REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : matériaux en génie civil

Thème

Corrélation entre les performances des prismes et des murets en maçonnerie sous chargement axial

---

Présenté par :

TRIFI MOHAMED SALEH

KFAIFI ABD ERHMENE

Proposé et Dirigé par :

Dr : HARNOUNE.H

Promotion Juin 2025

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame **HARNOUNE HOURIA** pour l'encadrement de ce mémoire et pour ça aide, ça patience et la confiance qu'elle nous a accordée.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame

BOUKHELKHAL DJAMILA chef département de génie civil

Pour son soutien tout au long de nos études , et particulier pour le mémoire

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

A mon père, A ma mère,

A mes frères, A mes sœurs,

A mon très cher binôme

Abd erhmene

A mon très cher frère aymen ET

Houssem et islem

A tous ceux qui me sont chers...

Mohamed saleh

Dédicace

A mon père, A ma mère,

A mes frères, A mes sœurs,

A mon très cher binôme

Mohamed saleh

A mon très cher frère aymenET

houssem ET islem

A tous ceux qui me sont chers...

Abd erhmane

Résumé

Les caractéristiques de résistance et de déformation de la maçonnerie sous compression uni axiale sont étudiées sur des décennies à l'aide des murets et des prismes et ; cependant, la corrélation entre ces deux méthodes d'essai standard n'est pas établie. Les normes de conception de la maçonnerie fournissent des expressions et des données tabulées pour déterminer les caractéristiques de compression à partir des tests de prismes ou de murets à échelle réduite. Par la suite, les chercheurs ont comparé les normes et tiré des conclusions sur leurs conservatismes respectifs ou autres, sans tenir compte de la manière dont ces dispositions ont été élaborées pour ces normes de conception. Par conséquent, une tentative a été faite pour corréler le comportement du prisme de maçonnerie au comportement de compression de muret. Six prismes et nef murets ont été construits et testés en utilisant trois types différents de brique et 3 type de mortier. Les résultats des tests ont révélé que les tests de prisme fournissent systématiquement une résistance à la compression supérieure à celle des murets correspondants. Une relation linéaire entre les résistances à la compression des prismes et des murets s'est avérée appropriée. Pour les caractéristiques de résistance à la compression de la maçonnerie, un modèle analytique simplifié est proposé pour corréler les données d'essai des prismes et des murets.

Abstract

Strength and deformation characteristics of masonry under uniaxial compression are researched over decades using prisms and wallettes; however, correlation between these two common test methods is not firmly established. Masonry design standards provide expressions and tabulated data for the determination of the compression characteristics from either the prism or the wallette tests. Subsequently researchers compared the standards and made conclusions on their respective conservativism or otherwise, without any regard to the way these provisions have been developed for these design standards. Hence an attempt was made to correlate the behaviour of the solid masonry prism to the wallette compressive behaviour. Six prisms and nine wallettes were constructed and tested using three different types of units and three type of mortar. The test results have revealed that the prism tests consistently provide higher compressive strength than that of the corresponding wallettes specimens. A linear relationship between the compressive strengths of the prisms and the wallettes has been found appropriate. Simplified analytical model is proposed to correlate the test data from the prisms and the wallettes.

ملخص

تمت دراسة خصائص المقاومة والتشوه للبناء تحت ضغط أحادي المحور على مدى عقود باستخدام الجدران والمنشورات المصغرة؛ ومع ذلك، لم يتم إثبات العلاقة بين هاتين الطريقتين القياسيتين للاختبار. توفر معايير تصميم البناء تعبيرات وبيانات مجدولة لتحديد خصائص الضغط باستعمال المنشور أو اختبار الجدار المصغر. بعد ذلك ، قارن الباحثون المعايير واستخلصوا استنتاجات حول المحافظات الخاصة بكل منها أو غيرها ، بغض النظر عن كيفية تطوير هذه الأحكام لمعايير التصميم هذه .لذلك، جرت محاولة لربط سلوك المنشور للبناء الصلب بسلوك الضغط للجدران ال مصغرة. تم بناء واختبار ستة مناشير و تسعة جدران باستخدام ثلاثة أنواع مختلفة من الطوب وثلاثة أنواع من الملاط. أظهرت نتائج الاختبار أن اختبارات المنشور توفر باستمرار مقاومة ضغط أعلى من الجدران. تم العثور على علاقة خطية بين القوة الانضغاطية للمنشورات والجدران لتكون مناسبة. بالنسبة لخصائص مقاومة الانضغاط للبناء، تم اقتراح نموذج تحليلي مبسط لربط .بيانات الاختبار للمنشورات والجدران المصغرة.

Mots-clés pour le mémoire

"Corrélation entre les performances des prismes et des murets en maçonnerie sous chargement axial".

- Résistance à la compression*
- Maçonnerie
- Briques(B1 ; B2 et B3)
- Mortier(M1 ; M2 et M3)
- Prismes(prisme 3 (P3) ET prisme 6 (P6)).
- Murets(WE1 ; WE2)
- Essai de compression axiale
- Corrélation prisme-muret
- Propriétés mécaniques
- Paramètres géométriques
- Modes de rupture
- Paramètres expérimentaux
- Analyse numérique
- Eurocode 6
- Résistance au cisaillement
- Déformations de la maçonnerie
- Influence du type de bloc et du type de mortier
- Relation linéaire entre les résistances à la compression
- Modélisation analytique simplifiée
- Essais en laboratoire
- Facteurs influençant la performance structurelle
- Comparaison entre résultats expérimentaux et normatifs
- Effet de l’épaisseur du mur et des joints
- Durabilité et soutenabilité
- Mécanismes de rupture dans la maçonnerie

Liste des tableaux

Tableau 1.1 les déférents types de parpaing……..12
Tableau 1.3 : Principaux défauts de la maçonnerie, causes et conséquences……17
Tableau 1.4 : Pathologies courantes en maçonnerie, causes principales et conséquences….25
Tableau 1.5 : Comportement mécanique de la maçonnerie selon ses différents aspects……34
Tableau 2.1 Caractéristiques physiques des briques perforés en terre cuite utilisées…….54
Tableau 2.2 : Résistances à la compression des briques testée……..55
Tableau 2.3 : Comparaison des propriétés……60
Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques moyennes des mortiers à 28 jours……62
Tableau 2.5 : Matrice du programme expérimental sur les assemblages de maçonnerie……..63
Tableau 2.6 : Matrice du programme expérimental sur les assemblages de maçonnerie……66
Tableau 3.3 : Propriétés de déformation des éprouvettes testées. **…….73**
Tableau 3.6 : valeurs de la contrainte à la compression…….79
Tableau 3.5 : Relation entre les contraintes à la compression des prismes et des murets. **…83**
Tableau 3.4 : deformation propreties of tested specimens …….86
Tableau1.2 : Types de joints de maçonnerie, épaisseurs typiques et caractéristiques principales…….87
Tableau3. 1 : Résultats de résistance à la compression des tests. (Les murets)……...90
Tableau3.2 : Résultats de résistance à la compression des tests. (Les prismes)……..92
Tbleau 3.7 : Résistance à la compression des(muretes et prismes)…….94

Liste des figures

Figure 1.10 Briques creuses …….6
Figure 1.11 constituants d'un mortier…….. 7
Figure 1.12 : Défauts causés par le Mouvement des dalles……. 7
Figure 1.13 : Mouvements de dilatation thermique ……10
Figure 1.14: Fissure le long des fenêtres ……11
Figure 1.15 : types de chargement appliqués sur les murs …….13
Figure 1.16 Mécanismes de rupture de la maçonnerie : (a) fissuration du joint en traction ;..16
Figure 1.17 Propagation de la charge concentrée d'un mur ……..18
Figure 1.18 Essai de traction …….25
Figure 1.19 Flexion due aux efforts appliqués au plan perpendiculaire au joint de pose…..28
Figure 1.1pierre naturelles ……31

Figure 1.2 mur en pierre naturelles ……31
Figure 1.20 Flexion due aux efforts appliqués au plan parallèle au joint de pose……..32
Figure 1.21 Comportement à la flexion des murs en maçonnerie ……33
Figure 1.22 Modes de rupture sous flexion uni-axiale ……..34
Figure 1.23 Modes de rupture des murs ……34
Figure 1.24 charge de compression ……...35
Figure 1.25 État de contrainte dans la maçonnerie, sous compression uni axiale……..37
Figure 1.26 Montage des essais en compression uni axiale……38
Figure 1.27 Résultats d'essais en compression uni axiale……..40
Figure 1.28 Modes de rupture en compression uni axiale……..41
Figure 1.29 Résultats de la campagne expérimentale sur la maçonnerie chargée en…….41
Figure 1.3 maçonnerie en pierre naturelles ……43
Figure 1.30 Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré-compression.43
Figure 1.4 mur en pierre naturelle ……...44
Figure 1.5 bloc plein de béton……..45
Figure 1.6 bloc de béton creux…….46
Figure 1.7 : processus de fabrication des briques en terre cuite creuses …….47
Figure 1.8 briques pleines ……...50
Figure 1.9 briques perforées **. ……51**
Figure 11 : Outils utilisés pour la confection des assemblages……..51
Figure 2.1: Presse universelle (photos prises par les auteurs)……..53
Figure 2.10 les murets type 2 (épaisseur 2)……..54
Figure 2.12 : Etalement du mortier (photos prise par les auteurs)……56
Figure 2.13 : Vérification de la planéité à l'aide du niveau à bulle (photos prise par les auteurs)……58
Figure 2.14: Cure et stockage des assemblages de maçonnerie……60
Figure 2.15 : L'ensemble du dispositif d'essai (photos prise par les auteurs)……61
Figure 2.16 : Muret sous charge de compression (photos prise par les auteurs)…….64
Figure 2.2 : Moule prismatique normalisé et b) Éprouvettes de mortier 4x4x16 cm³……65
Figure 2.3 Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm de mortier…….65
Figure 2.4 : **Dispositif d'essai de flexion sur éprouvette de mortier……..66**
Figure 2.5 Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. (BUI, 2013)…….66
Figure 2.6: L'essai de résistance à la compression…….67

Figure 2.8 : les prismes de types 1……68
Figure 2.9 : Les murets type 1 (épaisseur 1)……69
figure 3.1 :mode de rupture Murette brique 1……76
figure 3.10 : mode de rupture prisme 3 brique2……77
figure 3.11 :mode de rupture prisme 3 brique3……..77
Figure 3.12: mode de rupture de mur……78
Figure 3.13: mode de rupture prismes.3……80
Figure 3.14: mode de rupture prismes 6……81
figure 3.15 : Les murettes……..81
figure 3.16 : Les prismes……..83
figure 3.17 : Les murette avec les prismes……84
Figure 3.17: Relation entre la résistance à la compression des prismes de maçonnerie et la résistance à la compression des murets……86
figure 3.18 : Relation contrainte de compression de brique selon X, contrainte de compression de mortier selon y, contrainte de compression des murets selon Z……87
figure 3.19 : **Relation contrainte de compression de brique selon X, contrainte de compression de mortier selon y, contrainte de compression des prismes selon Z…….87**
figure 3.2 :mode de rupture Murette brique 2 mortier…….88
figure 3.3 : mode de rupture Murette brique 3……88
figure 3.4 :mode de rupture prismes6 brique1 ……90
figure 3.5 :mode de rupture prismes6 brique 2……90
figure 3.6 :mode de rupture prismes 6 brique 3……...91
figure 3.7 : mode de rupture prisme 3 brique 1……93
figure 3.8 : mode de rupture prisme 3 brique3……94
figure 3.9 :mode de rupture prisme 3 brique 1……96

NOMENCLATURE

FX : Murets où les charges sont parallèles au lit de joint

FY : Murets où les charges sont perpendiculaires au lit de joint

M1 : Mortier en ciment (1 : 4)

M2 : Mortier en ciment (1 : 6)

M3 : Mortier bâtard (1 : 2 : 9)

FM1 X : Muret FX en mortier de ciment (1 : 4) testé à la flexion

FM2 X : Muret FX en mortier de ciment (1 : 6) testé à la flexion

FM3 X : Muret FX en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la flexion

FM1 Y : Muret FY en mortier de ciment (1 : 4) testé à la flexion

FM2 Y : Muret FY en mortier de ciment (1 : 6) testé à la flexion

FM3 Y : Muret FY en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la flexion

CM1 : Muret en mortier de ciment (1 : 4) testé à la compression

CM2 : Muret en mortier de ciment (1 : 6) testé à la compression

CM3 : Muret en mortier de ciment (1 : 2 : 9) testé à la compression

EC6 : L'Eurocode 6

φ : Masse volumique apparente (kg/m3).

M : Masse des briques (kg)

V : Volume net des briques

Cap : Capillarité des briques

S : Surface horizontale mouillée en cm2 incluant ou non les vides

t : Temps d'immersion en minutes

σb : Résistance à la compression (MPa).

ρs : Masse volumique

ES : Equivalent sable

Rc : Résistance à la compression fr : Force de flexion à la rupture

f: Force de compression

$\boldsymbol{fxk}$: Résistance à la flexion (N/mm2).

$fxk1$: Résistance à la flexion des murets FX (N/mm2)

$fxk2$: Résistance à la flexion des murets FY (N/mm2)

L : Longueur du mur b : Largeur du mur.

E : Epaisseur du mur.

fm : résistance à la compression les murets.

fp : résistance à la compression murets.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

NOMENCLATURE

Introduction Générale.....1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....3

I .Introduction de la revue de littérature.....3

I .2 Maçonnerie.....4

I.2.1 Définition.....4

I.2.2. Domaine d'application.....8

I.3 Les différents types de maçonnerie :.....12

I.3.1 Introduction :.....15

I.3.2. Maçonnerie de pierre naturelles :.....19

I .3.3 Maçonnerie en agglomérés de béton.....25

I.4 : LES MORTIERS :.....30

1.4.1 :Composition.....33

1.4.2 :Fonctions principales.....33

1.4.3 :Types de mortiers.....34

1.4.4 Les classes de mortier.....36

1.4.5. Épaisseur des joints de mortier :.....37

1.5. DEFAUTS DANS LA MAÇONNERIE :.....37

1.5.1 : Défauts dans la maçonnerie.....37

1.5.2 : Efflorescence.....38

1.5.3. Ventre-de-bœuf 38

1.5.4. Fissures dans les murs 38

1.5.5. Dégradation du mortier 38

1.5.6. Joints mal réalisés 38

1.5.7. Humidité et moisissures 39

1.5.8. Défauts de conception et exécution 39

1.5.9. Problèmes liés aux matériaux 39

1.6. PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE : 41

1.6.1 :Principales pathologies courantes 41

1.6.2 :COMPORTEMENT MECANIQUE DES STRUCTURES EN MACONNERIE : 45

1.6.3. Comportement sous charges horizontales et flexion 47

1.6.4 : COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE EN COMPRESSION : 48

1.7 : RESISTANCE AU CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA CHARGE VERTICALE (COMPRESSION) : 49

1.7.1 : Résumé 50

1.8 : CONCLUSION : 52

CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 53

Ⅱ.1 Introduction 53

Ⅱ.1.1 MATÉRIAUX UTILISES : 53

Ⅱ.2 : Programme Expérimental sur les Assemblages de Maçonnerie 61

Ⅱ.3 :Conception et Nomenclature des Éprouvettes 61

Ⅱ.4 : Confection des Assemblages de Maçonnerie 61

Ⅱ.5 : Méthodologie de la confection des murets : 61

Ⅱ.6 Cure et Stockage des Assemblages 69

Ⅱ.7 : Dispositif et Procédure d'Essai en Compression 69

Ⅱ.8 : Principe de l'essai : 70

Ⅱ.9 : Conclusion du Chapitre 71

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS 72

Ⅲ.1.Introduction 73

Ⅲ.2 : Résistance des murets testés 73

Ⅲ.2.1 : Résistance des murets sous sollicitations de compression 73

Ⅲ.2.2 : Modes de ruptures 75

Ⅲ.2.3.les murettes 77

Ⅲ.3 : Analyse Générale Combinée des Courbes Contrainte-Déformation (Tous Prismes) 87

Ⅲ.3.1. Comportement Général en Compression : 87

Ⅲ.3.2 : Résistances en Compression (Approximatives, Contrainte de Pic) : 88

Ⅲ.3.3. Comportement Général en Cisaillement : 89

Ⅲ.3.4 :Résistances en Cisaillement (Approximatives, Contrainte de Pic, hors anomalie) : 89

Ⅲ.3.5. Influence des Types de Briques (Analyse Logique Comparative) : 89

Ⅲ.3.6. Influence des Types de Mortiers (Analyse Logique Comparative) : 90

Ⅲ.3.7. Influence de la Géométrie des Prismes ("Prisme 3" vs "Prisme 6") : 90

Ⅲ.3.8. Ratio Résistance en Cisaillement / Résistance en Compression : 90

Ⅲ.4 : corrélations des murets avec les prismes : 91

Ⅲ.5 : Calcul de la contrainte par l'Eurocode 6 92

Ⅲ.6 :La contrainte de compression expérimentale : 93

Ⅲ.7.Analyse Générale de la Relation entre les Résistances des Composants (Brique, Mortier) et de l'Assemblage Maçonné (Murets, Prismes) 95

Ⅲ.7.1. Influence de la Contrainte de Compression de la Brique (X) sur Z : 95

Ⅲ.7.2. Influence de la Contrainte de Compression du Mortier (Y) sur Z : 96

Ⅲ.7.3. Interaction entre la Brique (X) et le Mortier (Y) pour déterminer Z : 96

Ⅲ.7.4. Autres Facteurs influençant Z (non directement X ou Y) : 97

Ⅲ.7.5 :Conclusion 98

Conclusion Générale 100

REFERRENCES 101

Introduction Générale

Introduction Générale

La maçonnerie, matériau de construction séculaire et omniprésent dans le patrimoine bâti comme dans les édifices contemporains, demeure un sujet d'étude central en génie civil. Sa performance sous diverses sollicitations, et plus particulièrement sous chargement axial, est un facteur déterminant pour la stabilité et la pérennité des ouvrages. Une compréhension approfondie du comportement mécanique de ses éléments constitutifs, notamment les prismes et les murets, s'avère donc indispensable pour garantir la sécurité et l'optimisation des structures en maçonnerie.

La réponse en compression de la maçonnerie de briques est un phénomène complexe, régi par une synergie de facteurs. Si l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux – briques et mortier – et la qualité de leur mise en œuvre sont bien établies, l'impact des paramètres géométriques constitue un champ d'investigation fondamental et continu. Ces paramètres ne se limitent pas aux caractéristiques unitaires des briques (dimensions, élancement, type de perforations) ou des joints de mortier (épaisseur, continuité), mais englobent de manière cruciale la géométrie de l'assemblage maçonné lui-même. L'élancement des éprouvettes, tel que la hauteur des prismes, ainsi que la taille, l'appareillage et l'épaisseur des murets, conditionnent en effet la distribution interne des contraintes, les modes de déformation et, in fine, les mécanismes de rupture.

L'étude de ces effets est traditionnellement menée par des essais sur des prismes – assemblages de taille réduite permettant de caractériser les propriétés mécaniques fondamentales – et sur des murets (ou "wallettes"), qui, par leur échelle et leur configuration, offrent une représentation plus fidèle du comportement des murs réels. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente thèse, intitulée "Effets géométriques sur la performance en compression de la maçonnerie en brique". L'objectif principal est d'investiguer expérimentalement l'influence de paramètres géométriques spécifiques – en particulier la hauteur des prismes (assemblages de trois et six briques) et la configuration des murets – sur le comportement mécanique et la résistance en compression de la maçonnerie. Un second objectif majeur est l'établissement d'une corrélation robuste et pertinente entre les performances observées sur ces différents types d'éprouvettes, en considérant une variété de matériaux.

Pour atteindre ces objectifs, une campagne expérimentale d'envergure a été menée, impliquant la confection et l'essai en compression d'éprouvettes utilisant trois types de briques et trois types de mortiers distincts. L'analyse comparative des résultats issus des essais sur prismes (trois et

six briques) et sur murets permettra d'évaluer l'effet de l'élancement, les effets d'échelle et l'influence de l'appareillage.

Ce mémoire s'articulera comme suit : un premier chapitre dressera un état de l'art sur le comportement de la maçonnerie en compression, les effets géométriques et les études de corrélation prisme-muret. Le deuxième chapitre détaillera la méthodologie expérimentale, incluant les matériaux, la préparation des éprouvettes et les protocoles d'essai. Les résultats obtenus pour les prismes et les murets seront ensuite présentés et analysés, en se concentrant sur la résistance, les modes de rupture et les courbes contrainte-déformation. Une discussion approfondie sur les corrélations et l'influence des paramètres géométriques suivra, avant qu'une conclusion générale ne synthétise les principales contributions de cette étude et n'esquisse des perspectives de recherches futures. Ce travail ambitionne ainsi d'enrichir la compréhension des facteurs géométriques régissant la performance de la maçonnerie en brique, d'affiner les méthodes d'évaluation de son comportement et de contribuer à l'amélioration des pratiques de dimensionnement.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

I .Introduction de la revue de littérature

La revue de littérature constitue une étape fondamentale dans l'étude du comportement mécanique des structures en maçonnerie soumises à un chargement axial. Elle permet de synthétiser les connaissances acquises à travers les recherches antérieures, d'identifier les méthodes expérimentales et numériques utilisées, ainsi que les principales conclusions relatives aux performances des éléments constitutifs tels que les prismes et les murets.

Les travaux existants mettent en lumière les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie non armée, en insistant notamment sur la résistance à la compression uniaxiale, le module d'élasticité, ainsi que les mécanismes de rupture observés lors des essais sur prismes et murets. Plusieurs études soulignent également les différences entre les résultats obtenus sur ces deux types d'éléments, dues aux effets d'échelle, à la qualité du mortier, et aux interactions entre unités de maçonnerie.

Par ailleurs, la revue de littérature aborde les normes de conception qui intègrent des relations empiriques pour estimer la résistance globale des murs à partir des essais sur prismes ou murets, tout en discutant leur degré de conservatisme et leurs limites. Elle examine aussi les approches de modélisation, allant des méthodes analytiques aux simulations numériques, qui visent à mieux prédire le comportement structural des ouvrages en maçonnerie sous chargement axial.

Ainsi, cette revue vise à fournir un cadre théorique et expérimental solide pour analyser la corrélation entre les performances des prismes et des murets, en vue d'améliorer la compréhension et la fiabilité des évaluations mécaniques des structures en maçonnerie.

I .2 Maçonnerie

Les éléments de maçonnerie en briques de production locale permettent de réaliser pour la construction de bâtiments civils et industriels une importante solution socioéconomique, environnementale et architecturale. La maçonnerie utilise différents types de composants dans leur fabrication, leur préparation, où leur agencement nécessite une certaine maitrise voire même une science bien étudiée.

I.2.1 Définition

La maçonnerie est un matériau composite constitué d'éléments solides (pierres, briques ou blocs) liés entre eux par un mortier. Elle est largement utilisée dans la construction en raison de sa simplicité, son faible coût et sa capacité à supporter des charges de gravité importantes. La maçonnerie traditionnelle, notamment celle à base de pierre calcaire et de mortier ciment-chaux, présente des caractéristiques mécaniques spécifiques, telles qu'une résistance à la compression élevée des pierres (par exemple autour de 77 à 100 MPa) et des propriétés variables du mortier (typiquement entre 3 et 8 MPa en compression)14.

Sous chargement axial, les éléments de maçonnerie (prismes, murets, murs) développent des contraintes complexes qui combinent compression, flexion et cisaillement. Les essais expérimentaux réalisés sur des prismes et des murets permettent de caractériser la résistance à la compression, la traction diagonale, ainsi que le module d'élasticité et de cisaillement de la maçonnerie14. Ces données sont essentielles pour comprendre les modes de rupture, qui peuvent inclure la fissuration des joints, le balancement des murs ou la rupture fragile des matériaux.

La maçonnerie présente toutefois une faible résistance en flexion et cisaillement, ce qui la rend vulnérable aux charges latérales, notamment sismiques. C'est pourquoi des recherches récentes s'attachent à mieux modéliser son comportement sous charges combinées, en intégrant des paramètres issus d'essais sur prismes et murets, et en développant des modèles numériques calibrés sur ces données expérimentales35. Ces études visent à améliorer la conception, le renforcement et la réhabilitation des structures en maçonnerie, particulièrement dans les zones sismiques.

I.2.2. Domaine d'application

La maçonnerie trouve son domaine d'application principalement dans la construction de bâtiments et d'ouvrages divers, où elle assure des fonctions essentielles telles que la stabilité mécanique, la sécurité, l'étanchéité et le confort hygrothermique et acoustique. Elle est utilisée aussi bien dans le gros œuvre, pour les éléments porteurs comme les murs, fondations et soubassements, que dans certains ouvrages de second œuvre.

Plus précisément, la maçonnerie est employée dans :

- Les constructions résidentielles (maisons, immeubles) et industrielles (usines, entrepôts).
- Les murs porteurs assurant la transmission des charges vers les fondations.
- Les murs de remplissage dans les structures à ossature.
- Les ouvrages exposés à des sollicitations variées, incluant les charges statiques, thermiques, climatiques, ainsi que les sollicitations exceptionnelles comme le feu ou les séismes.

Les maçonneries de petits éléments (briques, pierres, blocs) sont régies par des normes spécifiques (par exemple NF DTU 20.1) qui encadrent leur mise en œuvre et leurs performances. Elles doivent garantir la stabilité, la sécurité incendie, l'étanchéité à la pluie, ainsi que contribuer aux exigences hygrothermiques et acoustiques des bâtiments.

