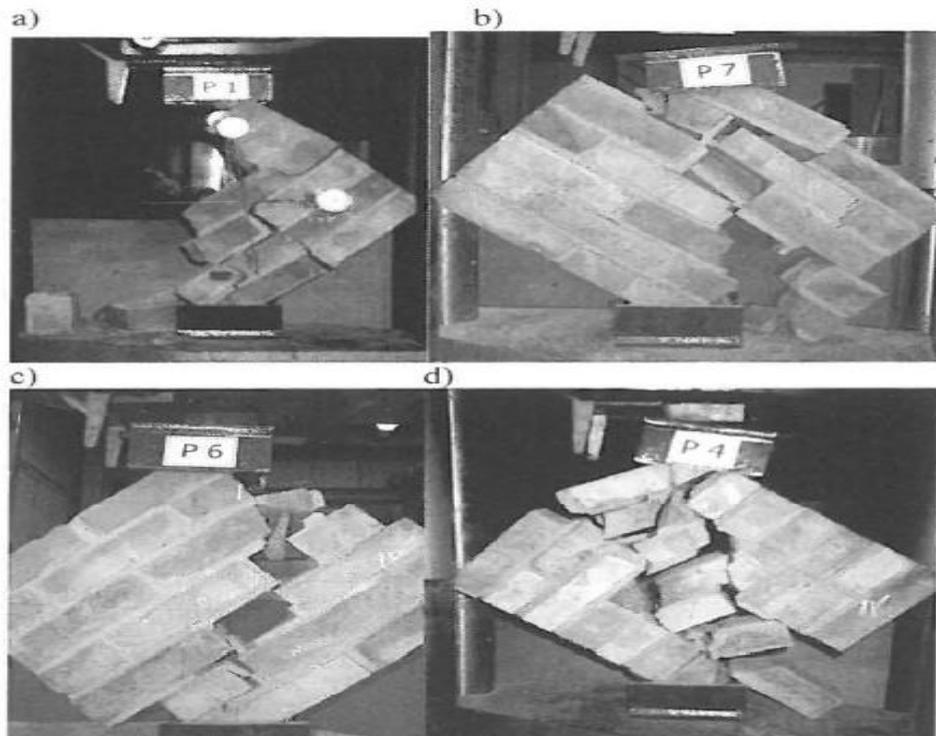


Figure 2.9 : modes expérimentaux de fissuration des panneaux en maçonnerie a) Fissuration par tension diagonale b) et c) combinaison de tension diagonale et glissement des joints d) domination de la compression [Malyszko 2003].

En fonction des charges latérales et axiales dans le plan, ainsi que de la forme de construction de la paroi, le mode de rupture sous chargement de cisaillement peut être caractérisé par trois mécanismes de base:

Glissement le long des joints de lits : se produit lorsque la force de cisaillement latérale est supérieure à la résistance de l'adhérence et au cisaillement entre le mortier et les unités (Figure 2.9.b et c).

Fissuration par tension diagonale : se fait suivant la diagonale, par glissement le long des joints du mortier, en fonction des caractéristiques des matériaux constitutifs (mortiers et briques) Figure 2.9 a.

Fissuration par compression : le troisième mode est attribué à la prédominance de la charge axiale conduisant à une fissuration verticale ou à une rupture de compression bi axiale plus localisée Figure 2.9.d.

Le critère de rupture le plus couramment adopté dans les codes de pratique pour la combinaison de compression et de cisaillement traduit la résistance à la compression par une équation de type coulombien (équation 2.4). Cette relation est en accord avec des résultats expérimentaux au moins jusqu'à une certaine valeur de la contrainte de compression. Le critère de Coulomb est lié au premier mode de rupture.

$$f_v = f_{v0} + \mu\sigma_c = 0.53 + 0.54\sigma_c \quad (2.4)$$

En supposant que l'effort de traction conduisant à la rupture est constant et égal à la résistance à la traction diagonale, un critère peut être écrit sous une forme plus simple comme suit:

$$f_v = S_{pt} \sqrt{1 + \frac{\sigma_c}{S_{pt}}} \quad (2.5)$$

f_v = résistance au cisaillement de la maçonnerie ;

σ_c = contrainte de compression normale aux joints.

En utilisant la résistance à la traction diagonale S_{pt} , ce critère est lié à la fissuration par traction diagonale.

Le critère lié au troisième mode de rupture peut être écrit sous la forme la plus simple comme:

$$f_v = n_c f_c \sqrt{1 - \frac{\sigma_c}{f_c}} \quad (2.6)$$

f_c = la résistance à la compression de la maçonnerie pour un chargement axial perpendiculaire aux joints; n_c = rapport des résistances à la compression pour les résistances parallèles et normales aux joints de lits.

2.3.2 Travaux de Milosevic et col:

Milosevic et col. [Milosevic et col 2012] ont effectué des essais de compression diagonale selon la norme [ASTM E519-02] sur quatre panneaux de maçonnerie en moellons de pierres de dimensions de 120x120x70 cm (deux panneaux avec un mortier à base de chaux aérienne W2 et W3 et les deux autres avec un mortier hydraulique W1 et W4. Il est important de mentionner que les panneaux W2, W3 et W4 ont été construits avec des couches de jointement diagonales à 45°, tandis que l'échantillon W1 a été construit avec des couches de pierres horizontales.

Les résultats obtenus ont montré que les différentes dispositions des pierres entraînent, des différences dans la résistance de la maçonnerie et la capacité de déformation. L'influence de la disposition des pierres et l'orientation des joints n'est pas aussi importante que l'influence du mortier: les murs jointoyés avec du mortier à base de chaux hydraulique ont montré une

résistance au cisaillement d'environ 10 fois supérieure à la résistance au cisaillement des murs réalisés avec du mortier à base de chaux aérienne. La grande influence de la résistance au mortier sur la résistance au cisaillement de la paroi s'explique par le fait que les fissures se propagent à travers les joints sans endommager les pierres.

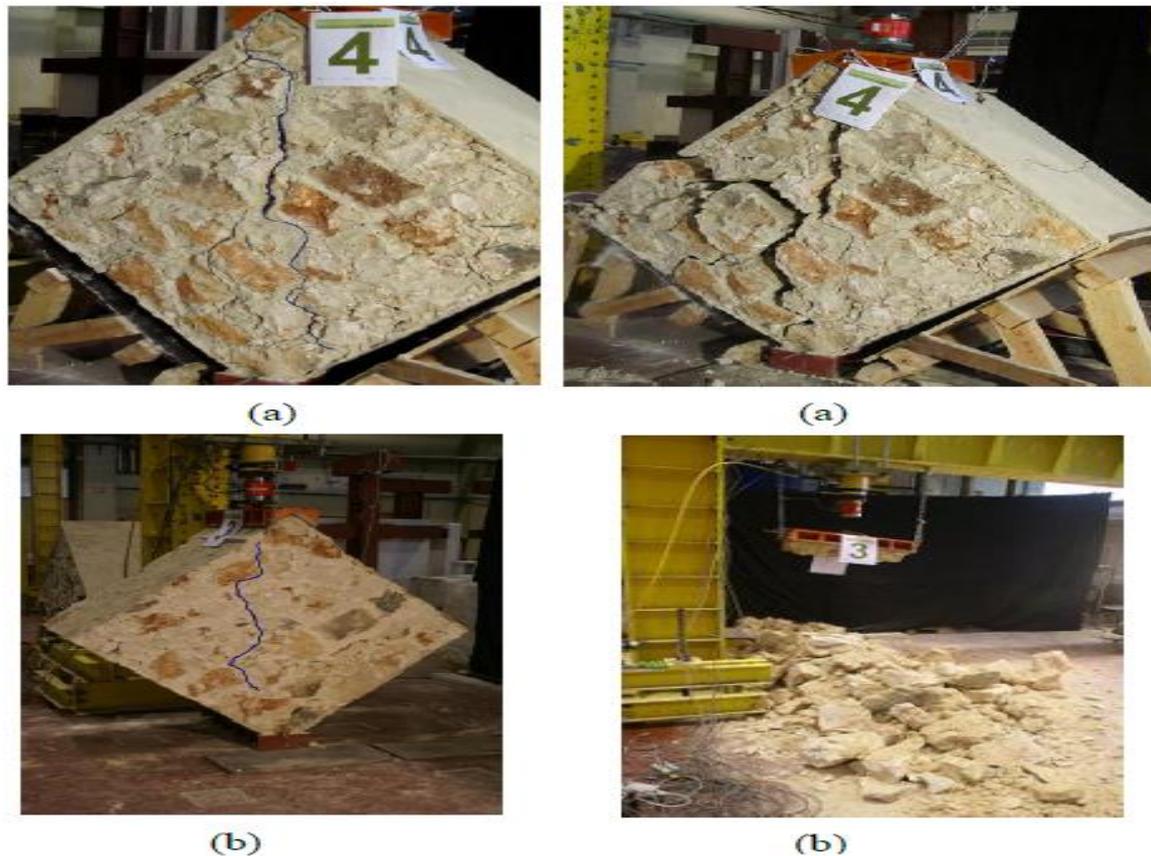


Figure 2.10: (à gauche) Mode de fissuration (à droite) Effondrement. Les spécimens en maçonnerie: (a) échantillon W4 (b) échantillon W3 [Milosevic et col 2012].

Neuf autres prototypes de (60x40x40 cm) ont été soumis à des essais triplets selon la norme EN 1052-3 [BS EN, 2002]. Les murs ont été construits avec trois couches de pierre et subdivisés en deux groupes selon le type de mortier (cinq avec mortier hydraulique TH, tandis que les quatre restants avec un mortier à base de chaux aérienne TA). Cela a conduit à un mode de rupture : glissement de la couche intermédiaire par cisaillement, identique pour tous les échantillons comme le montre la figure 2.11.

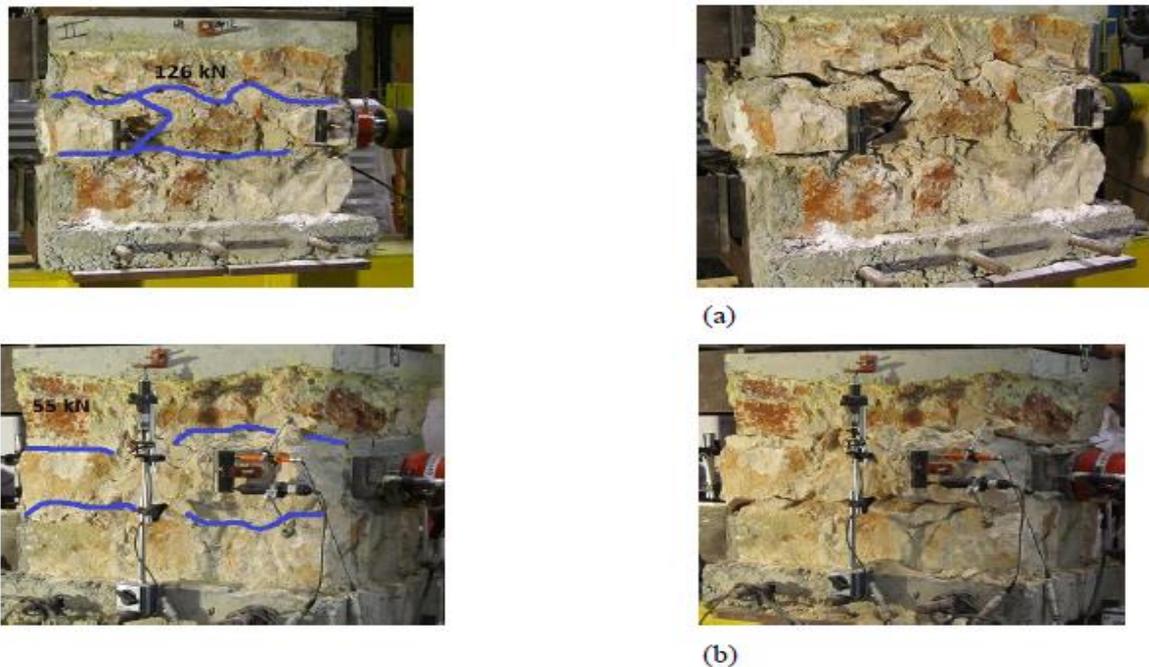


Figure 2.11: (à gauche) Mode de fissuration (à droite) Effondrement. Les spécimens en maçonnerie: (a) échantillon T1 (b) échantillon T7 [Milosevic et col 2012].

Comme s'est produit dans le cas des tests de compression diagonale dans les essais de triplet, les murets à base de mortier hydraulique présentaient une résistance au cisaillement beaucoup plus élevée que ceux construits avec du mortier à base de chaux aérienne. L'effondrement des murets s'est également produit sans écrasement majeur de la pierre et la composition du mortier a eu une grande influence dans la résistance au glissement des joints.

2.3.3 Travaux de GHARIB et col :

GHARIB et col [GHARIB et col 2015] ont réalisé des tests sur des murets d'une longueur moyenne de 600 mm et une épaisseur de 85mm. Chaque mur est composé de cinq rangés de pierres, chaque rangé est constituée de trois pierres. 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 à une vitesse de chargement de 2mm/min. Les mesures de déplacement dans les deux sens sont effectuées par deux capteurs de déplacement LVDT fixés sur les deux diagonales.

Comportement des murs non renforcés :

La valeur expérimentale de la résistance moyenne de cisaillement est calculée pour trois murs. La résistance a une valeur de 1,26 MPa correspondant à une force moyenne de 89,4 KN (figure 2.12). La rupture des murs non renforcé s'est produite par fissuration de joints horizontaux et verticaux.

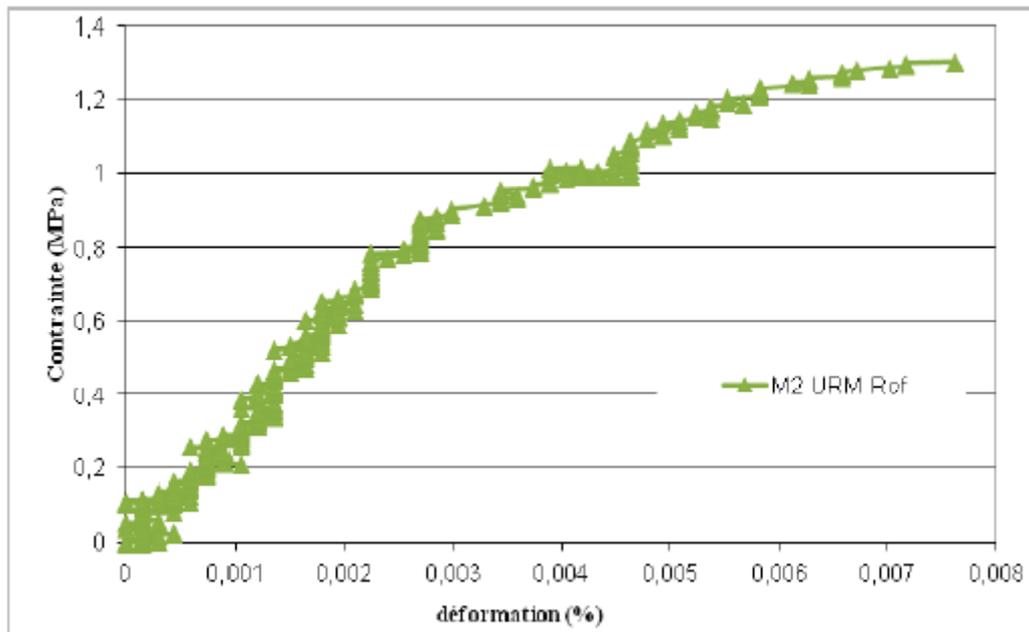


Figure 2.12: Compression diagonale : contrainte de cisaillement-déformation du mur non renforcés [GHARIB et col 2015]

2.3.4 Travaux effectués par KARA ALI et HAMZA CHERIF :

Dans leur travail [KARA ALI et HAMZA CHERIF, 2014] ont effectués des essais sur des murets de 60×60cm² en agglomérés de béton tout en variant l'épaisseur des joints horizontaux (5mm, 10mm, 15mm) constitués de trois types de mortier (A)1 :4, (B) 1 :6 et (C) 1 :2 :9. Deux autres paramètres ont influencé la résistance au cisaillement : l'enduisage et le remplissage des joints verticaux.

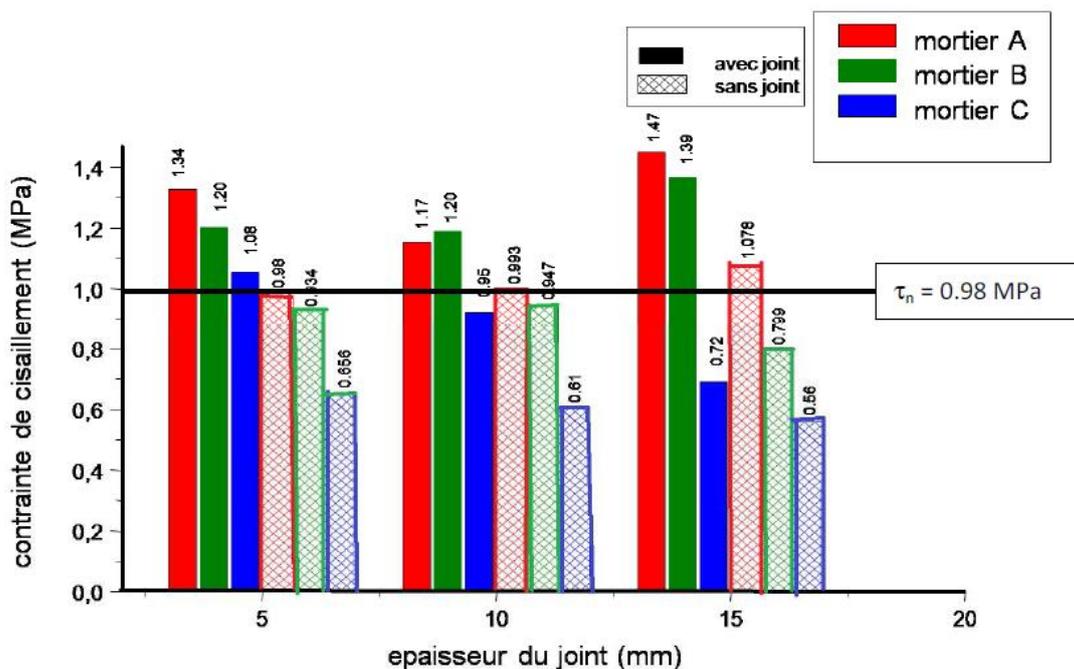


Figure 2.13: Variation de la résistance des murets avec et sans joint vertical [KARA ALI et HAMZA CHERIF 2014].

