REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE – Dr YAHIA FARES- MEDEA
جامعة الدكتور يحي فارس -المدية-

FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
كلية العلوم التكنولوجية

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
دائرة الهندسة المدنية

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

مذكرة نهاية التدرج

Pour l'obtention du diplôme
DE MASTER

Option : STRUCTURE

Thème

VALORISATION DE LA CHAUX COMME LIANT DANS LES MORTIERS

Présenté par :

BENKALI ZIN-EDDINE

Promoteur :

M^{me}. BENHADJI MAISSEN

Promotion-Juin 2017-


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu, le tout puissant qui ma permis d'apprendre à lire et à connaître le vrais sens de la vie et qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Au terme de cette étude, j'exprime ma profonde gratitude envers ma directrice de thèse Madame BENHADJI Maissane enseignante à l'institut d'architecture et d'urbanisme de l'université SAAD DAHLEB DE BLIDA 1, que malgré ses nombreuses responsabilités a su à travers ses orientations, ses conseils et sa disponibilité permanente assurer ma formation scientifique ;Je ne saurai oublier la totale confiance qu'elle ma accordée lors de la réalisation de la partie expérimentale de la thèse et les qualité humaines dont elle fait preuve tout au long de ce travail.

Je voudrai remercier Monsieur Boukessani Omar enseignant à l'université YAHIA FARES de Médéa, qui ma fait l'honneur d'accepter la présidence du juré qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect
Ainsi que tout les membres du juré.

Ce travail n'a pu être réalisé que grâce à la collaboration du personnel du HALL TECHNOLOGIQUE DE Médéa, particulièrement M^{elle} Boukelkal Djamila, je les remercie amicalement.

Je tien à remercier toute la grande famille du C.N.R.I.B à leur tête Monsieur Bendaoud Mohamed

Enfin Je remercie Tous ceux et toutes celle qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail en particulier mon amie Boulesnam Rafik.

Dédicaces

Je dédie ce Modeste travail à:

A la mémoire de mes grands parents

Mon père : *Pour tous ses sacrifices, sans lesquels, je ne serai jamais arrivé à cette consécration, l'exemple constant qu'il ma toujours donné, d'une vie de droiture, sa passion de travail, ont toujours suscité en moi le désir de suivre sa voie.*

Ma mère : *Avec toute sa tendresse, en signe d'affection et de reconnaissance, pour son dévouement exemplaire et pour les énormes sacrifices qu'elle m'a consentis.*

Ma femme : *pour son soutien indéfectible et sa patience spécialement dans les moments difficiles.*

A mes quatre enfants
A mes frères et sœurs

A tous les enseignants et les étudiants du département de Génie Civil de l'université YAHIA FARES DE Médéa.

BENKALI ZIN-EDDINE

Tables des matières

Introduction générale

Chapitre I : RECHERCHE BIBLIGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Mortiers

I.1. Introduction : 1

I.2. Aperçue historique : 1

1.3. Définition du mortier : 7

I.4. Type de mortier : 7

I.4.1. Mortiers hydrauliques : 7
I.4.1.1. Mortiers de chaux : 8
I.4.1.2. Mortier en terre : 8
I.4.2. Mortiers aériens : 9
I.4.2.1. Mortier de chaux aérienne : 9
I.4.2.2. Mortier de plâtre : 10
I.5. Constituants des mortiers : 11

I.5.1. Les liants : 11
I.5.1.1. La chaux : 11
a. Chaux aériennes : 13
b. Chaux hydraulique (XHN) : 13
c. Normalisation des chaux : 14
I.5.1.2. Les ciments : 14
I.5.1.3. Le plâtre : 17
I. 5.1.4. L'argile : 17
I.6. Les agrégats : 18

I.6.1. Le sable : 18

I.6.1.1. Caractéristique des sables : 19
a. La granularité et la granulométrie : 19
c. Module de Finesse : 20
d. Masses volumiques : 20
- La masse volumique apparente : 20
- La masse volumique absolue : 20

e. Densité : 21
f. Pourcentage d'Impureté : 21
g. Les fines : 21
h. Évaluation du taux d'argile : 21
I. Mesure des vides : 22
I.6.2. Les pouzzolanes naturelles : 23
I.6.3. Les pouzzolanes artificielles : 23
I.7. L'eau pour les mortiers 24

I.8. Les ajouts : 24

I.8.1. Matières organiques : 25
I.8.2. Cendre des os (Le noir animal) : 26
I.8.3. Charbon de bois : 26

1.9. Pigments : 26

I.9.1. Pigments naturels : 27
I.9.2. Pigments artificiels : 27
I.10. Caractéristiques des mortiers : 27

I.10.1. Mortiers de chaux hydrauliques : 27
I.10.2. Mortier du plâtre : 28
I.10.3. Mortier de terre : 28
I.10.4. Mortiers bâtards : 29
I.10.5. Emploi des mortiers : 29
I.10.5.1. Les mortiers de maçonnerie, ou d'hourdage : 29
I.10.5.2. Composition : 29
I.11. Durcissement du mortier de chaux : 30

I.12. Compatibilité des matériaux de construction : 30

I.13. La chaux dans le bâti ancien : 31

Chapitre 2 : Enduits

II.1. Les enduits : 32

II.1.1. Composition : 32
II.1.2. Mise en œuvre : 32
II.1.2.1. Le gobetis : 32
II.1.2.2. Corps d'enduit : 33
II.1.2.3. Couche de finition : 33
II.1.3. Rôle : 33

Chapitre 3 : Maçonnerie

III.1. Maçonnerie : 34

III.1.1. Historique de la maçonnerie : 34
III.1.2. Caractéristiques des constituants de la maçonnerie : 36
III.1.2.1. Les briques : 36
a. Briques de laitier : 37
b. Briques silico-calcaires : 37
III.2. Propriétés mécaniques de la maçonnerie : 38

III.2.1. Comportement sous sollicitation de compression uni axiale : 38
III.2.2. Comportement sous sollicitation de traction uni-axiale : 39
III.2.3. Comportement bi-axial : 41
III.2.4. Comportement au cisaillement : 43
III.2.5. Modes de rupture dus au cisaillement dans le plan du mur : 43
III.2.5.1.Théorie de rupture en cisaillement d'un mur dans son plan d'après Mann/Muller : 44
III.2.6. Essais de cisaillement : 47
III.2.6.1. Essai sur couplet de briques : 47
III.2.6.2. Essai sur murets : 48
III.3. Comportement de la maçonnerie en compression diagonale : 50

III.3.1. Introduction : 50
III.3.2. Comportement structural des remplissages en maçonnerie sous charges horizontales : 50
III.3.3. Essai de compression diagonale : 51

Chapitre 4 : Matériaux composites

IV.1. LES MATÉRIAUX COMPOSITES :.....54

IV.1.1. Introduction :.....54
IV.1.2. Polymères renforcés de fibres « PRF » : 54
IV.1.3. Les constituants d'un polymère renforcé de fibres :.....55
IV.1.3.1. Les fibres :.....55
a. Les fibres de carbone (PRFC) : 56
b. Les fibres de verre (PRFV) : 56
c. Les fibres d'aramides (PRFA) : 56
d. Les fibres de basaltes (PRFB) : 57
IV.1.3.2. Les Caractéristiques des fibres et renforts :.....58
IV.1.3.3. Les matrices : 59
a. Les résines thermodurcissables (TD) :.....60
b. Les Résines thermoplastiques (TP) : 61

Chapitre 5 : Renforcement des structures

V.1. Renforcement des structures par matériaux composites renforcés de fibres : 63

V.1.1. Historique et avantages :.....63
V.1.2. Applications : 64
V.1.3. Le principe de la réparation : 65
V.1.4. Réhabilitation des murs : 66
V.2. Essai de compression diagonale sur maçonnerie renforcée (FRP) : 66

Chapitre 6 : Pathologie de la maçonnerie

VI.1. APPAREILLAGE DE LA MACONNERIE : 69

VI.1.1. Appareillage de la maçonnerie pour les éléments de formes régulières et de.....69
dimensions uniformes : 69
I.21.2. Orientation des plans de stratification d'un mur en maçonneries :.....69
I.21.3. Adhérence :.....69
I.21.4. Finitions des joints : 69
VI.2. FONCTIONNALITES ET PATHOLOGIES DE LA MACONNERIE 70

VI.2.1. Fonctionnalités de la maçonnerie :.....70
VI.2.2. Pathologies de la maçonnerie : 72
VI.3. CONCLUSION :.....75

Chapitre VII : Matériaux et essais

VII.1. Introduction : 76

VII.2. Programme expérimental et protocole d'essais :.....76

VII.2.1. Matériaux utilisées :.....77
VII.2.1.1. Le sables : 77
VII.2.1.2. Le ciment : 78
a. Ciment CPJ-II B 32.5 R :.....78
b. Analyse et caractérisation : 78
b.1. Analyse chimique du ciment et composition minéralogique du clinker : 78
b.2. Essais physique :.....79
- La finesse :.....79
- La consistance normale : 79
- Le temps de prise : 79

b.3. Essais mécaniques sur le ciment :.....80
VII.2.1.3. Chaux :.....80
VII.2.1.4. la Briques :.....82
VII.2.1.5. L'eau de gâchage :.....82
VII.2.2. Les essais:.....82
VII.2.2.1. Les essais effectués sur les granulats :.....82
a. Masses volumiques :.....82
a.1. Masse volumique apparente :.....82
b. Equivalent de sable :.....84
b.1. Précautions d'emploi :.....85
b.2. Expression des résultats :.....85
c. Granulométrie :.....85
VII.2.2.2 Les essais effectués sur le mortier :.....86
a. Essai sur mortier à l'état frais :.....86
a.1. Ouvrabilité du mortier :.....86
b. Essai sur mortier à l'état durci :.....87
b.1. Protocol d'essais :.....87
b.2. Confection et Cure des éprouvettes :.....87
b.3. Composition des mortiers :.....88
b.4. Malaxage des mortiers :.....89
b.5. Essai de traction par flexion :.....90
b.6. Essai de compression :.....91
c. Essai de retrait :.....92
c.1. Mesure des variations de longueur :.....93
c.2. Mesure des variations de masse :.....93
c.3. Expression des résultats :.....93
c.4. Conduite de l'essai :.....94
d. Essai de mesure du temps de prise (Vicat) :.....95
d.1. Essai de consistance :.....96
d.2. Conduite de l'essai :.....97
d.3. Essai de prise :.....97
d.3.1. Conduite de l'essai :.....98
VII.2.2.3. Essai mécanique sur maçonnerie :.....99
a. Confection des murets :.....100
a.1. Matériel utilisé :.....100
a.2. Préparation du mortier :.....100
a.3. Méthodologie de confection des murets :.....101
b. Les essais :.....101
b.1. Essai de compression diagonale :.....101
b.1.1. Protocole d'essai :.....102
b.2. Essai de cisaillement :.....103
b.2.1. Protocole d'essai :.....104
b.3. Essai de compression centrée sur murets :.....105
b.3.1. Protocole d'essai :.....105
b.4. Essai de compression diagonale sur murets renforcés :.....106
b.4.1. Muret renforcé par la fibre de verre (FRP) :.....106
b.4.1.1. Protocole d'essai :.....106
b.4.2. Muret renforcé par l'enduit en ciment et grillage :.....107
b.4.2.1. Protocole d'essai :.....107

Chapitre VII : Résultats et interprétations

VIII.1. Introduction :.....111
VIII.2. Caractérisation des granulats : 111
VIII.3. Caractérisation des mortiers :.....112
VIII.3.1. Etat frais :.....112
a. Ouvrabilité : 112
b. Essai de prise :.....113
VIII.3.2. Etat durci :.....114
a. Résistance à la compression :.....114
b. Résistance à la traction par flexion :.....115
d. L'essai de retrait :.....116
VIII.4. Essai mécanique sur murets :.....117
VIII.4.1. Essai de compression diagonale sur murets non renforcés :.....117
a. Mode de rupture : 117
b. Analyse des résultats : 117
VIII.4 .2. Essai de compression diagonale sur murets renforcés par GPRF : 119
a. Mode de rupture : 119
b. Analyse des résultats : 119
VIII.4 .3 Essai de compression diagonale sur murets renforcés par Grillage : 120
a. Mode de rupture : 120
b. Analyse des résultats : 121
III.4.4. Essai de cisaillement sur triplets : 122
a. Mode de rupture : 122
b. Analyse des résultats : 123
VIII.4.5. Essai de compression simple sur murets type II : 124
a. Mode de rupture : 124
b. Analyse des résultats : 125
VIII.5. Conclusions générale et recommandations :.....126

Références Bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Le colisée et le panthéon de ROME..... 3