Ainsi, le domaine d'application de la maçonnerie est très vaste, allant des murs porteurs traditionnels aux ouvrages de remplissage, en passant par des fonctions structurelles et de protection, dans des constructions variées allant du bâtiment résidentiel aux infrastructures industrielles ou urbaines381.

I.3 Les différents types de maçonnerie :

I.3.1 Introduction :

La maçonnerie regroupe un ensemble de techniques de construction utilisant des éléments assemblés, généralement avec du mortier, pour édifier des structures porteuses ou non

porteuses. Ces éléments peuvent être de nature diverse : briques, pierres, blocs de béton, ou matériaux composites. Chaque type de maçonnerie présente des caractéristiques mécaniques, esthétiques et fonctionnelles spécifiques, adaptées à des usages variés dans le bâtiment et les ouvrages d'infrastructure.

La diversité des matériaux et des procédés de mise en œuvre permet d'adapter la maçonnerie aux exigences architecturales, aux contraintes environnementales et aux performances recherchées, telles que la résistance mécanique, l'isolation thermique ou la durabilité. Ainsi, la connaissance des différents types de maçonnerie est essentielle pour choisir la solution la plus appropriée à chaque projet de construction, de rénovation ou d'aménagement.

Cette section présente une synthèse des principaux types de maçonnerie couramment utilisés, en mettant en lumière leurs matériaux constitutifs, leurs domaines d'application et leurs avantages respectifs.

I.3.2. Maçonnerie de pierre naturelles :

La maçonnerie de pierres naturelles utilise des éléments issus directement de roches extraites de carrières, façonnés ou taillés pour la construction. Ces pierres se distinguent par leur grande durabilité, leur résistance mécanique élevée, ainsi que leurs qualités esthétiques variées dues à la diversité des couleurs, textures et finitions possibles.

Les pierres naturelles se classent en trois grandes catégories géologiques :

- **Roches magmatiques** (ex. granite, basalte) formées par refroidissement du magma, reconnues pour leur grande dureté et résistance à la compression.
- **Roches sédimentaires** (ex. calcaire, grès, travertin) issues de dépôts sédimentaires, souvent plus tendres mais offrant une bonne maniabilité et une esthétique variée.
- **Roches métamorphiques** (ex. marbre, schiste, gneiss) résultant de la transformation de roches préexistantes sous pression et température, combinant résistance et apparence décorative.

Les caractéristiques mécaniques de la pierre naturelle sont remarquables : elles peuvent atteindre des résistances à la compression proches de 300 MPa et des résistances à la flexion

supérieures à 20 MPa. De plus, la pierre naturelle est incombustible, offre une bonne inertie thermique, une isolation acoustique efficace et une régulation hygrothermique favorable au confort intérieur.

Sur le plan environnemental, la pierre naturelle est un matériau durable, nécessitant peu d'entretien et ayant une faible empreinte carbone liée à sa production. Sa masse thermique élevée contribue à réguler le climat intérieur des bâtiments, réduisant ainsi les besoins énergétiques. Elle est également recyclable et réutilisable, ce qui en fait un choix privilégié dans une démarche de construction durable.

En maçonnerie, la pierre naturelle est utilisée pour la construction de murs porteurs, de façades, d'éléments décoratifs, ainsi que dans la voirie et le mobilier urbain. Les normes de mise en œuvre, telles que la NF DTU 20.1, précisent les prescriptions relatives aux dimensions des joints, à la qualité du mortier et aux contraintes spécifiques en zone sismique.

Ainsi, la maçonnerie en pierre naturelle allie performance mécanique, durabilité et esthétique, ce qui en fait un matériau de choix pour des constructions solides et pérennes13456.



Figure 1.1pierre naturelles [1].



Figure 1.2 mur en pierre naturelles [1].



Figure 1.3 maçonnerie en pierre naturelles [1].

I .3.2.1M Moellons :

Un **moellon** est une pierre à bâtir, généralement en calcaire relativement tendre, taillée partiellement ou totalement, dont les dimensions et la masse permettent une manipulation aisée par une seule personne1. Il provient souvent des bancs de pierre extraits des carrières, notamment ceux peu épais, et est utilisé dans la maçonnerie soit en blocage à l'intérieur des murs, soit en parement lorsqu'il est correctement taillé1.

Les moellons ne sont pas parfaitement dressés ni taillés sur toutes leurs faces : ils peuvent être irréguliers, bruts, dégrossis (piqués ou smillés) ou épincés, selon le degré de

finition souhaité pour l'assemblage et l'esthétique1. Ils forment ce qu'on appelle le « petit appareil », en opposition à la pierre de taille qui constitue le « grand appareil » avec des pierres plus grandes et posées à joint vif1.

La maçonnerie en moellons est généralement liée par un mortier de terre, de chaux ou de ciment, et peut être homogène (moellons seuls) ou mixte (associée à des pierres de taille pour les angles, encadrements, etc.)1. La mise en œuvre demande un bon mortier et un enchevêtrement soigné pour assurer la cohésion et la stabilité de la structure1.

Historiquement, les Romains utilisaient des moellons dans leurs massifs de maçonnerie, désignés sous le terme *cæmenta*, formant des appareillages comme l'opus incertum ou l'opus reticulatum1.

En résumé

le moellon est une pierre de construction polyvalente, maniable et économique, utilisée depuis l'Antiquité dans des maçonneries variées, du blocage intérieur aux parements extérieurs, avec des finitions adaptées aux exigences architecturales et structurelles.

► I .3.2.2Jointoiement :

Le **jointoiement** en maçonnerie désigne l'action de remplir et de lisser les joints, c'est-à-dire les espaces entre les éléments de construction (pierres, briques, moellons, blocs) avec du mortier ou un matériau similaire123. Cette opération peut être réalisée au fur et à mesure de la construction ou a posteriori, notamment lors de travaux de rénovation, pour assurer la cohésion, la stabilité et l'étanchéité du mur145.

Le jointoiement joue un rôle essentiel non seulement sur la solidité mécanique de l'ouvrage, en assurant la liaison entre les éléments, mais aussi sur son aspect esthétique et sa protection contre les infiltrations d'eau et les agressions extérieures17. Les joints peuvent être réalisés en creux, en saillie ou affleurants, selon l'effet recherché et la technique employée18.

En rénovation, le rejointoiement consiste souvent à dégarnir les anciens joints abîmés, à nettoyer les surfaces, puis à recharger les joints avec un mortier adapté, garantissant ainsi la durabilité et la continuité de la maçonnerie45.

Ainsi, le jointoiement est une étape clé dans la construction et la maintenance des ouvrages en maçonnerie, influençant à la fois la performance structurelle, l'étanchéité et l'esthétique des murs.

► I .3.2.3:Epaisseur des murts :

Épaisseur des murs en maçonnerie

L'épaisseur des murs en maçonnerie varie selon leur fonction, le type de matériau utilisé et les exigences réglementaires ou structurelles.

- **Murs porteurs** :
    - Les murs de façade ou murs mitoyens ont généralement une épaisseur minimale d'environ **20 cm**.
    - Les murs de refend (murs porteurs intérieurs) ont souvent une épaisseur d'environ **15 cm**.
    - En sous-sol, les murs porteurs doivent être plus épais, typiquement au moins **29 cm** pour assurer la stabilité et la résistance aux charges importantes14.
- **Murs non porteurs** :
    - Leur épaisseur ne doit pas être inférieure à **9 cm** pour assurer une bonne tenue et isolation4.
- **Murs en briques** :
    - L'épaisseur est souvent exprimée en fonction de la longueur d'une brique.
    - Un mur d'une demi-brique a une épaisseur égale à la moitié de la longueur d'une brique, un mur d'une brique entière correspond à la longueur d'une brique, et un mur de briques et demie à une brique plus une demi.

- En pratique, la plupart des murs en briques ont une épaisseur comprise entre une et trois briques, soit environ 10 à 30 cm environ selon le format des briques utilisées56.

- **Murs de fondation** :

  - Pour un mur de fondation en béton plein ou en blocs de béton non armé, une épaisseur de **20 cm** est couramment requise pour des hauteurs jusqu'à 3 mètres, avec des prescriptions spécifiques selon le support latéral et les charges2.

Ces épaisseurs sont à adapter selon les contraintes spécifiques du projet, notamment les charges à supporter, les exigences d'isolation thermique et acoustique, ainsi que les réglementations locales en vigueur.

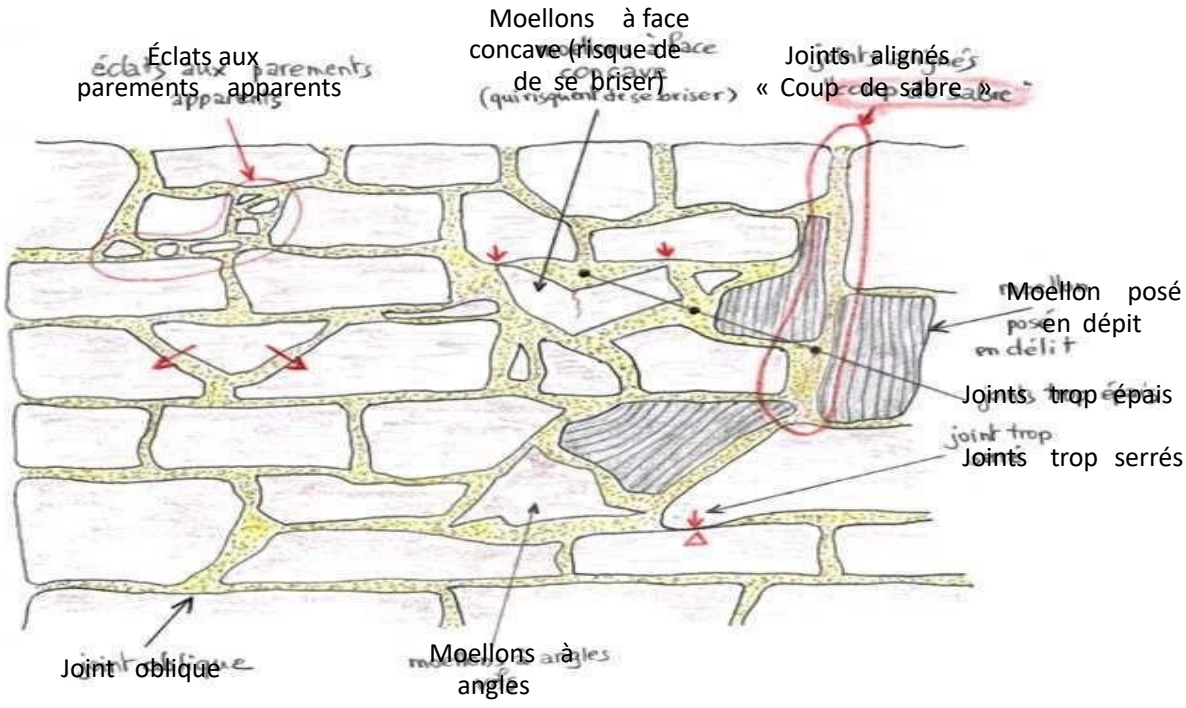


Figure 1.4 mur en pierre naturelle [1].

I .3.3 Maçonnerie en agglomérés de béton

La maçonnerie en agglomérés de béton, couramment appelée maçonnerie en blocs béton, parpaings ou agglo, est l'un des types de maçonnerie les plus répandus dans la construction moderne. Ces blocs sont fabriqués à partir d'un mélange de granulats (sable, graviers), de ciment et d'eau, moulés en forme de parallélépipèdes creux ou pleins. Leur fabrication locale et leur prix compétitif en font un matériau accessible et largement utilisé pour les bâtiments résidentiels, tertiaires et industriels147.

I .3.3.1 :Caractéristiques principales

- **Composition** : environ 85 à 86 % de granulats, 6 à 7 % de ciment, et le reste en eau57.
- **Forme et dimensions** : blocs généralement creux pour réduire le poids et améliorer les performances thermiques, mais aussi disponibles en version pleine selon les besoins.
- **Résistance** : les blocs béton offrent une bonne résistance mécanique, supportant efficacement les charges structurelles, les poussées de terre et les sollicitations climatiques. Ils résistent également bien au feu et aux variations de température14.
- **Inertie thermique** : grâce à leur masse, les blocs béton possèdent une forte inertie thermique, ce qui contribue à la régulation thermique des bâtiments5.

I .3.3.2 :Avantages et limites

- **Avantages** :
    - Facilité et rapidité de mise en œuvre grâce à leur forme régulière et leur taille standardisée.
    - Coût économique et disponibilité locale.
    - Bonne performance mécanique et résistance au feu.
    - Matériau recyclable et à faible consommation énergétique lors de la fabrication (moulé à froid).
- **Limites** :

- Sensibilité à l'humidité, notamment par capillarité en contact avec le sol, nécessitant des systèmes de drainage ou d'étanchéité pour les soubassements1.

- Isolation thermique intrinsèque limitée, souvent complétée par un isolant intérieur ou extérieur.

I .3.3.3 : Mise en œuvre

Les blocs sont assemblés par rangs successifs, liés par une fine couche de mortier (1 à 1,5 cm d'épaisseur), conformément aux règles du DTU 20.1. Ils peuvent être utilisés seuls ou associés à des enduits, bardages ou parements pour améliorer l'esthétique et la performance thermique des murs468.

En résumé, la maçonnerie en agglomérés de béton constitue une solution robuste, économique et polyvalente, adaptée à une large gamme de constructions, tout en nécessitant des précautions particulières pour la protection contre l'humidité et l'amélioration de l'isolation thermique.

I .3.3.4 : Les blocs pleins : ce sont des blocs de béton massifs sans cavités internes. Ils sont souvent utilisés pour les murs porteurs, les fondations et les murs de soutènement.



Figure 1.5 bloc plein de béton.

I .3.3.5 :Les blocs creux :

ce sont des blocs de béton avec des cavités internes qui peuvent être remplies de mortier ou de béton. Ces blocs offrent une excellente isolation thermique et acoustique et sont souvent utilisés pour les murs intérieurs et extérieurs.



Figure 1.6 bloc de béton creux.

I .3.3.6 : Les blocs à nervures :

ce sont des blocs de béton creux avec des nervures internes qui offrent une résistance structurelle supplémentaire. Ils sont souvent utilisés pour les murs de soutènement, les murs porteurs et les fondations.

I .3.3.7 :Caractéristiques principales

- **Structure** : Les blocs à nervures possèdent deux faces parallèles reliées par plusieurs nervures verticales, créant des ouvertures continues en haut et en bas pour le passage des armatures et du béton.

- **Fonction** : Ils servent de coffrage permanent, simplifiant la mise en œuvre des murs en béton armé, en évitant l'utilisation de coffrages traditionnels amovibles.

- **Dimensions** : La largeur minimale des blocs est généralement de 20 cm, avec un noyau béton d'au moins 15 cm pour assurer la résistance structurelle, notamment en zone sismique.

I .3.3.8 :Avantages

- **Facilité de pose** : Leur conception permet une pose rapide et une intégration aisée des armatures verticales et horizontales.

- **Performance structurelle** : Le béton coulé dans les cavités, associé aux armatures, confère au mur une grande résistance aux efforts mécaniques, notamment en compression axiale et en flexion.

- **Polyvalence** : Adaptés à divers types de constructions, ils sont particulièrement utilisés dans les zones sismiques où la résistance et la ductilité des murs sont cruciales.

- **Économie de temps et de matériaux** : En jouant le rôle de coffrage, ils réduisent les coûts liés au coffrage traditionnel et optimisent la consommation de béton et d'acier.

I .3.3.9 :Applications

Les blocs à nervures sont largement employés dans la construction de murs porteurs, de murs de soutènement, et dans les ouvrages nécessitant une bonne résistance structurelle et une rapidité d'exécution. Leur utilisation est recommandée dans les zones à risque sismique et dans les bâtiments soumis à des charges importantes.

En résumé, les blocs à nervures constituent une solution technique efficace pour la réalisation de murs en béton armé, combinant simplicité de mise en œuvre, performance mécanique et adaptabilité aux exigences modernes de construction.

Tableau 1.1 les déférents types de parpaing.

Types de parpaings	caractéristiques	Utilisations
Bloc pleins	Bloc de béton massifs sans cavités internes.	Murs porteurs, fondations, murs de soutènement
Bloc creux	Bloc de béton avec des cavités internes pouvant etre remplies de mortier ou de béton.	Murs intérieurs et extérieurs
Bloc a nervures	Bloc de béton creux avec des nervures internes pour offrir une resistance structurelle supplémentaire.	Murs de soutènement, murs porteurs, fondations
Bloc cellulaire	Bloc de béton legérs avec des cavités internes remplies d'air pour offrir une excellente isolation thermiques et acoustique	Murs intérieurs et extérieurs
Bloc isolant	Bloc de béton avec couches d'isolant thermiques intégres	Murs extérieurs pour offrir une meilleure isolation thermique

I.3.4.1 Maçonnerie en briques d'argile cuite :

La maçonnerie en briques d'argile cuite utilise des éléments fabriqués à partir d'un mélange d'argile et de sable, moulé puis cuit à des températures élevées, généralement comprises entre 850 et 1200 °C18. Ce procédé confère aux briques une grande durabilité, une résistance mécanique adaptée et une bonne inertie thermique.

I.3.4.1.1 : Caractéristiques principales

- **Composition et fabrication** : La brique est composée principalement d'argile ferrugineuse, de silice et d'alumine, qui après cuisson en atmosphère oxydante ou réductrice, prennent une couleur rouge, jaune ou brune selon la nature de l'argile et les conditions de cuisson138.

- **Formes et types** : On distingue plusieurs types de briques en terre cuite :

    - **Briques pleines**, denses et robustes, idéales pour les murs porteurs, offrant une bonne isolation thermique et acoustique457.

    - **Briques creuses** ou perforées, plus légères, facilitant le passage des réseaux et améliorant l'isolation4.

    - **Briques alvéolées** ou micro-poreuses, utilisées pour leurs performances thermiques spécifiques2.

I.3.4.1.2 : Propriétés mécaniques et thermiques

- La résistance à la compression des briques pleines varie généralement entre 8 et 40 MPa, tandis que les briques alvéolées présentent des résistances plus faibles, de 2 à 10 MPa selon leur densité et structure2.

- La brique en terre cuite possède une capacité de rétention et de diffusion thermique qui contribue à améliorer le confort intérieur et à réduire les besoins énergétiques du bâtiment57.

- Le matériau est ininflammable, durable et nécessite peu d'entretien, ce qui en fait un choix fiable pour la construction57.

I.3.4.1.3 : Enjeux environnementaux

- La fabrication de la brique est énergivore, notamment lors de la cuisson, avec une consommation d'énergie grise importante (environ 450 à 700 kW·h/m³ selon le type de brique)2.

- Cependant, la durabilité, la recyclabilité et la performance thermique compensent en partie cet impact, faisant de la brique d'argile un matériau respectueux de l'environnement sur le long terme2.

I.3.4.1.4 : En résumé

la maçonnerie en briques d'argile cuite est un procédé traditionnel et éprouvé, combinant solidité, isolation et esthétique, adapté à de nombreuses applications dans la construction contemporaine comme dans la rénovation.

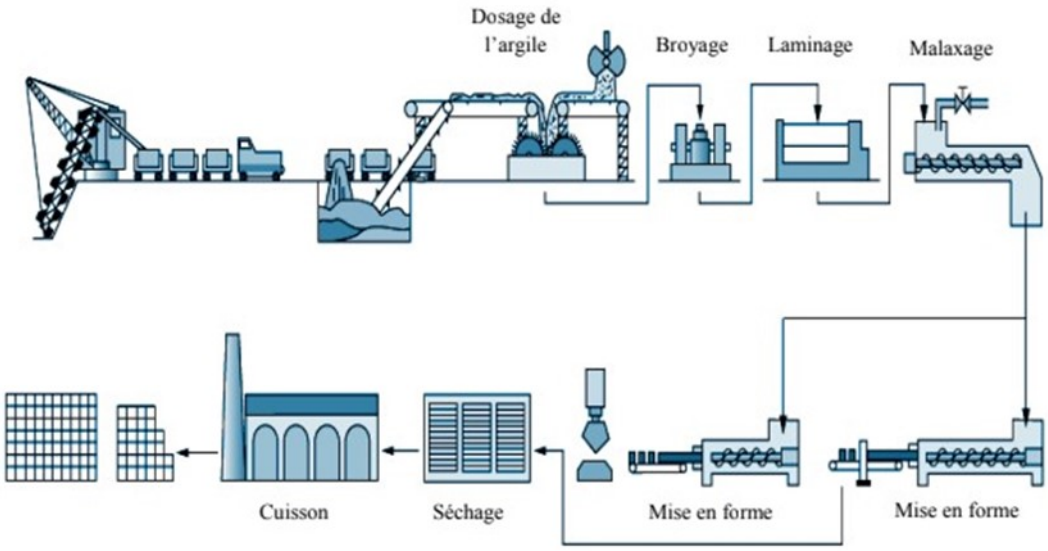


Figure 1.7 : processus de fabrication des briques en terre cuite creuses [12].

Il existe 3 types de briques :

► Briques pleines.

► Briques perforées.

► Briques creuses.

I.3.4.2. Briques pleines

- **Description** : Briques massives, sans perforations ni alvéoles.
- **Caractéristiques** :
    - Forte densité et bonne résistance mécanique (généralement entre 15 et 40 MPa).

- Bonne inertie thermique.
- Utilisées principalement pour les murs porteurs et les éléments soumis à des charges importantes.

- **Avantages** : Grande durabilité, excellente résistance aux chocs et à l'usure.
- **Inconvénients** : Plus lourdes, moins isolantes thermiquement que les briques creuses ou perforées.

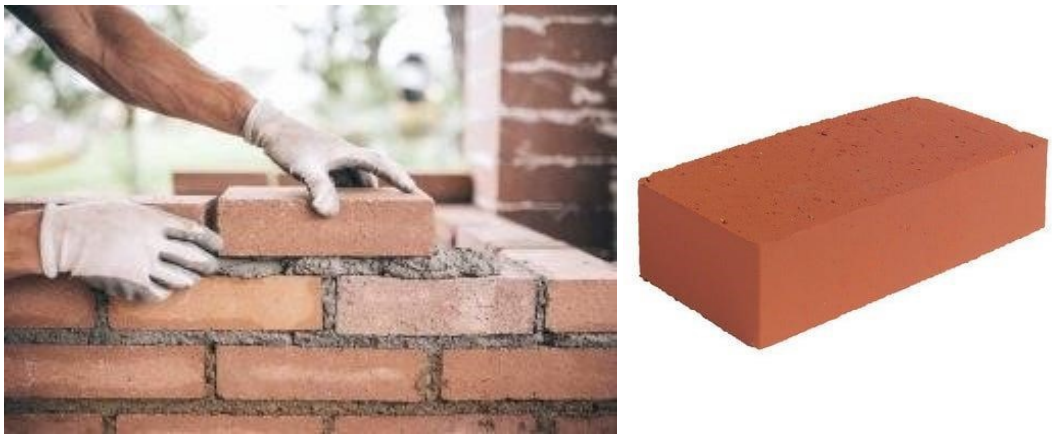


Figure 1.8 briques pleines

I.3.4.3. Briques perforées

- **Description** : Briques traversées par des perforations verticales, généralement régulières et alignées.
- **Caractéristiques** :
  - Réduction du poids par rapport aux briques pleines.
  - Amélioration de l'isolation thermique grâce à la présence d'air dans les perforations.
  - Résistance mécanique modérée, adaptée aux murs non porteurs ou semi-porteurs.
- **Avantages** : Plus légères, facilité de manipulation, meilleure isolation thermique.

- **Inconvénients** : Résistance mécanique inférieure aux briques pleines, moins adaptées aux charges lourdes.

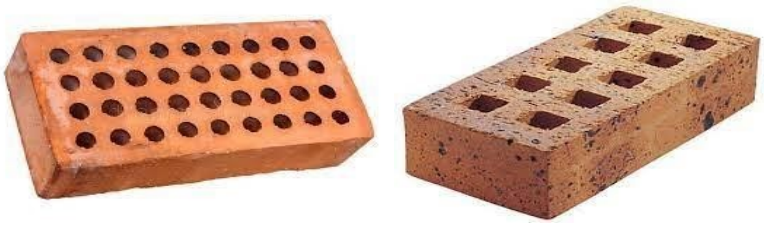


Figure 1.9 briques perforées **.**

I.3.4.4. Briques creuses

- **Description** : Briques comportant des alvéoles plus larges et souvent irrégulières, parfois en forme de cellules.
- **Caractéristiques** :
    - Très légères, avec une excellente isolation thermique et phonique.
    - Résistance mécanique plus faible, adaptées principalement aux cloisons et murs non porteurs.
- **Avantages** : Très bonnes performances thermiques, réduction du poids des murs.
- **Inconvénients** : Moins résistantes mécaniquement, nécessitent souvent un doublage ou renfort pour les applications structurelles.

Ces trois types de briques offrent un large éventail de solutions adaptées aux exigences spécifiques des projets de construction, conciliant résistance, isolation, poids et coût.



Figure 1.10 Briques creuses .

I.4 : LES MORTIERS :

Le mortier est un matériau composite obtenu par le mélange homogène d'un liant, d'un matériau inerte (généralement du sable) et d'eau, parfois complété par des adjuvants. Il est utilisé en maçonnerie principalement comme élément de liaison entre les unités (pierres, briques, moellons, blocs), assurant la cohésion de l'ensemble et la transmission des charges[128].

1.4.1 :Composition

- **Liants** : ciment Portland, chaux (hydraulique ou aérienne), ou un mélange des deux (mortiers bâtards). Le choix du liant dépend de la nature de l'ouvrage et de son environnement[238].