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

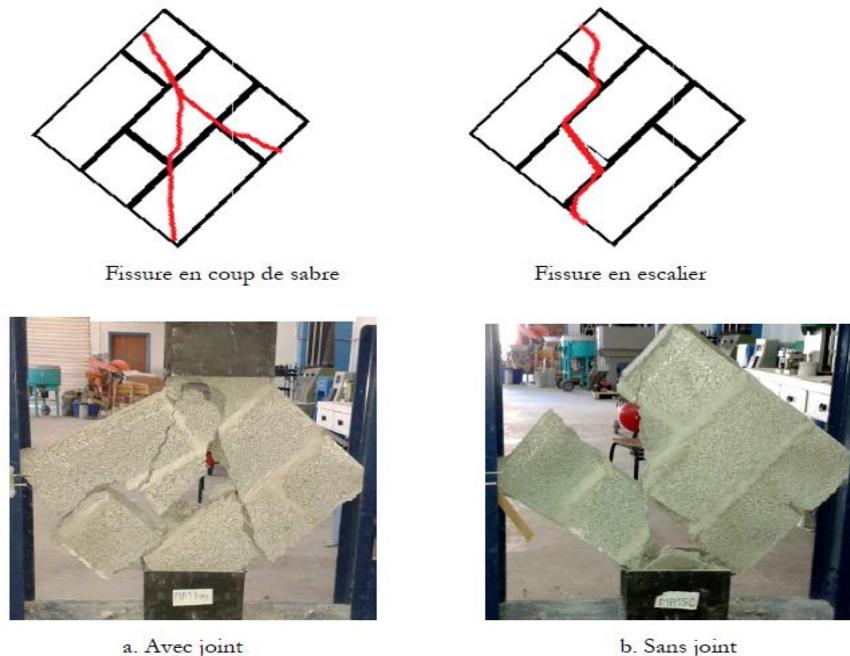


Figure 2.14: Mode de rupture des murets hourdés au mortier A [KARA ALI et HAMZA CHERIF 2014].

2.3.5 Travaux effectués par RAMDANI et ACHOURI :

Le travail de [RAMDANI et ACHOURI, 2016] consistait à tester sous chargement de cisaillement, des murets de dimensions $60 \times 60 \text{ cm}^2$. Les murets sont construits avec des briques en terre cuite ayant une résistance à la compression moyenne de 2,5 MPa, hourdés à l'aide de deux types de mortier à base de ciment portland : 1 :4, 1 :6, avec des substitutions par du fillers calcaire à des pourcentage allant de 0 à 25% avec un pas de 5% et une épaisseur des joints (verticaux et horizontaux) égale à 10 mm.

Les résultats montrent qu'il y avait une légère augmentation de la résistance des murets aux joints confectionnés avec un mortier 1 :4 avec une substitution du ciment par le filler calcaire à 5%. Pour le mortier 1 :6 c'est le pourcentage de 10% qui a présenté une augmentation relative de la résistance au cisaillement (voir figure 2.15).

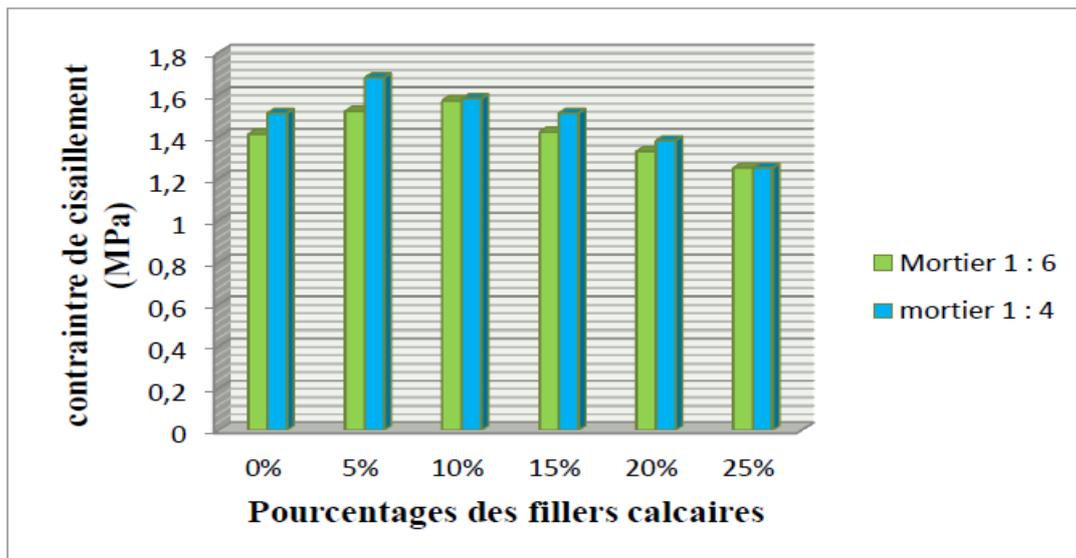


Figure 2.15: Influence des fillers calcaires sur la contrainte de cisaillement [RAMDANI est ACHOURI 2016].

2.3.6 Travaux de Tomazevic :

[Tomazevic, 2008] a réalisé plusieurs tests sur des murs en briques creuse et perforée en terre cuite, soumis à des chargements de cisaillement. Il a enregistré deux types de rupture : le premier mode apparait sur les murs en briques creuses, les fissures traversent les unités (figure 2.16.a). Le second mode qui apparait sur les murs en briques perforées, les fissures traversent les unités et suivent les joints en escalier (figure 2.16.b).

Les deux modes sont apparus avant l'effondrement total de la maçonnerie.

TOMAZEVIC [TOMAZEVIC, 2008] a réalisé aussi l'essai triplet selon la norme EN 1052-3 (figures 2.17) avec une contrainte de compression nulle pour obtenir la contrainte de cisaillement pure f_{vk} , indiquant la résistance à l'interface entre mortier et briques. Pour ce faire, il faut que les joints soient parfaitement remplis de mortier. Six triplets de chaque type de maçonnerie ont été testés à la rupture (briques en terre cuite creuses et perforées, briques en silico calcaire, en agglomérée de béton, béton cellulaire autoclave et en pierre naturelles). Le tableau 2.1 consigne les valeurs des résistances obtenues sur ces triplets.



Figure 2.16: Les modes de rupture des murs : a) en briques creuses b) briques perforées [Tomazevic 2008].

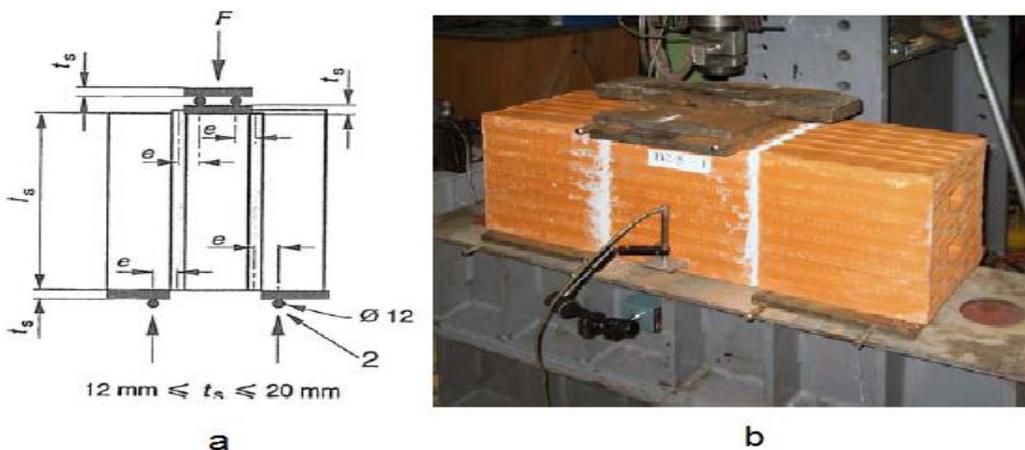


Figure 2.17: a) Présentation schématique du test de résistance au cisaillement initial selon EN 1502-3 b) Essai de résistance au cisaillement initial selon EN 1502-3 en laboratoire [Tomazevic 2008].

Tableau 2.1: Valeurs moyennes de la résistance au cisaillement initiale de la maçonnerie, f_{vo} , obtenues en testant les triplets selon EN 1502-3 [Tomazevic, 2008].

Désignation des briques	Résistance à la compression des briques (MPa)	Classe de résistance des mortiers			
		5 MPa		10 MPa	
		f_{vko}	f_{vo}	f_{vko}	f_{vo}
B1	20.7	0.17	0.23	0.19	0.27
B2	13.0	0.19	0.26	0.21	0.26
B3	14.6	0.16	0.20	0.16	0.20
B4	12.2	0.26	0.31	0.22	0.38
B5	11.5	0.50	0.60	0.55	0.66
B6	30.3	0.28	0.34	0.28	0.33
Moyenne		0.21	0.27	0.21	0.29

2.4 Comportement de la maçonnerie en compression :

Lorsqu'une maçonnerie est sollicitée en compression simple dans son plan, on observe en général trois modes de rupture selon la direction de la sollicitation (figure 2.18).

Lorsque la charge est perpendiculaire aux lits du mortier, les fissures sont verticales, si $\sigma_v \gg \sigma_h$ c'est le cas de la figure 2.18.a. Lorsqu'elle est parallèle au lit de mortier, les fissures sont horizontales, si $\sigma_v \ll \sigma_h$ (figure 2.18.b). En cas de compression biaxiale dans son plan, le mode de rupture de la maçonnerie est fonction de l'intensité des charges verticales σ_v et horizontales σ_h . Dans le cas où $\sigma_v = \sigma_h$, on observe une fissure verticale dans le plan du mur (figure 2.18.c).

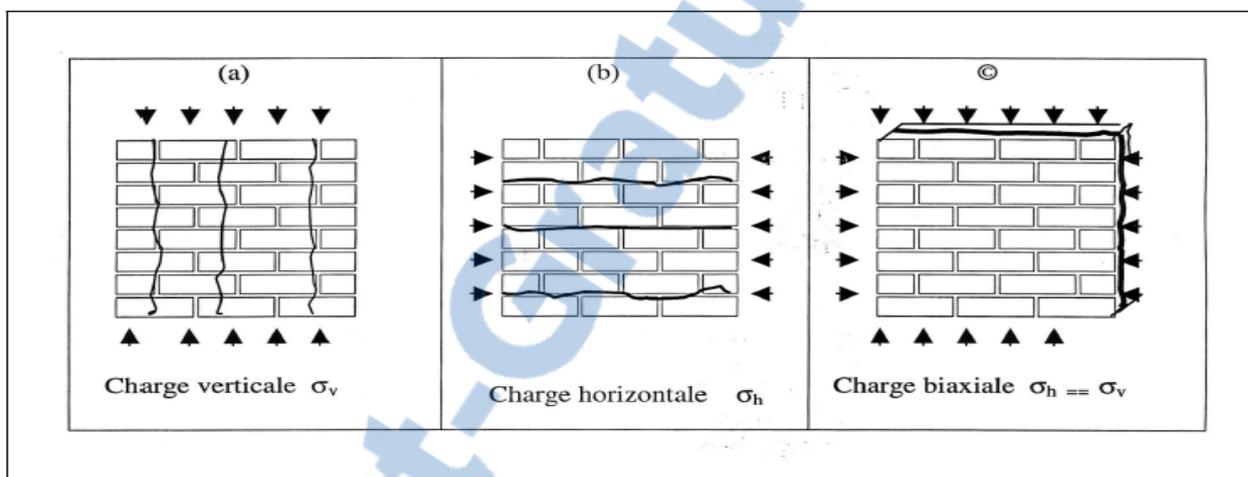


Figure 2.18: modes de ruptures des maçonneries sollicitées en compression dans son plan
 a) compression simple verticale dans la direction perpendiculaire au lit de mortier ; b)
 compression horizontale parallèle au lit de mortier ; c) compression biaxiale dans le plan
 du mur [P'KLA 2002]

2.5 Travaux effectués sur la compression

2.5.1 Travaux de HOUTI :

HOUTI [HOUTI, 2002] a réalisé des tests de compression uni axiale sur des panneaux de maçonnerie en briques de terre cuite de dimensions $10 \times 90 \times 100 \text{ cm}^3$ avec deux types de joints : mortier de ciment (1 :3) et un mortier bâtard (1 :1:6) tout en variant l'épaisseur des joints de 5, 10 et 15mm et leurs orientations : 0, 45 et 90° (cf. figure 2.19).

Trois modes de rupture ont été observés (figure 2.20):

- lorsque l'orientation du plan de joint θ est égale à 0° , nous obtenons une rupture par décohésion entre les joints de mortier parallèle au chargement et les briques,
- lorsque l'orientation du plan de joint θ est égale à 90° , la rupture se produit par une fissuration de traction s'initialisant dans le joint de mortier parallèle à l'axe de chargement,
- Dans le cas où l'orientation du plan de joint θ est égale à 45° , la rupture intervient par combinaison des deux cas précédents.

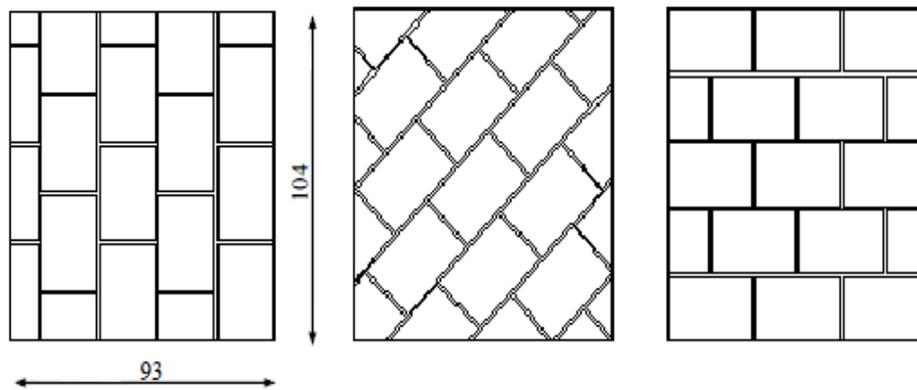


Figure 2.19: Dimensions des murets en briques de terre cuite creuses [HOUTI 2002].

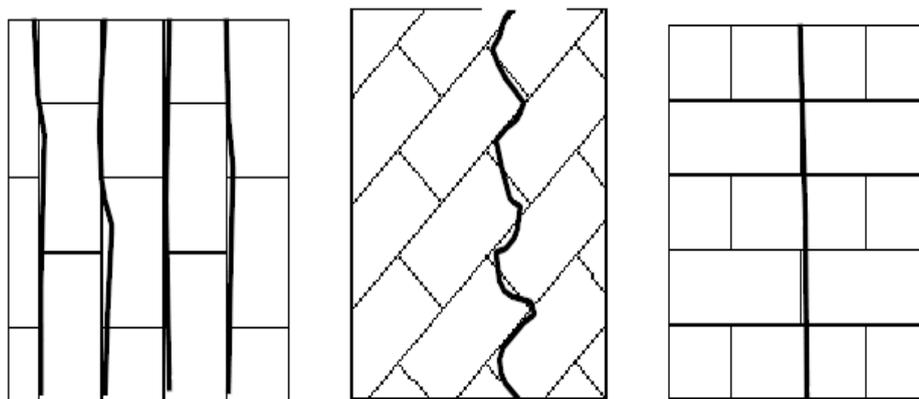


Figure 2.20: Mode de rupture des briques en terre cuite [HOUTI 2002].

L'étude expérimentale sur les murets tests s'est avéré un moyen efficace d'étude du comportement de la maçonnerie. Houti a aussi constaté l'influence de l'épaisseur du joint sur le comportement de la maçonnerie sous un chargement uni axial ; l'épaisseur optimale pour la maçonnerie en brique creuse est de 1.0 cm. Outre l'importance de l'épaisseur du joint, l'étude effectuée permet de mettre en évidence l'importance des variables telles que l'orientation du joint et la nature du joint (figure 2.21).

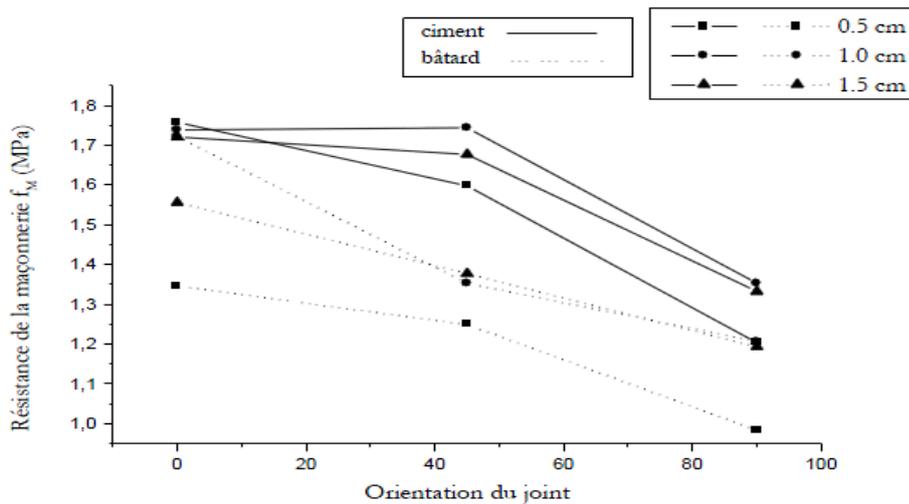


Figure 2.21: Influence de l'orientation du joint sur la résistance de la maçonnerie.

2.5.2 Travaux effectués par RAMDANI et ACHOURI :

Un travail similaire que celui relatif au cisaillement (chap. 2.3.5) est réalisé sous chargement de compression diagonale avec un changement des dimensions des murets 80×60cm².

La résistance à la compression des murets, diminue graduellement au fur et à mesure de la substitution du filler (voir figure 2.22).

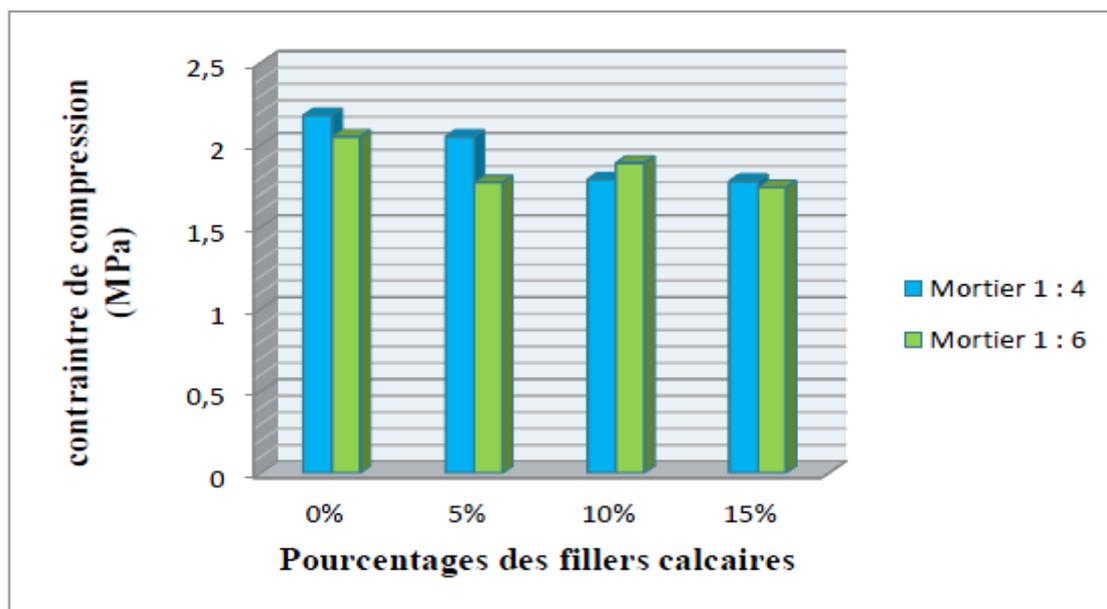


Figure 2.22: Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression [RAMDANI et ACHOURI 2016].