Figure I.2 : Aqueducsromains…….....3
Figure I.3 : Le phare EDDY STONE 4
Figure I.4 : la grande muraille de chine…….…… 5
Figure I.5 : Plan de masse de la citadelle d'Alger ……...…….…….…6
Figure I.6 : palais du dey (Haut casbah)…..…..…….……...7
Figure I.7 : Mosquée de Tombouctou 8
Figure I.8 : Schéma du cycle de la chaux ……....9
Figure I.09 : Cycle de la chaux ..…….…….....10
Figure I.10 : Four à chaux de Marcel Lavie ……...……...…11
Figure I.11 : Four vertical ..……..…….. .12
Figure I.12 : Différent type de chaux …..……..….. 13
Figure I.13 : le ciment ……..…….……...…16
Figure I.14 : Cristal d'argile : feuillet Si-Al ……..…. 18
Figure I.15 : Mesure d'équivalence de sable …….... 23
Figure I.16 : Représentation d'une goutte d'eau sur une surface solide non polaire……....26
Figure I.17: Vue d'une coupe d'un crépissage à base de chaux aérienne….. ……. 32

Figure II.1 : Différente couche d'enduit de recouvrement ..……...…31

Figure III.1 : Comportement de la maçonnerie sous l'effet d'un effort normal……38
Figure III.2 : Essai de traction dans la direction parallèle aux joints horizontaux ..…..……40
Figure III.3: Diagramme contrainte - déplacement pour un essai de traction suivant la direction parallèle aux joints horizontaux……...… 40
Figure III.4 : Essai bi-axial sur des panneaux de maçonnerie .…… …..41
Figure III.5 : Modes de rupture d'un mur en maçonnerie soumis un chargement bi-axial……....42
Figure III.6 : Enveloppe des différents cas de ruptures …….……..….45
Figure III.7 : Modes de ruptures pour un mur de maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement ……46
Figure III.8 : Assemblage des briques utilisées pour étudier le comportement en cisaillement,……..... 48
Figure III.9 : Essai de cisaillement sur prisme en maçonnerie…….……... .49
Figure III.10: Diagonale équivalente d'un panneau avec remplissage en maçonnerie……...50
Figure III.11 : (a) Panneau carré homogène soumis à l'effet de cisaillement pur.
(b)État de contrainte produit dans un panneau carré soumis à la compression …….…….....51
Figure III.12 : Essai RILEM de compression diagonale ……..…….....52
Figure III.13 : Fissuration et rupture du panneau (essai RILEM) … ……..……...52
Figure IV.1 : Différentes lois de comportements des fibres… ……..…….....…53
Figure IV.2 : Organigramme des différentes familles de fibres……...….54
Figure IV.3 : Quelque forme disponible de renfort en fibres.……..…....56
Figure IV.4: Organigramme des différentes familles de matrices..……..……...59
Figure V.1 : Eléments de structure pouvant être renforcé par matériaux composites.……...63
Figure V.2 : Principe d'une réparation par matériaux composites.……..….64
Figure V.3 : Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse).……..…64
Figure V.4 : Essais de compression diagonale sur des murs renforcés..…….……66
Figure VI.1 : Appareillage d'un mur en maçonneries .. ……67
Figure VI.2 : Fonctionnalité de la maçonnerie…….68
Figure VI.3 : Cause de pathologie de la maçonnerie…….70
Figure VI.4 : Pathologies de la maçonnerie; Exemple de fissures dues au cisaillement…...71

Chapitre II

Figure VII.1: Le sable utilisé …… 74
Figure VII.2 : Ciment CPJ-VIIB35.5 ……77
Figure VII.3: Représente la chaux éteinte (NHL) de Hssasna……..78
Figure VII.4 : brique utilisée ……79
Figure VII.5 : Le cône et le récipient……..80
Figure VII.06 : Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre…..80
Figure VII.07 : Procédure de mesure de l'équivalent de sable ……...81
Figure VII.08 : Tamiseuse électrique ……..82
Figure VII.09 : Maniabilimètre à mortier avec la tige de piquage……..83
Figure VII.10 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre……..83
Figure VII.11 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement ……84
Figure VII.12: Conservation des éprouvettes à l'air libre …… 85
Figure VII.13 : Les étapes de confection des éprouvettes de mortier……87
Figure VII.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion…… 87
Figure VII.15 : Rupture des éprouvettes en traction par flexion……88
Figure VII.16 : Dispositif de rupture à la compression……89
Figure VII.17 : Essai de compression……89
Figure VII.18 : Rétractomètre et son étalonnage……90
Figure VII.19 : Principe de mesure du retrait ……90
Figure VII.20 : appareil de VICAT…… 93
Figure VII.21 : appareil de VICAT avec sonde de consistance …….. 94
Figure VII.22 : Mesure du temps de début et fin de prise…… .96
Figure VII.23 : Outils utilisés ……97
Figure VII.24 : Murets de type I …… 99
Figure VII.25 : Essai de compression diagonale sur muret type I…… 100
Figure VII.26 : Essai de cisaillement sur triplet ……100
Figure VII.27 : les différents triplets de l'essai de cisaillement …….. 101
Figure VII.28 : Murets de type VII ……..102
Figure VII.29 : Essai de compression centrée sur muret de type VII……..103
Figure VII.30: différents composants de la colle ……..103
Figure VII.31 : Différente étapes de renforcement du muret en fibre de verre……104
Figure VII.32 : Essai de compression diagonale sur muret **type I** renforcé par **FRP**… ..104
Figure VII.33 : les étapes de réalisation du renforcement du muret par grillage…… . .105
Figure VII.34 : Essai de compression diagonale sur muret **type I** renforcé…… . 105
Figure VII.35 : Variable étudié……109

Chapitre VIII

Figure VIII.1 : La courbe granulométrique du sable utilisé……111
Figure.VIII.2 : Temps d'écoulement des différents mortiers réalisés…… .112
Figure VIII.3 : Temps de prise des mortiers réalisés…… . 113
Figure VIII.4 : Variation de la Résistance à la compression des mortiers……...114
Figure VIII.5 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers……..…115
Figure VIII.6 : Variation du retrait des mortiers ……..……..…116
Figure VIII.7 : Mode de rupture des murets type I en compression diagonale……. 117
Figure VIII.8 : Compression diagonale : Contrainte - déformation des murets type I….. 118
Figure VIII.9 : Diagramme de contrainte maximal par type de mortier utilisé…… ..118
Figure VIII.10: Mode de rupture des murets type I renforcés par GPRF…… . 119
en compression diagonale.

Figure VIII.11 : Diagramme déformation des murets type I renfoncés par GFRP……... 119
Figure VIII.12: comparaison de la contrainte maximale entre un muret non renforcé…120
et muret renforcé par GFRP.
Figure VIII.13 : Mode de rupture des murets type I renforcés par grillage…….. 120
en compression diagonale.
Figure VIII.14: Diagramme déformation du muret type I renfoncé par grillage…….…...121
Figure VIII.15: comparaison de la contrainte maximale entre un muret non renforcé
et muret renforcé par grillage ……..…….....121
Figure VIII.16 : Mode de rupture des triplets sous l'effort de cisaillement…….... ..122
Figure VIII.17: Diagramme déformation des triplets sous l'effort de cisaillement…… 123

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Chaux de construction 14

Tableau I.2 : Récapitulatif de différent type de ciment..... 16

Tableau I.3 : Valeurs souhaitables de l'Equivalent de sable 23
Tableau I.4 : Principaux types d'adjuvants et leurs rôles dans les mortiers …..…….…… 25
Tableau I.5 : Principales compositions des mortiers chez Vitruve 30

Chapitre II

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des briques ……..36

Chapitre III

Tableau III.1 : Modes de rupture d'une maçonnerie constituée de briques à base d'argile soumise à un chargement bi-axial ……..……..43

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résumé sur les principales caractéristiques des fibres de renforcement…….……..…..……..57
Tableau IV.2 : Comparaison qualitative entre les fibres ..…..……..58
Tableau IV.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des résines thermodurcissables (TD)…..……..…….…… .60
Tableau IV.4 : Propriétés des résines thermoplastiques (TP).……..…60
Tableau IV.5: Comparaison entre les deux types de résines ……..……..…… …61

Chapitre V

Tableau V.1: Propriétés de matériaux composites par secteur……...……..…..62

Chapitre VII

Tableau VII.1 : Les essais réalisés sur les mortiers à l'état frais Et à l'état durci…….… ..74
Tableau VII.2 : l'Analyse chimique du ciment et la composition minéralogique du clinker ……..……..…..75
Tableau VII.3 : Résumé des résultats des essais physiques sur le ciment utilisé……...……76
Tableau VII.4 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge ….....…..….....77

Tableau VII.5 : La fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida ……..……..…..78
Tableau VII.6 : Résumé des essais effectués sur mortier ……..……84
Tableau VII.7: Les limites du temps d'écrasement ..……..…… 85
Tableau VII.8 : Compositions des mortiers réalisés ……..……. 86
Tableau VII.9 : Opérations du malaxage du mortier……..86
Tableau VII.10 : Récapitulatif des dosages de liant dans les mortiers……98

Chapitre VIII

Tableau VIII.1 : Caractéristiques des différents sables utilisés ……108
Tableau VIII.2 : Temps d'écoulement des différents mortiers ……...……...109
Tableau VIII.3 : le début et la fin de prise du différent mortier réalisé. ……..….110

Tableau VIII.4: Variation de la Resistance à la compression des mortiers réalisés à (7j,14j, 28j) ……..…….111

Tableau VIII.5: Variation de la Resistance à la traction des mortiers réalisés à (7j,14j, 28j) ……112

Résumé :

Les reconstructions postérieures à la seconde guerre mondiale produisent des logements neufs n'utilisant plus la chaux : elle est en passe d'abandon.

Aujourd'hui la chaux est redécouverte, à la faveur de ses qualités, de la prise en compte du patrimoine et de la mode. Elle suscite depuis peu un regain d'intérêt grâce à ses propriétés exceptionnelles, dans cette perspective nous testons les qualités physiques et les caractéristiques mécaniques de la chaux en outre la prédiction du comportement mécanique de la maçonnerie est rendue difficile à cause de l'hétérogénéité de ses constituants.

Dans ce travail, nous nous proposons d'évaluer la résistance des murets en maçonnerie en compression et en cisaillements a travers plusieurs essais mécanique sur des modèles réduits réalisés à l'aide d'un mortier à base de ciment, d'un mortier bâtard et un autre en chaux.

Parailleurs Le patrimoine historique réalisé en maçonnerie connaissent de nombreuses pathologies et doivent donc être réhabilités. Parmi Les techniques de réhabilitation actuellement utilisées sont le renforcement par la fibre de verre, L'étude envisage l'application du procédé de renforcement par lamelles de fibre de verre coller directement sur des modèle réduit en maçonnerie et de les tester mécaniquement.

Mots clés :

Mortier, Ciment, Chaux, Brique, , maçonnerie, muret, joint, Compression, Cisaillement, Résistance, Renforcement, Fibre de verre.

abstract :

Post-World War II, reconstructions produce new homes that no longer use lime : It is in the process of being abandoned.

Today lime is rediscovered, to its best qualities, considered in the historique building, it's being fashion. It has recently renewed interest thanks to its exceptional properties, in this perspective we test the quality physical and mechanical characteristic of lime in addition The prediction of the mechanical behaviour of the masonry is very difficult because of the heterogeneity of Its constituents.

In this work, we propose to evaluate the strength of masonry walls in compression and shear through several mechanical tests on reduced models made using a mortar based on cement, a bastard mortar and another in lime.

Moreover, the historical building made of masonry has pathologies and must therefore be rehabilitated. Among the rehabilitation techniques currently used are reinforcement by fibreglass.

The study plan is to study the application of the process of reinforcement by fibreglass laminates sticking directly to model masonry and testing them mechanically.

Keywords :

Mortar, Cement, Lime, Brick,, Masonry, wall, Joint, Compression, Shear, Strength, Reinforcement, Fibreglass.

ملخص :

إن إعادة البناء ما بعد الحرب العالمية الثانية نتجت منازل جديدة لم يستخدم فيها الجير و تم التخلي عنه.

إن الأخذ بلإعتبار الجير كمادة للبناء اليوم لم يكن سوى لمواصفاته، إنها الموضة في بناء التاريخي وقد تجدد مؤخرا الاهتمام به بفضل خصائصه الاستثنائية، في هذا المنظور اختبارنا الجودة الفيزيائية والميكانيكية للجير بالإضافة إلى ذلك التنبؤ للسلوك الميكانيكي للبناء صعبة للغاية بسبب عدم تجانس مكوناتها.