- **Agrégats** : sable siliceux ou silico-calcaire, dont la granulométrie influence la résistance et la maniabilité du mortier[26].

- **Eau** : nécessaire pour l'hydratation du liant et la mise en pâte du mélange[6].

- **Adjuvants** : plastifiants, réducteurs d'eau, hydrofuges, retardateurs ou accélérateurs de prise, utilisés pour améliorer certaines propriétés spécifiques du mortier[26].

1.4.2 :Fonctions principales

- Assurer la liaison entre les éléments de maçonnerie, formant un ensemble monolithique capable de transmettre les charges mécaniques18.
- Remplir et sceller les joints, garantissant l'étanchéité à l'eau et à l'air, ainsi que la durabilité de la structure158.
- Permettre une répartition homogène des contraintes malgré les irrégularités des surfaces des éléments maçonnés4.
- Offrir une certaine perméabilité à la vapeur d'eau pour éviter les phénomènes de condensation et préserver la durabilité des matériaux4.
- Constituer un composant sacrificiel qui peut céder préférentiellement en cas de surcharge, protégeant ainsi les éléments porteurs4.

1.4.3 :Types de mortiers

- **Mortiers de chaux** : souples, perméables à la vapeur, résistants à la traction, adaptés aux assemblages traditionnels et aux enduits3.
- **Mortiers de ciment** : résistants à la compression, durcissement rapide, utilisés dans les constructions classiques nécessitant une forte résistance mécanique8.
- **Mortiers bâtards** : mélange de ciment et de chaux, combinant la résistance du ciment et la plasticité de la chaux, adaptés au montage et à l'enduisage23.
- **Mortiers spécifiques** : hydrofuges (résistants à l'eau), réfractaires (résistants aux hautes températures), ou à joints minces pour des finitions esthétiques58.

1.4.3.1 : En résumé

le mortier est un élément indispensable en maçonnerie, jouant un rôle clé dans la solidité, l'étanchéité et la durabilité des ouvrages, avec des formulations adaptées selon les exigences techniques et environnementales du projet.

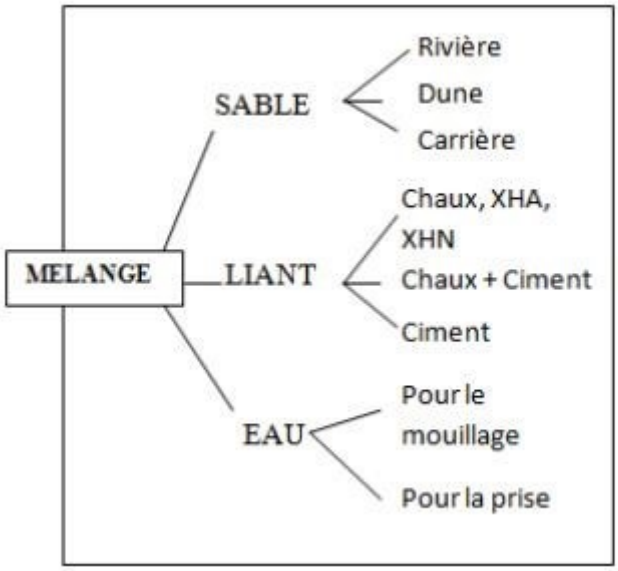


Figure 1.11 constituants d'un mortier (CHERIF ET KARA ,2013).

1.4.4 Les classes de mortier

Les mortiers sont classés en différentes catégories selon leurs propriétés mécaniques, leur composition et leur usage, permettant de choisir le type adapté aux contraintes spécifiques du chantier.

Classification selon la résistance et l'usage

- **Mortiers de réparation (norme UNE-EN 1504-3)** :

  Ces mortiers sont classés en quatre classes principales :

  - **Classe R1** : résistance faible, pour réparations non structurelles.
  - **Classe R2** : résistance modérée, pour réparations non structurelles ou peu sollicitées.
  - **Classe R3** : résistance moyenne à élevée, module d'élasticité moyen, adaptés à la réparation de bétons anciens ou de résistance moyenne à élevée. Résistance à la compression supérieure à 25 MPa et adhérence minimale de 1,5 N/mm².

- **Classe R4** : résistance élevée, module d'élasticité important, conçus pour la réparation de structures en béton modernes ou très résistantes.

- **Mortiers de maçonnerie selon DIN 1053** :

  - **Mortier léger (LM)** : améliore l'isolation thermique, avec des groupes LM21 et LM36 selon la conductivité thermique.

  - **Mortier standard (NM)** : masse volumique sèche ≥ 1500 kg/m³, classé selon la résistance croissante.

  - **Mortier en couche mince (DM)** : utilisé pour briques ou pierres planes avec légères variations dimensionnelles.

- **Classification américaine (types M, S, N, O)** :

  - Type M : haute résistance, usage structurel.

  - Type S : résistance élevée, usage structurel.

  - Type N : résistance moyenne, usage général extérieur/intérieur.

  - Type O : faible résistance, utilisé pour la restauration et matériaux fragiles.

Autres classifications

- **Mortiers bâtards** : mélange de ciment et chaux, offrant un compromis entre résistance et souplesse.

- **Mortiers hydrauliques et aériens** : selon le type de liant (ciment, chaux hydraulique ou chaux grasse), influençant la prise et la durabilité.

Résumé

La classification des mortiers permet d'adapter le choix du matériau aux exigences mécaniques, environnementales et fonctionnelles du projet, qu'il s'agisse de construction neuve, de réparation ou de restauration. Chaque classe garantit des performances minimales en termes de résistance, d'adhérence, d'élasticité et de durabilité.

1.4.4.1 : Épaisseur des joints de mortier

L'épaisseur des joints de mortier en maçonnerie varie selon le type de mortier, les matériaux utilisés, les normes en vigueur et les exigences esthétiques ou techniques.

1.4.5. Épaisseur des joints de mortier :

- **Joints traditionnels** : l'épaisseur standard recommandée est généralement de **10 à 12 mm** pour les mortiers classiques (sable-ciment ou chaux)178. Cette épaisseur permet de compenser les irrégularités dimensionnelles des éléments maçonnés et d'assurer une bonne adhérence.

- **Joints minces** : utilisés avec des mortiers spéciaux ou des mortiers-colle, l'épaisseur des joints peut être réduite entre **3 et 6 mm**37. Ces joints nécessitent des matériaux parfaitement calibrés et une mise en œuvre rigoureuse pour garantir la stabilité et l'esthétique.

- **Joints très fins** : dans certains cas, notamment pour des briques ou blocs très réguliers, les joints peuvent être réduits à environ **3 mm** ou moins, souvent réalisés avec des mortiers-colle7.

Normes et recommandations

- Selon l'Eurocode 6 (partie 1-1), les épaisseurs des joints sont classées par type de mortier :
    - Mortier d'usage courant (G) et mortier allégé (L) : **6 à 15 mm**
    - Mortier de joints minces (T) : **0,5 à 3 mm**3.
- La NF DTU 20.1 précise que l'épaisseur du joint durci est comprise entre **10 et 20 mm**, avec une valeur courante autour de 10 mm pour les maçonneries traditionnelles8.

Autres considérations

- En restauration, l'ancien mortier doit être retiré sur une profondeur minimale d'environ **20 mm** pour garantir un bon ancrage du nouveau mortier2.

- La largeur des joints peut aussi être adaptée en fonction des tolérances dimensionnelles des matériaux : des briques anciennes ou irrégulières nécessitent des joints plus larges (jusqu'à 12 mm ou plus) pour compenser les variations[5][6].

- Les conditions climatiques et environnementales influencent également le choix de l'épaisseur des joints, notamment pour absorber les mouvements thermiques et assurer la durabilité[5].

Tableau1.2 : Types de joints de maçonnerie, épaisseurs typiques et caractéristiques principales

Type de joint	Épaisseur typique (mm)	Caractéristiques principales
Joint traditionnel	**10 – 12**	**Adapté aux matériaux classiques, compense les irrégularités**
Joint mince	**3 – 6**	**Nécessite matériaux calibrés, finition soignée**
Joint très mince (colle)	**0,5 – 3**	**Pour briques/blocs très réguliers, pose rigoureuse**

Résumé

L'épaisseur des joints doit être choisie en fonction des matériaux, des contraintes mécaniques, des exigences esthétiques et des conditions d'application pour garantir la solidité, la durabilité et l'apparence de la maçonnerie.

1.5. DEFAUTS DANS LA MAÇONNERIE :

1.5.1 : Défauts dans la maçonnerie

La maçonnerie, bien que robuste et durable, peut présenter divers défauts qui affectent sa performance, son esthétique et sa durabilité. Ces défauts résultent souvent d'erreurs de conception, de mise en œuvre, de choix des matériaux ou d'expositions environnementales. Voici les principaux défauts couramment rencontrés :

1.5.2 : Efflorescence

C'est un dépôt blanchâtre de sels minéraux qui apparaît à la surface des murs en maçonnerie, généralement sur les matériaux à base de chaux ou de ciment. L'efflorescence est due à la migration de l'eau soluble chargée en sels vers la surface, où l'eau s'évapore et laisse

les sels en dépôt. Ce phénomène est fréquent en période humide et peut être confondu avec de la moisissure13.

1.5.3. Ventre-de-bœuf

Ce terme désigne un gonflement localisé d'un mur de briques, causé par une infiltration d'eau, la corrosion des ancrages métalliques, la dégradation du mortier ou le déplacement du revêtement extérieur. Ce défaut fragilise la structure et peut entraîner un effondrement partiel si non traité rapidement134.

1.5.4. Fissures dans les murs

Les fissures sont parmi les défauts les plus visibles et préoccupants. Elles peuvent résulter de défauts structurels (mauvaise conception, tassements du sol), de mouvements thermiques, de retrait du mortier, ou d'une mauvaise exécution des travaux (joints mal réalisés, mortier inadéquat). Les fissures peuvent affecter la stabilité et l'étanchéité du mur1457.

1.5.5. Dégradation du mortier

Le mortier peut s'effriter, se détacher ou se désagréger avec le temps, notamment sous l'effet des intempéries, du gel/dégel, ou d'un mauvais dosage initial. Un mortier dégradé compromet la cohésion des éléments maçonnés et favorise les infiltrations d'eau14.

1.5.6. Joints mal réalisés

Les erreurs fréquentes incluent des joints de lit non remplis, des joints trop épais ou trop fins, ou un mauvais alignement des joints. Ces défauts affaiblissent la maçonnerie, réduisent sa résistance mécanique et peuvent entraîner des infiltrations d'eau ou des fissurations26.

1.5.7. Humidité et moisissures

L'humidité excessive dans les murs, due à des infiltrations, une mauvaise étanchéité ou des remontées capillaires, favorise l'apparition de moisissures, qui détériorent les matériaux et nuisent à la qualité de l'air intérieur135.

1.5.8. Défauts de conception et exécution

Défaut	Causes principales	Conséquences
Efflorescence	Migration d'eau chargée en sels	Taches blanches, dégradation esthétique
Ventre-de-bœuf	Infiltration d'eau, corrosion, dégradation du mortier	Gonflement, risque d'effondrement
Fissures	Défauts structurels, retrait, mauvaise exécution	Perte de stabilité, infiltration
Dégradation du mortier	Intempéries, mauvais dosage, vieillissement	Perte de cohésion, infiltration
Joints mal réalisés	Joints non remplis, épaisseur inappropriée	Faiblesse mécanique, infiltration
Humidité et moisissures	Infiltrations, remontées capillaires	Détérioration,problèmes sanitaires
Défauts de conception	Mauvais dimensionnement, absence de renfort	Fissures, effondrement
Matériaux défectueux	Qualité insuffisante, incompatibilité	Faiblesse, dégradation

Une mauvaise conception (dimensionnement inadéquat, absence de renforcement) ou une exécution défectueuse (mauvais mélange du mortier, pose incorrecte des éléments,

compactage insuffisant) sont à l'origine de nombreux défauts structurels, fissures et défaillances57.

1.5.9. Problèmes liés aux matériaux

L'utilisation de matériaux de mauvaise qualité, défectueux ou inadaptés peut entraîner des fissures, une faible résistance mécanique, ou une dégradation prématurée de la maçonnerie78.

Synthèse des défauts courants en maçonnerie

Tableau 1.3 : Principaux défauts de la maçonnerie, causes et conséquences

Ces défauts nécessitent une identification précise et une intervention adaptée, souvent réalisée par des professionnels, pour garantir la pérennité et la sécurité des ouvrages en maçonnerie.

a) Mouvement des dalles.

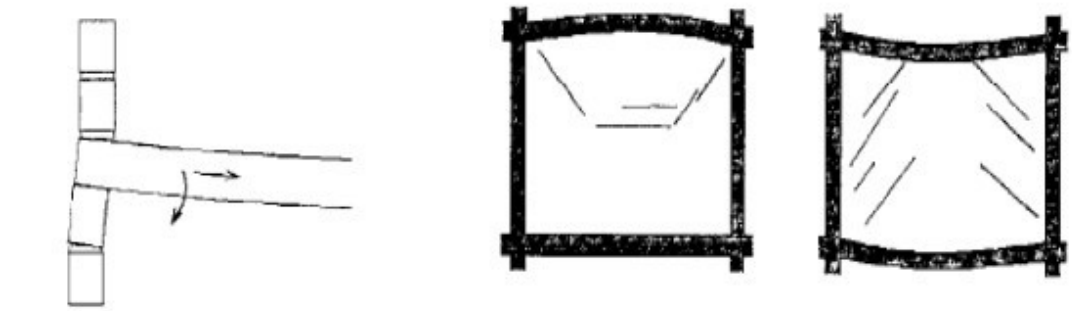


Figure 1.12 : Défauts causés par le Mouvement des dalles

b) Mouvements de dilatation thermique.

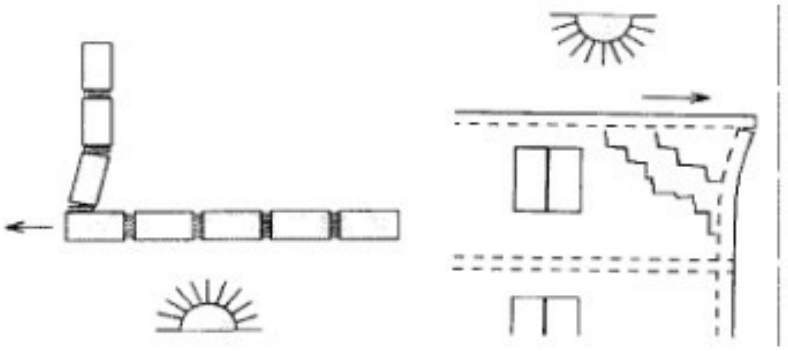


Figure 1.13 : Mouvements de dilatation thermique.

c) Fissure le long des fenêtres.

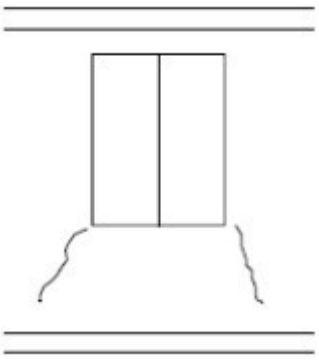


Figure 1.14: Fissure le long des fenêtres.

1.6. PATHOLOGIES DE LA MAÇONNERIE :

Les pathologies de la maçonnerie regroupent l'ensemble des désordres et dégradations qui affectent les ouvrages maçonnés, compromettant leur durabilité, leur stabilité et leur performance. Ces altérations résultent souvent de facteurs liés à l'environnement, aux matériaux, à la conception ou à la mise en œuvre.

1.6.1 :Principales pathologies courantes

- **Infiltrations d'eau et humidité**

  L'eau pénètre souvent par les toitures défaillantes ou par les joints de maçonnerie, provoquant des infiltrations dans les murs et planchers. L'humidité favorise la dégradation des matériaux, la corrosion des armatures, les remontées capillaires, et l'apparition de moisissures ou salpêtre1356.

- **Fissures etcraquelures**

  Elles peuvent être dues à des mouvements structurels (tassements différentiels du sol, dilatation thermique, retrait du mortier), à une mauvaise conception ou exécution, ou à des sollicitations mécaniques. Ces fissures compromettent la stabilité et facilitent les infiltrations d'eau4578.

- **Efflorescences**

  Apparition de dépôts blanchâtres de sels minéraux à la surface des murs, causés par la migration de sels dissous dans l'eau qui remonte par capillarité. Elles entraînent souvent le décollement des enduits et altèrent l'esthétique et la durabilité des façades4.

- **Décollement d'enduits et manque d'adhérence**

  Souvent lié à l'humidité, aux efflorescences ou à une mauvaise préparation des supports, ce phénomène fragilise la protection des murs et peut accélérer leur dégradation4.

- **Dégradation du mortier et joints mal réalisés**

  Le vieillissement, les intempéries, ou un mauvais dosage du mortier entraînent son effritement, réduisant la cohésion des éléments maçonnés et favorisant les infiltrations15.

- **Corrosion des armatures**

  Dans les maçonneries armées, l'humidité provoque la corrosion des armatures métalliques, entraînant des fissures et une perte de résistance mécanique8.

- **Déformations et mouvements différenciés**

  Les différences de dilatation thermique entre éléments, le retrait ou le fluage du béton ou de la maçonnerie provoquent des déformations, fissurations, voire des ruptures localisées, notamment dans les façades ou planchers8.

- **Problèmes liés aux fondations et au sol**

  Le tassement différentiel, le gonflement des argiles ou les mouvements du terrain induisent des contraintes qui peuvent provoquer des fissures, des déformations et une instabilité des murs58.

Synthèse des pathologies et leurs effets

Tableau 1.4 : Pathologies courantes en maçonnerie, causes principales et conséquences

Pathologie	**Causes principales**	**Conséquences**
Infiltrations d'eau	Toitures défaillantes, joints poreux	Humidité, moisissures, salpêtre
Fissures	Mouvements du sol, retrait, dilatation	Perte de stabilité, infiltration
Efflorescences	Migration de sels par capillarité	Décollement d'enduits, altération
Décollement d'enduits	Humidité, mauvaise adhérence	Protection réduite, dégradation
Dégradation du mortier	Vieillissement, mauvais dosage	Effritement, affaiblissement
Corrosion des armatures	Humidité, défaut d'étanchéité	Fissuration, perte de résistance

Pathologie	Causes principales	Conséquences
Déformations différentielles	Dilatation thermique, retrait, fluage	Fissures, ruptures localisées
Problèmes de fondations	Tassement, gonflement d'argiles	Fissures, déformations, instabilité

Ces pathologies nécessitent un diagnostic précis et des interventions adaptées, incluant parfois des réparations structurelles, des traitements d'étanchéité, ou des renforcements, afin de garantir la pérennité et la sécurité des ouvrages en maçonnerie.

1.6.2 :COMPORTEMENT MECANIQUE DES STRUCTURES EN MACONNERIE :

La maçonnerie est un matériau composite hétérogène constitué d'éléments (briques, pierres, blocs) liés par un mortier. Son comportement mécanique est complexe et dépend fortement des caractéristiques de ses constituants, en particulier des propriétés des joints de mortier qui constituent souvent le point faible de la structure.

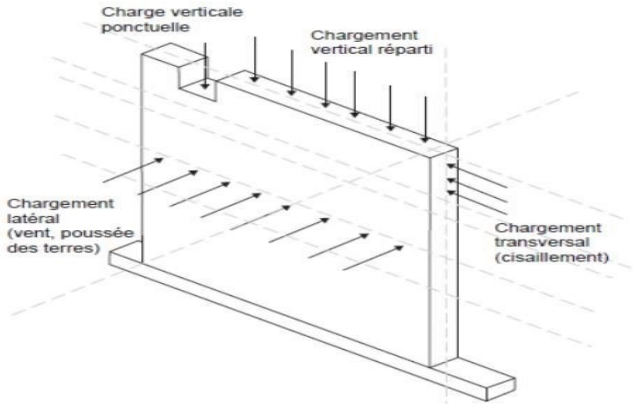


Figure 1.15 : types de chargement appliqués sur les murs (MARCEL et coll,2009).

1.6.2 .1 : Résistance et modes de rupture

- **Résistance en compression** : La maçonnerie présente une bonne résistance en compression, comparable à celle du béton ordinaire. Cette résistance dépend de la qualité des unités (briques, pierres) et du mortier utilisé.

- **Résistance au cisaillement** : Modérée à faible, la résistance au cisaillement est principalement gouvernée par la résistance des joints de mortier, notamment leur comportement en cisaillement. Le cisaillement peut provoquer des fissures horizontales dans les joints, conduisant à une rupture par glissement.

- **Résistance en traction** : Très faible, la maçonnerie est généralement considérée comme ayant une résistance à la traction proche de zéro. La traction provoque souvent des fissures diagonales ou verticales.

1.6.2 .2 : Modes de rupture typiques

- **Rupture par glissement** : Formation de fissures horizontales dans les joints de mortier sous sollicitations sismiques ou charges latérales, conduisant à un glissement des lits de mortier.

- **Rupture par basculement** : Sous charges horizontales croissantes, le mur bascule autour de sa base, avec rupture en traction des joints et compression du coin supérieur.

- **Rupture par compression du coin** : Compression excessive localisée dans les coins du mur, proche du mode de basculement.

- **Rupture par cisaillement diagonal** : Fissuration diagonale traversant les blocs ou suivant les joints, liée à la résistance relative des joints et des unités.

- **Rupture par traction diagonale** : Fissuration due à la traction diagonale dans les murs soumis à des charges latérales.

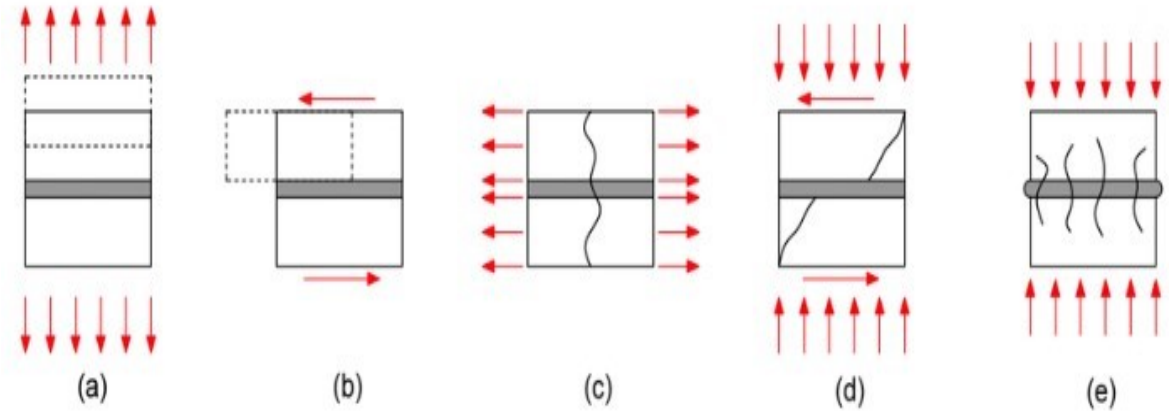


Figure 1.16 Mécanismes de rupture de la maçonnerie : (a) fissuration du joint en traction ; (b) glissement le long des joints horizontaux ou verticaux ; (c) fissuration des blocs en traction directe ; (d) fissuration en traction diagonale des blocs ; (e) écrasement de la maçonnerie.

1.6.2.3 : COMPORTEMENT DES MURS SOUMIS AUX CHARGES HORIZONTALES ET SOUS DES CHARGES LATERALES MONOTONES :

Quand un panneau en maçonnerie est sujet à des charges horizontales, telles que celles provenant des séismes et du vent, leur comportement est différent, selon qu'il s'agisse de murs isolés ou porteurs. Les derniers présentent un comportement plus ductile que les premiers ; mais ils présentent un réseau de fissuration similaire [2].

Les modes de rupture qui peuvent avoir lieu sont :

►Rupture par traction diagonale.

► Rupture par glissement.

► Rupture par flexion : la fissuration se produit dans des zones voisines de la base encastrée.

► Rupture mixte, caractérisée par l'apparition de fissures diagonales qui tantôt traversent les pièces, tantôt suivent la direction des joints.

► Ecrasement du matériau dans les zones en compression.

1.6.2.4 COMPORTEMENT DES MURS VIS-A-VIS DE LA CHARGE CONCENTREE :

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

Une maçonnerie peut résister à un chargement concentré si celle-ci est correctement positionnée et suit une répartition à 45° similaire à celle montrée en figure 2.3 [17].

Il n'y a aucune augmentation de contrainte pour les charges concentrées appliquées à l'extrémité d'un mur [14]. Les charges concentrées ont montré que le mode de rupture pour ce type de chargement se produit dans les fentes des blocs plutôt que par une rupture verticale [18].

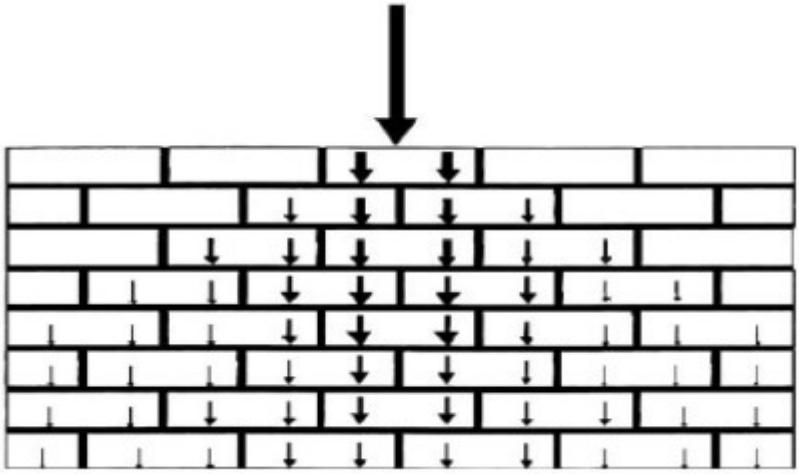


Figure 1.17 Propagation de la charge concentrée d'un mur (ASTME519-02, 2002).