Pour les modes de rupture, les auteurs ont enregistré deux modes principales :

- Rupture parallèle à l'axe du chargement on obtient une rupture en compression diagonale,
- Eclatement de la pièce dans la partie supérieure ou inférieure.

2.6 Travaux effectués sur les mortiers :

2.6.1 Travaux de CHAIB et col :

Cette étude effectuée par [CHAIB et col 2015] consistait, à préparer un mortier normalisé en remplaçant un certain pourcentage de ciment par l’ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentages : 20, 30, 35, 40 et 50%. Le ciment utilisé est un ciment CPA-CEM I 42,5N selon la norme algérienne NA442. Les résistances minimales garanties à 02 jours sont de 8MPa et à 28jours 40MPa.

La pouzzolane naturelle utilisée est d’origine volcanique extraite du gisement de Bouhmidi, situé au sud de Béni-Saf. Elle se présente sous forme d’une poudre, résultante de concassage des scories pouzzolaniques, étuvées pendant 24 heures à une température de 50°C, ensuite broyées et tamisée à 80 µm. Les échantillons ont été confectionnés selon la norme NF15 403 dans des moules prismatiques (4x4x16 cm³).Les rapports pondéraux utilisés expérimentalement sont : liant/sable = 1/3 et eau/liant = 0,5. Les résistances mécaniques (flexion et compression) sont mesurées aux échéances : 1, 3, 28 et 45 jours. Les essais mécaniques sont effectués conformément à la forme NF P15 471.

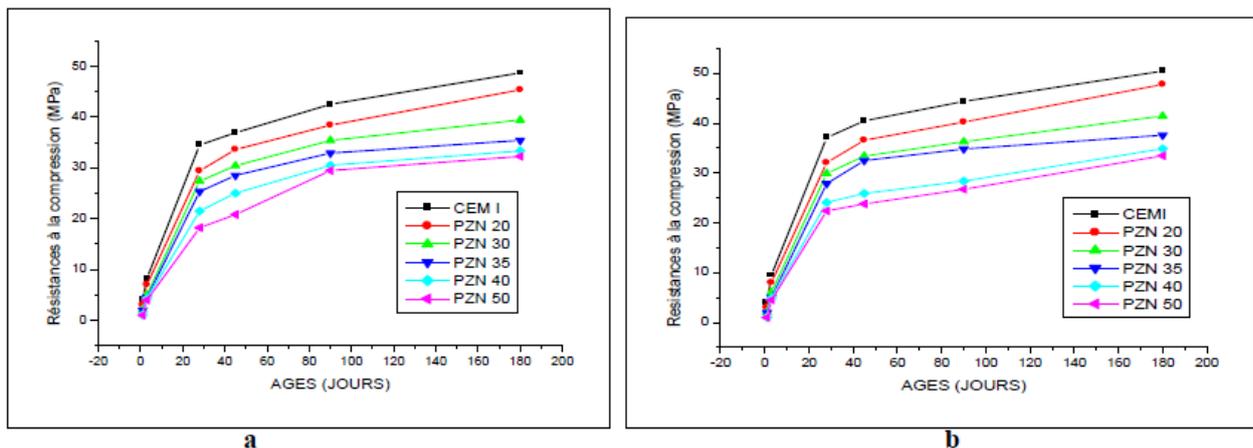


Figure 2.23:Evolution de la résistance à la compression des mortiers binaires en fonction de l’âge a) conservation à l’air b) conservation dans l’eau [CHAIB et col 2015]

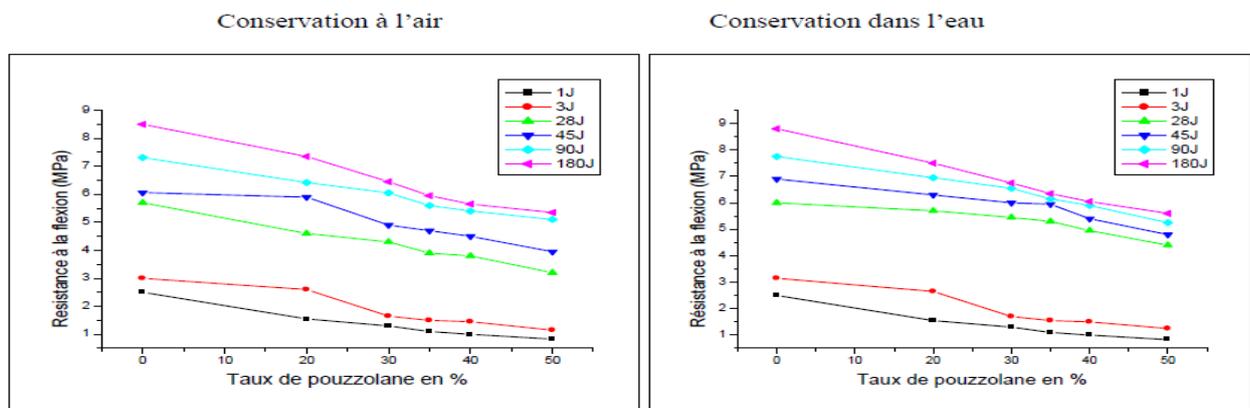


Figure 2.24: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de la pouzzolane [CHAIB et col 2015]

Les résultats de cette étude (figures 2.23 et 2.24) se résument dans ce qui suit :

- Les résistances des mortiers diminuent en fonction du taux de substitution de la pouzzolane ; mais restent inférieures à celle du mortier de référence et ce pour tous les âges,
- Au jeune âge, l'augmentation du taux d'ajout a un effet négatif sur la résistance à la compression ; seulement la tendance s'inverse avec l'âge quand il devient important, la résistance augmente,
- A long terme et pour un taux de pouzzolane de 20 %, la résistance à la compression s'approche de la résistance du mortier de référence.

2.6.2 Travaux de BENKADDOUR et col :

Dans ce travail [BENKADDOUR et col 2009] ont étudié l'effet de la pouzzolane naturelle (PN) et la pouzzolane artificielle (PA) à base de calcination d'une vase de dragage sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Les résultats ont été analysés et ils ont comparé les deux mortiers avec ajout par rapport au mortier de référence.

Le ciment utilisé pour la confection des mortiers est un CEM I 42.5 avec une surface spécifique Blaine de $3585 \text{ cm}^2/\text{g}$ et une densité de 3,2. La pouzzolane artificielle est à base de la vase calcinée du barrage FERGOUG et la pouzzolane naturelle utilisée est de provenance du gisement de Bouhmidi à Béni-Saf.

Deux types d'éprouvettes de mortiers 1/2 sont confectionnés selon la norme NF EN 196-1. Dans le premier type d'éprouvettes, Les pouzzolanes naturelle et artificielle sont incorporées dans les mortiers à différents dosages 0, 10, 20 et 30%. Pour la caractérisation de la résistance mécanique les éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont subi des essais de traction par flexion puis les demi-prismes obtenus ont été écrasés en compression à différents âges : 2, 7 et 28 jours (figure 2.25).

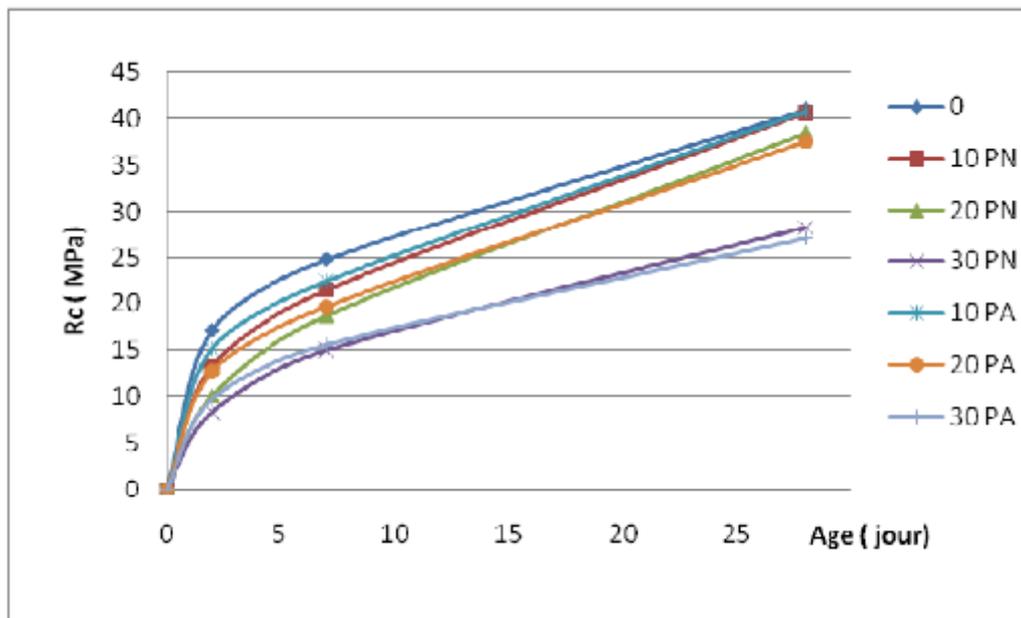


Figure 2.25: Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers (PA et PN) en fonction de l'âge [BENKADDOUR et col 2009].

La pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliorent la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.

2.7 Les codes de calcul :

2.7.1 La norme ASTM E 519-02:

A partir d'un essai simple de compression diagonal sur des murets en maçonnerie de $1,20 \times 1,20 \text{ m}^2$, la norme ASTM nous permet de calculer la contrainte de cisaillement principal. Les essais se font à l'aide d'un portique et un vérin hydraulique pour appliquer une charge croissante et continue jusqu'à la rupture.



Figure 2.26: appareillage permettant de déterminer la contrainte de compression diagonal pour les murs en maçonnerie [ASTM E 519-02]

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

τ : contrainte de cisaillement sur la surface en MPa.

P : charge de compression appliquée en KN.

A_n : surface nette du mur en mm^2 , calculée selon l'équation 2.8 (figure 2.27):

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

w : largeur de l'échantillon, en mm.

h : hauteur de l'échantillon, en mm.

t : épaisseur de l'échantillon, en mm.

n : surface brute du bloc, en pourcentage.

Le module de rigidité est obtenu par la formule 2.9 :

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

G : module de rigidité en MPa

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

$\gamma_{1/3}$: déformation tangentielle correspondant au tiers de la charge de rupture

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

ΔL : déplacement diagonal, en mm.

l : longueur de la diagonale, en mm.

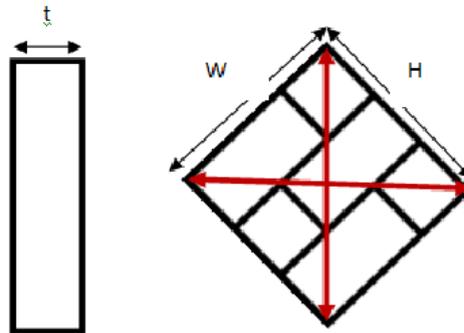


Figure 2.27: Caractéristiques géométriques des murets [ASTM E 519-02].

2.7.2 La résistance au cisaillement de la maçonnerie non armée selon l'EUROCODE 6 :

Le dimensionnement en cisaillement de la maçonnerie s'appuie sur la valeur de l'adhérence entre le mortier et l'élément du support (figure 2.28).

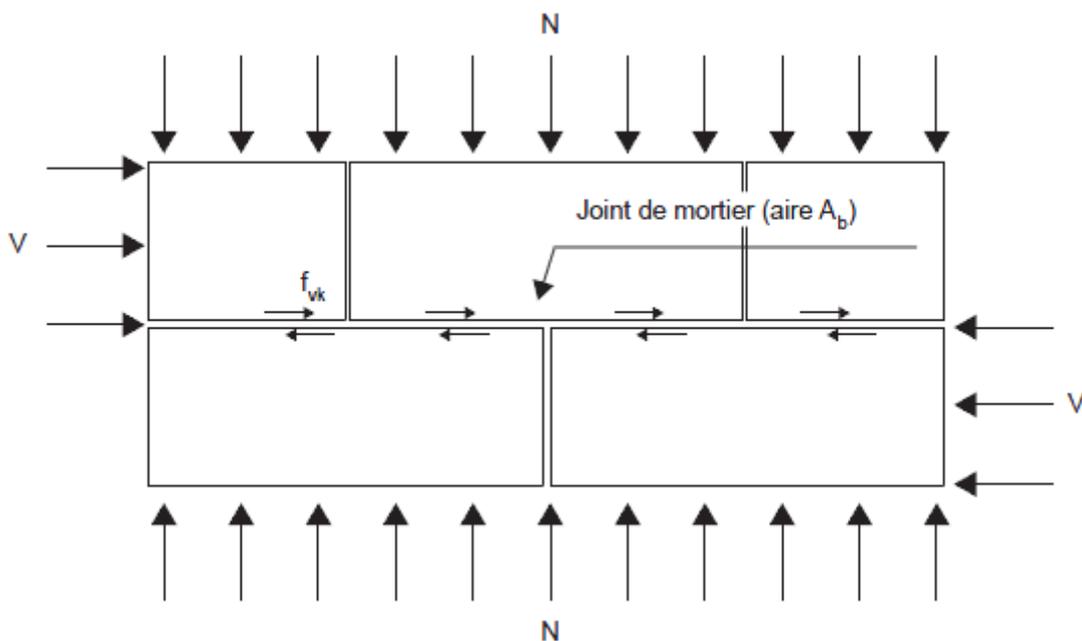


Figure 2.28: Détermination de f_{vk} [HUREZ et col, 2009].

La résistance f_{vk} peut être obtenue selon la norme EN 1052-3 ou EN 1052-4 ou par calcul comme indiqué sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Calcul de la résistance caractéristique au cisaillement f_{vk} selon les normes EN 1052-3 ou EN 1052-4.

Jointes verticales remplies de mortier	Jointes verticales non remplies de mortier
$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,065f_b$ (*)2.11) (*) Valeur limite de f_{vk} pour le béton cellulaire autoclavé : $0,045 f_b$	$f_{vk} = 0,5f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,045f_b$ (2.12)
f_{vk0} : résistance caractéristique initiale au cisaillement définie selon le tableau 2-3, pour la contrainte de compression σ_d nulle ; σ_d : contrainte verticale moyenne s'exerçant sur la partie comprimée du $\sigma_d = N / A_b$; f_b : résistance moyenne normalisée de l'élément de maçonnerie.	

Les joints sont considérés comme remplis si le joint vertical est rempli sur au moins 40 % de l'épaisseur de l'élément (voir figure 2.29).

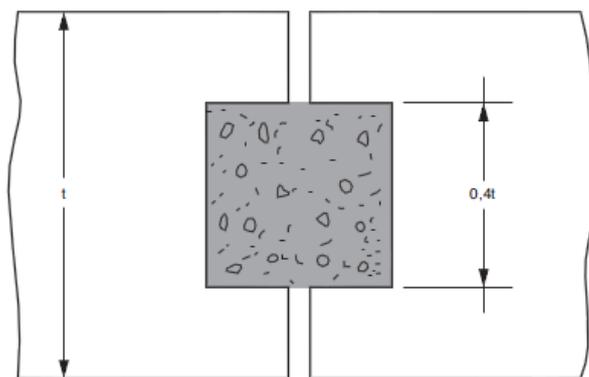


Figure 2.27: Jointes verticales remplies (conditions à respecter)

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

Élément de maçonnerie	f_{vk0} (MPa)		
	Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces $0,5 \leq t \leq 3$ mm	Mortier allégé
Terre cuite	0,3	0,3	0,15
	0,2		
	0,1		
Silico-calcaire	0,3	0,4	0,15
	0,15		
	0,1		
Béton de granulat	0,2	0,3	0,15
Béton cellulaire autoclavé	0,15		

La résistance F_m peut être obtenue selon l'équation 2.13.

$$F_m = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (2.13)$$

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.

2.7.3 Calcul au cisaillement (DTR CNERIB) :

La contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{Q \cdot S_m}{I_m \cdot d} \quad (2.14)$$

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 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.

2.7.4 Calcul de la compression (DTR CNERIB) :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S} \quad (2.15)$$

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

F_c : charge de rupture, en N.

S : section effective moyenne du muret, en m^2 .

Le module de Young est calculé à l'aide de la formule 2.16.

$$E = \frac{\sigma_{c1/3}}{\varepsilon_{1/3}} \quad (2.16)$$

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 :

$$\varepsilon_{1/3} = \frac{\Delta V}{H} \quad (2.17)$$

ΔV : déplacement vertical, en mm.

H : hauteur de l'échantillon, en mm.

Connaissant les résistances des matériaux constituant la maçonnerie (blocs, mortier), on applique la formule 2.18 :

$$R_m = 0,55 \sqrt[3]{\sigma_m \cdot \sigma_b^2} \quad (2.18)$$

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.

2.8 Conclusion :

L'état de l'art sur le comportement de la maçonnerie sous différentes sollicitations et avec plusieurs matériaux utilisés (terre cuite, moellons de pierre ou agglomérés de béton) nous révèle l'importance du mortier sur le comportement global de la maçonnerie sous diverses sollicitations.

Dans ce qui suit, on va utiliser la pouzzolane naturelle locale comme ajout dans la composition des mortiers utilisés pour la réalisation des joints en vue d'évaluer son influence sur le comportement mécanique de la maçonnerie soumise au cisaillement et à la compression.

CHAPITRE 03: PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES UTILISÉES AU LABORATOIRE

3.1 Introduction :

A travers la revue de la littérature, il a été montré que dans la maçonnerie, les résistances du support et du mortier de jointement ainsi que de leur interface, conditionnent la résistance globale au cisaillement et à la compression des murets en maçonnerie.

Le programme expérimental que nous allons présenter dans ce chapitre s'inspire fortement des résultats de la littérature. On a convenu d'optimiser la résistance du mortier en y substituant une partie du ciment portland par de la pouzzolane naturelle à des pourcentages de 5 à 25% pour deux compositions différentes : 1 :4 et 1 :6. L'épaisseur du joint est prise égale à 10mm (Houti, 2002). Une moyenne de trois mesures est nécessaire pour s'assurer de la fiabilité des résultats.

Le programme consiste à confectionner 48 murets de 60x60x10 cm, dont 36 seront soumis à un chargement de cisaillement jusqu'à la rupture et les 12 autres vont subir un chargement de compression.