في هذه الدراسة، نقترح تقييم قوة تحمل الجدران مبنية بالأجر تخت الضغط والقص من خلال العديد من الاختبارات الميكانيكية على نماذج مصغرة مصنوعة باستخدام ملاط من الاسمنت، أو خليط من الإسمنت و الجير وآخر من الجير.

وعلاوة على ذلك، فإن المبانى التاريخية المصنوع من مواد البناء لها مشاكل ويجب بالتالي إعادة تأهيله و من بين تقنيات إعادة التأهيل المستخدمة حاليا هي تعزيز من الألياف الزجاجية. خططنا لدراسة تطبيق عملية التعزيز بواسطة شرائح من الألياف الزجاجية تم إلصاقها مباشرة بنماذج مصغرة واختبارها ميكانيكيا.

الكلمات الدالة :

ملاط، الاسمنت، الجير، الطوب، البناء، الجدار، السمك، ضغط، القص، القوة، تعزيز، الألياف الزجاجية.

Introduction générale :

La chaux a été, jusqu'à la révolution industrielle, le principal liant (mortier) de la construction. Son utilisation si abondante autrefois, a beaucoup diminué depuis l'invention du ciment Portland mais la nécessité d'entretenir et de réparer le patrimoine historique a généré un regain d'intérêt dans l'emploi de la chaux comme matériau de construction, puisque on s'est rendu compte de ses avantages a savoir que le mortier de chaux étant un peu poreux permet l'évaporation de l'eau, on lui reconnaît un bon pouvoir isolant, il n'est pas cassant après durcissement puisqu'il peut supporter de petites déformations sans se rompre et comme enduit, il confère donc aux parois une isolation thermique et acoustique et les maintient sèches, à l'inverse des mortiers en ciments qui sont imperméables et plus durs ne sont pas appropriés pour les bâtiments anciens traditionnellement construits et peuvent les endommager considérablement, malgré ses avantages les mortiers de chaux présente les inconvénients suivants :

Ils durcissement plus lentement, ont une certaine porosité et des résistances plus faibles.

Parailleurs, la prédiction du comportement mécanique de la maçonnerie est rendue difficile à cause de l'hétérogénéité de ses constituants. La maçonnerie est un matériau anisotrope, composé de briques et de mortier, nécessite l'étude de son comportement suivant les deux directions perpendiculaire et parallèle au joint de mortier, cependant la connaissance et la détermination de leur comportement mécanique est indispensable afin de prédire leur durabilité et leur avenir.

En effet, de nombreux auteurs (expérimentateurs) se sont penchés sur cette question dans le but de comprendre le comportement de ces structures sous les différentes sollicitations auxquelles elles sont soumises régulièrement :

– la compression uniaxiale
– la traction uniaxiale
– le chargement biaxial
– le cisaillement
– la compression diagonale

Toutes ces sollicitations ont des conséquences considérables sur la résistance des maçonneries. En revanche, il a été constaté que les cas les plus désastreux et les plus imprévisibles sont dus aux sollicitations de cisaillement produites par les efforts horizontaux tels que les séismes. Les modes de rupture observés lorsque ces efforts sont

appliqués dans le plan sont souvent de même type, il s'agit de l'apparition de fissures le long de la diagonale comprimée jusqu'à l'effondrement total,

Par conséquent le renforcement de la maçonnerie est devenu une nécessité afin de préserver et garantir sa durabilité, parmi les matériaux de renforcement utilisés est la fibre de verre qui offre une excellente alternative.

Le but principale de cette recherche est de mieux connaitre les caractéristiques de la chaux dans le but de trouvé des solutions à ses inconvénients, aussi nous allons étudier le comportement mécanique de la maçonnerie sous divers sollicitations à travers des modèle réduits et de tester des modèles renforcés par la fibre de verre et le grillage métallique.

Plan de travail :

- La première partie est une revue bibliographique sur les mortiers et ces différents types, la maçonnerie vis-à-vis de son comportement sous divers sollicitations et ses pathologie et en fin les matériaux composites et les méthodes de renforcements de la maçonnerie.
- La deuxième partie présente les différents essais réalisés sur le mortier et la maçonnerie.
- Le troisième partie exprime les résultats trouvés et leurs interprétations.

Chapitre I
Recherche bibiographique

I.1. Introduction :

La chaux naturelle obtenue par cuisson du calcaire, a depuis longtemps servi comme liant minéral pour assembler les blocs de pierre. Après un déclin dans son utilisation au profit du ciment après la 2ème guerre mondiale pendant la période de la reconstruction, le développement du marché de la restauration du patrimoine historique a généré un regain d'intérêt dans l'emploi de la chaux comme matériau de construction, puisque on s'est rendu compte, que les mortiers imperméables en ciment, plus durs ne sont pas appropriés pour les bâtiments anciens traditionnellement construits et peuvent les endommager considérablement.

Contrairement au mortier à base de chaux, les mortiers de ciment agissent comme une colle, ne sont pas flexible et n'empêche pas l'évaporation de l'humidité au niveau des joints, d'où ils accélèrent l'infiltration d'eau dans la pierre et par conséquent la dégradation de la structure contrairement aux mortiers traditionnels basés sur la chaux qui sont plus fiables que les pierres environnantes encore capable de supporter le poids du mur et l'usure de temps.

On sait maintenant que la chaux est un matériau écologique puis qu'il contribue au développement durable depuis sa phase fabrication qui nécessite une cuisson entre 800 C° à 900 C° contrairement au ciment qui nécessite une cuisson à 1400 C° d'où une économie considérable d'énergie, et lors de sa mise en œuvre en absorbant le gaz carbonique environnent durant la phase du durcissement.

I.2. Aperçue historique :

L'homme préhistorique est né dans les bois et dans les cavernes à l'instar des animaux. Il a mis plusieurs siècles pour découvrir les matériaux nécessaires à la construction durable de son foyer d'habitat pour une meilleure sécurité vis-à-vis des agents atmosphériques et autres.

La pierre a été le premier matériau utilisé et qui n'offre pas un habitat répondant à tous les critères de vie. L'homme à travers l'espace et le temps a pu améliorer le niveau de sa vie et de son environnement, en découvrant et utilisant différents matériaux comme les mortiers.

La diversité des mortiers archéologiques nous a permis de réfléchir au premier liant utilisé, la chaux ou le plâtre ? Les deux sont des matériaux anciens, ils sont issus d'une cuisson : Le plâtre, obtenu à partir de gypse cuit et broyé, et la chaux provenant de la calcination de calcaire, puis de l'extinction du produit obtenu.

Les différentes recherches et investigations dans le domaine archéologique ont montré des dates sur l'emploi de ces liants anciens qui appartenant aux différentes périodes. Au

cours des fouilles de « çatal Höyük » en Turquie, des traces de l'enduit à base du plâtre sont trouvées et qui remontent au VI^{ème} av. J. c.

Vers IIIe av. J.c., l'Amérique précolombienne a maîtrisé la fabrication de la chaux et son utilisation dans les mortiers, employés comme liant à bâtir. La matière première était obtenue en calcinant les coquillages. Les mortiers précolombiens sont constitués de chaux et de sable. Parfois ils comportaient du gravillon. Le mortier de la vallée de Mexico, très dur, a longtemps été considéré comme un ciment **[1]**.

Dans la même période et dans la région d'Abydos, le plâtre a été utilisé pour combler les vides de maçonneries cyclopéennes (tombes et pyramides).

L'Egypte hellénistique **[1]** a suivi les méthodes de construction grecques. Des mortiers à base de chaux, des sables associés quelques fois à de briques pilées ont été utilisées. L'analyse du mortier de la pyramide de Saqqarah a permis de constater que l'enduit comportait trois couches successives, chacune faite d'un mélange d'argile, de chaux et de sable quartzeux.

Les romains ont tiré des leçons chez les Grecs. Ils ont multiplié l'utilisation de la chaux, ainsi l'amélioration du procédé de leur cuisson afin d'acquérir ces meilleures caractéristiques, surtout mécaniques. Comme, ils ont introduit un mortier à base de chaux et de la pouzzolane qui favorise le développement de la construction en petit appareil. Vitruvius, un architecte romain, donnait les grandes lignes pour la préparation des mortiers de chaux **[2]**,"… Lorsqu'elle (la chaux) est éteinte, laissez-la se mélanger avec du sable de manière à ce qu'il y ait trois parties de sable de carrière pour une partie de chaux; dans le cas de sable provenant de rivière ou le l'océan, deux parties de sable pour une partie de chaux. On obtient ainsi la bonne proportion pour le mélange."

Plus encore les romains utilisés dans la construction du panthéon et le colisée de Rome **figure I.1** (80 a J c) un mortier a base de chaux, de cendre et roche volcanique et de sable fin, doit sa supériorité à une réaction chimique provoquée par la chaux mouillée d'eau de mer et par la présence d'aluminium dans la roche volcanique, qui rend le mélange particulièrement stable.



Figure I.1 : Le colisée et le panthéon de ROME

Les mortiers contenant uniquement de la chaux et du sable nécessitent du dioxyde de carbone contenu dans l'air pour se convertir et reprendre la forme de pierre calcaire et durcir. Les mortiers de sable et de chaux durcissent lentement et ne durcissent pas sous l'eau.

L'influence romaine se ressent dans les aqueducs (**Figure I.2)** ou dans les citernes dont l'étanchéité était assurée par un corps d'enduit à base de chaux, brique pilée et de fibre d'origine végétale (les anas de lin, les poils de chanvre, etc.), recouvert d'enduit de finition **[1]**.



Figure I.2 : Aqueducs romains

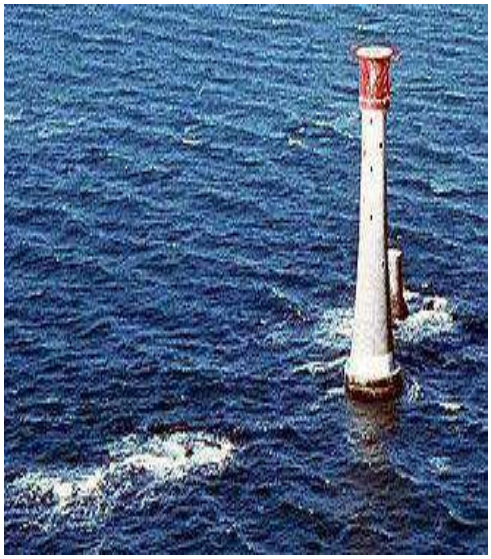
Depuis cette ère jusqu'à XVIII, des progrès techniques et architecturaux ont visé à perfectionner la maçonnerie et les supports des façades pour recevoir des décors peints. Toutes ces tentatives visent à l'amélioration de la qualité des mortiers, du type et de la qualité des liants utilisés, ainsi que les procédés de leur fabrication.

L'ajout de certains adjuvants, comme les suifs, le sang de bœuf, le blanc d'œuf et d'autres ajouts font aussi l'objet d'amélioration des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des mortiers. Cependant, la préparation de mortier se fait avec un apport

progressif d'eau et un brassage long, en respectant les proportions des constituants jusqu'à ce qu'on aura une pâte homogène.

La découverte de secret d'hydraulicité des ciments fait passer du savoir empirique au monde d'expérimentation qui permis d'établir et de traduire par des formules les compositions de ces mortiers.

Les progrès les plus importants de l'utilisation des pouzzolanes dans les mortiers sont survenus au cours du 18e siècle. On a alors découvert qu'en brûlant de la pierre calcaire contenant des argiles, on produisant un produit hydraulique. En 1756, James Smeaton a peut-être mis au point le premier produit de chaux hydraulique en calcinant de la pierre calcaire Blue Lias contenant de l'argile.



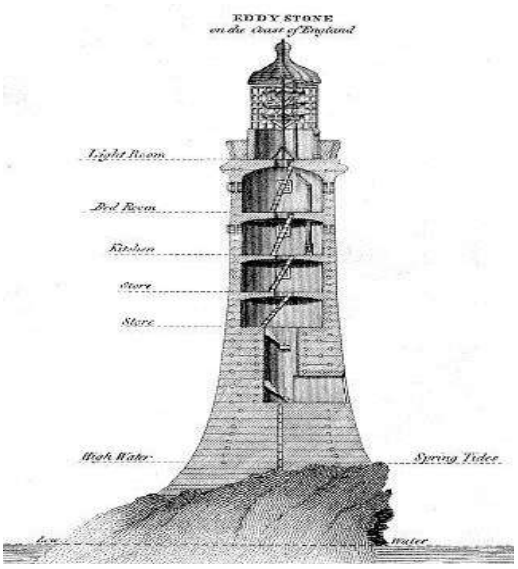


Figure I.3 : Le phare EDDY STONE

On ajoutait également de la terre pouzzolanique d'Italie pour donner plus de résistance **[3]**,ce mélange de mortier a servi à construire le phare Eddystone (**Figure I.3**).