1.6.2.5 COMPORTEMENT AU CISAILLEMENT DES MURS EN MAÇONNERIE :

L'évaluation de la résistance au cisaillement est requise pour les murs en maçonnerie soumis aux actions horizontales, tel que le séisme et le vent. Les actions horizontales sont généralement combinées avec les actions gravitaires du poids propre ou des surcharges normales aux joints de mortier [16].

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

► rupture par cisaillement : lorsque les fissures apparaissent le long du joint de mortier horizontal.

► rupture par tension diagonale : qui est généralement caractérisée par une fissuration par tension diagonale.

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

► L'intensité du chargement vertical.

► La résistance au cisaillement qui peut être assumée par les joints horizontaux.

► La résistance à la traction des briques.

La résistance à la compression de la maçonnerie.

1.6.2.6 COMPORTEMENT EN TRACTION DES MURS EN MAÇONNERIE :

La maçonnerie construite avec des mortiers traditionnels à une résistance très limitée face aux efforts de traction pure. La résistance à la traction est habituellement prise égale à zéro. Cette résistance peut être sensiblement améliorée par l'ajout d'adjuvants tels que les Polymères ou le Latex.

La résistance à la traction horizontale est très rarement mesurée et aucun essai standard n'est disponible d'où l'absence totale de données significatives. L'essai le plus familier est normalisé par ASTM C952-76 et illustré dans la figure 2.4. Les résultats de cet essai indiquent

que la résistance à la traction directe se situe entre un tiers et deux-tiers du moment de flexion [13].

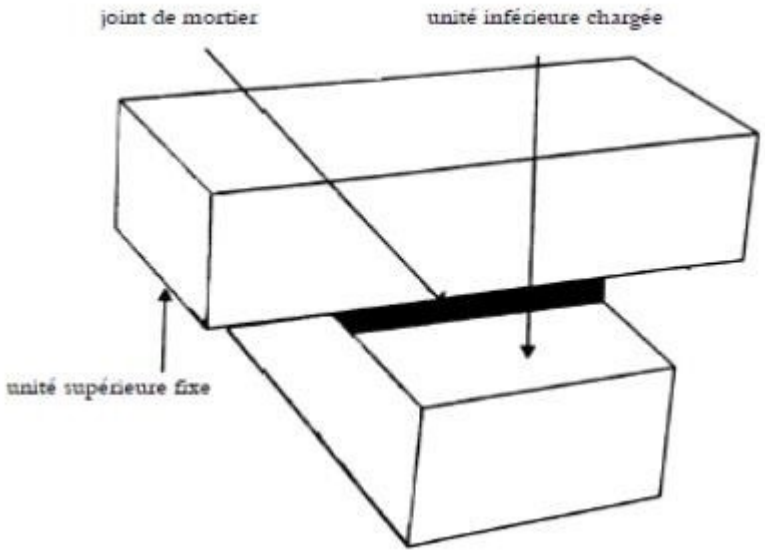


Figure 1.18 Essai de traction (HOUTI ,2002).

1.6.2.7 COMPORTEMENTS EN FLEXION DES MURS EN MACONNERIE :

Traditionnellement, la maçonnerie résiste grâce à sa grande inertie et sa masse souvent très

Importante. Ces structures ne dépendent pas en grande partie du lien du mortier aux éléments - support.

La maçonnerie construite ces dernières décennies a été, cependant, réalisée avec des murs minces dont la résistance aux efforts latéraux (exemple le vent) dépend principalement de l'adhérence du mortier. Ce dernier peut être amélioré par l'ajout d'adjuvants.

On distingue deux modes principaux de flexion dans les deux plans orthogonaux :

- Lorsque l'effort est appliqué au plan perpendiculaire aux joints de pose (figure 2.5).

• Lorsque l'effort est appliqué au plan parallèle aux joints de pose (figure 2.6).

Il est clair que la résistance est susceptible d'être hautement anisotropie, puisque la Résistance à l'effort au plan parallèle aux joints de pose est assurée par :

a) La résistance au cisaillement des mortiers de pose,

b) La résistance élastique des joints de mortier vertical face à la rotation des éléments,

c) L'adhérence des joints de mortier vertical,

d) La résistance à la flexion des éléments eux-mêmes.

La résistance limite de flexion sera la plus petite valeur de (a + b) ou (c + d) Plan de flexion latéral

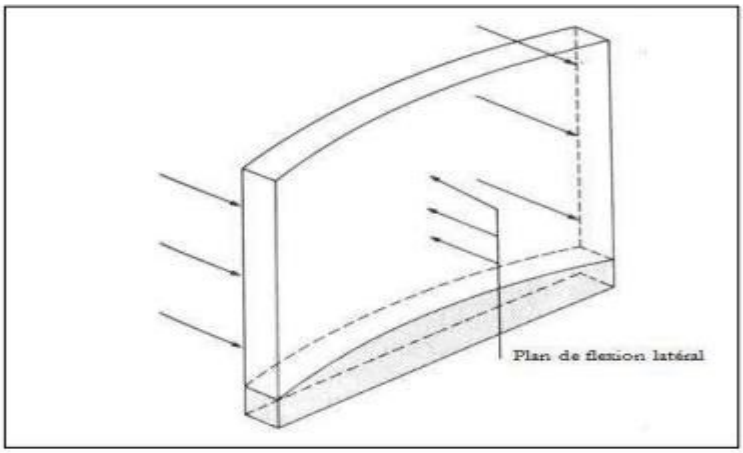


Figure 1.19 Flexion due aux efforts appliqués au plan perpendiculaire au joint de pose.

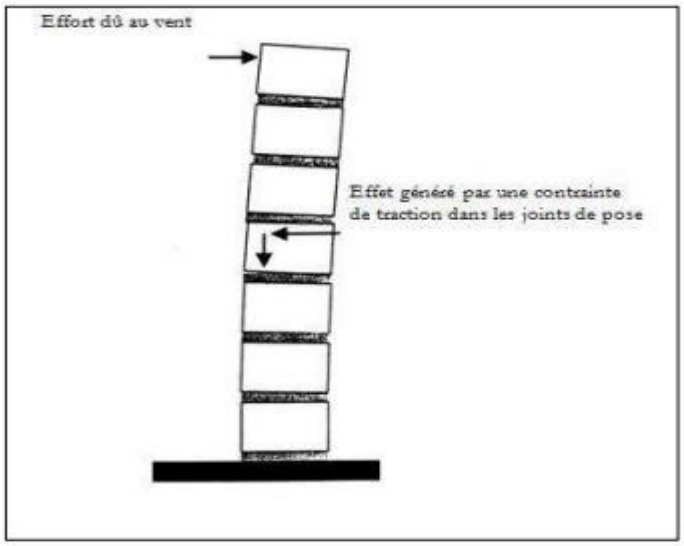


Figure 1.20 Flexion due aux efforts appliqués au plan parallèle au joint de pose.

1.6.3. Comportement sous charges horizontales et flexion

- Les murs porteurs présentent un comportement plus ductile que les murs isolés sous charges horizontales (vent, séisme), mais tous développent un réseau de fissures similaires.

- Sous charges concentrées, la maçonnerie répartit les efforts selon un angle d'environ 45°, avec rupture souvent localisée dans les fissures des blocs.

- Le comportement en flexion est lié à la résistance à la traction par flexion, généralement plus élevée que la traction directe. La flexion hors plan est plus fragile et difficile à modéliser.

1.6.3.1 Flexion uni-axiale :

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

Le comportement non linéaire de maçonneries sous traction directe a été étudié par Pluijm [19]. Il est noté que le comportement hors plan est considéré plus fragile que celui dans le plan, et donc plus difficile à caractériser expérimentalement ; mais aussi numériquement.

La stabilité des murets en maçonnerie de brique, chargés latéralement dépend de leur résistance à la traction par flexion. Cette résistance dépend des facteurs qui conditionnent l'adhésion brique mortier. Si un mur est appuyé horizontalement sur sa barre supérieure et inférieure, sa résistance Latérale dépend de la résistance à la traction par flexion développée à travers le joint. Si en plus, il est appuyé latéralement sa résistance latérale dépend aussi de sa résistance à la traction par flexion développée le long de la direction perpendiculaire au lit de joint (voir figure 2.7). Cette résistance est généralement trois fois plus grande que celle à travers les joints si l'adhésion (mortier-brique) est bonne. La résistance à la flexion parallèle au lit du joint est conditionnée par la résistance à la traction par flexion des briques.

Si l'adhérence est mauvaise, cette résistance est conditionnée principalement par la résistance au cisaillement développée dans le joint à l'interface brique-mortier [17].

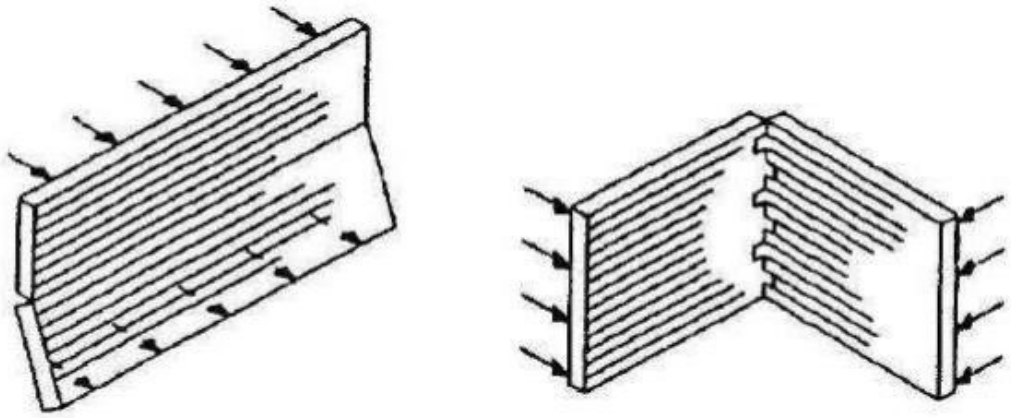


Figure 1.21 Comportement à la flexion des murs en maçonnerie (NF EN 1996-1-1,2006).

(A) : Rupture le long de la ligne perpendiculaire aux lits des joints.

(B) : Rupture le long de la ligne parallèle aux lits des joints.

En particulier le comportement de la maçonnerie dans la direction de la flexion verticale est très complexe. En effet, pour la flexion horizontale, on n'observe qu'un seul mode de rupture, la ligne de fissure apparait dans les joints d'assises (joints horizontaux) (Figure.

2.8a). Tandis que pour la flexion verticale, deux modes de rupture, qui dépendent des résistances relatives des constituants de la maçonnerie, sont possibles. Le premier traduit une rupture ou « ligne de fissure » en adéquation avec une vision homogénéisée du milieu (Figure2.8b), l'hétérogénéité du milieu n'est pas mise en exergue. Le second se traduit par une ligne de rupture en escalier, sous forme de zigzag ou forme dentée (Figure. 2.8b). Ce second mode traduit clairement la discontinuité du matériau, l'échelle de la brique constitutive et celle du mortier sont clairement identifiées. Pour les murs dont la résistance d'adhérence du mortier est relativement forte par rapport à la résistance des briques constitutives, la ligne de rupture va avoir tendance à apparaître comme une fissure verticale au travers des briques et des joints verticaux (Figure. 2.8c). La rupture de type zigzag alterne la propagation de fissure le long d'un joint vertical puis le long d'un joint d'assise (Figure. 2.8b).

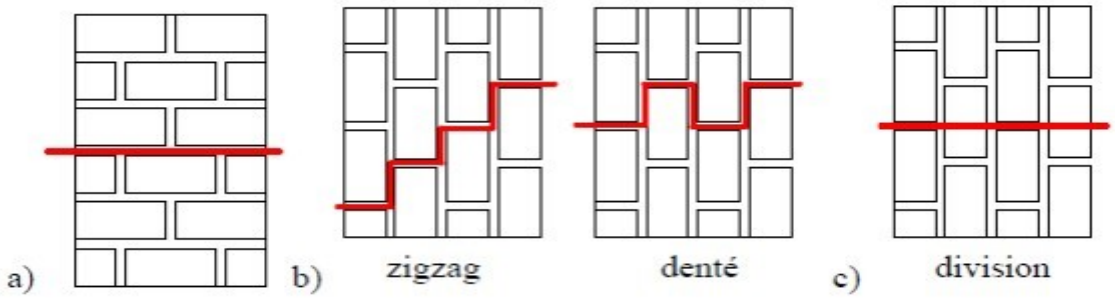


Figure 1.22 Modes de rupture sous flexion uni-axiale : a) flexion horizontale. b) flexion verticale Zigzag, denté) ; c) flexion verticale (division) [10].

1.6.3.2 Flexion biaxiale :

Un mur travaille à la flexion biaxiale lorsqu'il est en appui sur 3 ou 4 de ses extrémités ou bords (Figure. 2.9) [5], ou bien lorsqu'il porte sur 2 bords adjacents. Le mécanisme de rupture des murs sous flexion biaxiale est très complexe car sous cette condition de charge, la distribution du moment de flexion n'est pas monotone ; mais varie à travers le panneau. Les modes de rupture caractéristiques dépendent, des dimensions du panneau, des conditions aux limites, ainsi que des résistances relatives des unités (briques, blocs) et joint d'adhésion ou mortier.

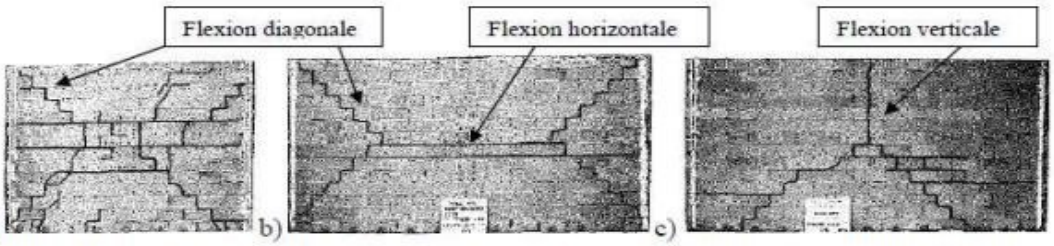


Figure. I.20 : Modes de rupture des murs : a)et b) mur supportés sur 4 bords ; c) mur supportés sur 3 bords (DRYSDALE, 1988).

Figure 1.23 Modes de rupture des murs : a) et b) murs supportés sur 4 bords ; c) murs supportés sur 3 bords [5].

1.6.4 : COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE EN COMPRESSION :

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

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

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

- Les contraintes de traction causant les fissurations sont dues à déformations générées du mortier du joint.
- La résistance nominale à la compression des briques (essais standards) ne peut pas être exploitée directement pour déterminer la résistance des briques dans les murs car les modes de rupture d'une brique dans les deux situations sont différentes [3].

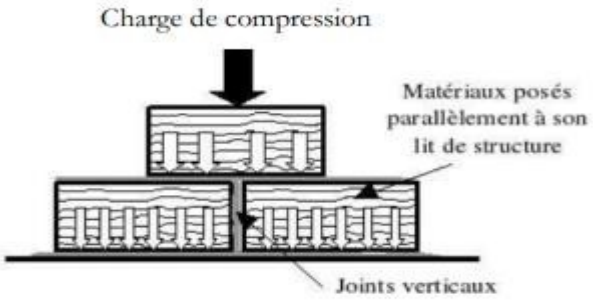


Figure 1.24 charge de compression (CHERRABI.A, 1990).

1.6.4.1. Compression uni axiale

1.6.4.1.1. Compression uni axiale perpendiculaire aux lits

La maçonnerie montre une très bonne résistance face aux sollicitations de compression axiale. De ce fait, les structures ont été construites de telle sorte que la maçonnerie soit principalement sollicitée en compression (murs porteurs massifs, arcs, voûtes, ...). Traditionnellement, la compression unie axiale perpendiculaire aux lits était donc considérée comme la seule propriété mécanique pertinente pour qualifier la maçonnerie.

Hilsdorf fut l'un des premiers à tenter d'établir une relation entre la résistance en compression de la maçonnerie et la résistance de ses constituants. Selon lui, les différences de déformations entre les blocs et le mortier (le premier étant plus rigide que le second), entraîne une compression triaxiale des joints de mortier, tandis que les blocs sont en traction biaxiale (Figure 2.11). Ceci expliquerait deux caractéristiques de la rupture de la maçonnerie en compression uni axiale :

- La rupture s'initie par fissuration verticale ou par écrasement des blocs,
- Les contraintes de compression à la rupture excèdent la résistance en compression uni-axiale du mortier

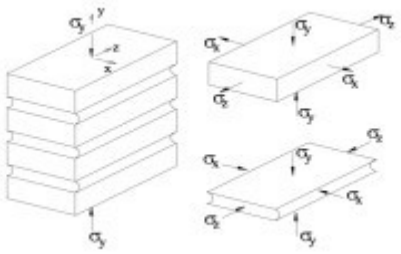


Figure 1.25 État de contrainte dans la maçonnerie, sous compression uni axiale.

La résistance en compression de la maçonnerie peut être déterminée expérimentalement. L'essai normalisé RILEM peut être utilisé, cependant ces éprouvettes sont encombrantes et chères à réaliser (Figure 2.12a). Par conséquent, des tests de compression sur des blocs empilés (Figure 2.12b) sont souvent réalisés, même si les résultats obtenus peuvent être légèrement différents du test normalisé. En menant des essais sur des panneaux faits de blocs en terre crue de dimensions 500 × 250 × 600[mm3], BINDA et. Al. Ont montré que la résistance en compression du mortier utilisé influence fortement la résistance en compression de l'échantillon. Néanmoins, l'augmentation de la résistance en compression de l'échantillon conduit à un comportement plus fragile de la maçonnerie (Figure 2.13a).

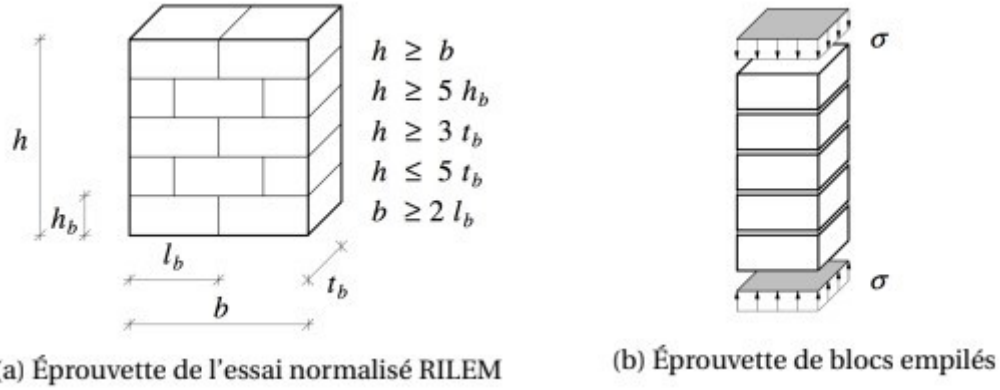
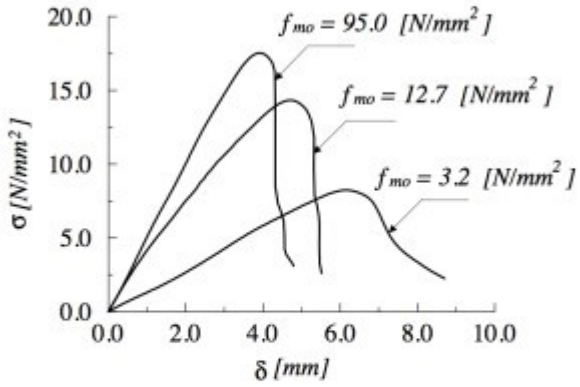


Figure 1.26 Montage des essais en compression uni axiale

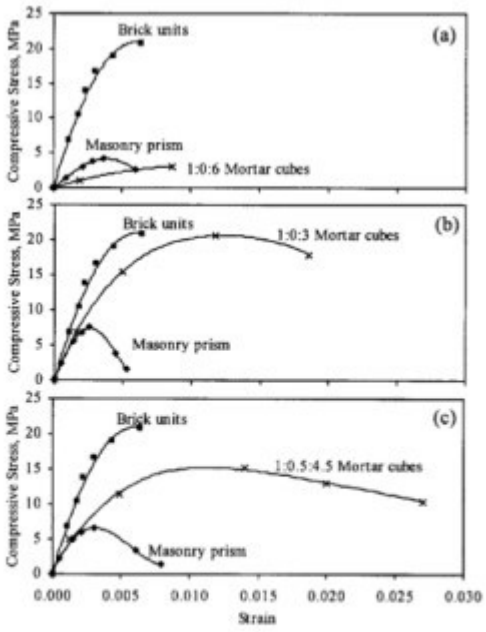
Plus récemment, Kaushik et. Al. Ont testé des éprouvettes en compression avec des briques d'argile pleines et différents types de mortier. Ils montrent que les courbes contrainte déplacement de la maçonnerie se trouvent souvent en-dessous des courbes trouvées pour Les briques et le mortier qui la composent (Figure 1.4b). Autrement dit, l'assemblage est moins résistant que chaque élément pris individuellement. Ceci va à l'encontre de ce qui est généralement supposé, à savoir que la résistance de la maçonnerie se trouve bornée par les résistances du composant le plus faible (le mortier) et du composant le plus fort (la brique).

Cette hypothèse devient réaliste lorsque l'un des composants est beaucoup plus faible que l'autre.

Ceci illustre l'effet structurel de la maçonnerie, dont la résistance ne se résume pas seulement à la résistance de ses composants. Il faut également considérer des éventuelles concentrations ou redistributions de contraintes entre les phases, qui jouent aussi un rôle dans le comportement final de la structure.



(a) Courbes force-déplacement obtenues par Binda *et. al.* [16], où f_{mo} est la résistance en compression du mortier



(b) Courbes force-déplacement obtenues par Kaushik *et. al.* [52] ; mortier (Ciment:Chaux:Sable) faible (a), fort (b) et intermédiaire (c)

Figure 1.27 Résultats d'essais en compression uni axiale

La norme européenne donne une formule de la résistance caractéristique en compression de la maçonnerie fk, obtenue à partir de la résistance caractéristique des éléments de corps et du mortier de montage :

$$fk = K \times fb\alpha \times fm\beta$$

Où fb est la résistance moyenne normalisée de l'élément, fm est la résistance moyenne du mortier de montage, et K est un coefficient qui dépend du type de blocs et de mortier assemblés. Les coefficients α et β sont pris égaux à 0,7 et 0,3 respectivement, dans le cas d'un montage au mortier courant avec un joint épais (>3mm). Le coefficient α est supérieur à β, car

la résistance en compression de la maçonnerie est supposée plus influencée par la résistance des blocs que par la résistance du mortier. Kaushik et. Al. Ont étudié la conformité de cette équation à des résultats expérimentaux. L'équation de l'Eurocode 6 serait appropriée dans le cas de maçonneries constituées de briques à forte résistance, mais l'erreur augmente lorsque l'on considère des briques dont la résistance est plus faible. Pour des briques de faible à moyenne résistance, les auteurs proposent des coefficients $\alpha = 0, 49$ et $\beta = 0, 32$, ajustés par rapport à leur campagne expérimentale, qui prédiraient mieux la résistance en compression de la maçonnerie dans ces cas.

1.6.4.1.2. Compression uni axiale parallèle aux lits

La maçonnerie résiste moins bien à la compression parallèle aux lits, car les joints sont continus dans ce sens. Ce comportement a reçu peu d'attention de la part des chercheurs.

L'Eurocode 6 prévoit le calcul des maçonneries chargées parallèlement au lit de pose. Le calcul se fait de la même manière que pour la compression perpendiculaire au lit de pose (voir paragraphe précédent), en tenant compte de l'axe de chargement des éléments dans la détermination de fb. De plus, pour certains types de blocs (classe 2 ou 3), un coefficient de sécurité est ajouté à la valeur de la résistance en compression fk.

1.6.4.1.3. Influence des joints de mortier

Les joints de mortier jouent un rôle crucial dans la réponse mécanique globale, notamment en cisaillement. Leur résistance et leur comportement non linéaire gouvernent la surface de contact entre briques et mortier, conditionnant la ductilité et la capacité dissipative de la structure.