3.2 Matériaux utilisés

3.2.1 PROVENANCE DES MATÉRIAUX :

Les matériaux nécessaires pour la confection des murets en maçonnerie utilisés pour le programme expérimental préconisé sont (figure 3.1) :

- Les briques : en terre cuite creuses, provenant de la briqueterie de la TAFNA à Zenata située au sein de la wilaya de Tlemcen.
- Le sable : provient de la carrière de Sidi Abdelli (Wilaya de Tlemcen),
- Le ciment : ciment portland composé CEM II/A 42.5 provenant de la cimenterie GICA, située à Béni-Saf dans la wilaya d'AinTemouchent,
- La pouzzolane : d'origine volcanique, provient du gisement de Bouhmidi, situé au sud de Béni-Saf dans la wilaya d'AinTemouchent,
- L'eau de gâchage utilisée provient de la distribution du réseau public de la daïra de Chetouane de la Wilaya de Tlemcen.



Figure3.1: Plan de situation indiquant les gisements des matériaux utilisés (Google Maps).

3.2.2 Planning du programme expérimental :

Notre programme expérimental a duré 3 mois et demi. La figure 3.2 présente en détail, l'ensemble des travaux effectués au laboratoire EOLE.

Le premier mois était destiné aux essais préliminaires, relatifs à la préparation du sable pour la confection des mortiers, les essais d'identification des caractéristiques physiques de leurs constituants, la réalisation des premiers murets, le broyage et tamisage de la pouzzolane, et les essais de consistance des diverses formulations de mortiers. La période restante était destinée à la construction des murets objets du programme (environ un mois) et pour les écrasements, selon les échéances.

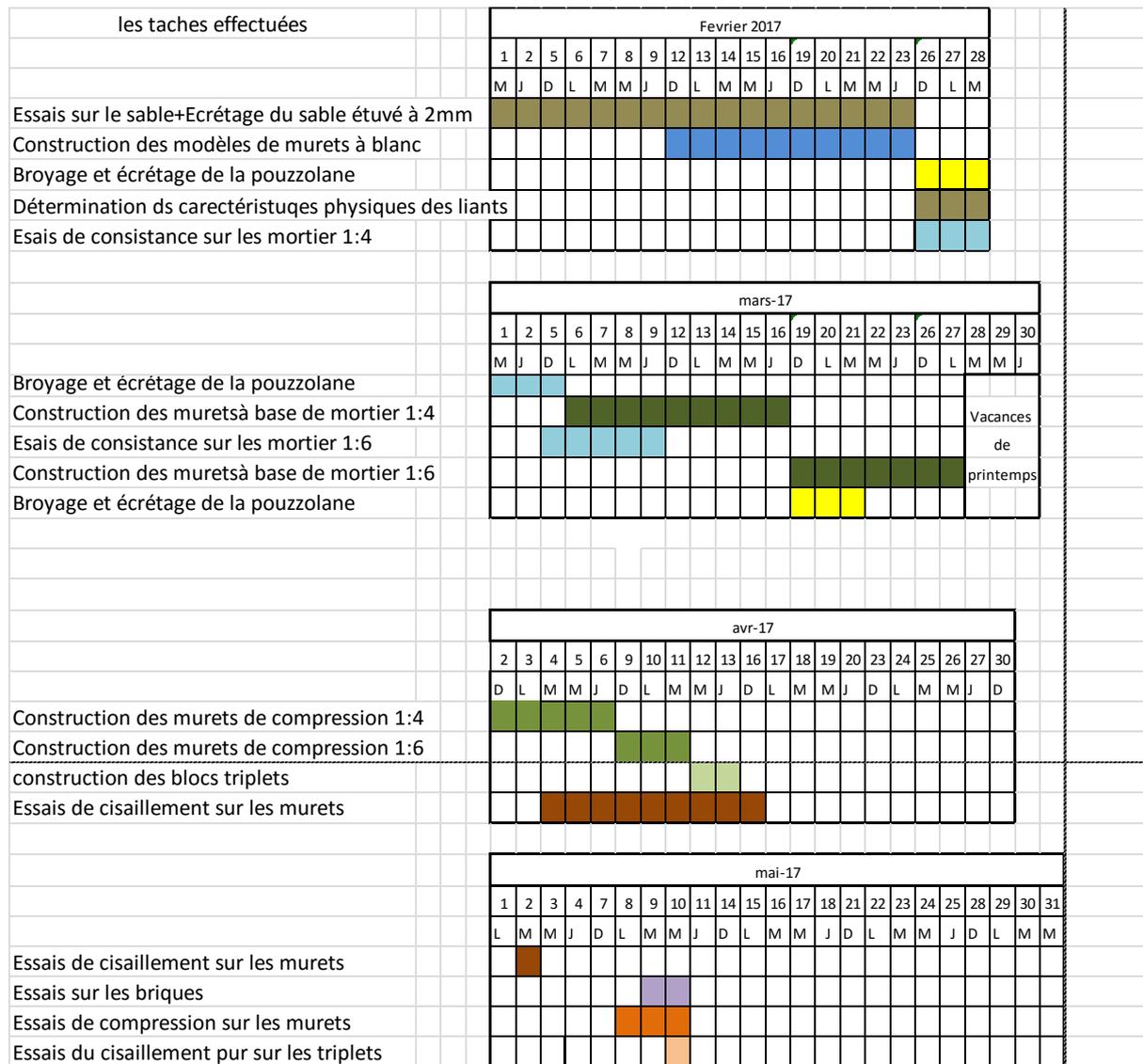


Figure3.2: Planning du programme expérimental

3.2.3 CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX :

3.2.3.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA BRIQUE

Le programme que nous avons préconisé, nécessite l’utilisation d’environ 550 briques 8T. L’identification des caractéristiques physiques et mécaniques que nous allons présenter, a été réalisée sur un lot de 10 briques, échantillonnées pour une meilleure représentativité des briques sujets de notre étude ; lesquelles ont été fabriquées le 26/12/2016 à l’usine de la Tafna.

i. Caractéristiques géométriques :

Les briques creuses à base de terre cuite sont de dimensions 10×20×30 cm³ (voir Figure 3.3). Les différentes dimensions sont mesurées à l’aide d’un pied à coulisse (Figure 3.4) et un mètre pliant (Figure 3.5).Les valeurs des dimensions mesurées sont regroupées dans le tableau de l’annexe 1. Les écarts types des longueurs, largeurs et hauteurs sont

respectivement de 0.19, 0.20 et 0.07 cm. Les écarts types indiquent qu'il n'y a pas une grande dispersion entre les dimensions des briques. En revanche, les dimensions moyennes sont de : $29.6 \times 19.6 \times 9.7 \text{ cm}^3$. Sachant que la tolérance sur les dimensions extérieures doit être au plus égale à 3mm selon le DTR C2-45, on peut donc conclure que pour la hauteur et la longueur, la tolérance recommandée n'est pas respectée.

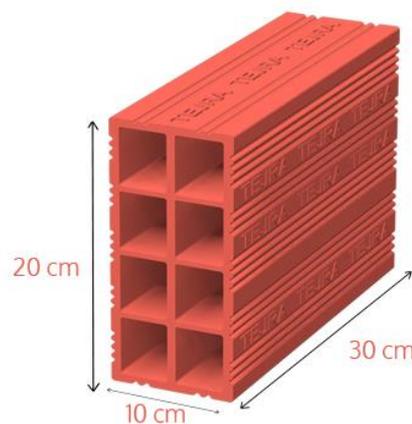


Figure 3.3: Dimensions des briques creuses utilisées en tant que support.



Figure 3.4: Pied à coulisse



Figure 3.5: Mètre pliant.

ii. Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques telles que la masse et la masse volumique sont regroupées sur le tableau 3.1.

- **Masse volumique :**

La masse volumique est calculée selon l'équation 3.1 :

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

M : masse de la brique en (kg),

V : volume net de la brique (cm^3) = 2640 cm^3 ,

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

D'après les résultats obtenus, on en déduit que la moyenne de la masse volumique des briques est conforme au DTR C2-45 : $500 < \rho < 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$, avec un écart type de $18 \text{ kg}/\text{cm}^3$ qui n'est donc pas notable.

Tableau 3.1: Masses volumiques des échantillons de briques creuses testées.

<i>Echantillon</i>	<i>M (Kg)</i>	<i>$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$</i>	<i>Moyenne (kg/m^3)</i>
1	3,716	1 408	1 427
2	3,794	1 437	
3	3,806	1 442	
4	3,836	1 453	
5	3,780	1 432	
6	3,680	1 394	
7	3,824	1 448	
8	3,748	1 420	
9	3,770	1 428	
10	3,730	1 413	
Ecart type	0,05	18	

- **ESSAI D'ABSORPTION EN EAU PAR CAPILLARITÉ : (DTR C2-45).**

L'essai a pour objectif, la détermination du pouvoir de succion de l'eau par les briques utilisées au contact du mortier d'assemblage (DTR C2 45). Ce qui nous informe sur le taux d'absorption en eau de ces briques, que l'on doit prendre en considération lors de la fabrication du mortier de jointoiement afin d'éviter son grillage pendant sa mise en œuvre. On peut penser aussi, mouiller la surface à enduire des briques avant d'y étaler le mortier à jointoyer.

L'essai est exécuté sur huit briques. Ces dernières sont séchées à l'étuve jusqu'à masse constante à une température de $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. La masse de chaque brique séchée est pesée, m_1 . Ces briques sont ensuite posées sur chant dans un récipient d'eau placé sur un plan horizontal et immergées partiellement dans un fond d'eau de 5 mm pendant 10 minutes. Ensuite, les briques sont retirées du récipient et essuyées par un chiffon pour être pesées, m_2 .

Le pouvoir de succion en eau, exprimé en $\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ est caractérisé par le coefficient C, donné par la formule 3.2 :

$$C = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{S\sqrt{T}} \quad (3.2)$$

S : surface horizontale mouillée en cm^2 ,

T : temps d'immersion en minutes,

m_2, m_1 : masses humide et sèche en g.

Les résultats de l'essai d'absorption en eau sont récapitulés dans le Tableau 30.2.

Tableau 30.2: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des échantillons de briques creuses testées.

Brique N°	Δm (g)	S (cm^2)	C ($\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$)	Moyenne
1	17	293	1,8	1,8
2	10	291	1,1	
3	22	285	2,4	
4	8	293	0,9	
5	21	287	2,3	
6	30	288	3,3	
7	8	286	0,9	
8	13	285	1,4	
Ecart type	7,8	3	0,9	

L'écart type du coefficient d'absorption est relativement grand ; cela indique une grande hétérogénéité dans l'absorption en eau des différentes briques testées. Toutefois, le coefficient de capillarité est conforme au DTR C2-45 : $1,8 \leq 15$ pour les briques creuses et montre surtout que les briques utilisées n'ont pas un grand pouvoir d'absorption.

iii. Caractéristiques mécaniques :

Nous présentons dans cette partie, les propriétés mécaniques de chaque composant des murets en maçonnerie, sujets de notre programme de travail.

iv. Résistance des briques à la compression

Avant la soumission des briques à l'essai de compression uniaxiale, on a surfacé les échantillons de briques dans les deux directions perpendiculaire au moment d'inertie le plus élevé (parallèles aux alvéoles). Le surfacage a été effectué au plâtre comme il est montré sur la Figure 3.6. Après le surfacage, la brique subit un écrasement à l'aide d'une presse à béton (Figure 3.7).



Figure 3.6 : Surfaçage des briques (Photos prises par les auteurs).



Figure 3.7 : Essai de compression des briques creuses (Photos prises par les auteurs).

La presse utilisée est destinée aux essais mécaniques sur des éprouvettes cylindriques 16*32 cm. Un montage a été réalisé dans l'entrefer situé entre les mores de la presse (figure 3.7) pour rattraper les 10 cm de différence en hauteur. La répartition des charges a été réalisée sur la brique à l'aide d'un profilé en C, rigide.

Pendant les essais de compression, il y a eu rupture des parois extérieures des briques. La résistance des briques à la compression est calculée par la formule 3.3 :

$$\sigma_c = \frac{F_b}{S_n} \mathbf{10} \quad (3.3)$$

σ_c : Résistance à la compression, en MPa,

F_b : Force de rupture, en KN,

S_n : Section nette moyenne de la brique, en cm².

Les résultats de la résistance à la compression des échantillons de briques testées sont récapitulés dans le Tableau 3.3

Tableau 3.3: Résistance à la compression des échantillons de briques creuses.

Brique N°	F_b (KN)	σ_c (MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart type
1	53,0	1,81	1,28	0,43
2	42,8	1,47		
3	44,5	1,56		
4	41,8	1,43		
5	41,4	1,45		
6	22,5	0,77		
7	43,4	1,51		
8	16,0	0,56		
9	19,9	0,70		
10	44,9	1,57		

Il est important de noter là aussi, la valeur élevée de l'écart type calculé : 0,43. On note une différence de 1,25 MPa entre les briques n°1 et n°8. Cette hétérogénéité substantielle va indubitablement influencer par la suite, les résistances mécaniques des murets ainsi que leurs modes de rupture, puisque la résistance de la maçonnerie dépend du maillon le plus faible.

3.2.4 Caractéristiques des mortiers

Le mortier est composé à base de ciment, de pouzzolane, de sable et d'eau. Inspirés des programmes de travail des masters soutenus les années précédentes, on a convenu d'utiliser deux types de mortiers :

- Mortier 1:4 : 1 volume de ciment pour 4 volumes de sable avec substitution volumique du ciment par de la pouzzolane naturelle allant de 5 à 25%,
- Mortier 1:6 : 1 volume de ciment pour 6 volumes de sable avec substitution volumique du ciment par de la pouzzolane naturelle allant de 5 à 25%.

3.2.5 Caractéristiques du sable

Le sable est étuvé avant son utilisation à 105° C, puis tamisé à 2mm. On a procédé à cet écrêtage en suivant les recommandations utilisées dans les travaux de [HOUTI 2002], [HAMZA CHERIF et KARA ALI 2014], [RAMDANI et ACHOURI 2016].

3.2.5.1 Propreté du sable :

L'essai de l'équivalent sable (norme NF P 18-598) permet de déterminer la propreté de ce dernier (Tableau 3.4). Ce sable répond aux exigences par le bas de la norme précitée, qui fixent les limites à $ESP \geq 60\%$, pour les sables concassés ou broyés.

Tableau 3.4 : Propreté du sable utilisé.

Echantillon	H _{totale}	H _{Sable (piston)}	ESP (%)	ESP (%)
Eprouvette 1	12,47	7,50	60	63,5
Eprouvette 2	11,90	8,00	67	

3.2.5.2 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris dans le tas, comprenant à la fois les vides inter et intra granulaires.

La masse volumique apparente est donnée par la formule 3.4 :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (3.4)$$

L'essai est répété 5 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente : $\rho_{app} = 1445 \text{ kg/m}^3$.

3.2.5.3 Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue ρ_{abs} est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. On a utilisé la méthode de l'éprouvette graduée et on a trouvé une masse volumique absolue qui égale à : $\rho_{abs} = 2656 \text{ kg/m}^3$

A partir des masses volumiques, on peut déterminer le vide inclus dans le sable selon la formule 3.6 :

$$n = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad (3.5)$$

On a une porosité $den = 0.54$, le volume des vides occupe la moitié du sable utilisé.

3.2.5.4 L'absorption de l'eau par le sable

Il est nécessaire de déterminer le coefficient d'absorption du sable car un sable composé d'une grande quantité de fines, peut avoir une grande demande en eau. Il est donc nécessaire de déterminer le coefficient d'absorption du sable.

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-555, où on détermine le coefficient d'absorption (A_b) par l'équation (3.7) :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \quad (3.7)$$

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105° C.

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

On a trouvé : $A_b = 1,2\%$

On peut conclure que la demande en eau est faible ; mais malgré cela nous avons pris en considération cette teneur en eau dans l'eau de gâchage des mortiers utilisés.

3.2.5.5 Courbe granulométrique

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis l'échantillon en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes de 2 mm jusqu'à 63 μ . Le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. La figure 3.8 illustre la courbe granulométrique du sable utilisé.

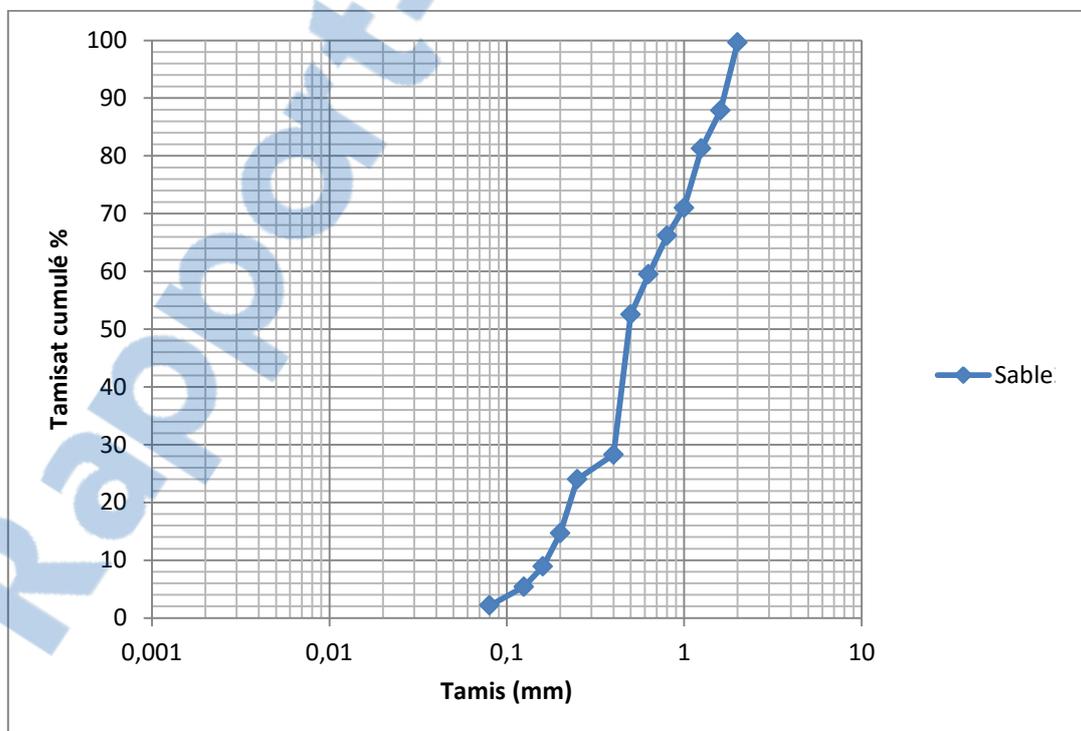


Figure 3.8: Courbe granulométrique du sable de carrière, sujet d'étude.

3.2.6 Caractéristique du ciment

Le ciment de Béni-Saf est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5. Il répond aux exigences de la norme NA 442/2000 (figure 3.9). L'ajout minéral est constitué de pouzzolane naturelle du gisement de Sidi Safi [Cimenterie de Béni-Saf, 2017]. Ce ciment est composé de 85% de clinker ; 3% de gypse, 10% de pouzzolane et de 2% de calcaire sableux [Taleb, 2009].