James Parker a breveté un produit appelé ciment romain ou ciment naturel en 1796.

Le ciment naturel était produit en brûlant ensemble un mélange de pierre calcaire et d'argile dans des fours similaires aux fours utilisés pour la chaux, le produit qui en résultait était broyé et entreposé dans des contenants étanches.

Les ciments naturels contenaient généralement plus d'argile que les produits de chaux hydrauliques, ce qui offrait une plus grande résistance. Les mortiers de ciment naturel étaient utilisés dans la construction lorsque la maçonnerie était soumise à de l'humidité et où des niveaux de résistance élevés étaient requise **[4]**.

Joseph Aspdin, un constructeur/maçon anglais, brevetait en 1824 un matériau appelé ciment portland. Le ciment portland est fait d'un mélange de pierre calcaire, d'argile et d'autres minéraux dans des proportions bien contrôlées; le mélange est ensuite calciné et broyé en fines particules. Bien que certains ciments portland étaient importés d'Europe, sa fabrication aux États-Unis n'a débuté qu'en 1871. La consistance et les niveaux élevés de résistance du ciment portland lui permettent de remplacer les ciments naturels dans les mortiers. Par lui-même, le ciment portland a une mauvaise maniabilité, mais combiné à la chaux, il offre un excellent équilibre de résistance et de maniabilité. L'ajout du ciment portland aux mortiers de chaux accélère la vitesse du processus de construction des édifices de maçonnerie grâce à l'obtention plus rapide d'une résistance. Différents types de mélange, combinant différentes quantités de chaux et de ciment portland ont été élaborés.

En 1951, ASTM publiait la norme C270-51 ;**[5]** (Standard Specification for Unit Masonry) encore utilisée aujourd'hui permet de spécifier les combinaisons de ciment et de chaux par proportions de volume ou par propriétés de mortier. Cette norme identifie cinq types de mortier à l'aide de l'expression **MASON WORKS,** les mélanges de ciment/chaux de **type "M"** possèdent la résistance à la compression la plus élevée et les mélanges **de type "K"** possèdent la résistance la plus faible.

Les produits de chaux ont joué un rôle important dans la construction des maçonneries pendant des milliers d'années. Avant 1930, la plupart des constructions en maçonnerie utilisaient des mortiers à base de chaux, cette dernière offre une durabilité éprouvé comme en témoigne des structures telles que la grande muraille de chine (**Figure I.4**), qui existe depuis des centaines d'années.les raisons qui justifiaient l'utilisation de la chaux dans le mortier il ya 2000 ans sont toujours valide aujourd'hui.



Figure I.4 : la grande muraille de chine

L'Algérie a connu l'utilisation de la chaux dans les constructions comme mortiers à l'arrivée des romains, les différents sites et monuments restant sont le témoin de ceux-ci.

Ainsi, durant la période médiévale, la chaux était utilisée dans les mortiers et les stucs. La Citadelle d'Alger (**Figure I.5**) est l'illustre exemple à citer, l'ouvrage le plus important de la citadelle et le palais du dey (classé patrimoine de l'UNESCO en 1992) (**Figure I.6**) construis entre 1516 et 1590 ,Le mortier de couleur blanche utilisé dans la construction composé d'un mélange de chaux, de gypse et d'agrégats en silex (sable de rivière grossier) avec un ajout d'os **[6]**.

Le mélange subis une cuisson qui permet la transformation d'os en cendre, dit cendre animale qui améliore l'hydrophobisation des mortiers. On peut citer entre autre les remparts qui sont construits avec les mêmes techniques anciennes. Ils ont été faits très épais, avec le remplissage par des couches d'argile ou de terre mélangée avec de la chaux. Ce remplissage jouait le rôle de l'amortissement des chocs des obus de canon.

Ces remparts de (8,50 m) minimum de hauteur et (17 m) maximum. Ils ont été construits avec des faces extérieures inclinées, très épais, couronnés par des créneaux et munis des meurtrières **[7]**.

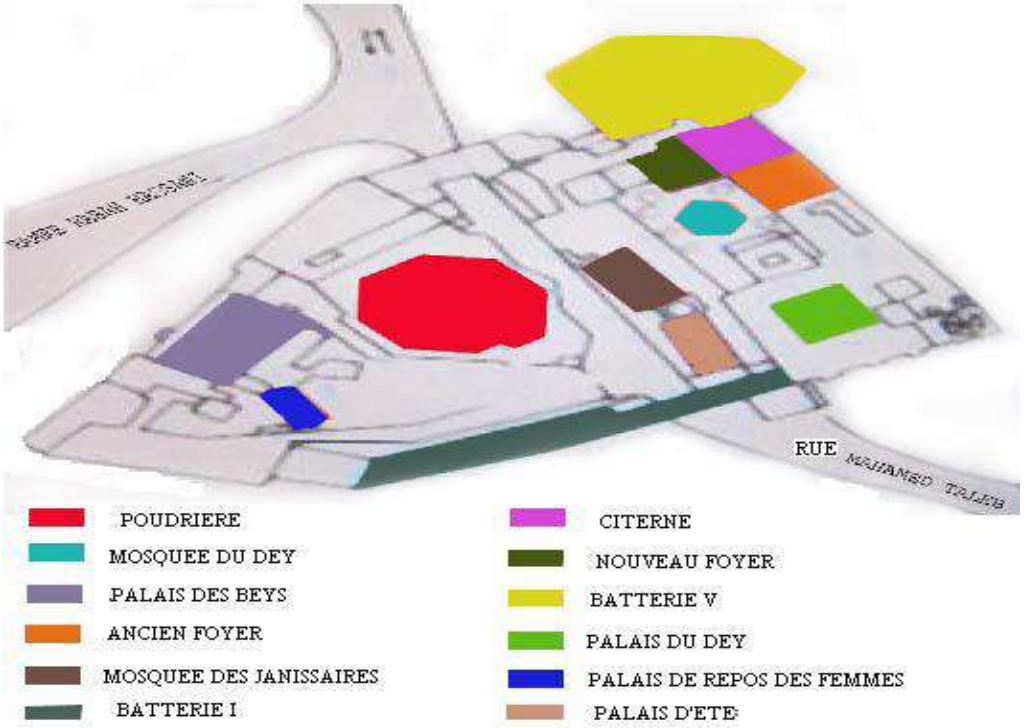


Figure I.5 : Plan de masse de la citadelle d'Alger

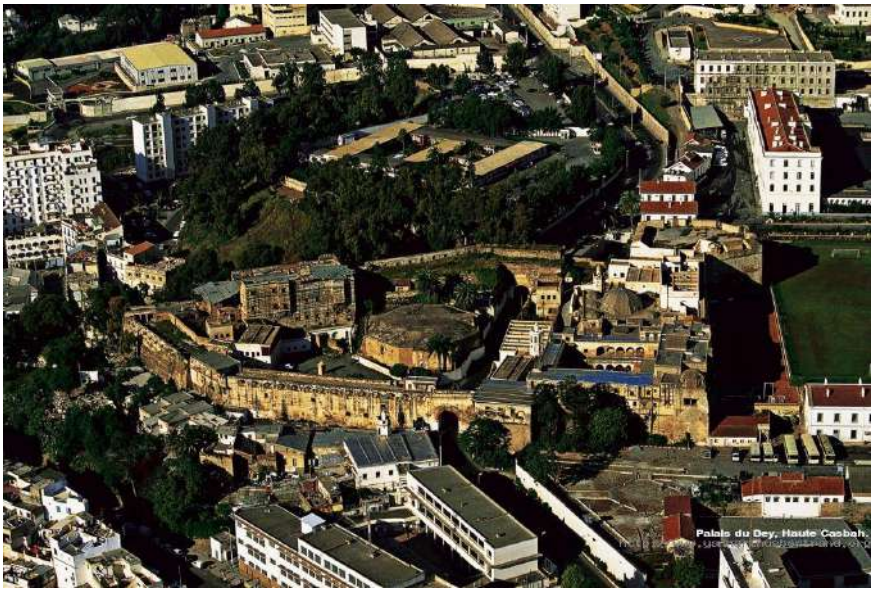


Figure I.6 : palais du dey (Haut casbah)

1.3. Définition du mortier :

Le mortier, en latin mortarium, désignant d'abord l'auge du maçon, puis son contenu, le mot est demeuré avec sa signification originelle lorsqu'il désigne un récipient où l'on mélange où l'on broie **[8]**.

Le terme de mortier recouvre à la fois les mortiers employés au cœur de structure, afin de lier les différents éléments du mur, et ceux qui servent à la réalisation de revêtements d'enduits **[9]**.

Les mortiers de revêtements servent à régulariser la surface des murs, à donner un aspect agréable aux parements et à protéger les maçonneries des intempéries et des infiltrations d'eau **[10]**; Ils contiennent des liants, des granulats et de l'eau; des adjuvants ou des colorants peuvent aussi être ajoutés.

I.4. Type de mortier :

Selon la nature de liant, on classe les mortiers de construction en deux catégories, les premiers se durcissent uniquement à l'air libre et les seconds sous l'eau et à l'air libre.

I.4.1. Mortiers hydrauliques :

Depuis l'antiquité, les mortiers ont fait l'objet de recherches dans l'amélioration de leurs caractéristiques, soit dans la nature du liant, le mode de préparation, le type 'agrégats et la nature des adjuvants, on vise souvent à améliorer leur résistance mécanique à la compression.

Ces types de mortiers font leurs durcissements à l'air libre ou même sous l'eau, une fois qu'ils sont durcis, ils résistent à l'action destructrice de l'eau et même salée. Cette double fonction permet leurs vastes utilisations.

I.4.1.1. Mortiers de chaux :

La chaux ne peut former le mortier hydraulique que par réaction avec la silice ou l'alumine. Cette réaction n'est possible qu'à haute température (ciment moderne) ou à température ambiante, si on utilise des formes de silice ou d'alumine très réactive (béton romain antique). Pour faire augmenter la résistance de mortier, on lui fait subir une cuisson, cela est confirmé par Vitruve **[11]** :

« … Si l'on mélange énergiquement, ce qui entraîne une meilleure introduction d'air, on obtient aussi un matériau plus facile à travailler sans qu'il soit nécessaire d'ajout trop d'eau. Ce type de mortier à un inconvénient principal, il s'agit de son durcissement très lent et peut même ne pas durcir du tout en atmosphère très humide ».

I.4.1.2. Mortier en terre :

Les argiles non cuites sont les principaux liants de la terre. Ce principe est ancré dans la culture de la construction dans maintes régions du monde on peut citer comme exemple la mosquée de Tombouctou au mali (**Figure I.7**). Ces cristaux sont dispersés irrégulièrement dans une forme floculée qui n'est pas très plastique, mais si on la laisse immergée pendant un certain temps et sous l'effet biologique, la disposition des cristaux change, et passe à une forme dispersée qui permet aux argiles d'être plus plastique. Dans ce cas, l'argile prend et retrouve ses propriétés cohésives et peut alors lier la terre.

La plupart des terres sont constituées d'argile, d'une proportion de limon, du sable et des graviers. Les particules les plus grandes donnent à la terre sa structure, alors que l'argile la lie et lui donne sa cohésion.



Figure I.7 : Mosquée de Tombouctou

Pour fabriquer un mortier en terre, l'ajout d'un liant (chaux, plâtre) garantit une meilleure cohésion, une meilleure compacité et une durabilité de la construction, objet d'agression et d'attaque des agents climatiques extérieurs. Ainsi, l'ajout des matériaux fibreux (paille de blé ou de riz et poil animal, etc...) lui confère une augmentation de sa résistance à la traction. Aussi, l'ajout de certain additif fait améliorer les performances des mortiers.

Les nombreuses recherches effectuées au moyen âge sur l'amélioration des performances de mortier, ont montré que plus on utilise un mortier chauffé plus on augmente ses performances mécaniques à savoir la résistance à la compression.

I.4.2. Mortiers aériens :

Leurs noms indiquent la nature du liant utilisé c'est-à-dire à base du liant aérien qui fait leur durcissement uniquement à l'air libre.

I.4.2.1. Mortier de chaux aérienne :

Dans ce type de mortier, on utilise la chaux aérienne en pâte mélangée avec les différents agrégats. La réaction entre les différents constituants nous amène souvent à la formation des mortiers hydrauliques.