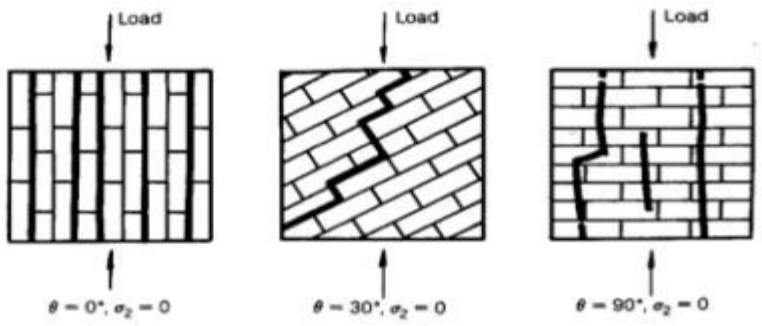
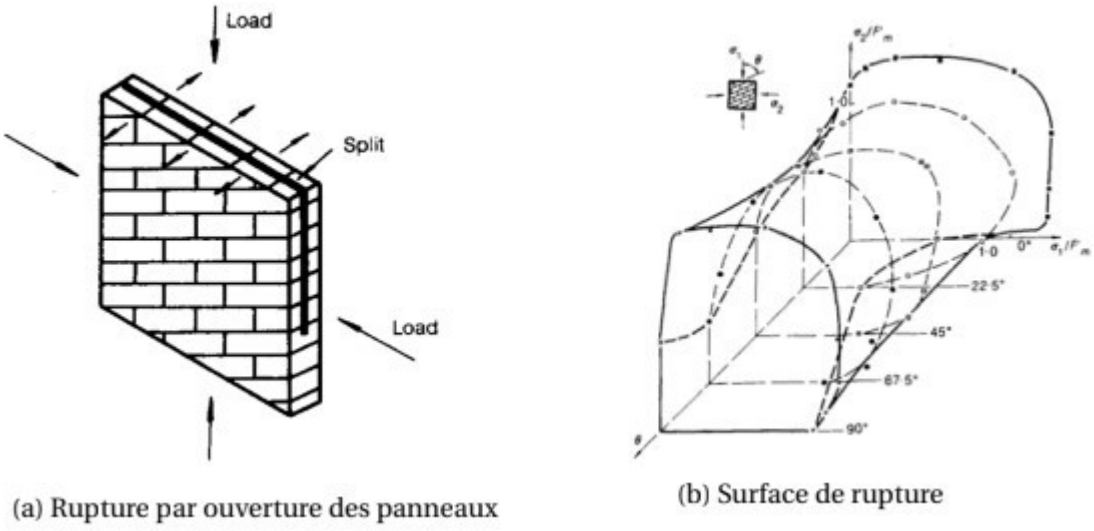


Figure 1.28 Modes de rupture en compression uni axiale.

1.6.4.2 : Compression biaxiale

L'un des premiers à étudier la rupture en compression biaxiale de la maçonnerie, importante pour prédire notamment la rupture par écrasement dans les murs de contreventement. La surface de rupture obtenue en fonction de l'orientation des joints horizontaux par rapport aux contraintes principales est donnée dans la Figure 2.16b. Pour la plupart des ratios des contraintes principales, la rupture apparaît de manière soudaine, par ouverture du panneau dans le plan parallèle à sa surface libre, et à la moitié de l'épaisseur, sans dépendance à l'orientation du joint horizontal (Figure 2.16a). Il paraît donc raisonnable de penser que le type de mortier et l'adhérence mortier/brique n'influence pas ce type de rupture. Cependant, lorsque l'une des contraintes principales devient prédominante, la rupture se fait plutôt par un mécanisme combinant la rupture du joint et l'ouverture latérale. Les propriétés du mortier et la qualité de l'interface brique/mortier joueraient donc un rôle dans ce cas.



(a) Rupture par ouverture des panneaux (b) Surface de rupture

Figure 1.29 Résultats de la campagne expérimentale sur la maçonnerie chargée en compression biaxiale.

Plus tard, Dhanasekar reprend les résultats expérimentaux de Page, et réexprime la surface de rupture, non plus en termes de contraintes principales, mais en termes de contraintes locales. D'après lui, une surface de rupture exprimée en termes de contraintes relatives aux plans des joints est plus logique, car les mécanismes de rupture des panneaux impliquent la plupart du temps la rupture des joints, en particulier lorsque des contraintes de traction sont

présentes dans les joints. Cette formulation serait donc plus appropriée pour modéliser la maçonnerie avec des techniques aux éléments finis.

1.7 : RESISTANCE AU CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA CHARGE VERTICALE (COMPRESSION) :

C'est le cas des murs porteurs sollicités par des efforts verticaux. Plusieurs essais ont été réalisés sur des murs en maçonnerie soumis à ce type de chargement pour déterminer les résistances ultimes. Il existe une relation de type coulomb (figure2.11) entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré compression c'est-à-dire il existe une résistance au cisaillement initiale qui dépend de l'adhésion entre les briques et le mortier à laquelle vient s'ajouter une composante de frottement proportionnelle à la pré compression soit :

$$\sigma = \tau_0 + \ . \sigma_c. \qquad (2.1)$$

Avec :

τ_o : résistance au cisaillement pour un effort normal nul μ : coefficient de frottement apparent

σc : contrainte verticale de pré compression

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

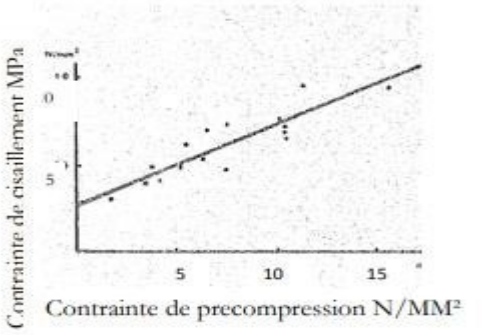


Figure 1.30 Relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de pré-compression

1.7.1 : Résumé

Tableau 1.5 : Comportement mécanique de la maçonnerie selon ses différents aspects

Aspect	**Comportement en maçonnerie**
Résistance en compression	Bonne, dépend des unités et mortier
Résistance au cisaillement	Modérée à faible, gouvernée par les joints
Résistance au cisaillement	Très faible, souvent négligeable
Modes de rupture principaux	Glissement, basculement, compression coin, cisaillement diagonal, traction diagonale
Comportement sous charges latérales	Murs porteurs plus ductiles, fissuration similaire
Importance des joints	Point faible, contrôle la réponse non linéaire

Ces caractéristiques expliquent la nécessité d'essais expérimentaux (sur prismes ou murets) et de modélisations spécifiques pour évaluer précisément le comportement mécanique des structures en maçonnerie, en particulier sous sollicitations dynamiques telles que les séismes123.

1.8 : CONCLUSION :

La maçonnerie, matériau de construction ancestral, reste largement utilisée grâce à ses qualités mécaniques, esthétiques et économiques. Cependant, son comportement complexe, lié à la nature composite des éléments et des mortiers, nécessite une bonne compréhension pour garantir la durabilité et la sécurité des ouvrages.

Les pathologies observées en maçonnerie, telles que les fissures, les efflorescences, les dégradations du mortier, ou les infiltrations d'eau, résultent souvent de facteurs multiples : défauts de conception, erreurs de mise en œuvre, vieillissement des matériaux, ou agressions environnementales. Ces désordres peuvent compromettre la stabilité, l'étanchéité et l'esthétique des constructions, rendant indispensables des diagnostics précis et des interventions adaptées148.

La résistance mécanique de la maçonnerie, notamment en compression, est généralement satisfaisante, mais sa faible résistance en traction et cisaillement impose des précautions particulières, surtout en zones sismiques ou pour les murs porteurs soumis à des charges latérales importantes. L'importance des joints de mortier dans la performance globale souligne la nécessité d'un choix rigoureux des matériaux et d'une mise en œuvre soignée14.

Enfin, les études récentes et les retours d'expérience insistent sur l'importance d'une conception technique rigoureuse, d'un contrôle qualité renforcé, ainsi que d'une maintenance régulière pour prévenir les pathologies et prolonger la vie des ouvrages. La complexité croissante des formes architecturales, les exigences environnementales et les contraintes économiques imposent une approche intégrée et multidisciplinaire de la maçonnerie, combinant savoir-faire traditionnel et innovations techniques26.

Ainsi, la maçonnerie continue d'évoluer, avec des perspectives prometteuses pour améliorer ses performances mécaniques, sa durabilité et son impact environnemental, tout en conservant son rôle fondamental dans le patrimoine bâti et la construction moderne.

CHAPITRE 2 :
PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la description détaillée des matériaux utilisés et du programme expérimental mis en œuvre dans le cadre de cette étude. L'objectif est de caractériser avec précision les composants de la maçonnerie – briques et mortiers – et de définir la méthodologie adoptée pour la confection et l'essai des assemblages (prismes et murets). Une connaissance approfondie des propriétés des matériaux et une description rigoureuse du protocole expérimental sont fondamentales pour assurer la fiabilité des résultats et la validité des conclusions qui en découleront.

Conformément aux objectifs de cette thèse, qui visent à étudier les effets géométriques sur la performance en compression de la maçonnerie en brique et à établir des corrélations entre le comportement des prismes et des murets, ce chapitre présentera successivement :

- La provenance et les caractéristiques physiques et mécaniques des trois types de briques perforées utilisées.
- La formulation et les propriétés mécaniques des trois types de mortiers confectionnés.
- Le programme expérimental détaillé, incluant la conception des éprouvettes (prismes de trois et six briques, murets de différentes configurations), leur fabrication, ainsi que le dispositif et la procédure d'essai en compression3.

II.1.1 MATÉRIAUX UTILISES :

La sélection et la caractérisation des matériaux constitutifs sont des étapes cruciales pour l'interprétation des résultats expérimentaux.

II.1.1.1 Provenance des matériaux :

- **Sable :** Le sable utilisé provient de la région de Oued Souf. [USER: Préciser si possible sa nature (roulé, concassé) et sa classe granulaire si connue, ou si une analyse granulométrique a été faite].
- **Ciment :** Ciment Portland au calcaire (NA442-CEM II/B-L 42.5N) provenant de la cimenterie « LAFARGE MATINE ».

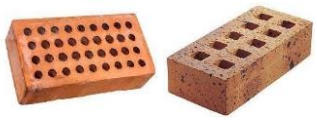
- **Chaux Hydraulique :** Chaux hydraulique provenant de l'usine de « HASSASNA », fabriquée dans la Wilaya de Saïda. Utilisée uniquement pour le mortier de type M1.

II.1.1.2 Caractéristiques des matériaux :

II.1.1.2.1 Les briques :

Trois types de briques perforées en terre cuite, provenant de la briqueterie de Remchi (Wilaya de Tlemcen), ont été utilisés pour cette étude. Leurs dimensions nominales sont les suivantes :

- **Type B1 :** 22 x 10.5 x 5.5 cm³
- **Type B2 :** 22.2 x 11 x 5.5 cm³
- **Type B3 :** 21.4 x 10.5 x 5.5 cm³



Brique 1



brique 2



brique 3

II.1.1.2.2● Caractéristiques physiques :

La masse volumique (tableau 3.1) des éléments est déterminée par la méthode géométrique. Les mesures sont effectuées sur neuf briques. La masse volumique d'une brique $\boldsymbol{\rho}$ (kg/m^3) est calculée par l'expression (3.1).

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Où :

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

M : masse des briques (kg).

V : volume net des briques.

Tableau 2.1 Caractéristiques physiques des briques perforés en terre cuite utilisées.

N°	Masse(Kg)	Volume net (dm3)	ρ (Kg/dm3)
B1	**1.6481**	**0.9141**	**1.802**
B2	**1.5895**	**0.7913**	**2.008**
B3	**1.2595**	**0.7056**	**1.785**

II.1.1.2.3● Caractéristiques mécaniques :

Résistance à la compression des briques :

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur 3 briques (voir figure 3.1) jusqu'à la rupture. Ces échantillons ont été surfacés dans le sens du chargement. La résistance en MPa est calculée selon l'expression :

$$R_c = \frac{F_b}{S_n}$$

Où :

R_c : Résistance à la compression (MPa).

F_b : Charge maximale de rupture en (kN).

S_n: Section nette moyenne de la brique (cm^2).

Les résultats sont consignés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Résistances à la compression des briques testée.

Brique	Surface nette (mm2)	Force de rupture (N)	R_c (MPa)
B1	**16620**	**69560**	**4.18**
B2	**14388**	**33410**	**2.32**
B3	**22470**	**246860**	**10.98**

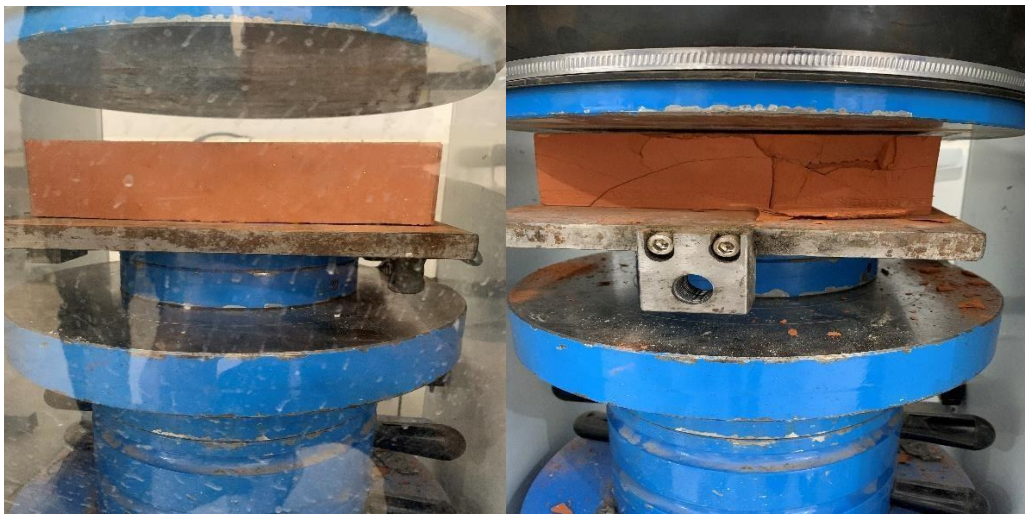


Figure 2.1: Presse universelle (photos prises par les auteurs).

II.1.1.2.4. Mortiers :

Trois types de mortiers ont été formulés et testés pour cette étude, afin d'évaluer l'influence de la composition du liant et du dosage en sable. Leurs compositions volumiques sont les suivantes :

- **Mortier M1 (Mortier bâtard) :** 1 volume de ciment / 2 volumes de chaux / 9 volumes de sable.
    - *Caractéristiques attendues :* Bonne ouvrabilité, souplesse, perméabilité à la vapeur d'eau, résistance mécanique modérée. Adapté aux maçonneries traditionnelles ou nécessitant une adaptation aux déformations.
- **Mortier M2 (Mortier de ciment dosé normalement) :** 1 volume de ciment / 4 volumes de sable.

- *Caractéristiques attendues :* Résistance à la compression élevée, prise relativement rapide. Adapté pour les maçonneries porteuses.

- **Mortier M3 (Mortier de ciment maigre) :** 1 volume de ciment / 6 volumes de sable.
  - *Caractéristiques attendues :* Résistance modérée, plus économique. Adapté pour des éléments moins sollicités.

Tableau 2.3 : Comparaison des propriétés

Mortier	Composition (volumes)	Résistance à la compression*	Flexibilité	Usage recommandé
1	**1 ciment / 2 chaux / 9 sable**	**2–4 MPa**	**Élevée**	**Enduits, maçonnerie traditionnelle**
2	**1 ciment / 4 sable**	**10–15 MPa**	**Faible**	**Murs porteurs, fondations**
3	**1 ciment / 6 sable**	**5–8 MPa**	**Modérée**	**Cloisons, murs non porteurs**

***Valeurs indicatives dépendant des matériaux et conditions de cure.**

II.1.1.2.4.1 Préparation et Essais sur Mortiers

La préparation et les essais sur les mortiers ont été réalisés conformément aux recommandations de la norme EN 196-1.

- **Confection des éprouvettes :** Des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm^3 (Figure 2.2) ont été confectionnées pour chaque type de mortier. Le remplissage des moules s'est fait en deux couches, chaque couche étant compactée par 60 chocs à l'aide d'un appareil à chocs normalisé.
- **Cure :** Après arasage et recouvrement, les moules ont été conservés en ambiance de laboratoire [USER: Préciser la température et humidité si contrôlée, ou "ambiance de laboratoire"] pendant 20 à 24 heures. Les éprouvettes ont ensuite été démoulées et conservées dans l'eau à 20°C ± 1°C jusqu'aux jours des essais (typiquement 7 et 28

jours). NF EN 196-1. (2016). Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques. Association Française de Normalisation (AFNOR).



Figure 2.2 : Moule prismatique normalisé et b) Éprouvettes de mortier 4x4x16 cm³.



a. Moule prismatique b. éprouvette

Figure 2.3 Moule prismatique et éprouvettes 4x4x16 cm³ de mortier.

Les essais de résistance à la flexion et à la compression des mortiers requièrent des équipements spécifiques et une procédure normalisée :

II.1.1.2.4.2 : Essai de Flexion (EN 196-1)

L'essai de flexion trois points a été réalisé sur les éprouvettes de mortier (Figure 2.3). La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (3.3).

Si Y est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut F_f* l/4 et la résistance à la traction par flexion correspondante est écrite par l'expression (3.3).

$$R_f = \frac{Ff}{b3} \text{.....(3.3)}$$

Compte tenu des dimensions normalisées de b et l, Si Ff est exprimée en (N), cette résistance sera exprimée en (MPa) par l'expression (3.4).

$\mathbf{R_f = 0.234N_f}$ .....(3.4)

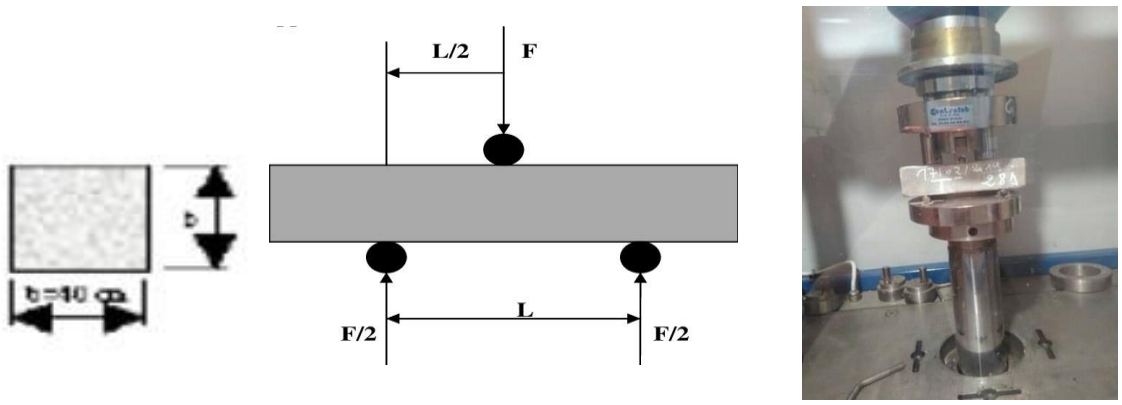


Figure 2.4 : **Dispositif d'essai de flexion sur éprouvette de mortier.**

II.1.1.2.4.3 :Essai de compression :

- Rompre les deux demi-prismes issus de la flexion (figure 2.5).

- **Résistance à la compression** :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 3.6. Si FC est la charge de rupture, la résistance à la compression est décrite par l'expression (3.5).

$$R_f = \frac{F^c}{b2} \text{.....(3.5)}$$

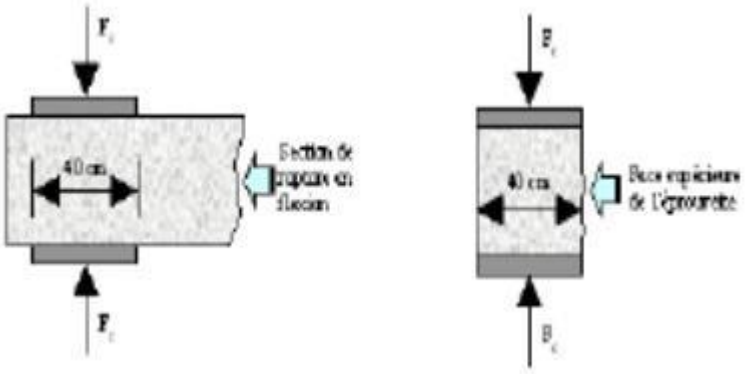


Figure 2.5 Dispositif pour l'essai de résistance à la compression. (BUI, 2013).

Les résultats moyens des résistances en flexion et en compression des mortiers à 28 jours sont présentés dans le Tableau 2.4.



Figure 2.6: L'essai de résistance à la compression

Tableau 2.4 : Résultats des Essais de Flexion et de Compression sur Mortiers

Type de Mortier	Éprouvette	Force maximale en Flexion (kN)	σf (MPa)	Force maximale en Compression (kN)	σc (MPa)
Mortier 1	**Essai 1**	**8.11**	**4.71**	**19.68**	**12.41**
	Essai 2	**7.41**	**4.64**	**20.62**	**12.97**
	Moyenne	**7.76**	**4.675**	**20.15**	**12.69**
Mortier 2	**Essai 1**	**6.22**	**1.94**	**11.25**	**7.7**
	Essai 2	**7.30**	**2.02**	**9.04**	**6.65**
	Moyenne	**6.76**	**1.98**	**10.145**	**7.175**
Mortier 3	**Essai 1**	**1.40**	**0.89**	**0.99**	**1.02**
	Essai 2	**1.22**	**0.78**	**0.60**	**0.76**
	Moyenne	**1.31**	**0.835**	**0.795**	**0.89**

II.2 : Programme Expérimental sur les Assemblages de Maçonnerie

Le programme expérimental a été conçu pour évaluer l'influence des paramètres géométriques des éprouvettes et des propriétés des matériaux sur la performance en compression de la maçonnerie. Il comprend des essais sur des prismes de différentes hauteurs et sur des murets.

II.3 : Conception et Nomenclature des Éprouvettes

Au total, 12 éprouvettes ont été confectionnées, combinant les 3 types de briques (B1, B2, B3) et les 3 types de mortiers (M1, M2, M3). L'épaisseur des joints de mortier a été maintenue constante à 10 mm pour tous les assemblages.

- **Prismes :** Deux types de prismes ont été réalisés pour chaque combinaison brique-mortier :
    - **P3B :** Prismes composés de 3 briques superposées.
    - **P6B :** Prismes composés de 6 briques superposées.
      L'objectif est d'étudier l'effet de l'élancement du prisme.



Figures 2.7 : les prismes de types 2.



Figure 2.8 : les prismes de types 1

- **Murets :** Deux types de murets ont été construits pour chaque combinaison brique-mortier, différant par leur épaisseur :
    - **W $_{E1}$:** Murets à simple épaisseur correspondant à la largeur d'une brique, environ 105-110 mm). Dimensions nominales : Hauteur ≈ 380 mm, Longueur ≈ 450 mm.

- **W_{E2}:** Murets à épaisseur correspondant à la longueur d'une brique, environ 214-222 mm. Dimensions nominales : Hauteur ≈ 380 mm, Longueur ≈ 450 mm.
  La nomenclature adoptée pour les éprouvettes est la suivante :
  `Type-Éprouvette_TypeBrique_TypeMortier`
  Par exemple : `P3B_B1_M1` désigne un prisme de 3 briques, construit avec la brique de type B1 et le mortier de type M1.
  `W_E1_B2_M3` désigne un muret de simple épaisseur, construit avec la brique de type B2 et le mortier de type M3.
- Ces murets sont fabriqués avec les méthodes traditionnelles (voir figure 2.9 et 2.10). Les objectifs des essais sont de déterminer la relation force-déplacement sous charges verticale.



(a) Muret B1E1 (b) Muret B2E1 (c) Muret B3E1

Figure 2.9 : Les murets type 1 (épaisseur 1).



[a] muret B1E2 [b] muret B2 E2 [c] muret B3E2

Figure 2.10 les murets type 2 (épaisseur 2)..

Tableau 2.5 : Matrice du programme expérimental sur les assemblages de maçonnerie.

Type de Brique	Type de Mortier	Type d'Éprouvette	Dimensions Nominales (L × ép. × H) (mm)	Nombre d'éprouvettes par série
B1	**M1**	**P3B_B1_M1**	**(larg. B1) × (larg. B1) × ($3H_{B1}+2e_j$)**	**3**
B1	**M1**	**P6B_B1_M1**	**(larg. B1) × (larg. B1) × ($6H_{B1}+5e_j$)**	**3**
B1	**M1**	**W_E1_B1_M1**	**~450 × (larg. B1) × ~380**	**3**
B1	**M1**	**W_E2_B1_M1**	**~450 × (long. B1) × ~380**	**3**
B1	**M2**	**P3B_B1_M2**	**(larg. B1) × (larg. B1) × ($3H_{B1}+2e_j$)**	**3**
B1	**M2**	**P6B_B1_M2**	**(larg. B1) × (larg. B1) × ($6H_{B1}+5e_j$)**	**3**
B1	**M2**	**W_E1_B1_M2**	**~450 × (larg. B1) × ~380**	**3**
B1	**M2**	**W_E2_B1_M2**	**~450 × (long. B1) × ~380**	**3**

...	...	...	...	...
B3	**M3**	**W_E2_B3_M3**	**~438 × (long. B3) × ~380**	**3**

Légende :

- **B1, B2, B3** : Types de briques utilisés (ex : brique perforée, pleine, etc.)
- **M1, M2, M3** : Types de mortiers utilisés (ex : ciment pur, bâtard, etc.)
- **P3B, P6B** : Prismes de 3 ou 6 briques
- **W_E1, W_E2** : Murets de type 1 ou 2 (dimensions variables selon la géométrie)
- $\mathbf{H_{B1}}$: Hauteur de la brique B1
- $\mathbf{e_j}$: Épaisseur du joint de mortier

Remarque :

Le nombre d'éprouvettes par série est généralement fixé à 3 pour garantir la répétabilité et la fiabilité statistique des résultats, mais il peut être adapté selon les ressources disponibles et les exigences du protocole expérimental.

Tableau 2.6 : Matrice du programme expérimental sur les assemblages de maçonnerie.