Figure 3.9: Sac de ciment (photo prise par les auteurs).

3.2.6.1 Composition chimique

Le tableau 3.5 indique la composition chimique du ciment utilisé.

Tableau 3.5: Composition chimique du ciment de Béni-Saf [TALEB, 2009].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO libre	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
27.97	5.43	3.05	56.37	0.71	-	0.43	0.30	0.75	59.98	2.15	9.87	9.31

3.2.6.2 Masse Volumique apparente :

La masse volumique apparente a été déterminée conformément à la norme NF P 18-558. L'appareillage utilisé est indiqué dans la figure 3.10.

$$M_{vapp} = 1.012 \text{ kg/l}$$



Figure 3.10: Dispositif permettant la mesure de la masse volumique apparente du liant.

3.2.6.3 Finesse de mouture

La mesure de la finesse de mouture se fait à l'aide du perméabilimètre Blaine qui détermine sa surface spécifique [cm^2/g]. Pour ce ciment la surface spécifique est égale à $3598 \text{ cm}^2/\text{g}$ [Taleb 2009].

3.2.7 Caractéristiques de la pouzzolane

La pouzzolane que nous avons utilisée est une pierre volcanique provenant du gisement de Bouhmidi au sud de Béni-Saf. On l'a récupéré à l'état brut, sous forme de pierre et puis on l'a concassé (concasseur 8/15) ensuite broyé et enfin tamisé à 0.125 mm (figure 3.11 et 3.12)



Figure 3.11: Broyeur utilisé (photo prise par les auteurs).



Figure 3.12: a) Pouzzolane brute b) Pouzzolane broyée et tamisée à 125 µm (photo prise par les auteurs).

3.2.7.1 Composition chimique

L'analyse chimique des oxydes est donnée par [BENKADDOUR et col, 2009], (voir tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle du gisement de Bou midi [BENKADDOUR et col., 2009].

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₄	Cl	P. F
Teneurs (%)	74.48	12.83	1.51	3.92	0.34	Nul	Nul	0.21

3.2.7.2 Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente a été déterminée conformément à la norme NF P 18-558.

$$M_{vapp} = 0.774 \text{ kg/l}$$

3.2.8 Caractéristique de l'eau de gâchage :

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 : Composition chimique de l'eau de Chetouane (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

3.2.9 Formulation des mortiers testés :

3.2.9.1 Détermination du rapport E/L

Le mortier est formulé suivant la norme EN 196-1 qui énumère les étapes relatives au processus de confection des mortiers. La norme vise à déterminer le rapport E/L¹ pour chaque type de mortier ; ce rapport a été déterminé à consistance normale constante.

Le tableau suivant regroupe le rapport E/L en fonction de la nature du mortier et du pourcentage de substitution en pouzzolane (Tableau 3.8).

Tableau 3.8: Tableau récapitulatif des rapports E/L après les essais de consistance des mortiers testés.

Consistance Type de mortier	Le rapport E/L	
	1:4	1:6
M ₀	0.97	1.40
M ₅	0.97	1.42
M ₁₀	0.99	1.43
M ₁₅	1.02	1.45
M ₂₀	1.04	1.47
M ₂₅	1.07	1.50

Le rapport E/L augmente au fur et à mesure que l'on augmente le pourcentage de pouzzolane dans les deux types de mortier 1 :4 et 1 :6. Le choix de ces fractions, résulte des travaux d'optimisation, réalisés précédemment par les chercheurs de l'équipe matériaux granulaire appartenant au laboratoire « EOLE ». On constate que la demande en eau des mortiers 1 :6 est relativement plus grande par rapport aux mortiers 1 :4 car la quantité de sable y est plus grande. De plus, pour un même mortier, la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle accroît le rapport E/L ; résultat d'une demande en eau de la pouzzolane, qui semble être plus élevée que celle du ciment.

3.2.9.2 Confection des éprouvettes

Nous avons confectionné des éprouvettes prismatiques de 4×4×16 cm³ selon la norme EN 196-1. On remplit le moule à moitié de mortier et on le soumet à 60 chocs, ensuite on le remplit à ras bord et on le soumet à 60 autres chocs, puis on l'arase et on le garde dans un environnement humide durant 20 à 24h.

¹ L : est le résultat de l'addition de la fraction volumique du ciment et de la pouzzolane naturelle.

3.2.9.3 Conservation des éprouvettes

Après confection, on démoule et on conserve les éprouvettes immergées dans des bassins remplis d'eau jusqu'au jour de l'écrasement (28jours). La température et l'humidité de maturation des éprouvettes sont celles du laboratoire qui sont respectivement égales à $19\pm 3^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $65\pm 5\%$.

3.2.10 Essais mécaniques sur les mortiers

On commence par l'essai de traction par flexion à l'aide de l'essai trois points. Après écrasement, on obtient deux morceaux qui servent à la réalisation de l'essai de compression.

3.2.10.1 Essai de traction par flexion

On place le prisme dans le dispositif de flexion sur sa face latérale de moulage au-dessus des rouleaux d'appui dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à ces derniers. On applique ensuite une charge verticale sur la face latérale opposée de l'échantillon prismatique à l'aide du rouleau de chargement jusqu'à rupture (figure 3.13). On calcule donc la résistance à la traction par flexion par la formule 3.8 :

$$R_f = \frac{1.5 F_f L}{B^3} \quad (3.8)$$

R_f : Résistance à la traction par flexion en MPa,

F_f : Force de rupture appliquée au milieu du prisme,

L : Distance entre appuis, 100 mm,

B : Coté latéral du prisme, 40 mm.



Figure 3.13: Dispositif de l'essai de flexion 3 points et les éprouvettes de mortier 4×4×16 (photos prises par les auteurs).

3.2.10.2 Essai de compression

Après rupture par flexion, on soumet un à un, les demi-prismes à la compression (Figure 3.14) et on obtient la résistance à la compression par la formule 3.9 :

$$R_c = \frac{F_c}{B^2} \text{(3.9)}$$

R_c : Résistance à la compression,

F_c : Force de rupture

B : Coté du demi-prisme



Figure 3.14: Dispositif pour l'essai de résistance à la compression (photo prise par les auteurs).

Le tableau 3.9 regroupe les résultats des essais de flexion 3 points et de compression des différents mortiers étudiés. Les figures 3.15 jusqu'à 3.18 illustrent respectivement la variation de la résistance à la compression et à la traction par flexion des deux types de mortiers testés.

On peut s'attendre de prime à bord au fait que les résistances mécaniques (Traction par flexion et compression) diminuent à cause de l'augmentation du rapport E/L (demande en eau de plus en plus élevée pour une quantité de pouzzolane de plus en plus grande) accompagnée de la diminution de la quantité de ciment.

Tableau 3.9: Résistances des mortiers à la flexion et à la compression

% De pouzzolanes	Mortier	(1 :4)		(1 :6)	
		R_c (MPa)	R_f (MPa)	R_c (MPa)	R_f (MPa)
F=0	M_0	27,20	6,25	11,77	3,28
F=5	M_5	20,31	5,47	12,09	2,46
F=10	M_{10}	18,34	3,75	12,44	2,58
F=15	M_{15}	15,67	3,75	11,53	2,58
F=20	M_{20}	16,49	3,75	9,69	1,99
F=25	M_{25}	13,25	3,05	9,10	1,33

Ces résultats sont en concordance avec les résultats trouvés dans la littérature [Chaib et Col 2015] et [BENKADDOUR et Col 2009]. Aussi, selon le DTR CNERIB C2-45, la résistance à la compression doit être comprise entre 3,5 et 55 MPa. Cette recommandation est respectée pour l'ensemble des mortiers formulés.

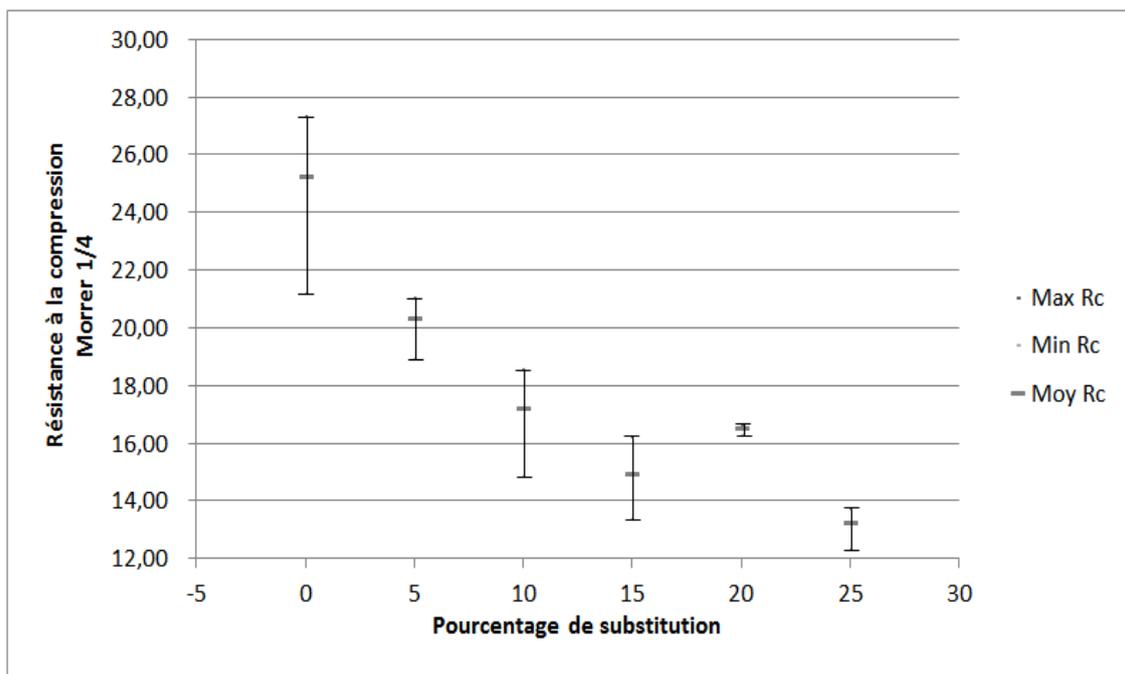


Figure 3.15: Résistance à la compression des éprouvettes du mortier 1:4 à consistance normale.

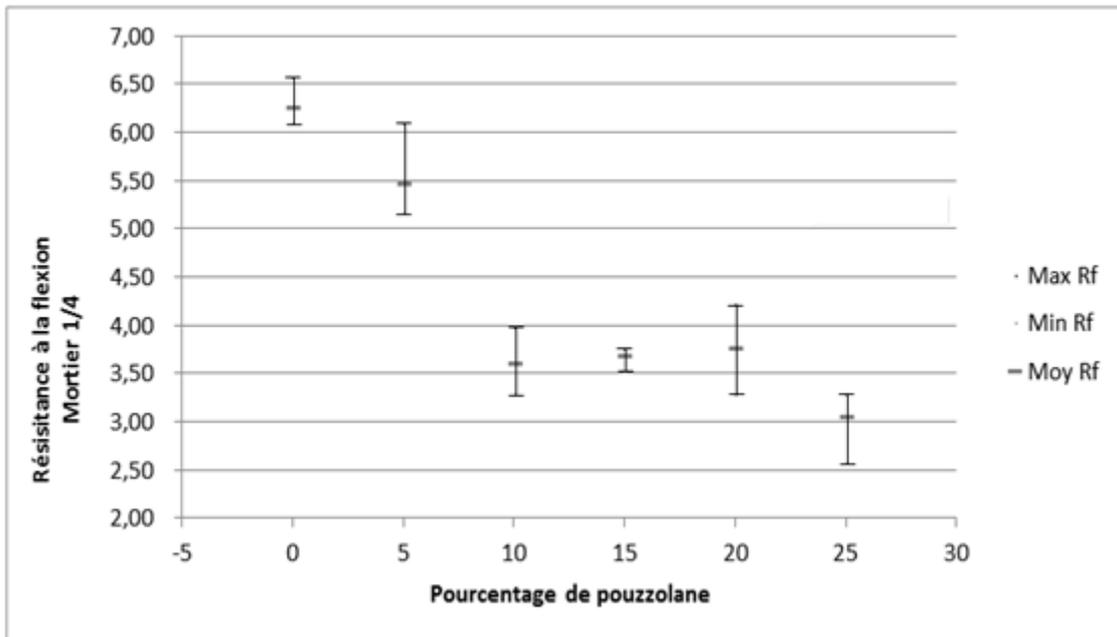


Figure 3.16: Résistance à la traction par flexion des éprouvettes du mortier 1:4 à consistance normale.

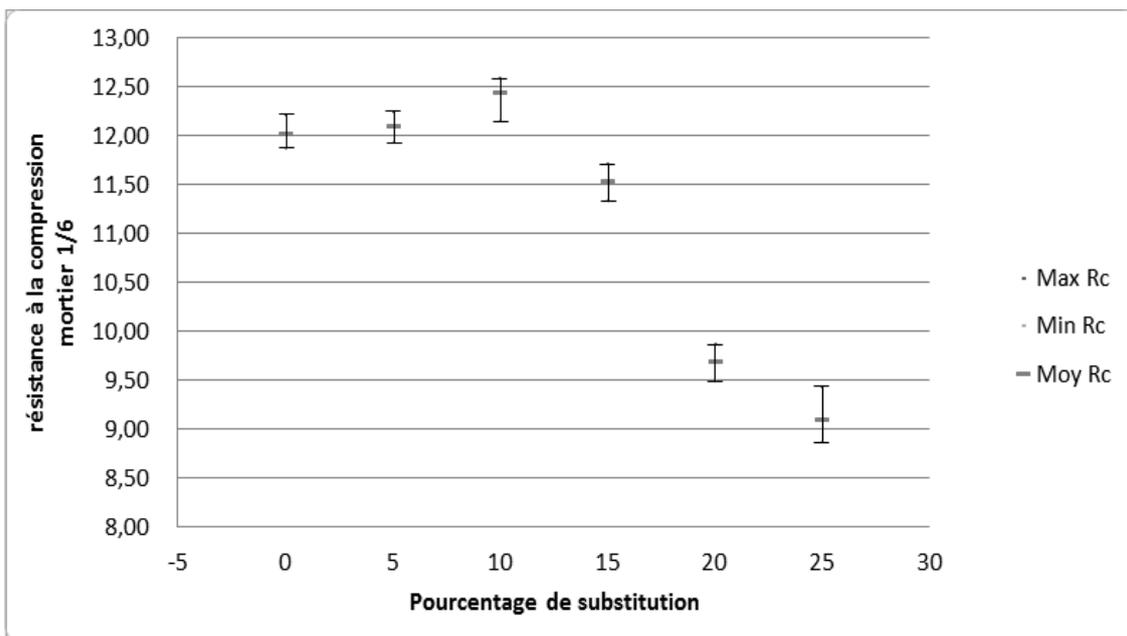


Figure 3.17: Résistance à la compression des éprouvettes du mortier 1:6 à consistance normale.

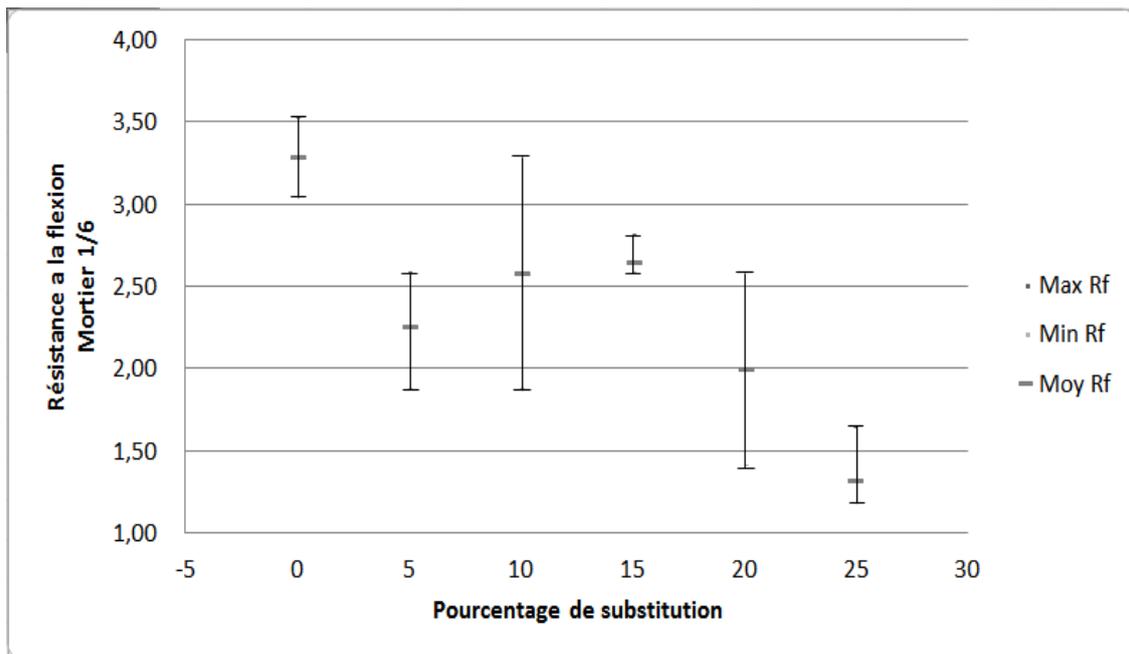


Figure 3.18: Résistance à la traction par flexion des éprouvettes du mortier 1:6 à consistance normale.

Concernant les mortiers 1 :4 et 1 :6, nous constatons les mêmes tendances au niveau de la variation des résistances en fonction du pourcentage de la pouzzolane substituée. En effet, si pour le mortier 1 :4 la tendance est à la diminution pour les résistances mécaniques, le mortier 1 :6 présente un point d'inflexion à 15% de substitution du ciment.

Qu'est-ce qui pourrait être à l'origine de cette diminution brutale des résistances mesurées à partir de ce taux de 15% ?

On peut supposer, comme le mortier 1 :6 présente en volume de grandes quantités de sable ayant un besoin important en eau ($E/L \approx 1.50$), que le retrait à l'échéance de 28 jours est relativement important (nécessité d'effectuer l'essai de retrait). C'est le seul phénomène qui pourrait expliquer cette diminution brusque des résistances.

3.2.11 Comparaison entre le support et le mortier :

La maçonnerie présente un comportement très complexe, ceci est dû essentiellement à l'hétérogénéité des matériaux qui la constituent. La résistance moyenne à la compression des briques (1,28 MPa, voir tableau 3.3) est d'une part inférieure à la résistance caractéristique minimale préconisée dans le DTR C2-45 et présente d'autre part, une résistance moindre par rapport à celles fournies par les deux types de mortiers testés (1 :4 et 1 :6).