Les **Figure (I.8) et (I.9)** explique les différentes étapes de transformation de la chaux aérienne avec ou sans ajout du sable et d'autres agrégats. L'ajout de cendre, de silice et de la terre contenant des agrégats, etc.. ; conduit à l'hydraulicité des mortiers dans une opération dite : pouzzolanique **[1].**



Figure I.8 : Schéma du cycle de la chaux



Figure I. 09 : Cycle de la chaux : Image au microscope électronique montrant les réactions et les produits issue des différentes étapes du cycle.
AAC : Amorphous Calcium Carbonate.

La réaction entre la chaux éteinte et les matériaux pouzzolaniques peut se résumer dans la réaction suivante **[11] :**

$$Al_2O_3\,2SiO_2 + 3\,Ca(OH)_2 + 6\,H_2O \rightarrow 2CaO.Al_2O_3.SiO_2.8H_2O + CaO\,SiO_2\,H_2O$$

Métakaolin *Chaux éteinte* *Géhlenite hydratée* *Tobermorite*

Les silicates de calcium hydratés forment un réseau de cristaux fibreux ou un matériau amorphe et gélatineux qui peut être considéré comme la cause principale du phénomène de durcissement du mortier.

I.4.2.2. Mortier de plâtre :

On ne peut obtenir du mortier avec le plâtre ordinaire, néanmoins on peut l'obtenir avec le plâtre à plancher et le plâtre aluné (pierres reconstituées). Il peut être utilisé pour ouvrage léger, bien protégé de l'humidité avec l'emploi de gravillons et de sable, un rapport (eau/plâtre) ne dépasse pas 0.80, et un dosage en plâtre ne dépasse pas 300à350 Kg de plâtre par m^3 **[6]**.

Avec ce liant, les résultats obtenus du point de vue mécanique n'en seraient pas améliorés, ce qui le distingue avec les bétons de ciment. On peut escompter une résistance à la compression, à (28j) de prise, de l'ordre de 50 à 100 kg/cm^2, suivant la qualité du plâtre utilisé.

Ces valeurs s'entendent pour des bétons de plâtres bien secs car l'effet de l'humidité fait réduire leur résistance à des valeurs assez basses.

Dans certaines régions d'Algérie, par exemple dans les maisons mozabites, on trouve certains enduits de revêtement à base du plâtre et du sable, ce mortier est appelé timchent.

I.5. Constituants des mortiers :

Le mortier est un mélange de plusieurs matériaux : le liant qui assure la cohésion entre les éléments de mortier, d'agrégats qui forme le corps de mortier, des pigments qui donnent la beauté des ouvrages et d'autres ajouts pour améliorer ses caractéristiques.

I.5.1. Les liants :

Les liants sont constitués d'un ou plusieurs minéraux, quand on les mélange avec l'eau ils forment une pâte plastique. Selon leurs origines, on distingue : la chaux, le plâtre et l'argile.

I.5.1.1. La chaux :

Les premières traces de la fabrication de la chaux remontent à l'aube de la civilisation. Elle est utilisée pour la confection des mortiers liants les maçonneries de moellons; Son emploi a fait marquer un tournant dans l'histoire de l'architecture en permettant le développement et la construction de voûte dont les portées demeurent encore records.

La chaux est une substance caustique solide, blanche lorsqu'elle est pure. Elle est obtenue par calcination du calcaire $CaCO_3$ et d'autres formes de carbonates de calcium.

La cuisson de la chaux dure trois jours, les pierres calcaires sont calcinées à $900^0 \div 1000^0$C **[13].**

La réaction de décarbonatation est la suivante :

$$\underset{\text{Carbonate de calcium}}{Ca\,CO_3} \xrightarrow{T^\circ} \underset{\text{Chaux vive}}{CaO} + \underset{\text{gaz carbonique}}{CO_2}\uparrow$$



Figure I.10: Four à chaux de Marcel Lavie situe sur la route de Sedrata

On éteint ces pierres calcinées en les mélangeant à de l'eau dans un bac en tôle ou en bois. A côté de cette cuve, a été creusée une fosse de terre bien damée qui servira de bassin de refroidissement pour la chaux. On verse de l'eau à proportion de (35 l) d'eau pour (70 l) de chaux **[13]**.

Cette seconde opération chimique s'exprime par l'équation suivante :

$$Ca\,O + H_2O \longrightarrow Ca\,(OH)_2 + \textit{chaleur}\uparrow$$

La chaux fusée devrait être malaxée avec beaucoup de patience, pour en faire une espèce de pâte jusqu'à la fin de l'ébullition. On laisse couler cette sorte de pâte dans la fosse, en prenant soin de retenir les morceaux de roche non encore fondus. On laissant reposer cette masse pendant (15 jours) au moins, à l'air. Cette chaux peut être conservée pendant plusieurs années. **[11]**. Telle est la méthode ancienne pour la fabrication de la chaux grasse.

Aujourd'hui les fours les plus utilisés sont des fours verticaux, le temps de décarbonatation pour la pierre appelé temps de résidence est approximativement de 4 à 6 heures pour des fours produisant 600 tonnes par jour.

Il existe également des fours à cycles alternés qui produisent davantage de chaux tout en consommant moins d'énergie ; et des fours rotatif qui consomme d'avantage d'énergie mais permettant une production de 1000 tonnes / jour. (**Figure I.11**)

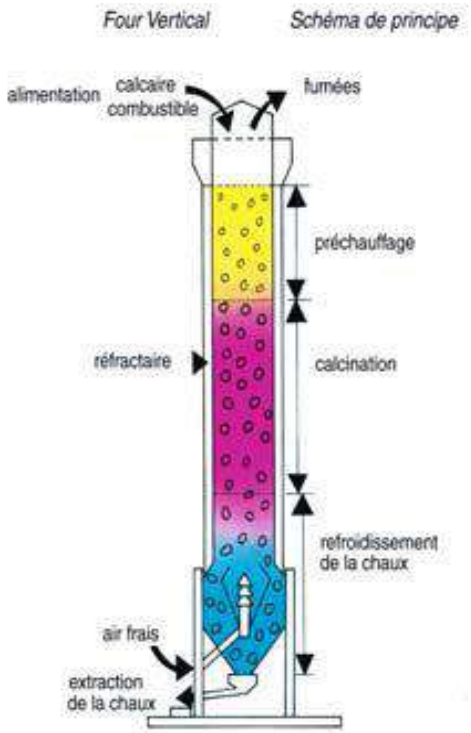


Figure I.11 : Four vertical

La chaux vive est commercialisée en morceau ou en poudre après être passée au broyage.

La chaux éteinte se vend en sac de 25 à 35 kg suivant le type de chaux. Certains industriels vendent également de la chaux en pâte et de la chaux vive.

Selon la nature des matières premières utilisées dans la fabrication de la chaux, on constate de profondes modifications qui l'affectent aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant la teneur en argile, on classe les chaux comme suit (**Figure I.12**) :



Figure I.12 : Différent type de chaux :

1-chaux vive
2- chaux éteinte
3- chaux artificielle
4- chaux hydraulique
5- chaux aérienne.

a. Chaux aériennes :

La prise de ces types de chaux s'effectue seulement en présence du gaz carbonique dans l'air, d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conserver de grandes quantités de chaux éteinte, on distingue deux types de chaux :

- la chaux grasse, qui est obtenue à partir d'un calcaire pur,
- la chaux maigre, qui contient 2 à 8 % d'argile.

b. Chaux hydraulique (XHN) :

Cette chaux est obtenue avec un calcaire contenant entre 8 et 20% d'argile. Cette dernière offre à la chaux les propriétés d'hydraulicité que *Vicat** exprime par un indice appelé, l'indice d'hydraulicité, qui est le rapport de la fraction acide sur la fraction basique, on note que plus cet indice est élevé et plus la chaux est dense, résistante et à une prise rapide.

La distinction entre les deux types de chaux, la Chaux aérienne et la Chaux hydraulique se fait par la composition du gisement, dès que la silice est présente, une chaux hydraulique XHN est obtenue.

- la chaux aérienne ne durcit, après gâchage, qu'au contact de l'air (CO_2)
- la chaux hydraulique après gâchage, durcit en contact de l'air (part aérienne) et avec l'eau (part hydraulique).

Cette distinction s'effectue aussi par la mesure de l'indice d'hydraulicité (**i**). Ce paramètre définit les chaux hydrauliques qui tiennent leurs propriétés de l'importance des éléments argileux de la roche mère.

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}{\%CaO + \%MgO}$$

- La chaux grasse à un indice d'hydraulicité compris entre 0 et 0,10.
- Les chaux hydrauliques ont un indice d'hydraulicité entre 0,20 à 0,50.

c. Normalisation des chaux :

La normalisation des chaux **[14]** de construction permet de savoir si une chaux est calcique ou dolomitiques, aérienne ou hydraulique, de résistance faible ou forte, pure où bâtardée, seules les chaux en pâte échappent encore à la norme **[NF P 15-311] [15]- où[EN 459-1] [16].**

Tableau I.1 : Chaux de construction : Normes **NF P 15-311, EN 459 -1**.

Chaux naturelles sans ajouts	Critères	Dénomination	Désignation NFP 15-311, EN 459 (1996)	Désignation précédente (1981-1996)
Chaux naturelle sans ajouts	Teneur en CaO et Mg	Chaux calcique ou «Calcic Lime"	CL90 (90% de CaO) CL80 (80% de CaO) CL70 (70% de CaO)	CAEB Chaux aérienne pour le bâtiment
Chaux naturelle sans ajouts		Chaux dolomitique ou "Dolomit Lime"	DL80 (80% de CaO+MgO) DL70 (70% de CaO+MgO)	
Chaux naturelle sans ajouts	Résistance minimum à la compression	Chaux hydrauliques naturelles ou "Natural Hydraulic Lime"	NHL 2 NHL 3,5 NHL 5	XHN ou Chaux Hydraulique Naturelle
Liants additionnés		Chaux Hydrauliques Naturelles avec ajouts de matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques (20% maxi)	NHL-Z 2 NHL-Z 3,5 NHL-Z 5	
Liants recomposés Critères		Chaux CL et DL mélangées avec des matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques	HL 2 HL 3,5 HL 5	Non désignés

I.5.1.2. Les ciments :

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection du mortier est conforme à la norme **NF P 15-301[17]**. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu etc.. ; d'une façon plus générale, de la composition du béton ou du mortier et de l'usage auquel on le destine.

Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition on privilégiera souvent les CPA par rapport aux CPJ.

Le ciment (**Figure I.13)** est obtenu du mélange de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile broyé est cuit à 1500°C donne le clinker. Ce clinker est broyé et additionné de gypse (3%) et autres ajouts pour donner du ciment.

Il existe (05) classes de ciment, CEM I à CEM V. Les plus couramment utilisés sont les CEM I (33% de la production) et les CEM II (49 %).

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou sous l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation.

Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début et de fin de prise, etc.…).

Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influantes sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse.

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et celle de la durabilité du béton.

Le rapport Eau/Ciment (**E/C**) est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons, ce dernier a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passent par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton.



Figure I.13 : le ciment.

Tableau I.2 : Récapitulatif de différent type de ciment **[12]**.

Désignation	**Type de ciments**	**Teneur en clinker%**	**Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier – pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice**	**Teneur en constituants secondaires**
CPA-CEM I	Ciment Portland	95 à 100 %	-	0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment Portland Composé	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans le cas ou le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*) ; de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*)	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %		0 à 5%
CHF –CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 65 %	36 à 65 % de laitier De haut-fourneau	0 à 5%
CHF –CEM III/B		20 à 34%	66 à 80 % de laitier De haut-fourneau	0 à 5%
CHF –CEM III/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5%
CPZ –CEM IV/A	Ciment pouzzlanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzlanes, cendres siliceux ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%. 36 à 55 % comme ci-dessus.	0 à 5%
CHF –CEM IV/B		45 à 64%		0 à 5%
CLC –CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendre	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier De haut-fourneau et 18 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % comme ci-dessus.	0 à 5%
CLC –CEM V/B		20 à 39%		0 à 5%

(*) Le pourcentage de fillers est limité à 5%.

I.5.1.3. Le plâtre :

On attribue la découverte des bienfaits du plâtre à un berger utilisant du gypse comme foyer en plein air pour cuire des aliments : après une averse soudaine, il aurait constaté que les pierres faisaient corps en durcissement autour du foyer éteint **[18]**.

C'est une poudre blanche, obtenue de la cuisson d'une roche sédimentaire, le plâtre qui est un sulfate de chaux déshydraté $CaSO_4$ ½H_2O et de couleur qui varie suivant les impuretés qu'il contient.

Sa fabrication dépendra de la provenance de la pierre extraite et le produit de base désiré :

A température de cuisant comprise entre (120° C) à (180° C), le gypse perd l'eau faiblement combinée en absorbant de la chaleur d'ou on obtient le plâtre ordinaire $CaSO_4$ ½H_2O ou semi-hydrate qui renferme encore (6,21%) d'eau en poids.