Type de brique	Type d'Éprouvette	Type de Mortier	Epaisseur(mm)	Dimensions Nominales (L x E x H) (mm)
Brique 1	WE_1B_1	M1	10	450 x 105 x 380
	WE_1B_1	M2		
	WE_1B_1	M3		
	WE_2B_1	M1	10	450 x 220 x 380
	WE_2B_1	M2		
	WE_2B_1	M3		
	P_3B_1	M1	10	220 x 105 x 380
	P_3B_1	M2		
	P_3B1	M3		
	P_6B_1	M1	10	220 x 105 x 185

	P_6B_1	**M2**		
	P_6B_1	**M3**		
Brique 2	**WE1B2**	**M1**	**10**	**454 x 110 x 380**
	WE1B2	**M2**		
	WE1B2	**M3**		
	WE2B2	**M1**	**10**	**454 x 230 x 380**
	WE2B2	**M2**		
	WE2B2	**M3**		
	P3B2	**M1**	**10**	**222 x 110 x 380**
	P3B2	**M2**		
	P3B2	**M3**		
	P6B2	**M1**	**10**	**222 x 110 x 185**
	P6B2	**M2**		
	P6B2	**M3**		
Brique 3	**WE1B3**	**M1**	**10**	**438 x 105 x 380**
	WE1B3	**M2**		
	WE1B3	**M3**		
	WE2B3	**M1**	**10**	**438 x 220 x 380**
	WE2B3	**M2**		
	WE2B3	**M3**		
	P3B3	**M1**	**10**	**214 x 105 x 380**
	P3B3	**M2**		
	P3B3	**M3**		
	P6B3	**M1**	**10**	**214 x 105 x 185**
	P6B3	**M2**		
	P6B3	**M3**		

II.4 : Confection des Assemblages de Maçonnerie

La confection des prismes et des murets a été réalisée au laboratoire de résistance des matériaux de la faculté de Technologie de l'université de Yahya Farès Médéa.

- **Matériel de confection :** Truelles, auge, fil à plomb, mètre, niveau à bulle, (scie à béton si des découpes étaient nécessaires), maillet (Figure 2.5).



Figure 11 : Outils utilisés pour la confection des assemblages.

II.5 : Méthodologie de la confection des murets :

Les briques ont été préalablement mouillées pour éviter une absorption excessive de l'eau du mortier.

1. Le mortier a été étalé pour obtenir une épaisseur de joint de 10 mm, en utilisant des gabarits si nécessaire (Figure 2.6).
2. La planéité et la verticalité des assemblages ont été vérifiées régulièrement à l'aide d'une règle et d'un niveau à bulle (Figure 2.7).

Un dispositif a été réalisé pour la confection des murets, afin de respecter la planéité.

Les opérations suivies sont :

1. Mouiller préalablement les briques pour éviter que le mortier ne grille pendant la réalisation de la maçonnerie,
2. Etaler le mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide de différents gabarits fixant ainsi les dimensions du joint (figures 2.12),
3. Vérifier la planéité du mur avec la règle en bois et le fil à plomb, (figures 2.13),

4. Les murets sont ensuite transportés et stockés après 7 jours pour toute la durée de la cure,

5. L'écrasement est effectué, après 28 jours de cure, aux conditions du laboratoire, Les mêmes opérations sont répétées, pour les tous les murs.



Figure 2.12 : Etalement du mortier (photos prise par les auteurs).



Figure 2.13 : Vérification de la planéité à l'aide du niveau à bulle (photos prise par les auteurs).

II.6 Cure et Stockage des Assemblages

Après confection, les prismes et murets ont été conservés au laboratoire pendant 7 jours avant d'être soigneusement transportés vers une zone de stockage. Ils y ont poursuivi leur cure dans les conditions ambiantes du laboratoire jusqu'à l'âge de 28 jours avant les essais (Figure 2.8).



Figure 2.14: Cure et stockage des assemblages de maçonnerie.

II.7 : Dispositif et Procédure d'Essai en Compression

Les essais de compression sur les prismes et les murets ont été réalisés à l'aide d'une presse pilotée par ordinateur.

- **Machine d'essai :**
  - Vérin hydraulique d'une capacité de 200 kN.
  - Système d'acquisition de données. [USER: Ajouter d'autres spécifications si pertinentes, comme la marque/modèle de la presse.]
- **Instrumentation :**
  - **Mesure de la charge :** Via le capteur de pression intégré au vérin.

- **Mesure des déplacements :** [USER: Préciser le type de capteurs (LVDT ?), leur nombre et leur positionnement exact sur les prismes et les murets. Par exemple, 2 ou 4 LVDT sur les faces principales pour mesurer le raccourcissement vertical moyen sur une hauteur de mesure définie.]

II.8 : Principe de l'essai :

Les efforts sont transmis aux corps d'épreuve à l'aide de barres de transmissions rigides (Figure 2.16). Des plaquettes d'appui, assurent une meilleure distribution des efforts sans aucune excentricité. La mesure de la pression, faite à l'aide d'un capteur de pression, permet de déterminer la charge appliquée par le vérin. La mesure des déplacements est effectuée à l'aide d'un capteur de déplacement qui est installé au-dessus du muret.

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

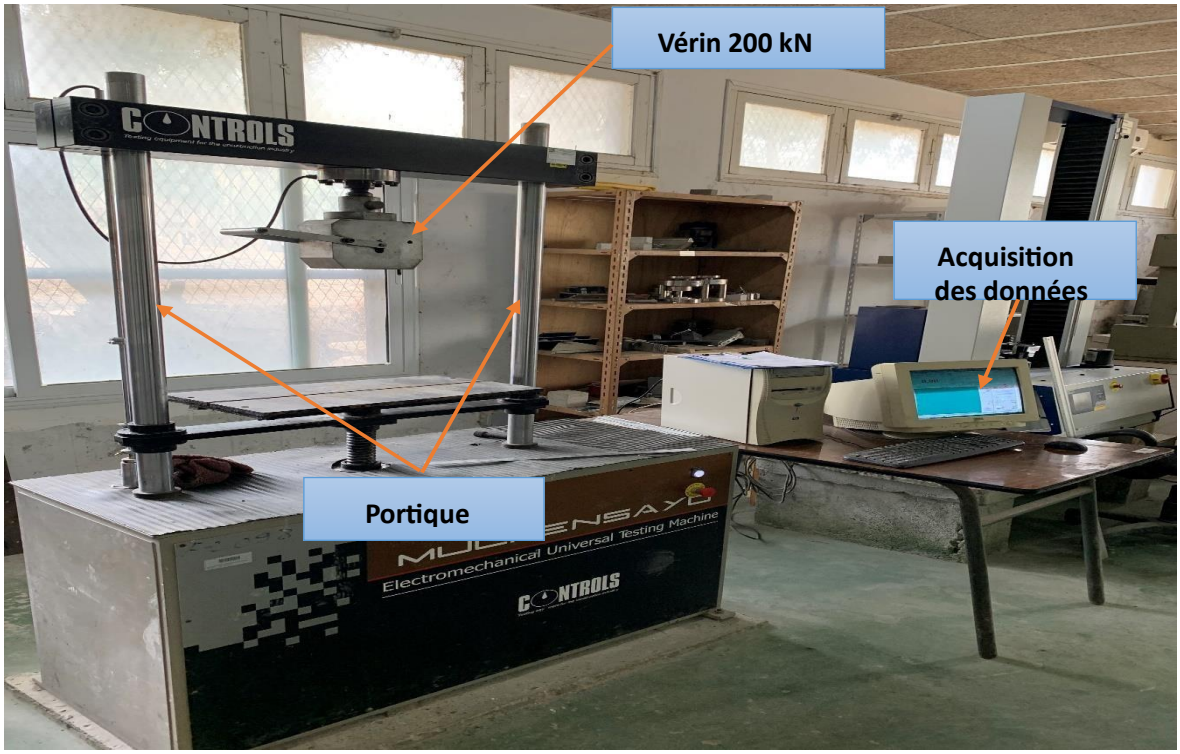


Figure 2.15 : L'ensemble du dispositif d'essai (photos prise par les auteurs).



Figure 2.16 : Muret sous charge de compression (photos prise par les auteurs).

- **Procédure d'essai :**
    1. Les faces supérieure et inférieure des éprouvettes ont été [USER: Préciser si un surfaçage a été réalisé (ex: plâtre, mortier soufre) ou si des plaques de répartition spécifiques ont été utilisées pour assurer une distribution uniforme de la charge].
    2. L'éprouvette a été centrée avec soin sur le plateau inférieur de la presse.
    3. La charge a été appliquée de manière monotone et continue à une vitesse de [USER: Préciser la vitesse de chargement en N/s ou de déplacement en mm/min, et si l'essai était contrôlé en force ou en déplacement].
    4. La charge et les déplacements correspondants ont été enregistrés en continu jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à un niveau de dégradation significatif.

II.9 : Conclusion du Chapitre

Ce chapitre a détaillé l'ensemble des matériaux utilisés, depuis leurs composants de base jusqu'aux briques et mortiers formulés, en passant par leur caractérisation physique et mécanique. Le programme expérimental, incluant la conception des différents types de prismes et de murets, leur méthode de confection, ainsi que le dispositif et la procédure d'essai en compression, a également été exposé. Cette base méthodologique rigoureuse permettra, dans les chapitres suivants, de présenter et d'analyser les résultats obtenus de manière fiable, en vue d'atteindre les objectifs fixés par cette étude.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1.Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais de compression effectués sur des prismes et des murets en brique perforée, utilisant des matériaux identiques pour permettre une comparaison directe. L'objectif est d'examiner leurs caractéristiques de résistance et de déformation, ainsi que les modes de rupture observés. Une analyse des corrélations entre les performances des prismes et des murets sera également menée pour évaluer la relation entre ces deux types d'essais et la prédictibilité du comportement des murets à partir des prismes.

III.2 : Résistance des murets testés

III.2.1 : Résistance des murets sous sollicitations de compression

Les résultats des essais de compression réalisés sur les murets et ls prismes en brique perforée sont présentés dans les tableaux 3.1 et 3.2. Ces tableaux regroupent les valeurs des forces de rupture mesurées ainsi que la résistance a la compression.

Pour le calcul de la résistance à la compression, la formule issue de l'Eurocode 6 (EC6) a été utilisée :

$$\mathbf{Rc}=\frac{\boldsymbol{F}\mathrm{c}}{\boldsymbol{b}.\boldsymbol{e}}$$

où :

- **Rc:** résistance à la compression (MPa)
- **F*c*:** force exercée par le vérin au moment de la rupture (N)
- **b:** largeur du mur (mm)
- **e :** épaisseur du mur (mm)

Cette approche permet d'obtenir la contrainte moyenne de rupture pour chaque muret testé, facilitant ainsi la comparaison entre les différentes configurations expérimentales.

Remarques complémentaires

- Selon la littérature, la résistance à la compression des briques perforées varie généralement entre 8 et 40 MPa, en fonction de la qualité des matériaux et du mode de fabrication3.
- Les essais expérimentaux montrent que la résistance de la maçonnerie dépend fortement de l'épaisseur du joint de mortier, de la qualité du mortier utilisé et de l'orientation des briques4.
- Les résultats expérimentaux sont souvent comparés aux valeurs analytiques et empiriques issues de l'Eurocode 6 et d'autres référentiels techniques afin de valider la pertinence des formulations utilisées42.

Dans la suite de ce chapitre, une analyse détaillée des résultats obtenus pour la résistance à la compression et à la flexion sera présentée. Ces résultats seront comparés aux valeurs issues de la littérature et aux exigences des normes en vigueur, afin d'évaluer la performance des matériaux et des assemblages testés. Enfin, une attention particulière sera portée à la description et à l'interprétation des différents modes de rupture observés au cours des essais, afin de mieux comprendre le comportement mécanique des prismes et des murets en maçonnerie sous sollicitation.

Tableau3. 1 : Résultats de résistance à la compression des tests. (Les murets).

Type De murets		
	***Rc* (MPa)**	**ΔL (mm)**
WE1B1M1	**2.557**	**6.426**
WE1M1B2	**1.561**	**10.962**

WE1M1B3	**2.366**	**8.4**
WE2M1B1	**0.542**	**3.6225**
WE2M1B2	**0.110**	**4.011**
WE2M1B3	**1.129**	**10.143**

Tableau3.2 : Résultats de résistance à la compression des tests. (Les prismes).

Type De prisme		
	Rc **(MPa)**	**ΔL (mm)**
PB1 type1	**4,184**	**7,95**
PB2 type1	**3,289**	**7,95**
PB3 type1	**2,285**	**5,45**
PB1 type2	**3,684**	**8.08**
PB2 type2	**2,102**	**5,81**
PB3 type2	**2,777**	**5.56**

III.2.2 : Modes de ruptures

Les modes de rupture observés lors des essais de compression sur les murets en brique perforée présentent plusieurs caractéristiques typiques de la maçonnerie.

Le mode de rupture principal est marqué par le développement de **fissures de tension parallèles à l'axe de chargement**. Ces fissures apparaissent généralement dans la partie centrale du muret, souvent au niveau de la ligne médiane du prisme, puis se propagent vers les unités inférieures (voir figure 3.1). Ce comportement a également été rapporté par d'autres chercheurs , confirmant la récurrence de ce mécanisme dans la littérature scientifique.

Dans certains cas, la rupture des murets s'est manifestée par :

- **Écrasement localisé des briques** sous l'effet de la charge,
- **Glissement le long des joints horizontaux et/ou verticaux**,
- **Mécanisme combiné** associant la rupture de la brique et celle du mortier (voir figures 3.2 et 3.5).

Pour les prismes, la rupture s'est produite principalement par un mécanisme combinant :

- **Rupture du joint de mortier**,
- **Ouverture latérale** du prisme .

Ces observations permettent de dégager deux caractéristiques majeures de la rupture de la maçonnerie sous compression :

- **La rupture s'initie soit par une fissuration verticale, soit par l'écrasement des briques**, traduisant une concentration des contraintes dans la zone centrale ou aux interfaces brique/mortier.
- **Les contraintes de compression à la rupture dépassent généralement la résistance uniaxiale du mortier**, ce qui souligne l'importance de l'interaction entre la brique et le mortier dans le comportement global de la maçonnerie.
- **La rupture se produit le plus souvent par un mécanisme combiné**, impliquant à la fois la rupture du joint de mortier et l'ouverture latérale des éléments. Ainsi, la qualité

du mortier et l'adhérence à l'interface brique/mortier jouent un rôle déterminant dans la résistance et le mode de rupture de la maçonnerie.

Ces résultats mettent en évidence la complexité du comportement de la maçonnerie sous compression et l'importance des propriétés des matériaux constitutifs et de leur interface pour la performance globale de l'ouvrage.

les murettes



figure 3.1 : Mode de rupture WE1B1



figure 3.2 :mode de rupture WE1B2



figure 3.3 : mode de rupture WE2B3

Le prisme



figure 3.4 :mode de rupture P6B1



figure 3.5 :mode de rupture P6B2



figure 3.6 :mode de rupture P6B3



figure 3.7 : mode de rupture P3B1

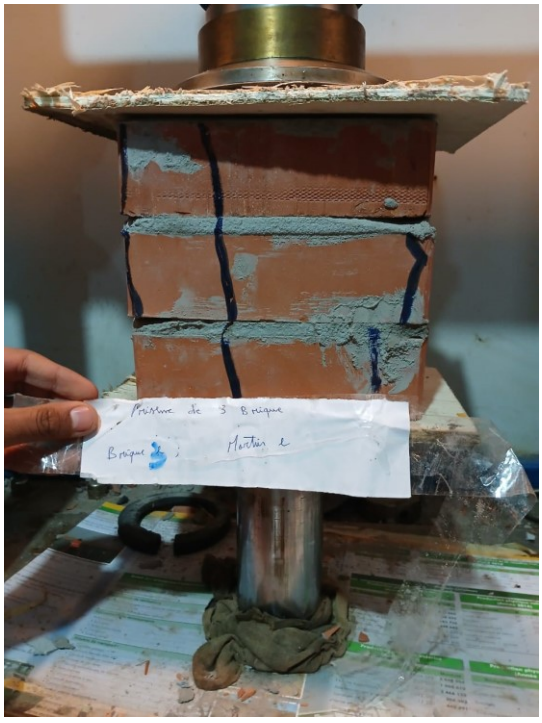


figure 3.8 : mode de rupture P3B3

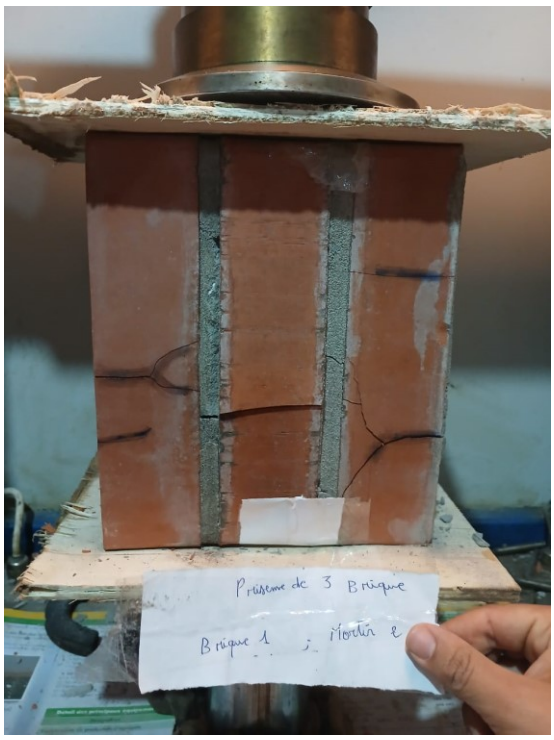


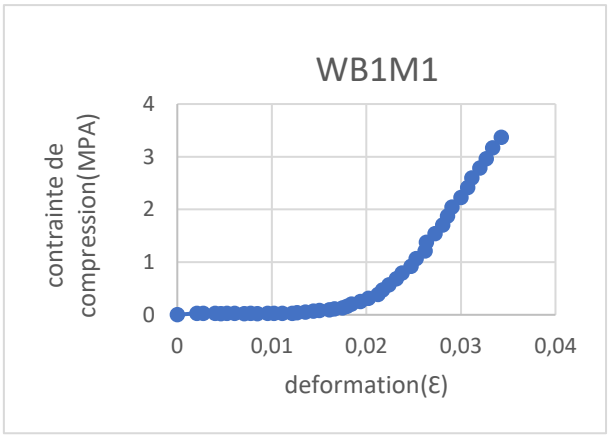
figure 3.9 :mode de rupture P3B1

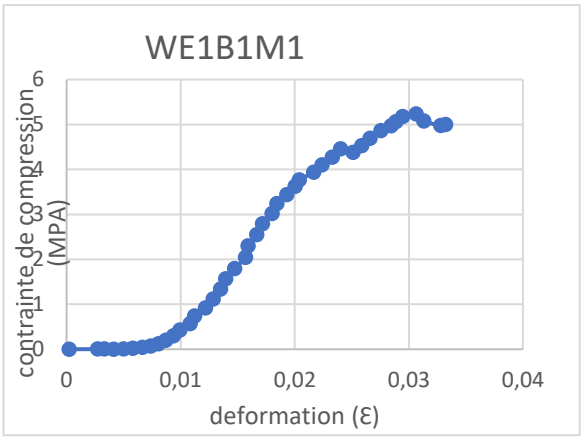


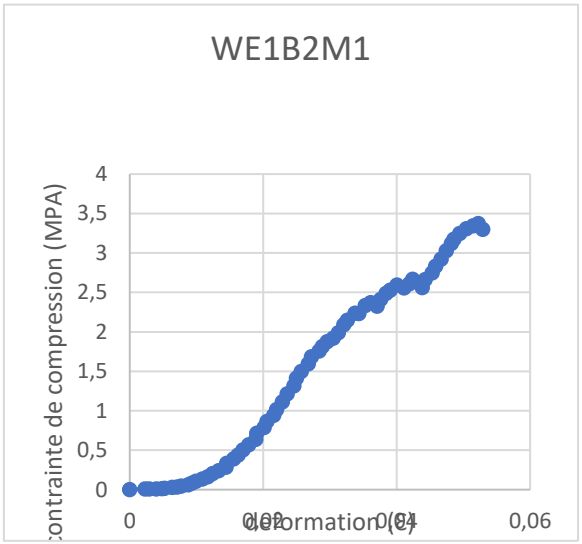
figure 3.10 : mode de rupture P3B2

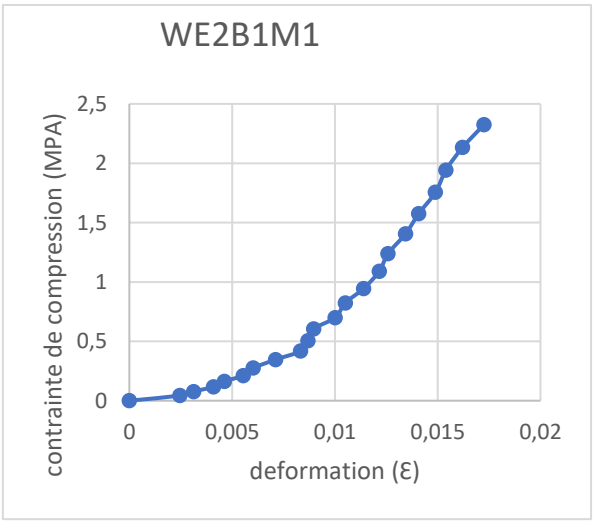


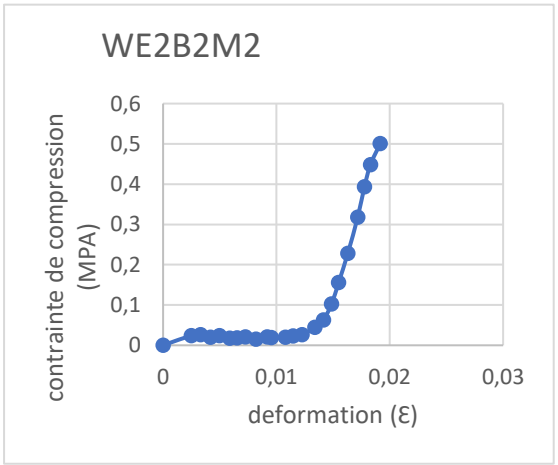
figure 3.11 :mode de rupture P3B3

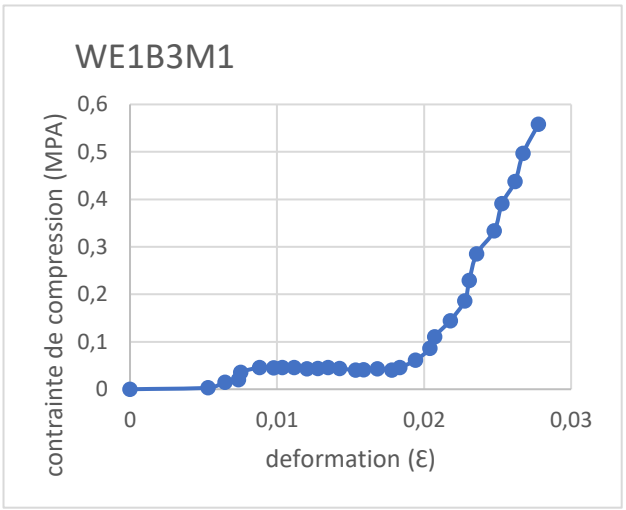

WB1M1
contrainte de compression(MPA)
deformation(ε)
0
1
2
3
4
0
0,01
0,02
0,03
0,04


WE1B1M1
contrainte de compression (MPA)
deformation (ε)
0
1
2
3
4
5
6
0
0,01
0,02
0,03
0,04


WE1B2M1
contrainte de compression (MPA)
deformation (ε)
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
0
0,06


WE2B1M1
contrainte de compression (MPA)
deformation (ε)
0
0,5
1
1,5
2
2,5
0
0,005
0,01
0,015
0,02


WE2B2M2
contrainte de compression (MPA)
deformation (ε)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0
0,01
0,02
0,03


WE1B3M1
contrainte de compression (MPA)
deformation (ε)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0
0,01
0,02
0,03