Au regard de ces résultats on peut conclure que les briques utilisées dans le cadre de notre programme expérimental présentent une qualité médiocre en tenant compte à la fois des recommandations du CNERIB (voir annexe 3) et des résultats obtenus sur les mortiers testés, sachant que ces derniers ont vu substituer une partie du liant par de la pouzzolane (cas le plus défavorable). A cet effet, il sera prévisible de voir la brique, en tant que support, céder la première lors des essais mécaniques que les murets tests vont subir et dont les résultats vont être présentés dans le chapitre 4.

3.3 Programme des essais sur les murets

3.3.1 Introduction

Notre étude expérimental consiste à présenter la réaction des murets en maçonnerie de briques en terre cuite face au cisaillement simulant ainsi l'effet d'une calamité naturelle qui peut être soit un séisme, soit un tassement ou encore un glissement de terrain. Le détail du programme expérimental adopté est présenté par la Figure 3.19.

3.3.2 La nature des murets à tester

Les murets à tester sont en effet un assemblage fait à base de briques en terre cuite, liées par un mortier fait à base de sable, ciment, eau et de pouzzolane, de dimensions de $60 \times 60 \times 10 \text{ cm}^3$ (figure 3.20) pour le cisaillement et de murets de $80 \times 60 \times 10 \text{ cm}^3$ pour la compression (figure 3.21). Le portique utilisé dans l'étude du comportement mécanique de nos murets nous impose les géométries arrêtées dans le cadre de ce programme.

Une étude de similitude devrait être élaborée sur les murets pour justifier leurs dimensions vis-à-vis de ces essais mécaniques.

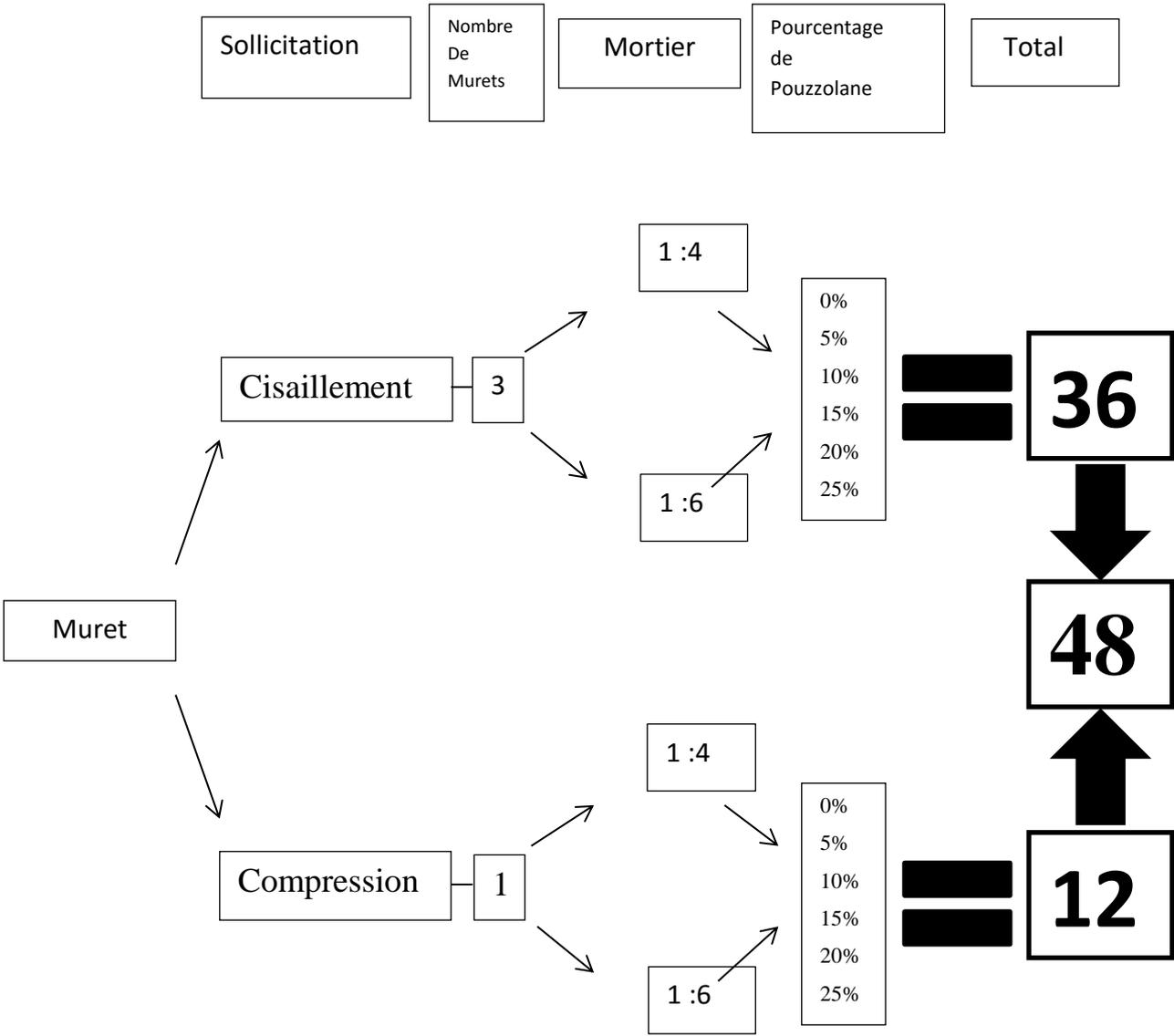


Figure 3.19: Schéma du programme expérimental.

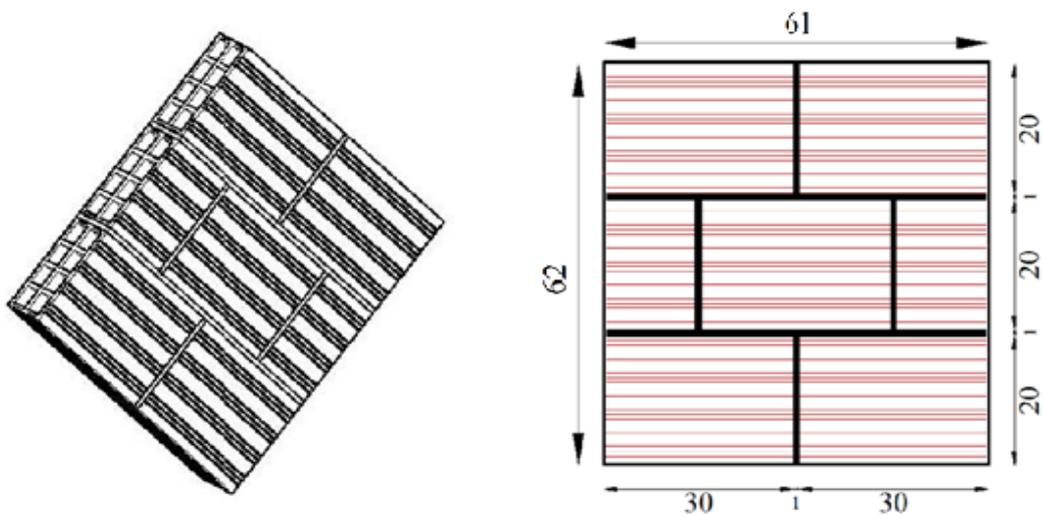


Figure 3.20: Géométrie des murets en briques creuses en terre cuite pour l'essai de cisaillement: $60 \times 60 \times 10 \text{ cm}^3$.

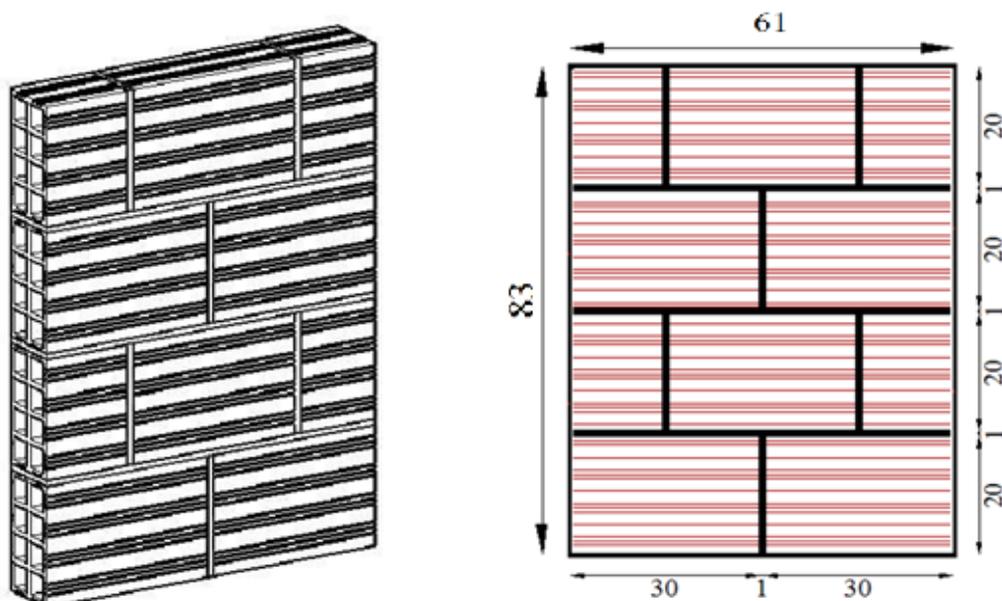


Figure 3.21: Géométrie des murets en briques creuses en terre cuite pour l'essai de compression: $60 \times 80 \times 10 \text{ cm}^3$.

3.3.3 La construction des murets

3.3.3.1 Processus de construction :

La construction des murets est réalisée au laboratoire de structures au sein de la faculté de Technologie. La durée moyenne pour la préparation du mortier de chaque muret est de 15 à 20 minutes, et le temps pris pour sa construction varie entre 25 et 35 minutes.

Les étapes pour la construction d'un muret sont :

- Poser sur le sol des briques silico-calcaire qui serviront de support pour le muret, et vérifier leurs planités dans les deux directions (figure 3.22),
- Découper une brique en deux moitiés égales, de 15cm de long,
- Mouiller les briques pour ne pas griller le joint (mortier),
- Mettre en place le joint vertical (figure3.23),
- Poser les deux premières briques, et à l'aide d'une cale de 10 mm et d'un marteau maillet, on s'assure de l'épaisseur du joint vertical (figure 3.24),
- Vérifier l'épaisseur du joint horizontal (10 mm) à l'aide d'un dispositif conçu pour cette opération (figure3.25),
- Poser la deuxième ligne de brique en suivant le même processus et en vérifiant cette fois-ci la planité et la verticalité entre les deux lignes horizontales par le biais d'une règle et d'un niveau à bulle (figure3.26),
- Après avoir achevé le processus de construction pour les murets de cisaillement, on surface les deux coins de la partie sollicitée par du plâtre pour assurer une bonne répartition des charges, telle que l'exige la norme ASTM E 519-02 (figures 3.27 et 3.28),
- Pour les murets soumis à la compression, on surface la ligne supérieure et la ligne inférieure des murets,

La manutention des murets pour les déplacer vers l'aire de stockage ne peut se faire qu'à partir du 7^{ème} jour. Aussi, la maturation des murets s'est faite aux conditions ambiantes du laboratoire dont la température était de $19 \pm 3^\circ \text{C}$ et l'humidité relative de $65 \pm 5\%$; ceci est conforme avec ce que la norme ASTM E519 préconise (une température de $24 \pm 8^\circ \text{C}$ et un pourcentage d'humidité de $75 \pm 15\%$),

L'écrasement des murets est préconisé pour l'échéance de 28jours.



Figure 3.22: Préparation du support en assurant sa planéité (photo prise par les auteurs).



Figure 3.23: Préparation du joint vertical (photo prise par les auteurs).



Figure 3.24: Vérification de l'épaisseur du joint vertical et le remplissage de ce dernier (photo prise par les auteurs).



Figure 3.25: Pose du joint horizontal (photos prises par les auteurs).



Figure 3.26: Vérifier la planéité et la verticalité entre les deux lignes horizontales par le biais d'une règle et du niveau à bulle.



Figure 3.27: Surfaçage des deux coins du muret de cisaillement avec du plâtre pour caler correctement le faitage du muret lors de l'essai (photos prises par les auteurs).



Figure 3.28: Surfaçage des murets soumis à la compression (photos prises par les auteurs).

3.3.4 Dispositif d'essai

Une presse pilotée par ordinateur a été utilisée pour la réalisation des essais (figure 3.30), 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.

3.3.4.1 Essai de cisaillement

i. Principe de l'essai

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

L'ensemble des données, forces et déplacements, sont enregistrés automatiquement par un système d'acquisition des données. Les déplacements horizontaux sont mesurés par un capteur de déplacement.

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

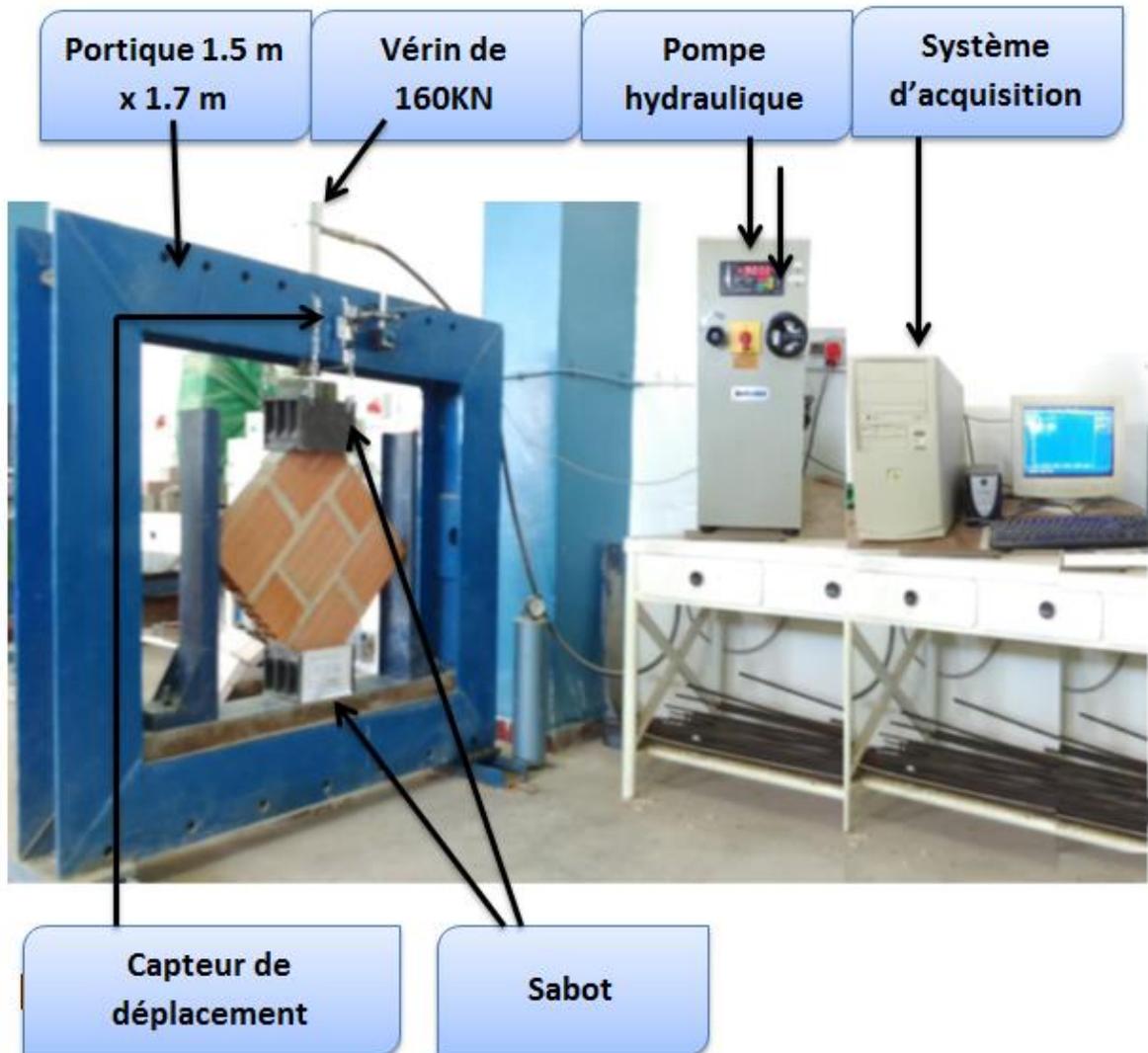


Figure 3.29: Dispositif pour l'essai de cisaillement selon ASTM E 519-02 [Achouri et Ramdani 2016]

3.3.4.2 Essai de compression

i. Principe de l'essai

Le vérin génère des charges verticales qui sont transmises uniformément par le biais de barres métalliques (figure 3.30). La force de rupture et le déplacement du muret lors de l'essai sont mesurés respectivement à l'aide de capteurs de pression et de déplacement.

Toutes les mesures sont enregistrées automatiquement grâce à un système d'acquisition des données.



Figure 3.30: Essai de compression des murets (photo prise par les auteurs).

3.3.4.3 Essai de cisaillement pur sur triplets

On a réalisé un triplet pour chaque paramètre étudié (Figure 3.31). L'objectif étant de déterminer la résistance pure au cisaillement de l'interface brique/joint, en suivant les recommandations de l'EUROCODE 6 et du DTR du CNERIB.



Figure 3.31: Cure et stockage des triplets prêts au cisaillement (photo prise par les auteurs).

i. Principe de l'essai

Dans cet essai un bloc (triplet) de briques creuses (une brique entière et deux demi-briques) sont jointoyés avec les mortiers confectionnés selon les paramètres indiqués (mortier 1 :4 et

1 :6 avec des substitutions volumiques de 0 à 25%).L'essai a été réalisé selon la procédure qui suit (voir figure 3.32):

- On place deux barres en acier aux extrémités de la partie inférieure du triplet de telle sorte à constituer un appui,
- On place deux autres barres sur les extrémités de la brique centrale avec une plaque métallique au-dessus pour répartir correctement les charges,
- Ce dispositif applique une force verticale sur la partie supérieure du triplet, ce qui crée un cisaillement pur dans les joints verticaux (interface brique/joint) en ayant une contrainte de compression nulle.



Figure 3.32: Essai de cisaillement d'un triplet (photo prise par les auteurs).

Il faut noter que ces essais sont effectués sur un seul triplet pour chaque configuration testée.

3.4 Conclusion :

Les différentes techniques utilisées pour la caractérisation des matériaux sont utilisées en prenant toutes les précautions et en respectant les normes prescrites. La confection des murets tests est faite en suivant les règles de l'art.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, leurs interprétations et la comparaison avec les résultats de la littérature.

Chapitre4 : Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, on traitera et interprètera les résultats obtenus des tests de cisaillement sur les murs en maçonnerie de briques en terre cuite tout en éclaircissant l'influence de la pouzzolane sur la résistance de ces murs.