Entre 180° C et 250° C, on obtient un plâtre à prise rapide, l'hydrate soluble $CaSO_4$, instable parce qu'avide d'eau. C'est un surcuit qui active la prise du plâtre (ou en ajoute dans le plâtre à mouler).

Entre (250° C) et (600° C), on obtient un plâtre inutilisable, l'anhydrite insoluble qui s'hydrate rapidement au début puis très lentement ou pas du tout.

Entre (600° C) et (900° C) on obtient un produit inerte, incapable de faire sa prise.

Au-dessus de (900° C) et jusqu'à (1450° C), le produit obtenu retrouve sa faculté de prise : c'est l'anhydrite soluble à prise très lente (5h à 20j) mais d'un durcissement élevé.

I. 5.1.4. L'argile :

L'argile est une roche sédimentaire, constituée essentiellement d'un mélange de silicates d'alumine hydratés. C'est une substance hydrophile avec une absorption d'eau allant jusqu'à 60%. Elle est caractérisée par sa plasticité qui est due au degré élevé de finesse de ses grains (<5µm) et sa morphologie, c'est-à-dire son aspect de minces paillettes laisse l'eau capillaire s'insérer en couche faible **(Figure I.14)**.

Les matières minérales qui forment l'argile dans la nature résultent de la désagrégation de diverses roches, et principalement des feldspaths, sous l'action de l'eau et de l'acide carbonique. A titre d'exemple, les feldspaths et en particulier l'orthose, se décomposent en produisant de la kaolinite sous l'action de la vapeur d'eau et du gaz carbonique de l'atmosphère.

$$K_2OAl_2O_3\,6SiO_2 + 2H_2O + CO_2 \longrightarrow K_2CO_3 + 4SiO_2 + Al_2O_3\,2SiO_2\,2H_2O$$

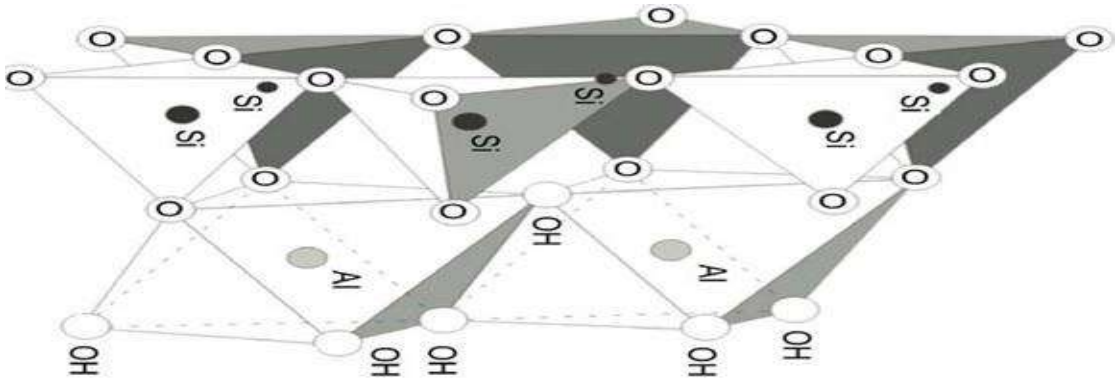


Figure I.14 : Cristal d'argile : feuillet Si-Al

Le choix du type d'argile pour la fabrication de la céramique pilée a été une problématique de recherche depuis l'époque romaine. Ils voyaient la tuile broyée, appelé le tuileau est qui à base de l'illite est le meilleur agrégat pour la fabrication des bétons. D'ailleurs, cette hypothèse est confirmée actuellement par l'utilisation de l'argile expansive dans ce domaine. **[6]**

I.6. Les agrégats :

Le terme agrégat est le nom officiel des matériaux de construction, tels que les graviers, les sables et les cailloux, intervenant dans la confection des mortiers **[1]**.

Dans les textes de Vitruve **[2]**, il a désigné les agrégats, par : une espèce de sable de cave qui le distingue par différentes couleurs : le noir, le gris, le rouge et carbunculus. D'après lui le meilleur sable est celui qui fait du bruit lorsqu'on le frotte entre les mains.

Le rôle des agrégats dans les mortiers est inerte, il réduit la quantité d'eau de gâchage, le phénomène de retrait et il forme le squelette de ceux-ci.

Ainsi, ils sont déterminants dans le choix de la résistance des mortiers.

Selon l'origine et la nature, on classe les agrégats en :

I.6.1. Le sable :

Le sable à une influence prépondérante sur la qualité des mortiers : il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient de roches chimiquement inertes telles que : les calcaires durs, les granits et les quartzites. Selon la norme **NF P 18 304 [19]**, on classe les sables en construction :

- Les sables de 0,1 à 6,5 mm,
- Les graviers, type grains de riz de 4 à 10mm jusqu'à 30 mm, pour les matériaux roulés,
- Les cailloux, supérieurs à 30 mm.

I.6.1.1. Caractéristique des sables :

a. La granularité et la granulométrie :

Un granulat est repéré par les différentes tailles de grains qui le constituent. En particulier la plus petite taille et la plus grande taille comme suit :

- Un sable fin sera nommé sable 0/2 (petit diamètre 0 et de plus grand, diamètre 2 mm),
- Les sables courants sont des sables 0/4 ou 0/5.

En patrimoine, les enduits sont souvent composés avec des sables plus gros pouvant aller jusqu'à 8 mm voir 10 mm. Il est important pour l'aspect d'un enduit de se rapprocher de la granulométrie existante des enduits anciens.

L'analyse granulométrique est exécutée sur des tamis (trous à maille carrée) après séchage de l'échantillon, les refus successifs récupérés sur chacun des tamis sont pesés.

La courbe granulométrique d'un granulat est représentée en abscisse par la dimension du coté de la maille du tamis, en ordonnée par le pourcentage des tamisât cumulés (complément du refus).

Une échelle logarithmique de la maille du tamis est plus convenable pour représenter adéquatement l'étendue des valeurs de la dimension de la particule. L'essai est normalisé selon la norme **NF P 18-540[20]**.

En suite on trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

- Le sable est un élément déterminant de la couleur et de l'aspect de l'enduit.

b. La forme :

La forme des sables influe sur leur domaine d'utilisation, c'est-à-dire on choisira un sable plus anguleux pour une accroche (1^{er} couche d'enduit) et un sable roulé pour une finition à la taloche.

On parle de granulats roulés lorsqu'ils sont extraits de rivières ou de fleuves. Ces matériaux, roulés par l'érosion, ont une forme arrondie. Ils offrent plus de plasticité au mortier.

Les granulats concassés sont obtenus après broyage et concassage. Leur structure est anguleuse.

c. Module de Finesse :

Le module de finesse **[12]** d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différent tamis de la série suivante :

0,16-0,35-0,63-1,25-2,5-5-10 – 20-40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables les tamis concernés sont :

0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

C'est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Des études expérimentales ont montré qu'un bon sable donnant les meilleurs résultats dans le mortier, est celui dont le module de finesse se situe aux environs de la valeur :

MF = 2.0

d. Masses volumiques :

La masse volumique ″ **r**″ est définie comme le rapport de la masse sèche ″M″ d'un corps par unité de volume ″V ″, elle est donnée par la formule suivante **[12]** :

$$r = M/V$$

Et s'exprime en : t/m^3 ; Kg/dm^3 ; g/cm^3.

On distingue deux volumes : le volume apparent et le volume absolu. On est donc conduit à définir deux masses volumiques :

- **La masse volumique apparente :**

Qui est la masse de l'unité de volume apparent (y compris les vides) d'un corps.

- **La masse volumique absolue :**

Qui est la masse de l'unité de volume absolu (volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains) d'un corps.

La connaissance de la masse et du volume permet le calcul :

- Du dosage volumétrique de composants (sable, gravier, ciment) du mortier, pâte et bétons.
- Du volume des matériaux pulvérulents à transporter et des dimensions des silos et entrepôts destinés au stockage de ces matériaux.

Les masses volumiques sont calculées d'après les normes : **NF P 18-650[23].**

e. Densité :

La densité est le rapport entre la masse d'un certain volume d'un corps et la masse d'un égal volume d'eau à (+ 4°C) **[12]**.

- On distingue la densité apparente et la densité absolue.
- La densité est un simple rapport sans dimension.
- L'absorption d'eau des sables :

Selon la norme **NF P 18-555,[24]**, le coefficient d'absorption d'eau du sable doit être inférieur ou égal à **5%**.

f. Pourcentage d'Impureté :

L'impureté est le pourcentage de vase, de limon, d'argile et de matières solubles, la norme prohibe les impuretés telles que le charbon, les déchets de bois, feuilles mortes, débris végétaux, débris plastique, etc. dont le pourcentage doit être inférieur à 3%.

Pour la propreté des gravillons, il convient d'éviter surtout la présence de la gangue argileuse ou des poussières qui risquent de compromettre l'adhérence du mortier sur les graviers et par conséquence de diminuer la résistance.

Le pourcentage des impuretés à ne pas dépasser est fixé à **3%**, **NF P 18-598[25]**.

g. Les fines :

Ce sont les particules de diamètre inférieur à 0,063 mm, les fines contiennent les argiles, elles améliorent la plasticité des enduits, leur résistance en augmentant la compacité, et apportent la coloration par les oxydes fixés avec l'argile.

Trop de fines peuvent entrainer des désordres comme la fissuration de l'enduit pour cela le **DTU 26.1**; **[21]** recommande une quantité de fines de 10 à 15 % pour les enduits sur murs anciens.

h. Évaluation du taux d'argile :

Le taux d'argile, où en simplifiant, le pourcentage de fines vont jouer sur la plasticité du mortier et la couleur de l'enduit. Un sable sans fines, dit sable creux ou sable cru, sera plus raide à jeter, moins coloré (ce qui rendra l'enduit plus blanc après séchage), et aura plus de vides.

La teneur en fines peut s'évaluer grossièrement en compactant dans la main un boudin du sable. Si le boudin reste compact alors la teneur est élevée, s'il est cassant et friable, il a peu de fines. Un tuf riche en fines se rapproche d'une argile, un tuf pauvre en fines se rapproche d'un sable.

On peut mesurer plus exactement la teneur en fines par la méthode dite « l'équivalent sable » ou plus simplement par la méthode de l'éprouvette :

L'argile joue également le rôle de liant, elle permet de doser moins en chaux. Elle a également un rôle pouzzolanique et monte l'hydraulicité des chaux. **[14]**

I. Mesure des vides :

La mesure des vides d'un sable sert à déterminer le dosage en liant d'un mortier, dans un bon mortier la compacité doit être maximale, c'est-à-dire que le liant et le granulat laisseront le moins de vide possible.

Il faut remplir un volume de sable d'eau jusqu'à saturation et déterminer la proportion d'eau qui a rempli les vides.

En général pour les sables, la propreté est contrôlée par l'essai dit « Equivalent de Sable » (E.S) .

Les valeurs minimales à respecter pour l'équivalent de sable, mesuré à vue, s'étagent de 70 à 80, suivant la destination du béton (**Tableau I.3**), (**Figure I.15**)

Tableau I.3 : Valeurs souhaitables de l'Equivalent de sable **[12]**

E.S. a vue	E.S. piston	Nature et qualité du sable
E.S. < 65	E.S. < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour les bétons de qualité.
65 ≤ E.S. < 75	60 ≤ E.S. < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ E.S. < 85	70 ≤ E.S. < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute (valeur optimale E.S. piston = 75 ; E.S. à vue = 80).
E.S. ≥ 85	E.S. ≥ 80	Sable très propre : l'absence total de fines argileuses risque d'entrainer un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.



Figure I.15 : Mesure d'équivalence de sable.

I.6.2. Les pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes **[26]**.

Elles sont composées d'un mélange d'alumine, de silice, de chaux et de fer, en proportions variables.

Biston **[27]** a décrit les pouzzolanes comme : une espèce d'argile ferrugineuse qui a éprouvé une forte température par le feu des volcans, elle tire son nom de pouzzolane en Italie, et affecte toutes sortes de couleurs; on la trouve ordinairement à l'état d'une poussière mélangée de parties plus grossières et poreuses assez semblables à la pierre ponce.

Ce type d'agrégat est un constituant déterminant, car il conditionne la résistance des mortiers.

Même Vitruve **[2]** a confirmé dans son texte : « ... la chaux, la pouzzolane et le tuf, engendrés par le feu, sont mêlés et joints ensemble par le moyen de l'eau, ils s'endurcissent promptement, et font une masse tellement solide, que les flots de la mer ne peuvent ni la rompre, ni la dissoudre ».