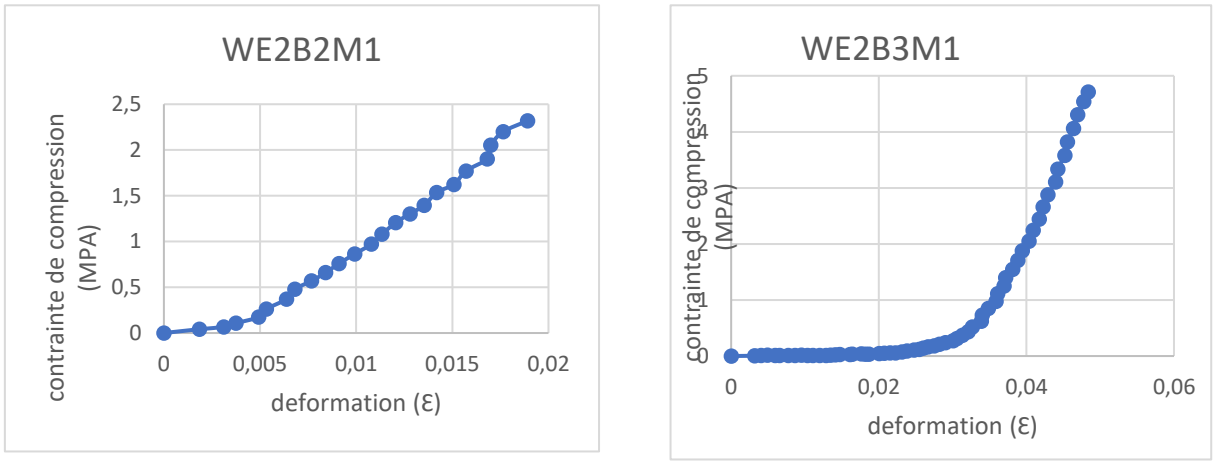
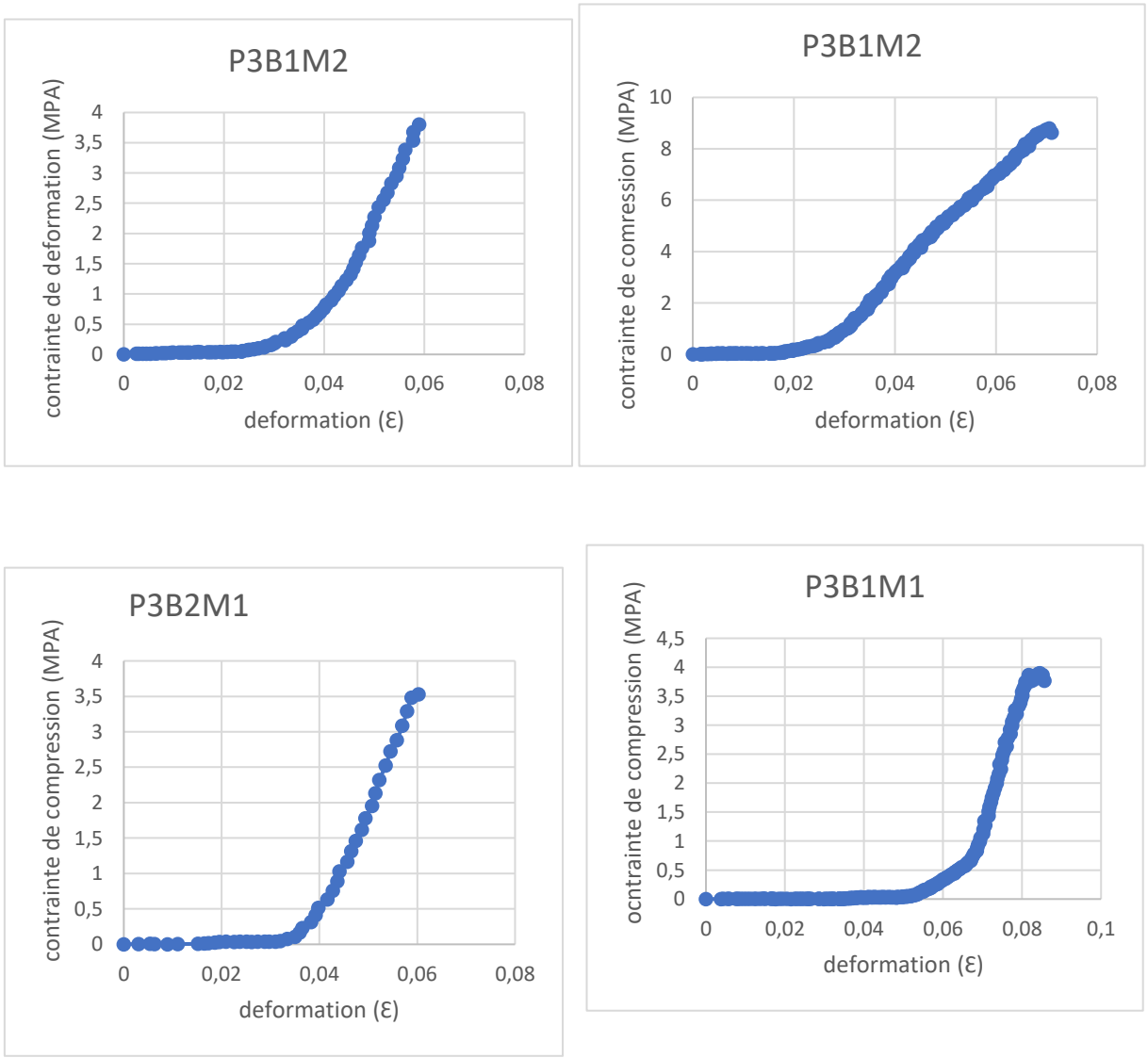
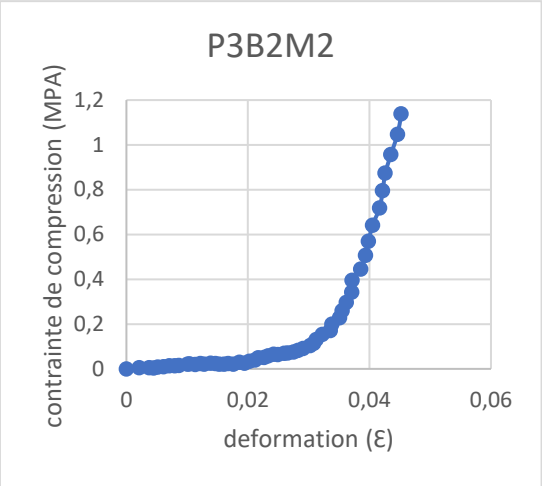
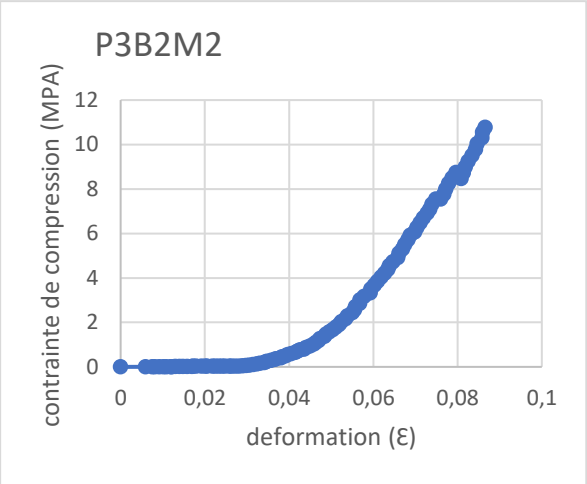
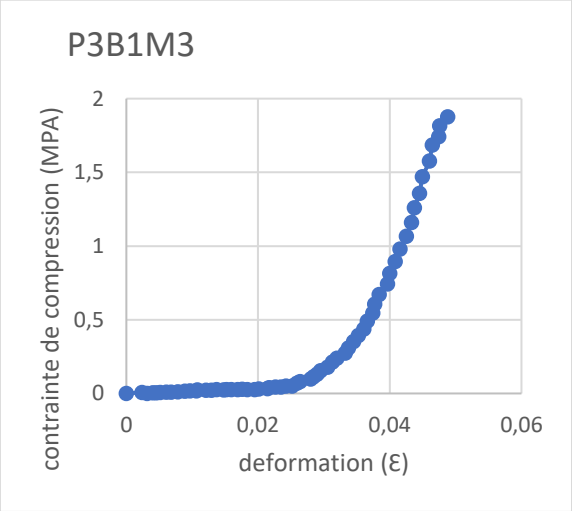


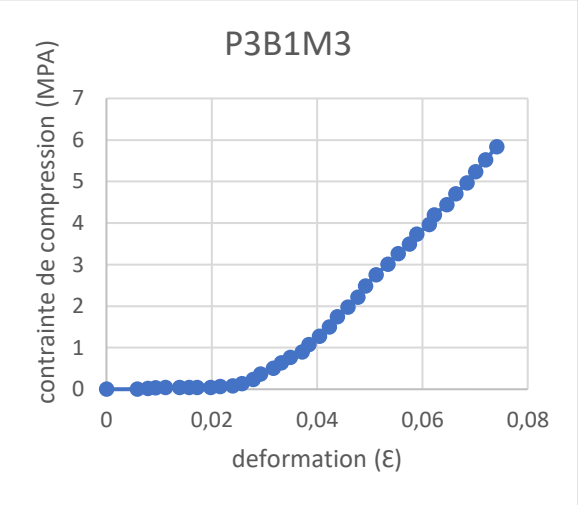
Figure 3.12: Courbes Contrainte-Déformation pour chaque muret.

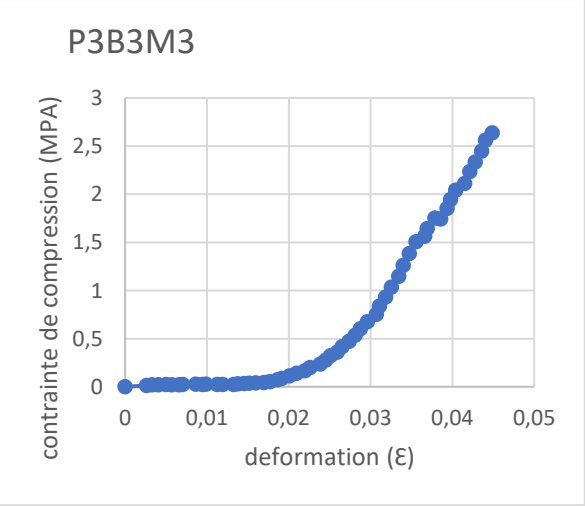


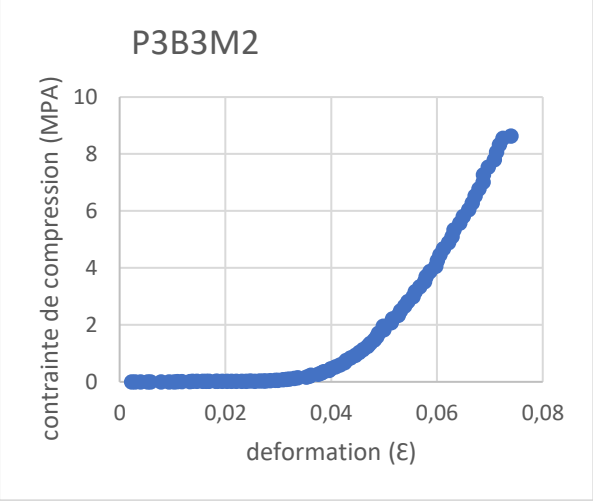

P3B2M2
contrainte de compression (MPA)
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,02
0,04
0,06
deformation (Ɛ)


P3B2M2
contrainte de compression (MPA)
12
10
8
6
4
2
0
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
deformation (Ɛ)


P3B1M3
contrainte de compression (MPA)
2
1,5
1
0,5
0
0
0,02
0,04
0,06
deformation (Ɛ)


P3B1M3
contrainte de compression (MPA)
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,02
0,04
0,06
0,08
deformation (Ɛ)


P3B3M3
contrainte de compression (MPA)
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
deformation (Ɛ)


P3B3M2
contrainte de compression (MPA)
10
8
6
4
2
0
0
0,02
0,04
0,06
0,08
deformation (Ɛ)

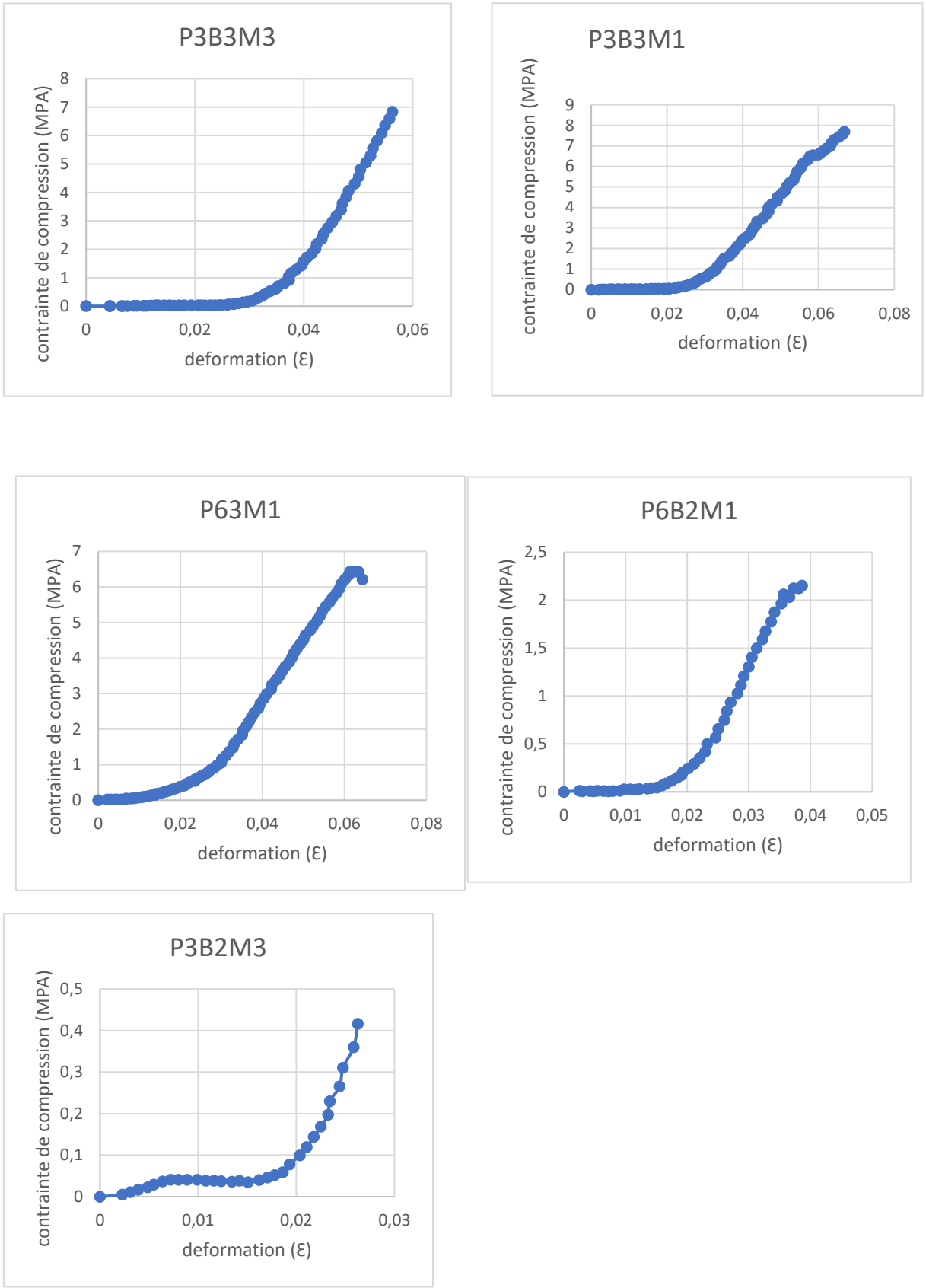


Figure 3.13: Courbes Contrainte-Déformation pour chaque prisme

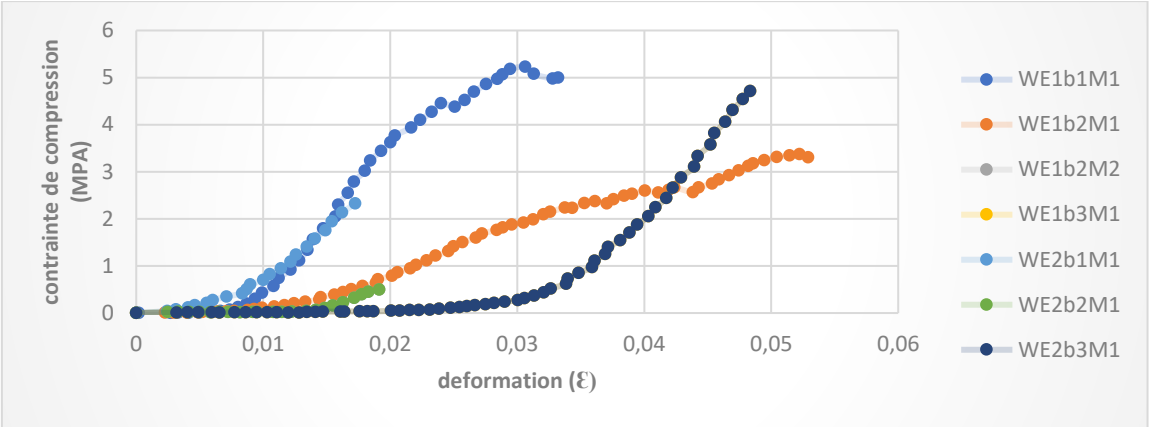


figure 3.14 : Courbes Contrainte-Déformation des Différents Types de Murets en Maçonnerie

Ce graphique présente le comportement en compression d'une série de murets en maçonnerie, identifiés par leur type (WE1 ép. 105mm, WE2 ép. 205mm, tous deux H=6 briques) et la combinaison de briques (B1, B2, B3) et de mortiers (M1, M2, M3) utilisés. Les courbes révèlent des performances variées : le muret WE1b1M1 (brique moyenne B1, mortier fort M1, épaisseur 105mm) affiche la résistance la plus élevée (~5,3 MPa) et une bonne rigidité. Le muret WE2b3M1 (brique forte B3, mortier fort M1, épaisseur 205mm) montre également une forte rigidité initiale et une résistance notable (~4,8 MPa). En revanche, plusieurs murets, notamment WE1b3M1 (anomalie), ainsi que les murets WE2 (plus épais) combinés avec les briques plus faibles B1 ou B2 (WE2b1M1, WE2b2M1), présentent des résistances et des rigidités très faibles, souvent inférieures à 1 MPa, soulignant une sensibilité de ces assemblages plus massifs ou élancés aux propriétés des briques.

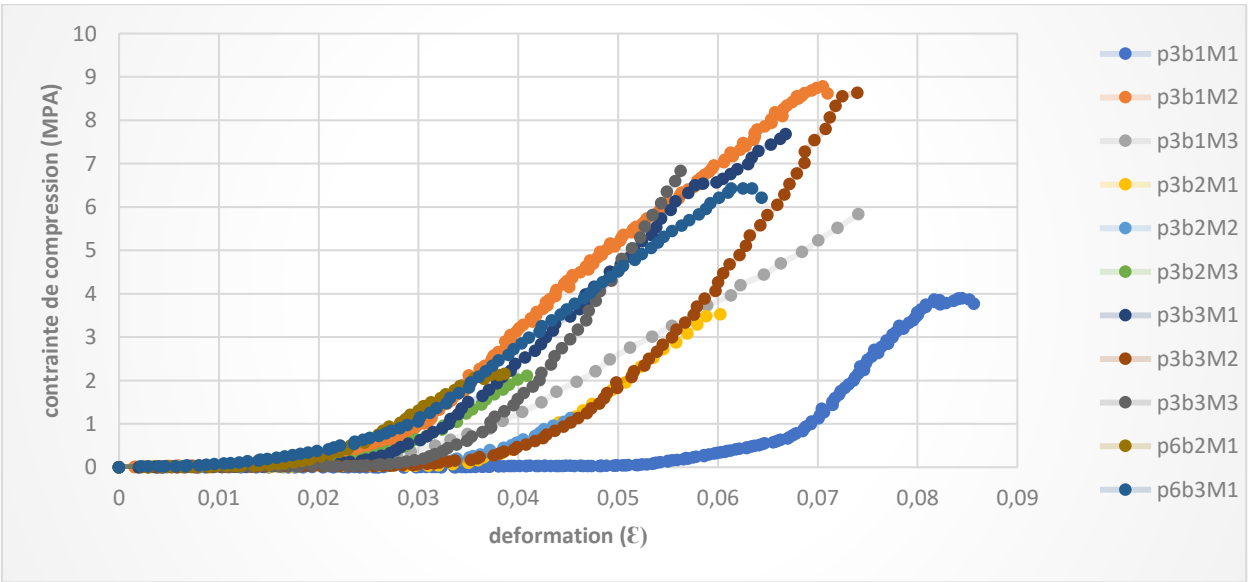


figure 3.15 : Courbes Contrainte-Déformation des Différents Types de Prismes en Maçonnerie.

Ce graphique illustre le comportement mécanique en compression d'une variété de prismes en maçonnerie, constitués de trois (p3) ou six (p6) briques, et assemblés avec différentes combinaisons de types de briques (B1, B2, B3) et de mortiers (M1, M2, M3). Les courbes contrainte-déformation révèlent une hétérogénéité marquée : les prismes fabriqués avec la brique la plus résistante (B3) et des mortiers de bonne qualité (M1, M2) atteignent les plus hautes résistances (jusqu'à ~9 MPa) et présentent une rigidité initiale élevée. Inversement, l'utilisation de la brique la plus faible (B2) limite considérablement la résistance des prismes (autour de 3-3,5 MPa), même avec un mortier fort, tandis que la courbe du prisme p3b1M1 se distingue par une résistance modérée mais une déformabilité exceptionnellement grande. L'influence de la hauteur du prisme (p3 vs p6) sur la résistance maximale semble moins significative que celle des matériaux constitutifs pour les cas présentés.

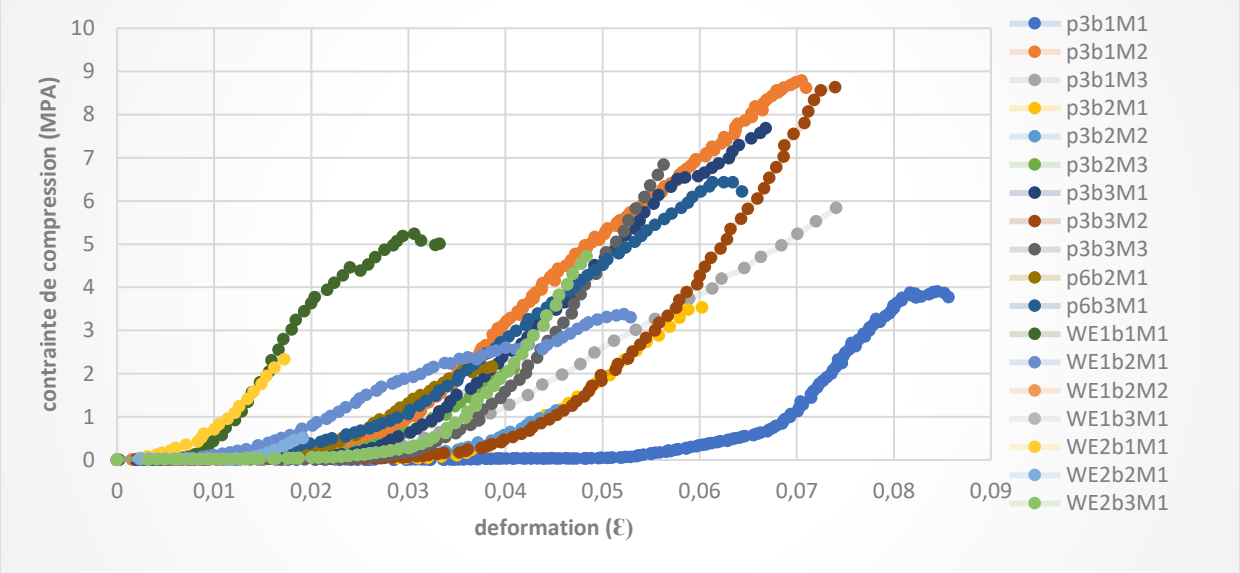


figure 3.16 : Analyse Comparative du Comportement Contrainte-Déformation des Prismes et Murets.

Ce graphique superpose les courbes contrainte-déformation de l'ensemble des éprouvettes testées – prismes (p3, p6) et murets (WE1, WE2) – permettant une comparaison directe de leur comportement mécanique en compression. Il confirme la tendance générale où les prismes, en particulier ceux fabriqués avec des matériaux de haute résistance (ex: p3b3M2, p3b3M1), atteignent des résistances maximales (~8-9 MPa) et des rigidités initiales supérieures à celles de la plupart des murets. Cependant, le muret WE1b1M1 (brique moyenne B1, mortier fort M1, épaisseur 105mm) se distingue en atteignant une résistance (~5,3 MPa) et une rigidité

compétitives, surpassant même certains prismes de moindre qualité. Les murets WE2 (plus épais), surtout avec des briques faibles, ainsi que le muret WE1b3M1 (anomalie), montrent les performances les plus faibles, soulignant l'impact combiné des matériaux et de la géométrie de l'éprouvette sur la réponse globale.

III.4 : corrélations des murets avec les prismes :

Dans la pratique de l'ingénierie de la maçonnerie, il est souhaitable de pouvoir estimer la performance d'éléments structuraux à partir d'essais sur des spécimens plus petits et plus faciles à confectionner. La section suivante aborde cette problématique en analysant les corrélations entre les résistances à la compression des murets et des prismes. Cette analyse permettra de déterminer des facteurs de conversion potentiels et d'évaluer la pertinence des essais sur prismes pour caractériser le comportement des murets.

Tableau 3.3 : Propriétés de déformation des éprouvettes testées.

Type de brique	Les murets et les prismes	Module de Young (MPa)	Déformation (ε)	Contrainte maximale (MPa)
BRIQUE 1	P3M1	29.71	0.0963	3.767
	P3M2	104.34	0,00.075	8.795
	P3M3	10.92	0,0825	6.018
	P6M1		----	------
	WE1M1	91.52	0.0287	2.558
	WE2M2	103.81	0.0187	0.543
BRIQUE 2	P3M1	41.17	0.07	3,408
	P3M2	34.05	0,0537	1.105
	P3M3	36.05	0,0475	1.999
	P6M1	42.99	0.0413	2.052
	WE1M1	11.74	0.055	1.561

	WE2M1	**17.47**	**0.0213**	**0.111**
BRIQUE 3	**P3M1**	**92.29**	**0,0687**	**7.921**
	P3M2	**82.46**	**0,085**	**8.953**
	P3M3	**85.03**	**0,065**	**7.134**
	P6M1	**82.75**	**0.0675**	**6.631**
	WE1M1	**6.59**	**0.0563**	**2.366**
	WE2M2	**62.93**	**0.0562**	**1.129**

L'analyse des résultats présentés dans ce tableau révèle que la résistance à la compression des prismes est généralement supérieure à celle des murets. De plus, il a été observé que la variation de la section transversale des murets induit une modification de leur résistance à la compression. En conséquence, il ressort que les résistances à la compression les plus élevées ont été mesurées sur les éprouvettes de type prisme.