4.2 RÉSULTATS DES MURETS SOUMIS AU CISAILLEMENT

4.2.1 Calcul de la résistance des murets soumis au cisaillement

La contrainte de cisaillement est obtenue par la formule décrite selon la norme ASTM E519-02. Nommée τ et donnée précédemment (chapitre 2, équation 2.7), elle est le rapport de la force de rupture en MPa sur la section nette A_n du muret en mm^2 , et n étant le pourcentage de la superficie brute de l'unité exprimée sous forme décimale ; $n = 0.44$ dans notre cas.

Le module de rigidité G (chapitre 2, équation 2.9), est la valeur de la contrainte de cisaillement du tiers de la charge maximale sur la déformation tangentielle correspondante, la longueur l : est la valeur moyenne des diagonales.

4.2.2 Résistance des murets soumis au cisaillement

Les résultats de la résistance des murets soumis au cisaillement τ , sont regroupés dans le tableau 4.1, qui présente la résistance en fonction du pourcentage de pouzzolane substitué au ciment dans l'intervalle 0 à 25% pour les mortiers 1 :4 et le 1 :6.

Tableau 4.1: Résistance des murets au cisaillement.

% de substitution pouzzolanique	Mortier 1 :4					Mortier 1 :6			
	Muret	Force	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	Taux de variation (%)	Force	τ_{moy} (MPa)	Ecart type	Taux de variation
0	M ₀	57,38	1,50	0,19	/	51,15	1,34	0,11	/
5	M ₅	52,32	1,37	0,08	8,81	52,81	1,38	0,13	- 0,02
10	M ₁₀	44,20	1,15	0,05	22,96	48,30	1,26 ⁽¹⁾	0,04	0,14
15	M ₁₅	53,47	1,40	0,17	6,82	48,86	1,28 ⁽¹⁾	0,25	- 0,05
20	M ₂₀	50,03	1,31	0,14	12,80	52,83	1,38 ⁽¹⁾	0,27	0,02
25	M ₂₅	48,27	1,26	0,09	15,88	43,01	1,12 ⁽¹⁾	0,20	0,06

¹ : Ecrasement à 45 jours

4.2.3 Influence de la pouzzolane sur les murets soumis au cisaillement

Les figures 4.1 et 4.2 présentent la variation de la résistance au cisaillement des murets réalisés à l'aide des mortiers 1 :4 et 1 :6. Nous avons jugé utile, sur ces figures, d'intégrer autour des valeurs moyennes, des barres d'erreurs, représentant l'intervalle des résistances mesurées, pour chacune des configurations testées. Il faut aussi signaler que nous avons au niveau de la figure 4.2 deux échéances différentes dans les essais de cisaillement réalisés (28 et 45 jours).

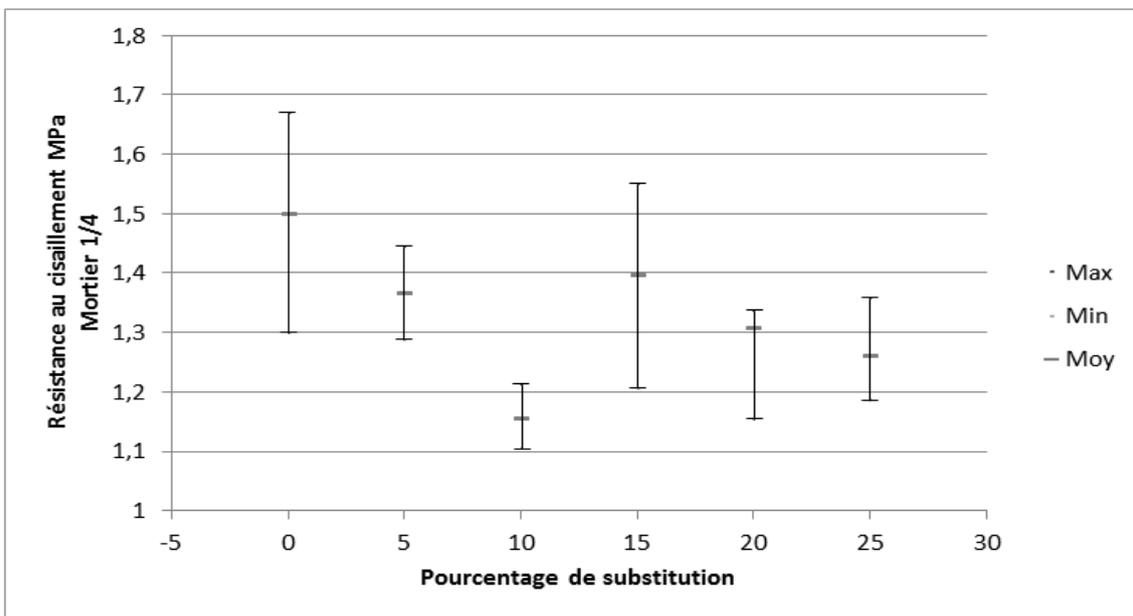


Figure 4.1: résistance au cisaillement des murets à base de mortier 1:4

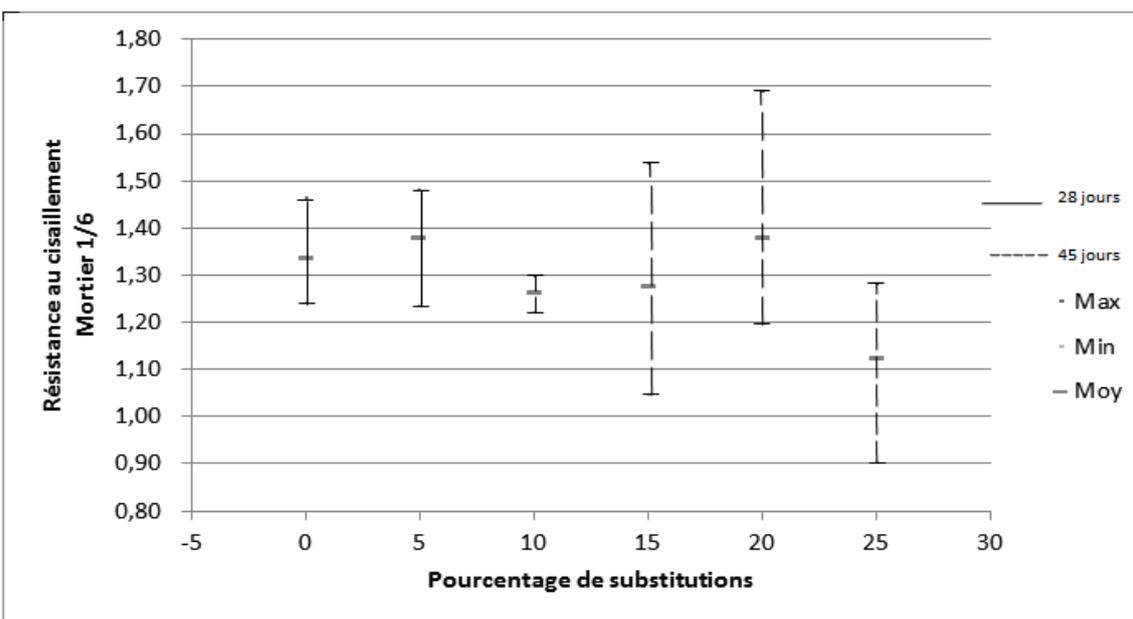


Figure 4.2: résistance au cisaillement des murets à base de mortier 1 :6

A partir des figures (4.1 et 4.2), on constate d'une part, que les résistances des murets sont plus grandes que les résistances des briques seules ; sachant que ces dernières présentent des résistances relativement faibles dont la dispersion est élevée [de 0,56 à 1,81MPa], et d'autre part, au vu des barres d'erreurs, la dispersion des mesures des résistances issues des essais effectuées sur les murets est clairement montré.

De plus, la diminution des résistances des murets à base des mortiers 1 :4 et 1 :6 suivent une tendance à la diminution qui aurait eu probablement la même pente, si les essais ont été réalisés en respectant la même échéance.

Il est clair que l'échéance de 28 jours n'est pas suffisante, pour observer l'effet de la pouzzolanité des mortiers modifiés. Il faudra pour ce faire, une échéance de 90 jours et plus ; temps dont on ne disposait guère pour ce travail de fin d'études.

4.2.4 Modes de rupture

Les figures 4.3 à 4.7 montrent les différents modes de rupture des 36 murets testés au cisaillement. On remarque que ces modes de rupture, tant pour le mortier 1 :4 que pour le mortier 1 :6, sont différents. L'annexe n°2 donne le détail des modes de rupture de tous les essais effectués dans le cadre de notre programme expérimental.

Le tableau 4.2 récapitule les types de mode de rupture recensé lors de nos essais ?

Tableau 4.2 : Différents modes de rupture recensés sur les murets cisailés

Le type de rupture	Le mortier 1 :4	Le mortier 1 :6
Glissement aux joints	17%	50%
Eclatement en appuis	60%	10%
Dents de scie	6%	10%
Traction en diagonale	17%	30%

On présente, dans ce qui suit, les mécanismes les plus fréquents d'entre eux :

- glissement au long du lit du joint horizontal (figure 4.3),
- rupture en diagonale (figure 4.4),
- éclatement aux appuis supérieur et inférieur (figure 4.5 et 4.6),
- rupture en dents de scie (figure 4.7).

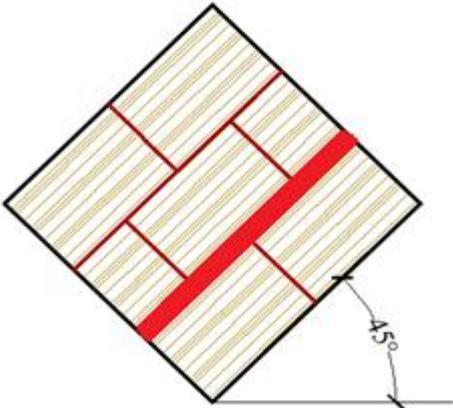


Figure 4.3: Glissement au long du lit du joint horizontal.

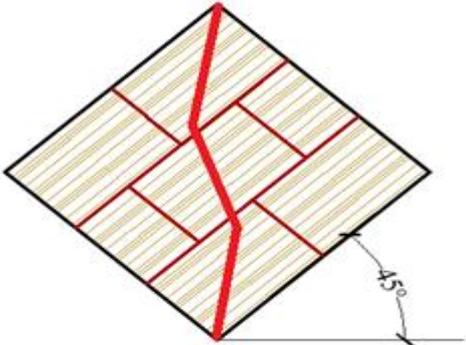


Figure 4.4: Rupture selon la diagonale.

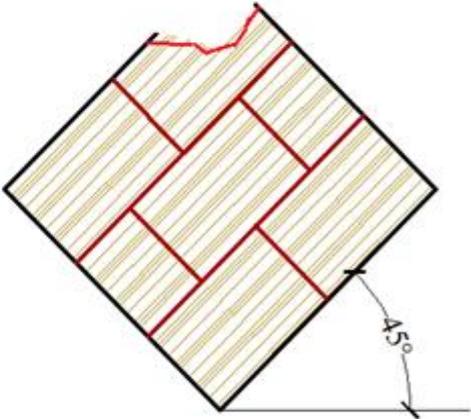


Figure 4.5: Eclatement de l'appui supérieur.

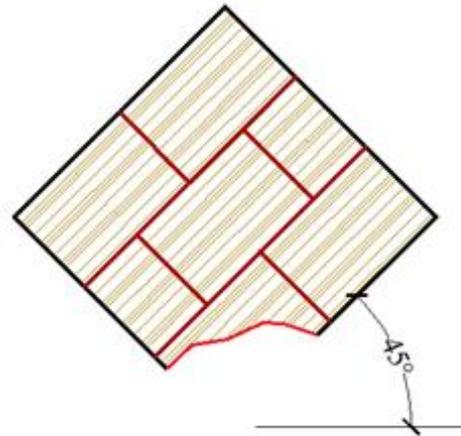


Figure 4.6 : Eclatement de l'appui inférieur.

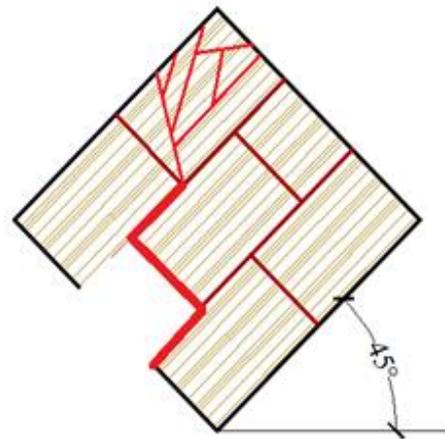


Figure 4.7 : Rupture en dents de scie.

Pour les murets à base de mortiers 1 :4, le mode de rupture le plus courant est l'éclatement en appuis (60%). Ce mode de rupture traduit l'insuffisance des résistances des briques relevée plus haut (cf. chapitre 3§2.3.1). Aussi, les modes de rupture qui suivent : traction en diagonale et glissement aux joints reviennent avec la même récurrence. Quant aux murets à base de mortier 1 :6, le mode de rupture qui s'impose est le glissement aux joints (50%). Il faut noter qu'on retrouve pratiquement les mêmes modes de rupture dans les travaux de Malyszko [Malyszko, 2003].

4.2.5 ESSAI DE CISAILLEMENT SUR LES TRIPLETS

L'essai effectué sur les triplets, nous permet de déterminer la contrainte de cisaillement pure, désignée dans l'EUROCODE 6 par Fvk_0 ou encore τ_0 dans le DTR C2-45 du CNERIB. Le tableau 4.3, consigne les résultats des essais réalisés sur ces triplets.

Tableau 4.3: Résultats des résistances au cisaillement Fvk_0

% de substitution pouzzolanique	Mortier 1 :4			Mortier 1 :6		
	Fvk_0 (MPa)	Ecart Type	Fvk_0 Moyenne	Fvk_0 (MPa)	Ecart Type	Fvk_0 Moyenne
0	0,49	0,13	0,34	0,30	0,08	0,30
5	0,45			0,39		
10	0,34			0,38		
15	0,38			0,29		
20	0,18			0,30		
25	0,19			0,17		

La résistance Fvk_0 obtenue avec un écart moyen de 10% s'apparente aux résultats obtenus dans l'étude menée par [TOMAZEVIC 2008] et sont d'ailleurs conformes aux valeurs données dans l'EUROCODE 6 et le DTR C2-45 du CNERIB pour la maçonnerie appartenant à notre catégorie. Ce paramètre a été déterminé pour le calcul de la résistance de la maçonnerie au cisaillement en prenant en considération les expressions empiriques données par l'Eurocode 6 et le DTR du CNERIB.

4.3 RÉSULTATS DES MURETS SOUMIS A LA COMPRESSION

4.3.1 Résistance des murets à la compression

Les résultats de la résistance des murets à la compression, sont regroupés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Résistance des murets a la compression

% de substitution pouzzolanique	Mortier 1 :4				Mortier 1 :6			
	Force (KN)	σ_{cmoy} (MPa)	ΔL (mm)	Taux de Variation	Force (KN)	σ_{cmoy} (MPa)	ΔL (mm)	Taux de Variation
0	100	1,64	9,677	0	115,4	1,89	9,492	/
5	82,04	1,34	10,41	18	92,09	1,51	8,563	20
10	115,3	1,89	10,07	15	98,14	1,61	6,728	15
15	110,7	1,81	11,15	10	107,9	1,77	6,743	6
20	102,8	1,69	9,079	3	88	1,44	7,783	24
25	103,3	1,69	8,653	3	82,82	1,36	7,568	28

4.3.2 Modes de ruptures

Le mode de rupture que nous avons observé sur ces murets concerne particulièrement l'éclatement soit de la ligne supérieure du muret (Figure 4.9), soit de sa ligne inférieure (Figure 4. 4.10). Ces observations sont encore une fois le résultat de la qualité mécanique insuffisante des briques utilisées.

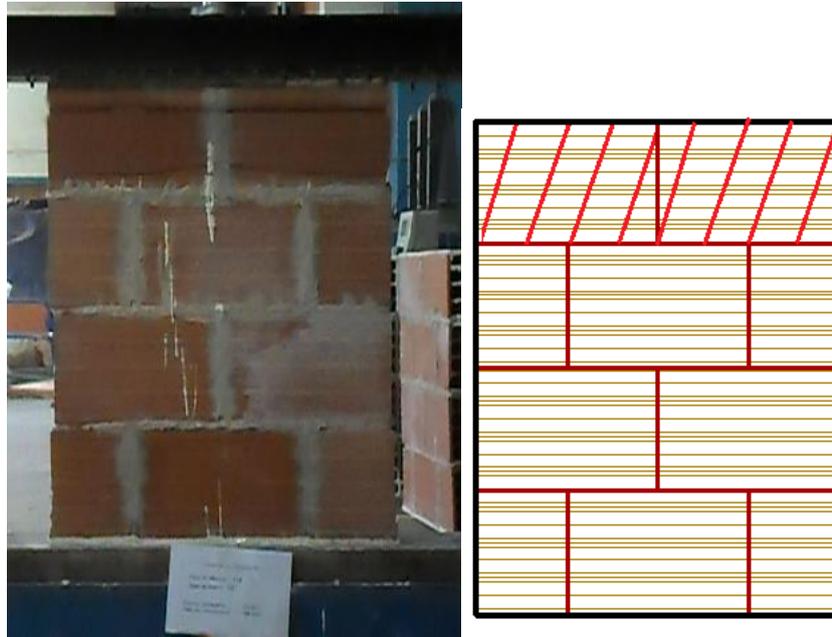


Figure 4.8 : Eclatement de la ligne supérieure du muret en maçonnerie de brique creuse

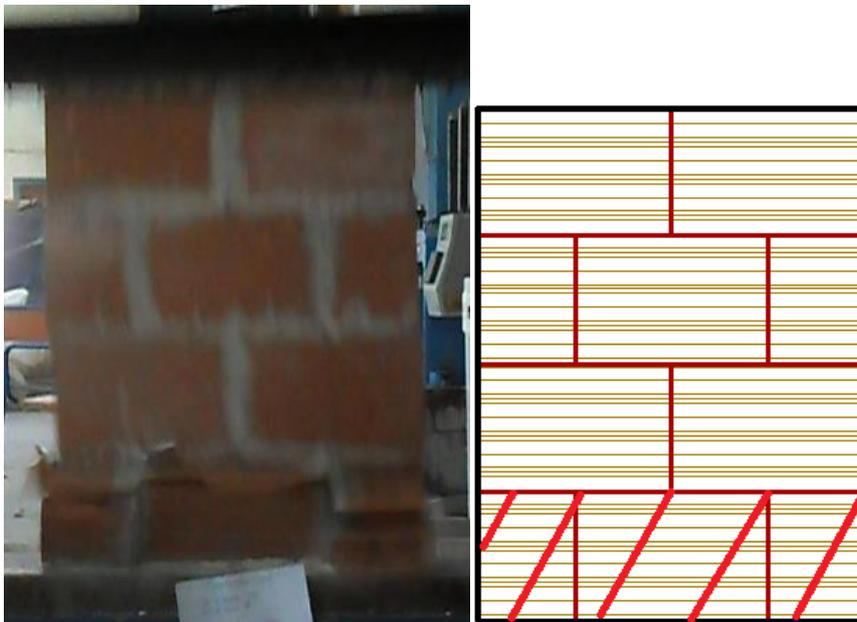


Figure 4.9 : Eclatement de la ligne inférieure du muret en maçonnerie de brique creuse.