A partir delà, on peut dire que les pouzzolanes sont des agrégats très durs, ils obtiennent cette dureté après leurs mélanges à d'autres constituant.

I.6.3. Les pouzzolanes artificielles :

Certains matériaux peuvent être transformés en pouzzolanes artificielles qui sont :

La poudre d'argile cuite ou la brique cuite pilée, ces substances concassées et broyées comme les poudres de pierre augmentent la dureté des mortiers.

Une étude effectuée par l'INSA, par l'équipe de MURAT entre 1981 et 1984 sur l'utilisation des argiles kaolinitiques calcinées à température 700° C ÷ 8000° C, a abouti aux résultats suivants :

- Les meilleures résistances des mortiers sont obtenues avec un rapport argile calcinée/chaux est supérieur à 1.
- La résistance à 28 jours du mortier obtenu à partir du mélange, deux parties d'argile calcinée et une partie de chaux est égale à 14,50 Mpa. Elle est équivalente à celle donnée par les mortiers de ciment portland.

On peut dire à partir de cette réaction (voir paragraphe I.4.2.1) que le mélange chaux aérienne- métakaolin est considéré comme chaux hydraulique avec l'ajout de l'eau. Donc, cette céramique peut substituer et remplacé la pouzzolane naturelle. **[6]**.

I.7. L'eau pour les mortiers

L'eau employée pour le gâchage du mortier doit répondre aux prescriptions de la norme **NF P 18-303**,**[28]**, « l'eau potable convient » **[29]**.

L'eau dans les mortiers assure au minimum deux rôles essentiels; la plasticité du mélange et l'hydratation de la chaux. Elle devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques.

I.8. Les ajouts :

Les adjuvants sont utilisés, en règle générale, pour leurs propriétés plastifiantes et fluidifiantes (diminuer la quantité d'eau ajoutée, améliorer l'ouvrabilité, augmenter la résistance mécanique, etc.) sans profits de certaines qualités de durabilité **[30]**.

Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité est une bonne technique qui permet habituellement d'obtenir une maçonnerie solide, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse qui ne peut pas être corrigée par l'emploi d'adjuvants.

Les romains ajoutaient dans leurs mortiers des mélanges de vins, de moût de raisin, du vinaigre et des figues (**Tableau I.4**) **[1]**.

Tableau I.4 : Principaux types d'adjuvants et leurs rôles dans les mortiers. **[1]**

Adjuvants	Rôles des adjuvants
Vinaigre, vin	Améliore la carbonatation et la résistance au gel.
Huiles de lin/ d'olive	Retard la prise de l'enduit liée à une évaporation trop rapide de l'eau; diminue le retrait et améliore la résistance au gel. L'inconvénient surtout de l'huile de lin est le jaunissement des enduits.
Le sucre	Retarde la prise
Le savon	Améliore la compatibilité des composants entre eux.
L'œuf (blanc et jaune) Le suif	Améliore les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.
L'alun	Améliore l'étanchéité de l'enduit à l'eau.
Paille, poile de chèvre blanche	Aide à la fixation des pigments (sulfate double d'aluminium et de potassium). Améliore les propriétés mécaniques des mortiers.

La quantité de produits ajoutés dans les mortiers est très variable. Leur détermination nécessite une expérience et un savoir-faire, car il s'agit d'une équation à quatre variables : le support, les quantités d'agrégats, la température et l'humidité ambiante et le choix du type de chaux.

I.8.1. Matières organiques :

L'ajout des matières organiques telles les huiles minérales, les corps gras sont principalement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Comme le carbone et l'hydrogène ont des électronégativités très voisines, les électrons mis en commun pour former la liaison carbone hydrogène sont repartis entre les deux atomes et il ne se forme pas de pôle électrique. Il en va de même pour la liaison carbone - carbone.



Cette matière non polaire, ne peut pas attirer de molécules d'eau puisqu'elle n'a pas de liaisons d'hydrogènes avec elles. Donc l'eau ne pénètre pas à la surface et l'angle de contact est très grand.

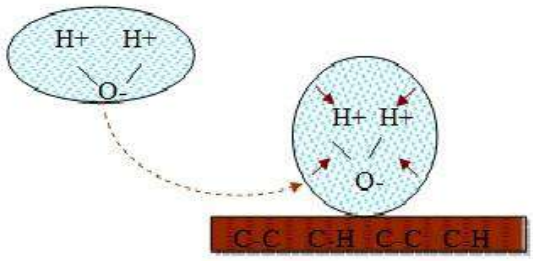


Figure I.16 : Représentation d'une goutte d'eau sur une surface solide non polaire.

La (**figure I.16)**, montre qu'il n'existe pas de force d'attraction entre la goutte d'eau et les parois des pores constituant le solide, cela explique la réussite dans la préparation des anciennes recettes qui sont riche en carbone, obtenu par calcination des os ou de la combustion du bois pour l'hydrophobisation des structures.

I.8.2. Cendre des os (Le noir animal) :

Résidu de la calcination des os à l'abri de l'air, la cendre des os provenant de la décomposition de l'osséine.

Le noir animal retient énergiquement en surface les matières colorantes des solutions (décoloration des jus sucrés, des huiles, des vaselines, …) **[31]**.

Il forme une sorte de film dans le mortier et ne laisse pas l'eau à se pénétrer à l'intérieur du matériau.

I.8.3. Charbon de bois :

On l'obtient par combustion du bois à l'abri de l'air, combustion qui fournit :

- des gaz combustibles (hydrogène, méthane, monoxyde de carbone)
- un résidu très homogène qui constitue le charbon de bois.

1.9. Pigments :

L'emploi des pigments comme ajout dans les mortiers est connu depuis l'antiquité. Ils sont largement répondus pendant l'époque romaine, comme il a indiqué Vitruve Vitruvius **[2]** dans son septième livre sur les techniques de construction :

Il y a des couleurs qui se trouvent dans la terre qu'on tire de certains lieux et il y en a d'autres qui se font par artifice de la composition de plusieurs choses, étant mêlées ensemble, font dans les ouvrages le même effet que les couleurs simples et naturelles.

De celles qui se tirent de la terre, que les Grecs appellent Ochra, est la première dont nous allons présenter. On la trouve en plusieurs endroits, et même en Italie … Au cours des années, il a été démontré que cet ajout c'est-à-dire les pigments à deux raisons :

- La première est décorative, dans ce cas, on ajoute un minéral au mélange chaux sable avant qu'il soit mouillé afin d'avoir une meilleure homogénéisation des façades enduites.
- La seconde raison est d'économiser les matériaux, dans ce cas cette terre joue le rôle d'une charge dans la composition de mortier, il peut arriver dans certains cas d'utiliser des agrégats colorés.

I.9.1. Pigments naturels :

Il existe une multitude de pigments aux noms évocateurs : blanc de Venise, bleu de Prusse, de Brême, jaune de Naples, terre verte de Vérone, etc.

I.9.2. Pigments artificiels :

Ils sont obtenus par réaction chimique sur les principaux métaux, par exemple l'oxyde de cuivre qui peut être de couleur verte et bleue.

I.10. Caractéristiques des mortiers :

Depuis des années, les mortiers font l'objet de développement spectaculaire dans l'amélioration de leurs caractéristiques intrinsèques et extrinsèques qui sont dues sans doute d'une grande part aux meilleurs choix de composition.

I.10.1. Mortiers de chaux hydrauliques :

Prise des chaux hydrauliques **[1]**

Silice (SiO_2)

+ Chaux éteinte $Ca(OH)_2$+ H_2O ⟹ **Silicate calcique Hydraté CSH**

Alumine (Al_2O_3) ⟹ **Aluminate Hydraté CAH**

Avec l'eau, la chaux et d'autres éléments de silice, d'alumine de fer et de calcium forment des hydrates insolubles qui confèrent au liant un caractère hydraulique.

Par la suite, au contact de l'air humide, la chaux et les hydrates ainsi formés vont se carbonater (avec le gaz carbonique de l'air) pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine.

Cette réaction prend plusieurs mois : c'est la partie aérienne de prise.

I.10.2. Mortier de plâtre :

Les mortiers du plâtre sont destinés généralement comme enduit de revêtement des maçonneries à l'intérieur des constructions. Parmi ces caractéristiques :

- isolant acoustique,
- régulateur d'hygrométrique (anti-condensation),
- isolant thermique; le coefficient de conductivité thermique est de 0.87,
- corrode le fer et l'acier,
- en raison de sa solubilité, le plâtre ordinaire ne peut être utilisé pour les extérieurs, sauf s'il est revêtu d'un enduit imperméable, une solubilité de 6.3 g/l.
- son PH est dans les environs de 6 à 6.5
- un enduit de plâtre, par sa structure monolithique, s'oppose à toute transmission de microbes et autres.
- la résistance à la compression peut varie entre 50 et 100 KgF/cm^2, suivant la qualité du plâtre employée. La résistance à la traction est de 5 à 10 Kg/ cm^2.

I.10.3. Mortier de terre :

Ce type de matériau possède une certaine déformabilité en compression et en cisaillement, ce qui le qualifie comme un matériau intéressant pour le parasismique. Si l'on veut construire en terre dans les régions séismiques, il est possible de l'associer avec un autre matériau, résistant à la tension, par exemple le bois. C'est ce qui se fait à Armenia en Colombie ou le bâtiment ancien est constitué essentiellement de murs en treillis de bambou remplis de terre, mais l'on peut aussi construire en utilisant des formes adaptées et validées par l'histoire, c'est le cas en Italie, avec des murs en pierres bâties à la terre, comme sur la plupart des côtes méditerranéennes, plus épais en bas qu'en haut, ou en construisant en terre damée (pisé) avec des contreforts comme dans l'Alentejo portugais **[32].**

La résistance mécanique à la compression qui est une propriété importante dans ce genre de construction. Elle est de 50 à 100 Kg/cm^2, dans le cas de la stabilisation au ciment

Par contre, elle est moins quant il s'agit de la stabilisation à la chaux : 30 à 80 Kg/cm^2.

Ainsi, dans ce genre de construction n'exclu pas l'effet de l'humidité, car la résistance à la compression du matériau humide réduit environ la moitié de sa résistance à sec.

Sa résistance à la traction est de 1/5 de la résistance à la compression.

Le module d'Young est de : 700 à 70 000 Kg/cm^2.

I.10.4. Mortiers bâtards :

Ce sont des mortiers qui se constituent de plusieurs liants avec éventuellement d'ajout d'agrégats et d'autres additifs.

I.10.5. Emploi des mortiers :

Selon la composition et la résistance recherchée, on distingue plusieurs sortes de mortiers employés dans divers ouvrages, mais on se limite dans notre travail à présenter les mortiers d'hourdages et les enduits de revêtements.

I.10.5.1. Les mortiers de maçonnerie, ou d'hourdage :

C'est sous la forme de liant que la chaux est utilisée en maçonnerie, c'est-à-dire mélangée à des proportions variables des matériaux divers, soit des agrégats comme : le sable, la brique pilée, etc.. ou de l'argile. Sans les agrégats la chaux très épaisse se fissure en séchant à cause de la perte de volume.

La confection du mélange se fait avec un apport progressif d'eau et un brassage long et méthodique jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, cette opération dite gâchage.

I.10.5.2. Composition :

Au terme de composition, il n'y avait pas de grande chose à signaler depuis la période romaine jusqu'au moyen âge, en suit à la lettre leurs recettes. Il y a une tendance plus à l'utilisation du mortier romain.

On trouve chez Vitruve **[1]** les recettes de préparation de bons mortiers et qui sont :

« … Lorsque la chaux sera éteinte, il faudra la mélanger de la manière suivante : on mettra une partie de chaux avec trois parties de sable de cave, ou deux parties de sable de rivière ou de mer; telle est la juste proportion de ce mélange qui deviendra encore meilleur, si on ajoute au sable de mer et de rivière une troisième partie de tuileaux pilés et cassés ».

Dans ce paragraphe Vitruve **[1]** montre l'usage de testa pour améliorer la résistance des mortiers. Si, on vient à résumer l'évolution de la résistance en fonction de la composition en constituants à l'époque antique, on se réfère aux travaux de Vitruve (**tableau I.5**) **[33]**.

Tableau I.5 : Principales compositions des mortiers chez Vitruve.

Proportion en Liant	Proportion en agrégats	Quantité d'eau en pourcentage %
1 partie de chaux	3 parts de sable de carrière	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de sable fluvial + 1 part de testa pilée	15 à 20
1 partie de chaux	2 parts de pouzzolane	15 à 20

Les mortiers du haut moyen-âge étaient composés ainsi : 300 kg de chaux (CaO) pour 1 m^3 de sable, soit ¼ de chaux éteinte pour ¾ de sable **[13]**.