Tableau 3.4 : Résistance à la compression des muretes et prismes

Résistance à la compression des murets (f'm_wallette) (MPa)		**Résistance à la compression des prismes (f'm_prism) (MPa)**	
WE1M1B1	**5.1705**	**P3B1M1**	**3.76688**
WE1M1B2	**3.46**	**P3B1M2**	**8.7435**
WE1M2B2	**3.512**	**P3B1M3**	**5.8374**
WE2M1B2	**1.96**	**P3B2M1**	**3.5299**
WE2M1B1	**2.39**	**P3B2M2**	**1.1378**
WE2M1B2	**0.5003**	**P3B2M3**	**2.1091**
WE2M1B3	**4.76**	**P3B3M1**	**7.5686**
WE1M2B3	**6.7**	**P3B3M2**	**8.6336**
WE1M3B1	**3.71**	**P3B3M3**	**6.8324**
WE1M3B3	**5.213**	**P6B2M1**	**2.1531**
		P6B3M1	**6.4253**

L'analyse des résistances à la compression issues du Tableau 3.4 révèle une prédominance générale des prismes sur les murets lorsque des matériaux identiques sont comparés. En effet, les prismes P3 affichent systématiquement des résistances supérieures à celles des murets WE1 ou WE2, avec des rapports muret/prisme P3 variant typiquement entre 0,56 et 0,78, à l'exception d'un cas atypique (P3B1M1). De même, les prismes P6 (plus minces mais de même hauteur que les murets) se montrent plus résistants que les murets WE2 (plus épais), avec des rapports muret WE2/prisme P6 de 0,74 et 0,91 pour les combinaisons de matériaux correspondantes. Par ailleurs, une comparaison entre les murets de différentes épaisseurs indique que le muret WE1 (plus mince, ép. 105mm) tend à être plus résistant que le muret WE2 (plus épais, ép. 205mm)

pour des matériaux similaires. Globalement, ces observations où la résistance des murets est généralement inférieure à celle des prismes sont en accord avec les attentes théoriques et soutiennent une corrélation muret/prisme avec un coefficient inférieur à l'unité.

- Déformation Élastique (Elastic Strain) et Déformation au Pic (Peak Strain) :

La déformation élastique est la déformation à la limite de la proportionnalité (ou du comportement élastique), tandis que la déformation au pic est celle à la contrainte maximale.

- Ductilité (Peak Strain / Elastic Strain) et Ductilité Moyenne :

La ductilité ici est calculée comme le rapport entre la déformation au pic et la déformation élastique. Une valeur proche de 1 indique peu de déformation plastique avant le pic. Une valeur

Tableau 3.5 : caractéristiques liées à la manière dont un matériau se déforme sous contrainte échantillons soumis à des essais.

unité	Type échantillon	Modules d'Élasticité (MPA)			• Déformation Élastique			Déformation au Pic			• Ductilité			"Ductilité moyenne
		MO1	MO2	MO3	MO1	MO2	MO3	MO1	MO2	MO3	MO1	MO2	MO3	
	Prisme3	29.71	104.34	10.92	0.076	0.05	0.057	0,077	0,06	0,066	1.01	1.2	1.16	1.12
	Prisme6													
	murette	91.52			0.034			0.023			0.68			
	Prisme3	41.17	34.05	36.05	0.051	0.02	0.035	0,056	0,043	0,038	1.1	2.15	1.09	1.45
	Prisme6	42.99			0.03			0.033			1.1			
	murette	11.74	11.33		0.017	0.015		0.044	0.018		2.5	1.2		
	Prisme3	92.29	82.46	85.03	0.049	0.062	0.048	0,055	0,068	0,052	1.12	1.1	1.08	1.1
	Prisme6	82.75			0.046			0.054			1.17			
	murette	6.59			0.042			0.045			1.07			
	Prisme3	29.71	104.34	10.92	0.076	0.05	0.057	0.077	0.06	0.066	1.01	1.2	1.16	1.12
	Prisme6													
	murette	103.81			0.013			0.015			1.15			
	Prisme3	41.17	34.05	36.05	0.051	0.02	0.035	0.056	0.043	0.038	1.1	2.15	1.09	1.45
	Prisme6	42.99			0.03			0.033			1.1			
	murette	17.47			0.017			0.017			1			
	Prisme3	92.29	82.46	85.03	0.049	0.062	0.048	0.055	0.068	0.052	1.12	1.1	1.08	1.1
	Prisme6	82.75			0.046			0.054			1.17			
	murette	62.93			0.042			0.045			1.07			

plus élevée suggère plus de déformation au-delà de la limite élastique avant d'atteindre la charge maximale.

Modules d'Élasticité des Murettes vs Prismes :

Pour B1M1, les murettes (91.52 et 103.81 MPa) sont beaucoup plus rigides que le Prisme3 B1M1 (29.71 MPa, si l'on ignore le 104.34 pour B1M2). C'est surprenant.

Pour B2M1, les murettes (11.74 et 17.47 MPa) sont beaucoup moins rigides que les Prisme3 (41.17 MPa) et Prisme6 (42.99 MPa).

Pour B3M1, la murette du second bloc (62.93 MPa) est moins rigide que les Prisme3 (92.29 MPa) et Prisme6 (82.75 MPa), tandis que celle du premier bloc (6.59 MPa) l'est encore bien plus. Ductilité Limitée pour la Plupart des Assemblages : La majorité des éprouvettes montrent

une ductilité faible (proche de 1.0-1.2), indiquant un comportement qui reste largement dans le domaine élastique jusqu'à la contrainte de pic.

Les combinaisons Prisme3 B2M2 (2.15) et Murette B2M1 (premier bloc, 2.5) se distinguent par une ductilité plus élevée, suggérant une capacité de déformation plastique avant le pic plus importante. Ces deux cas impliquent la brique la plus faible B2.

Le **Tableau 3.5** révèle que la brique B3 (forte résistance) confère la plus grande rigidité (module d'élasticité) aux prismes, tandis que les murettes présentent une variabilité de rigidité plus complexe, avec des valeurs parfois étonnamment élevées pour la brique B1 (moyenne) ou faibles pour la brique B3. La plupart des éprouvettes montrent une ductilité limitée (rapport déformation au pic/élastique proche de 1-1.2), à l'exception notable des prismes P3B2M2 et de certaines murettes B2M1/B1M1 qui affichent une plus grande capacité de déformation post-élastique. Les déformations au pic pour les murettes sont souvent plus faibles que pour les prismes. Des incohérences dans les modules (ex: P3B1M2) et les données de murettes (surtout B3 premier bloc) suggèrent une forte variabilité expérimentale ou des points nécessitant vérification.

III.5 : Calcul de la contrainte par l'Eurocode 6

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

$$\boldsymbol{f_k = K}.f_b^{\alpha} \,.\, f_m^{\beta}$$

$$\boldsymbol{f_k} = 0.55.\, f_b^{0.65}.\, f_m^{0.25} \qquad (\mathbf{3.2})$$

Où

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

K, α et β : Constantes déterminées en fonction de la maçonnerie du mortier utilisés, tirés de la

NBN EN 1996-1-1 ANB. Dans notre cas K=0.55, α=0.65, β=0.25

f_b: Résistance à la compression moyenne normalisée des blocs de maçonnerie en béton, en MPa.

$f_{b1} = 4{,}18(MPa)$, $f_{b2} = 2{,}32\ (MPa)$ et $f_{b3} = 14{,}06\ \ (MPa)$.

f_m: Résistance à la compression du mortier, **en MPa. (f_{m1}=12,18 MPa , f_{m2}=7 MPa ,f_{m3}=0,62MPa).**

III.6 :La contrainte de compression expérimentale :

Nous avons calculé la contrainte de compression par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{f}{s} \qquad (3.3)$$

Où

F : force exercée par le vérin (N).

S : Surface exposée à la compression $(mm2)$.

Tableau 3.6 : Validation des Formules de l'Eurocode 6 pour la Résistance à la Compression (f_k) des Prismes et Murets.

Type de brique	LES MURETS ET LES PRSMES	F_K Expérimentale (MPa)	F_K Eurocode 6 (MPa)
BRIQUE 1	P3M1	3.766	3.55
	P3M2	8.7435	2.316
	P3M3	5.8374	0.596
	P6M1	3.766	3.55
	P6M2	8.7435	2.316
	P6M3	5.8374	0.596
	WE1M1	5.2305	
	WE2M1	2.3251	

BRIQUE 2	**P3M1**	**3.5299**	**2.896**
	P3M2	**1.1378**	**1.999**
	P3M3	**2.1091**	**0.515**
	P6M1	**2.1531**	**2.896**
	P6M2	**1.1378**	**1.999**
	P6M3	**2.1091**	**0.515**
	WE1M1	**3.3749**	
	WE2M1	**0.5003**	
BRIQUE 3	**P3M1**	**7.5686**	**4.265**
	P3M2	**8.6336**	**2.944**
	P3M3	**6.8324**	**0.758**
	P6M1	**6.4253**	**4.265**
	P6M2	**8.6336**	**2.944**
	P6M3	**6.8324**	**0.758**
	WE1M1	**4.7122**	
	WE2M1	**4.6122**	

Le Tableau 3.6 compare les résistances caractéristiques à la compression (f_k) obtenues expérimentalement pour divers prismes (P3, P6) et murets (WE1, WE2) avec les valeurs calculées selon l'Eurocode 6, en fonction de trois types de briques et de trois types de mortiers (implicitement M1, M2, M3 par ordre décroissant de résistance pour les prismes). De manière générale, l'Eurocode 6 semble fournir des estimations de f_k qui sont souvent inférieures aux valeurs expérimentales pour les prismes P3, particulièrement lorsque des mortiers de résistance moyenne (M2) ou faible (M3) sont utilisés avec des briques de bonne qualité (B1, B3), suggérant une approche conservative de la norme pour ces configurations. Pour les murets, les valeurs expérimentales sont présentées principalement pour les assemblages avec le mortier M1, et leur comparaison directe avec des valeurs Eurocode spécifiques aux murets n'est pas explicitée dans les colonnes fournies, rendant cette analyse moins directe sans informations supplémentaires sur le calcul Eurocode pour les murets.

Tableau 3.7 : Analyse du Facteur de Corrélation K entre les Résistances à la Compression des Murets et des Prismes.

Type de brique		**LES MURETS ET LES PRSMES**	$\mathbf{K = \frac{fm\,(muret)}{fm(prisme)}}$
BRIQUE 1	**Expérimentale**	**Prisme type 1**	0.511
		Muret E1	
		Prisme type 2	0.410
		Muret E2	
BRIQUE 2	**Expérimentale**	**Prisme type 1**	0.459
		Muret E1	
		Prisme type 2	0.608
		Muret E2	
BRIQUE 3	**Expérimentale**	**Prisme type 1**	0.91
		Muret E1	
		Prisme type 2	0.820
		Muret E2	

Ce tableau présente le rapport (K) entre la résistance à la compression des murets (E1 ou E2) et celle des prismes (type 1 ou type 2), pour trois types de briques.

Pour la Brique 1 (résistance moyenne), le rapport K est de 0,511 lorsque le muret E1 est comparé au prisme de type 1 (probablement P3), et de 0,410 lorsque le muret E2 est comparé au prisme de type 2 (probablement P6). Dans les deux cas, K est significativement inférieur à 1, indiquant que les murets sont moins résistants que les prismes, avec une réduction plus marquée pour le muret E2 (plus épais) comparé au prisme P6.

Pour la Brique 2 (faible résistance), le rapport K est de 0,459 (Muret E1 / Prisme type 1) et de 0,608 (Muret E2 / Prisme type 2). Encore une fois, les murets sont moins performants que les prismes. Il est intéressant de noter que le rapport K est légèrement meilleur pour la comparaison Muret E2 / Prisme P6 que pour Muret E1 / Prisme P3, ce qui pourrait suggérer une interaction complexe entre l'épaisseur du muret et le type de prisme de référence pour cette brique faible.

Pour la Brique 3 (forte résistance), les rapports K sont les plus élevés : 0,91 (Muret E1 / Prisme type 1) et 0,820 (Muret E2 / Prisme type 2). Bien que toujours inférieurs à 1, ces valeurs indiquent que les murets se rapprochent davantage des performances des prismes lorsque des briques de haute qualité sont utilisées. Le muret E1 (plus mince) avec le prisme P3 montre le rapport le plus favorable.

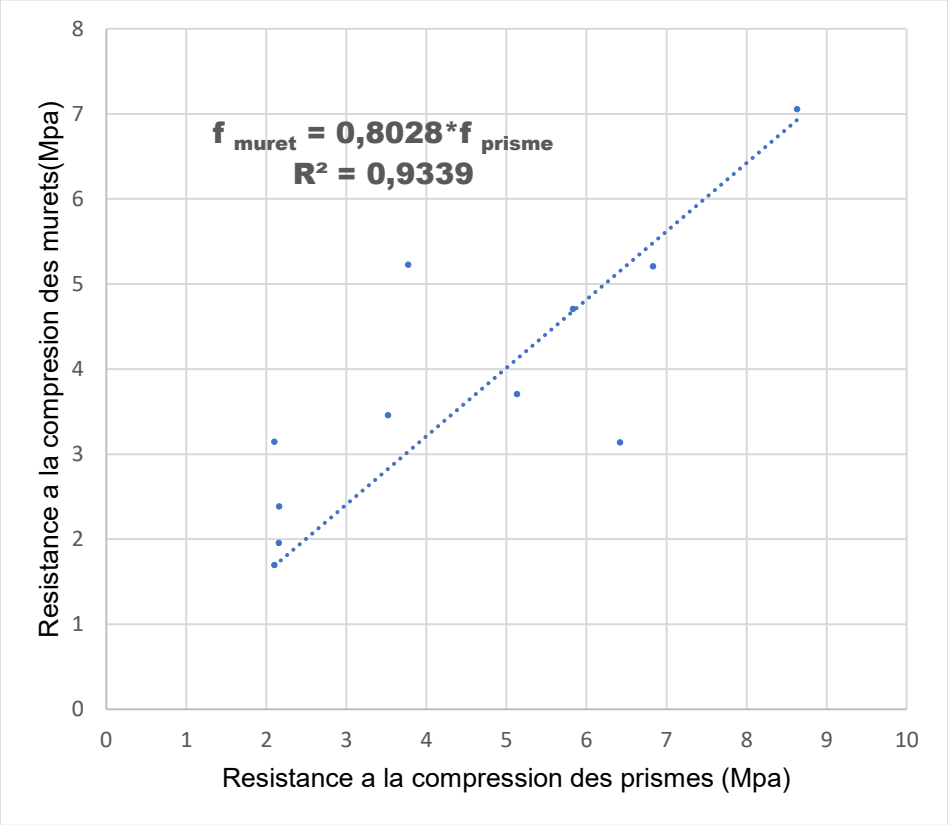


Figure 3.17: Relation entre la résistance à la compression des prismes de maçonnerie et la résistance à la compression des murets.

- Corrélation entre la Résistance des Murets et des Prismes en Maçonnerie

Ce graphique illustre la relation entre la résistance à la compression des murets de maçonnerie (axe Y, en MPa) et la résistance à la compression des prismes de maçonnerie (axe X, en MPa), basée sur un nouvel ensemble de données expérimentales ou une sélection différente des données précédentes.

On observe toujours une corrélation positive : lorsque la résistance des prismes augmente, celle des murets tend également à augmenter.

Les points de données sont dispersés autour d'une nouvelle ligne de tendance (régression linéaire) pointillée.

L'Équation de Régression : f_muret = 0,8028 * f_prisme

Ce coefficient suggère que, selon ce modèle et pour ces données spécifiques, la résistance à la compression des murets est en moyenne environ 80,28 % de celle des prismes.

Observation Importante : Un coefficient inférieur à 1 (comme 0,8028) est beaucoup plus conforme aux attentes théoriques et aux observations courantes dans la littérature concernant la maçonnerie. Généralement, la résistance d'un assemblage de maçonnerie tend à diminuer avec l'augmentation de la taille de l'éprouvette (muret vs prisme) en raison d'effets d'échelle, d'une plus grande probabilité de défauts, et de modes de rupture plus complexes.

Coefficient de Détermination (R^2) : $R^2 = 0,9339$

Le R^2 est atteignant 0,9339. Cela signifie qu'environ 93,39 % de la variabilité de la résistance des murets peut être "expliquée" par la variabilité de la résistance des prismes selon ce modèle linéaire.

C'est une valeur de R^2 très élevée, indiquant une très forte corrélation linéaire entre les deux variables pour cet ensemble de données. La résistance des prismes semble être un excellent prédicteur de la résistance des murets dans ce cas précis.

Dispersion des Données :

Malgré le R^2 très élevé, il y a toujours une certaine dispersion des points autour de la ligne de régression. Aucun des points ne se situe parfaitement sur la ligne.

Par exemple, pour une résistance des prismes d'environ 3,7 MPa, le muret a une résistance d'environ 5,3 MPa, ce qui est bien au-dessus de ce que la ligne de tendance prédirait (environ 0,8028 * 3,7 ≈ 2,97 MPa). Ce point influence probablement la régression, tirant la ligne vers le haut dans cette zone.

Pour une résistance des prismes d'environ 6,3 MPa, le muret a une résistance d'environ 3,2 MPa, ce qui est bien en dessous de la prédiction de la ligne (environ 0,8028 * 6,3 ≈ 5,06 MPa).

Ces écarts par rapport à la ligne suggèrent que même si la tendance globale est forte, des facteurs spécifiques à certaines combinaisons de matériaux ou à certaines éprouvettes individuelles peuvent influencer le rapport de performance muret/prisme.

Ce graphique de corrélation présente une relation linéaire très forte ($R^2 = 0,9339$) entre la résistance à la compression des prismes et celle des murets pour l'ensemble de données considéré. L'équation f_muret = 0,8028 * f_prisme indique que, pour ces essais, la résistance des murets est en moyenne d'environ 80 % de celle des prismes.

Ce résultat est plus aligné avec les observations typiques en ingénierie de la maçonnerie, où les éléments plus grands tendent à avoir des résistances normalisées plus faibles.

Conclusion

Ce chapitre a permis de caractériser de manière approfondie le comportement en compression de la maçonnerie à travers l'étude de prismes et de murets constitués de diverses combinaisons de briques et de mortiers. L'analyse des courbes contrainte-déformation a révélé l'influence prépondérante des propriétés des matériaux constitutifs, la résistance de la brique étant souvent le facteur limitant, et a mis en évidence des différences notables de rigidité et de ductilité entre les configurations. Les comparaisons directes ont généralement montré que les prismes atteignent des résistances à la compression supérieures à celles des murets fabriqués avec les mêmes matériaux, avec un impact significatif de la géométrie des éprouvettes, notamment l'épaisseur et l'élancement des murets. Bien qu'une corrélation globale ait pu être établie, les rapports de résistance muret/prisme (facteur K) varient considérablement selon les matériaux et la géométrie, soulignant la complexité de la transposition des résultats d'essais sur petites éprouvettes à des éléments de plus grande taille et la nécessité d'approches nuancées pour la prédiction de la performance.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette thèse a été consacrée à l'étude expérimentale du comportement en compression de la maçonnerie de briques perforées, en analysant et en corrélant les performances de prismes et de murets constitués de diverses combinaisons de briques (B1, B2, B3) et de mortiers (M1, M2, M3). Les investigations menées ont permis de dégager des conclusions fondamentales sur la résistance, la déformabilité, les modes de rupture et les relations entre ces deux types d'assemblages.

Il a été démontré que les propriétés des matériaux constitutifs, notamment la résistance de la brique et la qualité du mortier (le mortier M2 s'étant souvent révélé optimal avec les briques B1 et B3), ainsi que les paramètres géométriques des éprouvettes (élancement des prismes et épaisseur des murets) exercent une influence déterminante sur la performance globale en compression. Les courbes contrainte-déformation ont révélé un comportement non linéaire caractéristique, avec des combinaisons de matériaux telles que B1M2 et B3M2 se distinguant par une résistance élevée et une ductilité appréciable.

Conformément aux attentes, les prismes ont généralement présenté des résistances à la compression supérieures à celles des murets pour des matériaux identiques, illustrant l'effet d'échelle et l'impact d'une géométrie plus compacte favorisant une meilleure répartition des contraintes. Les modes de rupture observés, bien que distincts entre prismes (principalement fissuration verticale des joints) et murets (mécanismes plus complexes), ont tous souligné le rôle crucial de l'interface brique-mortier. L'analyse des corrélations entre les résistances des prismes et des murets, ainsi que la confrontation des résultats expérimentaux avec les prédictions de l'Eurocode 6, ont confirmé la pertinence des essais sur prismes comme indicateurs, tout en soulignant la nécessité de considérer les spécificités des matériaux locaux et les limitations des modèles analytiques pour prédire avec précision le comportement d'éléments de plus grande échelle.

En conclusion, la présente recherche met en évidence que la performance en compression des assemblages de maçonnerie résulte d'une interaction multifactorielle complexe impliquant les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs, la configuration géométrique des éléments et la qualité de l'interface brique-mortier. Une appréhension approfondie de l'influence et de l'interdépendance de ces paramètres s'avère primordiale pour l'optimisation de la conception structurale et l'amélioration de la durabilité des ouvrages en maçonnerie. Les résultats obtenus

suggèrent des pistes pour une meilleure harmonisation entre les investigations expérimentales et les cadres normatifs, dans l'optique d'une évaluation plus fiable de la sécurité et de l'efficacité structurelle.

REFERRENCES

REFERRENCES :

1. **BAUD :** « La construction du bâtiment : Maçonnerie et béton armé », Edition Dunod, 1990.
2. **Carter et Stafford:** "Structural behavior of masonry structural in filled Frames subjected to racking loads", International conference on Masonry structural Systems, College of Engineering, University of Texas, Austin, USA, May, 1969, pp. 226-233.
3. **(CHERRABI.A, 1.).**
4. **DESTRAC et coll. :** "Memo Technique en Génie Civil", Editions Castilla, 2003.
5. **DRYSDALE R., ESSAWY A.,** "Out-of-Plane Bending of Concrete Block Walls", J. Struct. Eng., 114(1), 1988, 121–133.
6. **DTR.C2-45 :** « Règles de conception et de calcul des maçonneries », Document Technique Réglementaire, CNERIB, Alger, (1997) ,62 p.
7. **DTU :** « Parois et murs en maçonnerie de petits éléments », N°20.1, cahiers des clauses techniques, CSTB, Paris, France, septembre, (1985).
8. **EUROCODE6:** « Design of masonry structures », Part 1-1: Rules for reinforced and unreinforced masonry, (2009) ,51p.
9. **GAZZOLAE.A., DRYSDALE R.G., ESSAWY A.S.,** "Bending of concrete masonry
10. Walls at different angles to the bed joint", Proc. 3rd North. Amer. Mas. Conf., Arlington, TX, USA, Paper 27, 1985.
11. **GAZZOLA E.A., DRYSDALE R.G.,** "A component failure criterions for blockwork in flexure", Proc., Structures ASCE, S.C. Anand, éd., New Orléans, 1986, 134-153, 1986.
12. **GERTIN, :** Comportement sismique d'un mur en maçonnerie armée entièrement rempli de coulis, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées, 2014, Université Sherbrooke (Québec), Canada, 149 p.
13. **HABER R.A., SMITH P.A.,** «Overview of Traditional Ceramics», New Brunswick, New Jersey, Ceramic Casting Program, Rutgers, State University of New Jersey, USA, 1987.
14. **HOUTI, F.B.,** « Comportement des structures en Maçonnerie sous sollicitation uni axiale », Mémoire de Magister, 2002, Université Abou BEKR BELKAÏD, Tlemcen, Algérie, 93 p.
15. **KIRTSCHIG.K., KASTEN.D.,** « Partial surface load of masonry », Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, USA, 1979.
16. **MARCEL H., NICOLAS J., ET COLL.,** « Dimensionner les ouvrages en maçonnerie
17. »,
18. Guide d'application, Vol. 3, 12 p., 2009.

19. **MEZIGHECHE.N.,** « Comportement des remplissages dans les structures sous différentes sollicitations : cas de la maçonnerie », Mémoire de Magister, 2010, Université ABOUBADJI Mokhtar, Annaba, Algérie, 174 p.
20. **PAGE A.W., HENDRY A.W.,** « Design rules for concentrated loads on masonry », Structural Engineer, 66 p, 1987.
21. **PAGE A.W., ALI S.,** « Non linear finite element analyses of masonry », Proc. Inst. Civil Eng., Vol.83, 1987.
22. **PLUIJM Vd.,** Material properties of masonry and its components under tension and shear.
23. In: V.V. Nais S, Saskatchewan, editor. Proc 6th Canadian masonry symposium, p. 67586, Canada (1997).
24. **PLUIJM Vd.,** Shear behavior of bed joints. In: Harris AAHAHG, editor. Proc 6thNorth American Masonry Conf. Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania, p. 12536, USA (1999).
25. **WIELAND R.,** «Design of Masonry Structures According Eurocode 6», Technical University of Kaiserslautern, 136 p, 1996.
26. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1961/methodes-dessais-des-ciments-partie-1-determination-des-resistances/fa184622/57803
27. https://www.infociments.fr/ciments/principaux-essais-sur-les-ciments
28. https://fr.scribd.com/document/560300317/Confection-eprouvettes-mortier-normal-21-12-28-tp2
29. https://fr.scribd.com/document/368405370/Essai-Sur-Mortier-Normal
30. https://fr.scribd.com/document/485575299/TP-MATRIAUX-RESISTANCE-MEC-CIMENT