4.4 Les études comparatives

4.4.1 ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSISTANCES AU CISAILLEMENT AVEC L'EUROCODE 6 ET LE DTR DU CNERIB

On récapitule dans le tableau 4.5, les résultats des résistances moyennes de cisaillement obtenues à partir de notre programme expérimental ainsi que ceux déterminés à partir des expressions empiriques données par l'Eurocode 6 et le DTR C2-45 du CNERIB.

Tableau 4.5: COMPARAISON DES RÉSISTANCES AU CISAILLEMENT AVEC L'EUROCODE 6 ET LE DTR C2-45 DU CNERIB

		Mortier 1 :4		Mortier 1 :6	
% de substitution Pouzzolanique	Muret	τ_{moy} (MPa)	Fvk (MPa)	τ_{moy} (MPa)	Fvk (MPa)
0	M ₀	1,50	1,14	1,34	1,06
5	M ₅	1,37	0,99	1,38	0,99
10	M ₁₀	1,15	1,10	1,26	1,02
15	M ₁₅	1,40	1,10	1,28	0,99
20	M ₂₀	1,31	0,86	1,38	0,88
25	M ₂₅	1,26	0,87	1,12	0,71

Au vu des résultats expérimentaux, la résistance au cisaillement proposée par l'EUROCODE 6 et le DTR C2-45 du CNERIB sont sous-estimées.

4.4.2 ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSISTANCES AU CISAILLEMENT DES MURETS AVEC LES TRAVAUX EFFECTUEES AU LABORATOIRE EOLE

Le tableau 4.6, consigne les résultats des résistances moyennes de cisaillement obtenues à partir de notre programme expérimental et ceux trouvés par nos collègues ayant utilisé les fillers calcaires à la place de la pouzzolane.

Tableau 4.6: Comparaison des résistances au cisaillement des murets avec substitution de pouzzolane et de fillers calcaires

		Mortier 1 :4		Mortier 1 :6	
% de substitution	Muret	τ pouzzolane (MPa)	τ fillers (MPa)	τ pouzzolane (MPa)	τ fillers (MPa)
0	M ₀	1,50	1,51	1,34	1,41
5	M ₅	1,37	1,68	1,45	1,52
10	M ₁₀	1,15	1,58	1,28	1,57
15	M ₁₅	1,40	1,51	1,28	1,42
20	M ₂₀	1,31	1,38	1,23	1,33
25	M ₂₅	1,26	1,25	1,12	1,25

On constate que les fillers calcaires ont eu un effet positif sur les résistances au cisaillement pour les faibles pourcentages de substitution (5 et 10%) ; au-delà on note une diminution de ces résistances. En revanche, pour la pouzzolane, les résistances au cisaillement ont tendance à la diminution. Il faut préciser, selon la littérature, que la pouzzolane présente une cinétique relativement lente dont l'effet ne peut être apprécié qu'à long terme (à partir de 90 jours).

Aussi, on ne peut comparer l'effet des fillers calcaire et l'effet de la pouzzolane car sur le plan des réactions chimiques, les fillers ne participent à la résistance que par l'effet de la densification (effet physique) alors que la pouzzolane participe à l'augmentation de la résistance en tant que liant par effet chimique (production de CSH).

4.5 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, on retiendra que la lenteur des réactions de la pouzzolane ne produit pas l'effet escompté à court terme.

Aussi, même si l'effet pouzzolanique n'agit pas tel que les fillers calcaire sur les résistances, il améliore nettement la maniabilité au fur et à mesure que le pourcentage de substitution s'accroît.

CONCLUSION GENERALE

La technique contemporaine la plus répandue en Algérie dans la construction des bâtiments est la structure porteuse en portiques de béton armé dont l'enveloppe est confectionnée en maçonnerie d'agglomérés en ciment ou de briques creuses en terre cuite. Cette enveloppe assure principalement l'isolation de l'espace intérieur.

Notre travail de fin d'études, mené au laboratoire de recherche « EOLE », a pour but de bien comprendre le comportement de la maçonnerie en briques creuses de terre cuite sous un chargement de cisaillement. Ces murets sont construits avec un mortier à base de ciment portland composé et de pouzzolane naturelle. L'ensemble des matériaux utilisés sont de provenance locale.

La pouzzolane a été incorporée dans le mortier en substitution volumique d'une partie du ciment variant entre 5 à 25%. La résistance mécanique après une cure de 28 jours a été déterminée selon la norme ASTM 519-02. Les briques utilisées présentaient des caractéristiques physico-mécaniques hétérogènes, ce qui a influencé de manière significative les résultats du programme effectué.

Les résultats obtenus indiquent que la pouzzolane diminue la résistance des murets au cisaillement pour les mortiers 1 :4 et 1 :6 à court terme. Les modes de ruptures sont similaires aux modes trouvés dans la littérature notamment les travaux réalisés au sein du laboratoire de recherche « EOLE ».

L'essai sur les triplets de brique sous un chargement de cisaillement et l'essai à la compression des murets nous ont permis de déterminer f_{vko} et F_{vk} nécessaires au calcul de la résistance caractéristique au cisaillement selon l'EUROCODE 6. On a montré que les résultats obtenus à l'aide de l'Eurocode sous-estiment les résultats obtenus expérimentalement.

Perspectives :

Cette étude peut servir pour d'autres travaux qui seront menés au sein du laboratoire EOLE en prenant en compte d'autres paramètres :

- Etudier l'influence de la pouzzolane sur les murs en maçonnerie sous chargement de flexion.
- Utilisation de briques de diverses briqueteries de la région,
- Utilisation d'autres supports pour la maçonnerie (briques pleines en terre cuite ou silico-calcaires, agglomérés de béton, etc.),
- Utilisation de mortiers plus maigres (1:8, 1:10)
- Suivre l'influence de la pouzzolane sur les murets à long terme : 90, 180 jours.
- Utiliser d'autres ajouts, tels que la fumée de silice, le laitier ou les cendres volantes.
- Sur la base des résultats expérimentaux, modéliser numériquement le comportement de la maçonnerie aux sollicitations étudiées,

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

OUVRAGES ET PUBLICATIONS :

- AIT RAMDANE Idir.**, « Comportement sismique d'ossature en portique en béton armé en tenant compte de l'interaction des murs remplissage en maçonnerie-cadres des portiques », *Mémoire de Magister 2014. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.*
- BEALL, C.**, « Masonry Design And Detailing For Architects And Contractor ». 5th Edition McGraw Hill, 2004, pp. 527-546.
- BENKADDOUR M et coll.**, « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. » *Revue Nature et Technologie*, 2009, 63-73.
- BOUKLI HACENE S.M.A.**, « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », *Thèse de Doctorat, 2010. Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.*
- BRIGAUX, G.**, « La maçonnerie ». France: Editions EYROLLES, 1968 Paris, France
- CHAIB O., MOULI M., HAMADECHE M., BENOBSMAN S., et DIFF.** « Etude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés. » *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Bayonne, France, 2015
- CHAIB O. et Coll**, « Etude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés. » *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Bayonne, France, 2015.
- DAVIDOVICI V.**, « Séisme de BOUMERDES – 21 mai 2003 / Rapport préliminaire », Alger: Ministère de l'Habitat, 2003.
- DE BRANDOIS P et BABICS F.**, « MANUEL DE SENSIBILISATION À LA RESTAURATION DE LA MAÇONNERIE ». France: Ministère de la Culture et de la Communication, Direction de l'Architecture et du Patrimoine, 2006, ISBN, 2110946636.
- DUCO F.**, « Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments existants à partir d'une instrumentation in situ », *these de doctorat*, 2012, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- 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.
- EIGAWADY M. et Coll**, « Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymers. » *Journal of Composites for Construction volume 11, numéro 1, 2007: p50-62.*
- GERTIN Y.**, « COMPORTEMENT SISMIQUE D'UN MUR EN MAÇONNERIE ARMÉE ENTIÈREMENT REMPLI DE COULIS », *Mémoire de Maîtrise 2014, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, SHERBROOKE, CANADA.*
- GHARIB T. et Coll**, « Analyse expérimentale du comportement au cisaillement des murs en maçonnerie de pierre renforcés par matériaux composites TRC & NSM FRP. » *33èmes Rencontres de l'AUGC, 2015, Université Claude Bernard Lyon 1, Hal-01167664.*

HAMZA CHERIF et KARA ALI. « Comportement en cisaillement des murs en maçonnerie »v, *Mémoire de Master,2014.*, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.

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

Hurez M. et Coll, « *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie* », Paris, Ed AFNOR et Groupe Eyrolles, 2009.

MALYSKO L., «In-plane shear and tensile strength tests of small brickwork specimens», *Structural Analysis of Historical Constructions*, 2005, p 291-998,ISBN 04 15363799.

MILOSEVIC J., «EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE SHEAR STRENGTH OF MASONRY WALLS.» *15th International Conference on Experimental Mechanics*. Porto/Portugal: Technical University of Lisbon, 2012.

PAULAY T, et PRIESTLEY M.N.J.,. « *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*».Ed JOHN WILEY & SONS, New York, 1992.

P'KLA A.,« CARACTERISATION EN COMPRESSION SIMPLE DES BLOCS DE TERRE COMPRIMEE (BTC) : APPLICATION AUX MACONNERIES "BTC-MORTIER DE TERRE »,*Thèse de Doctorat, 2012*, L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, LYON, France.

RAMDANI A. et ACHOURI.N., « *INFLUENCE DES ADDITIONS FILLERS CALCAIRES SUR LE COMPORTEMENT DES MURS EN MAÇONNERIE SOUS CHARGEMENT DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT* », *Mémoire de Master.2016*,UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie.

SHING P. et MEHRABI A.«Behavior and analysis of masonry-infilled reinforced concrete frames subjected to lateral load.» *Earthquake Resistant Engineering Structures VII*, n°104, p320-331, (2002).

Taleb O., « Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux », mémoire de magister, 2009, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.

AlgérieTOMAZEVIC M., «Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6:shear versus tensile strength of masonry.» *Materials and Structures*, 2009: 889–907.

Norme et Réglementation :

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

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

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

EUROCODE 6, « Calculs des ouvrages en maçonnerie, partie1-1: Règles générales- règles pour la maçonnerie armé et non armé », 144 p.

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

NF P 18-598 ., « Équivalent de sable », 1994.

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

NF P 18-555., "Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables", 1990.

Sites Internet :

https://books.google.dz/books?hl=en&lr=&id=1FLk8goS4DUC&oi=fnd&pg=PA5&dq=Construire+parasismique+:+risque+sismique,+conception+parasismique+des+b%C3%A2timents,+r%C3%A9glementation.&ots=hwUsl9460p&sig=4moTWvn3_lbb5oUOCvid3ziPam8&redir_esc=y#v=onepage&q=Construire%20parasismique%20%3A%20risque%20sismique%2C%20conception%20parasismique%20des%20b%C3%A2timents%2C%20r%C3%A9glementation.&f=false

(consulté en 2017)

<https://books.google.dz/books?id=i9kov8X-0n8C&printsec=frontcover&dq=Fundamentals+of+Building+Construction+:+Materials+and+Methods+%D8%AD%D9%8A%D8%A8&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiazpb3x9nTAhVF1xoKHUI0DeQQ6AEIJDA#v=onepage&q&f=false>

(consulté en 2017)

<http://jevaisconstruire.levif.be/construire-renovation/gros-oeuvre/le-silico-calcaire/article-normal-318605.html>

(consulté 2017)

<https://mur.ooreka.fr/comprendre/brique-rouge>

(consulté 2017)

<http://www.batisevre.fr/portfolios/maconnerie-de-moellon-en-schiste-et-gneis-%E2%80%A2-ologne-sur-mer/>

(consulté 2017)

<http://www.bricoleurdudimanche.com/forums/forums-bricolage/forum-bricolage-en-general-57/raviver-mur-en-brique.html>

(consulté 2017)

<https://www.leroymerlin.fr/v3/p/campus/traiter-les-murs-contre-l-humidite-mur-poreux-friable-avec-mousses-etc-l1401166280>

(consulté 2017)

<http://www.maximetoiture.fr/19/rejointoiement-mur-lens-auchel.html>

(consulté 2017)

<http://www.securiteinterieure.fr/2017/01/la-principale-faille-de-la-lutte.html>

(consulté 2017)

<http://www.stop-humidite.pro/hydrofuge-mur-humide.html>

(consulté 2017)

<http://www.storemat.com/news/4640/brevettato-certificato-testato-per-zona-sismica-bio-taurus-di-stabila.html>

(consulté 2017)

<https://www.systemed.fr/conseils-bricolage/maconnerie-briques,2325.html>

(consulté 2017)

<https://www.maisonbrico.com/images/conseils/construction-d-mur-bloc-beton-parpaing-1504-l320-h0.jpg>

(consulté 2017)

ANNEXES

Annexe 1

Le tableau 1 présente en détail les caractéristiques géométriques des briques.

Tableau: Caractéristiques géométriques de briques

Echantillon	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)	<i>M</i> (Kg)	<i>ρ</i> (Kg/m³)
1	29,7	19,5	9,85	3,716	1 407,58
2	29,5	19,8	9,85	3,794	1 437,12
3	29,4	19,9	9,7	3,806	1 441,67
4	30	19,4	9,75	3,836	1 453,03
5	29,5	19,4	9,65	3,780	1 431,82
6	29,8	19,5	9,75	3,680	1 393,94
7	29,6	19,9	9,7	3,824	1 448,48
8	29,4	19,7	9,8	3,748	1 419,70
9	29,5	19,4	9,7	3,770	1 428,03
10	29,4	19,4	9,7	3,730	1 412,88
Moyenne	29,58	19,59	9,745	3.768	1427,42

Annexe 2

En cisaillement

Les tableaux 1 et 2 présentent les résultats expérimentaux récapitulatifs moyens des résistances des murets, l'écart type entre les 3 échantillons, la durée de l'essai jusqu'à la rupture, les modes de rupture et leurs répétitions ainsi que la date de la construction et de l'écrasement.

Pour les modes de fissuration :

D : rupture en diagonal G : Glissement au joint
 A : éclatement en appuis S : Rupture en dent de scie.

Tableau 01: Résultats expérimentaux des résistances au cisaillement des murets tests du mortier 1 :4

% de substitution pouzzolanique	Muret	Force (KN)	τ_{moy} (Mpa)	Ecart type	Taux de variation (%)	Durée de l'essai (minutes)	Mode de rupture	Date de construction	Date d'écrasement
0	M ₀	61,18	1,60	0,10	/	1 :40	D : 2 A : 1	06.03.2017	04.04.2017
5	M ₅	53,84	1,41	0,05	-8,81	1 :36	G : 2 A : 1	07.03.2017	05.04.2017
10	M ₁₀	45,16	1,18	0,05	-22,96	1 :42	A : 2 G : 1	08.03.2017	06.04.2017
15	M ₁₅	57,10	1,49	0,08	-6,82	1 :18	A : 2 D : 1	12.03.2017	09.04.2017
20	M ₂₀	52,97	1,38	0,06	-12,80	1 :36	A : 2 S : 1	13.03.2017	10.04.2017
25	M ₂₅	49,65	1,30	0,09	-15,88	1 :14	E : 3	14.03.2017	11.04.2017

Tableau 02: Résultats expérimentaux des résistances au cisaillement des murets tests du mortier 1 :6

% de substitution pouzzolanique	Muret	Force (KN)	τ_{moy} (Mpa)	Ecart type	Taux de variation (%)	Durée de l'essai (min)	Mode de rupture	Date de construction	Date d'écrasement
0	M ₀	48,75	1,27	0,05	/	0 :49	S : 2 G : 1	15.03.2017	12.04.2017
5	M ₅	55,62	1,45	0,04	14,10	0 :51	E : 2 S : 1	19.03.2017	16.04.2017
10	M ₁₀	49,08	1,28	0,02	0,68	0 :52	G : 2 S : 1	20.03.2017	02.05.2017
15	M ₁₅	48,86	1,28	0,25	0,24	1 :02	S : 1 D : 1 S : 1	20.03.2017	02.05.2017
20	M ₂₀	46,92	1,23	0,04	-3,74	1 :04	G : 3	21.03.2017	02.05.2017
25	M ₂₅	43,01	1,12	0,20	-11,76	1 :01	E : 1 A : 1 D : 1	22.03.2017	02.05.2017

En compression :

.Les tableaux 3 et 4 récapitulent les résistances des à la compression des murets ainsi que les dates de construction et d'écrasement

Tableau 03: Résultats expérimentaux des résistances à la compression des murets tests du mortier 1 :4

% de substitution pouzzolanique	Muret	Force (KN)	σ_{moy} (MPa)	L	Taux de variation (%)	Date de construction	Date d'écrasement
0	M ₀	100	1,64	9,677	0	23.03.2017	08.05.2017
5	M ₅	82,04	1,34	10,41	18	02.04.2017	08.05.2017
10	M ₁₀	115,3	1,89	10,07	15	03.04.2017	08.05.2017
15	M ₁₅	110,7	1,81	11,15	10	11.04.2017	08.05.2017
20	M ₂₀	102,8	1,69	9,079	3	11.04.2017	08.05.2017
25	M ₂₅	103,3	1,69	8,653	3	11.04.2017	08.05.2017

Tableau 004: Résultats expérimentaux des résistances à la compression des murets tests

% pouzzolane	Muret	Force (KN)	σ_{moy} (Mpa)	Ecart type	Taux de variation (%)	Date de construction	Date d'écrasement
0	M₀	115,4	1,89	9,492	/	02.04.2017	09.05.2017
5	M₅	92,09	1,51	8,563	20	09.04.2017	09.05.2017
10	M₁₀	98,14	1,61	6,728	15	09.04.2017	09.05.2017
15	M₁₅	107,9	1,77	6,743	6	10.04.2017	09.05.2017
20	M₂₀	88	1,44	7,783	24	11.04.2017	10.05.2017
25	M₂₅	82,82	1,36	7,568	28	11.04.2017	10.05.2017

du mortier 1 :6

ANNEXE 3

Tableau 05: Quelques exemples de caractéristiques physico – mécaniques [DTR C2-45]

		Résistance min à la compression (MPa)	Masse volumique (Kg-m ³)	Module de déformation (MPa)
PRODUITS ROUGES (TERRE CUITE)	Brique pleine ou perforée	10 à 40	1600 à 1800	7000 à 30000
	Brique creuse	2	930 à 1200	1500 à 2000
AGGLOMERES	Bloc plein	8 à 16	1000 à 1500	
	Bloc creux	4 à 8		
BRIQUE SILICO – CALCAIRE	Brique pleine ou perforée	15	1200 à 2000	12000 à 20000