I.11. Durcissement du mortier de chaux :

Le durcissement de la chaux est dû à la formation d'un cristallin de l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ de très faible résistance de même que la formation du carbonate de résistances élevées à la surface du produit (mur).

Le durcissement de la chaux Croûte de $Ca(OH)_2$ aérienne est très lent, les résistances des mortiers à base de chaux aérienne sont plus importantes seulement après le phénomène de carbonatation c'est-à-dire après la formation de la croute de calcaire suivant le schéma de la (**Figure I.17**).

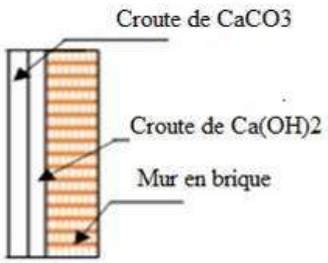


Figure I.17 : Vue d'une coupe d'un crépissage à base de chaux aérienne

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + nH_2O \longrightarrow CaCO_3 + (n+1)H_2O$$

La croûte de calcaire formée se colmate et se densifie de plus en plus ce qui la rendre pratiquement imperméable à l'eau, sa résistance ne cesse d'augmenter en contact de l'humidité.

I.12. Compatibilité des matériaux de construction :

Les éléments de maçonnerie ont par nature un pouvoir absorbant, de sorte que l'eau est extraite du mortier dès que les éléments et le mortier sont mis en contact ; et par conséquent la quantité d'eau extraite du mortier varie considérablement. Comme la perte d'une quantité d'eau trop importante peut réduire l'ouvrabilité à tel point que le mortier ne peut plus former un liaisonnement complet avec l'élément suivant, l'ouvrabilité et le pouvoir de rétention d'eau devraient être adaptés aux caractéristiques d'absorption des éléments de maçonnerie.

Les éléments de maçonnerie qui ont de forts coefficients d'absorption exigent des mortiers ayant une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau important.

D'autres facteurs qui agissent sur le durcissement du mortier et qui devrait être pris en considération sont les conditions atmosphériques.

Au cours des périodes sèches le mortier doit avoir un bon pouvoir de rétention pour compenser en partie la perte d'eau par évaporation.

En hiver, un pouvoir de rétention plus faible est souhaitable parce qu'il permet au mortier de perdre de l'eau avant que la congélation de celle-ci n'ait lieu.

Le bâti ancien est caractérisé sur le plan comportement par :

- Des maçonneries sensibles aux déformations,
- Des maçonneries sensibles à l'eau.

I.13. La chaux dans le bâti ancien :

Le ciment ou les liants non respirant et trop rigide (chaux artificielle) sont à proscrire sur le bâti ancien. Ils sont imperméables et empêchent les murs anciens de « respirer », de rester sain et de maintenir une atmosphère agréable dans la maison. Ils provoquent condensation, salpêtre et pourrissement des bois.

Ils sont souvent trop rigide, trop dur et fragilise les éléments de maçonnerie, parfois jusqu'à leur ruine.

Ils sont trop souvent uniformes dans leur aspect et dans leur teinte, nuisant ainsi à l'aspect final de l'enduit.

Sur les supports anciens (sans ciment) on utilisera des chaux hydrauliques naturelles NHL 3,5 pour les premières couches ou la maçonnerie. La chaux (NHL 5) pourra éventuellement s'utiliser en zone soumise à l'humidité, fondation ou soubassements enterrés.

La chaux (NHL 2) et la chaux aérienne (CL 90) s'utiliseront en finition grâce à leur qualité de transparence, de perméance et de souplesse **[14]**.

II.1. Les enduits :

C'est une mince couche de mortier appliqué sur les parements d'un ouvrage pour masquer la structure, régulariser les surfaces et les protéger des agressions extérieures.

Dans le bâtiment, un enduit désigne le plus souvent une ou plusieurs fines couches contenues d'un matériau plastique (plâtre, chaux, ciment ou mortier, terre, …), dont on revêt un support en vue de son unité, et/ou de sa protection **[1]**.

II.1.1. Composition :

Les compositions des enduits changent selon les localités et les époques. Donc, il est très difficile de citer toutes les compositions utilisées. On s'arrêtera à les citer d'une manière globale.

Ce sont des mélanges de liant (chaux grasse ou hydraulique, plâtre), des agrégats (sable, cailloux, céramique broyée), de l'eau et des adjuvants (huile d'olive ou de lin) posés en une ou plusieurs couches.

II.1.2. Mise en œuvre :

Selon le mode d'application des enduits, on trouve plusieurs procédés ; On se limite à la méthode classique.

Généralement, cette dernière consiste à projeter directement à la truelle ou au pot de projection perpendiculairement à la paroi.

Avant la prise, le mortier sera serré au bouclier par passes successives dans différentes directions.

La mise en œuvre des enduits s'effectue, soit en deux ou en trois couches.

Les principales couches sont :

le gobetis, le corps d'enduit et la couche de finition (**Figure II.1**).

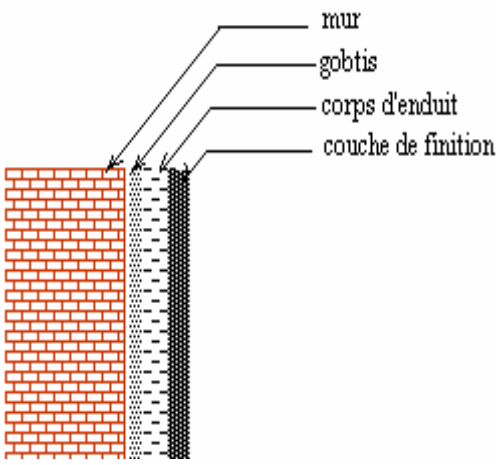


Figure II.1 : Différente couche d'enduit de recouvrement

II.1.2.1. Le gobetis :

Est la première couche qui assure l'adhérence de l'enduit au support. Elle permet également d'uniformiser la porosité du support **[34]**.

Sa structure rugueuse doit favoriser l'accrochage de la seconde couche.

Son épaisseur doit être faible, inférieure à 5mm.

La deuxième couche à une épaisseur environ 10 mm, est appelée le corps d'enduit.

II.1.2.2. Corps d'enduit :

Permet d'obtenir :

- une surface du support plane,
- une couche d'imperméabilisation d'enduit,
- une bonne adhérence avec la couche de finition.

II.1.2.3. Couche de finition :

La troisième couche à un rôle décoratif, elle assure, en outre, la protection de la deuxième couche attribue à la conservation de l'imperméabilisation de support **[34]**.
Cette couche à une épaisseur entre 5 à 7mm.

II.1.3. Rôle :

Les enduits ont plusieurs rôles dans les édifices, on cite :

- La protection et l'isolation contre l'humidité due aux intempéries ou remontées capillaires,
- Isolation thermique et acoustique,
- Adhère aux matériaux, pour mieux transmettre les charges ou créer un écran durable contre les agressions externes, gaz, humidité, etc.
- La présentation, pour dresser les surfaces inégales.

III.1. Maçonnerie :

Par définition la maçonnerie est l'art qui consiste à ranger des pierres avec du mortier ou avec une autre liaison. Elle est également définie comme étant une construction dans laquelle on emploie de la pierre, de la brique et du mortier.

C'est cette dernière définition que nous avons retenue pour toute notre étude.

III.1.1. Historique de la maçonnerie :

La maçonnerie est la plus ancienne technique utilisée dans la construction qui trouve encore sa place dans la construction industrielle moderne, ceci malgré l'utilisation intensive de matériaux de construction comme le béton ou l'acier. Des améliorations importantes ont été apportées à ce matériau, mais la technique d'empilement des briques ou des pierres est restée essentiellement la même au fil du temps. Ceci lui donne une caractéristique simple et très particulière et offre beaucoup d'avantages dans la construction tels que : l'esthétique, la solidité, la durabilité, la bonne isolation phonique et thermique, la protection contre le feu etc.…

Elle peut également jouer le rôle de murs porteurs dans une structure puisqu'elle possède une bonne résistance aux efforts horizontaux notamment aux efforts sismiques.

Les archéologues ont constaté que les premières maçonneries datent de l'âge de pierre, l'art de l'architecture remonte donc à très longtemps, aux premières civilisations, depuis ces époques lointaines la maçonnerie est devenue une technique de construction très répondue.

Le premier matériau qui a été utilisé dans la maçonnerie est probablement la pierre, les plus anciennes constructions de maçonnerie en pierres séchées au soleil ont été retrouvées près de lac Hula en Palestine et datent d'environ 9000-8000 ans avant Jésus-Christ.

De nombreuses constructions maçonnées en pierre ont survécu jusqu'à ce jour, et témoignent de la puissance des cultures anciennes et médiévales. Citons l'architecture égyptienne avec les pyramides des pharaons (environ 2800-2000 ans avant Jésus-Christ), l'architecture romaine (environ 0-1200 après Jésus- Christ) avec les temples, les palais, les arches, les colonnes, les barrages et les aqueducs ..., l'architecture gothique (environ 1200-1600 après Jésus-Christ) avec les magnifiques cathédrales et bien d'autres constructions. C'est avec les maçons de l'époque gothique que l'art de découper les pierres a atteint toute sa splendeur.

A présent, la pierre reçoit un nouveau rôle dans la construction industrielle du fait de ses difficultés d'extraction, de transport et de mise en œuvre. Elle est devenue un matériau excessivement cher et d'autres matériaux ont pris le dessus dans les applications structurales donc La maçonnerie est principalement devenue un matériau à usage esthétique.

En plus de la pierre, la brique séchée au soleil était aussi un matériau de construction très utilisé notamment par les habitants des contrées très peuplées au Moyen-Orient.

Les habitants se retrouvaient d'une part face à des problèmes de manque de bois pour la construction, des difficultés d'approvisionnement en pierre et surtout à une forte demande de construction, d'autre part, ces endroits sont caractérisés par un climat très rude connu par de hautes températures mais possédaient une forte abondance d'argile. Par conséquent, ces raisons ont favorisé le développement et augmenté la fabrication de la brique sèche.

La brique est devenue un matériau léger, facile à mouler, permettant de donner des formes diverses aux murs et qui possède également des propriétés de résistance et de durabilité.

Au Moyen-Orient, depuis 500 ans avant Jésus-Christ et jusqu'à l'occupation romaine (50 ans après Jésus-Christ) le matériau essentiel pour la construction était la brique séchée au soleil.

L'utilisation de la brique cuite a commencé probablement avec l'observation des briques séchées au soleil, qui devenaient très rigides et durables au contact de la chaleur, notamment pour les briques qui constituaient les murs des fours de cuisson. C'est sous l'Empire Romain que l'utilisation de la brique cuite a pu s'élargir et gagner du terrain surtout avec l'introduction d'autres types d'additifs qui sont rentrés dans la composition des briques. Ceci a permis une homogénéisation de l'architecture et une prépondérance de la brique dans les constructions.

Les briques prennent alors des formes beaucoup plus "standards" et régulières, elles peuvent prendre aussi des formes spécifiques en fonction de leur utilisation ; par exemple les éléments décoratifs.

Plus près de nous, l'histoire de la maçonnerie est liée aussi à la Révolution Industrielle, l'activité industrielle va remplacer les procédures manuelles. Le point de départ de la fabrication industrielle des briques a commencé avec l'introduction du four d'Hoffman Kiln en 1858 dans lequel se font toutes les procédures de fabrication à partir de la phase de préparation jusqu'à la cuisson. Depuis de nombreuses recherches ont été faites pour améliorer la production des briques. **[40] [90]**.

A présent, dans la construction industrielle, beaucoup de changements ont été apportés à la maçonnerie d'une manière générale, notamment aux techniques de fabrication des constituants et à leurs compositions. L'ancien et le nouveau coexistent et dans la plupart des cas sont indissociables. Le mélange du traditionnel et du moderne est présent dans presque toutes les constructions.

Des produits innovants, tels que les briques modernes, le béton armé ou préfabriqué, les matériaux composites . . . coexistent avec la brique traditionnelle, de nouvelles techniques sont dédiées à la sauvegarde et à la réhabilitation des monuments historiques comme par exemple la technique de renforcement par matériaux composites qui à déjà fait ses preuves.

D'un point de vue scientifique, beaucoup de chercheurs se sont intéressés et s'intéressent à l'étude des comportements des structures maçonnées, notamment les chercheurs italiens vu leurs intérêts culturels, sociaux et économiques pour la restauration et la sauvegarde de leur patrimoine architectural. Les résultats obtenus montrent que la ruine de ces constructions est gouvernée par le comportement de discontinuités telles-que les interfaces brique-mortier. Au niveau de ces interfaces se développent tous les phénomènes de non linéarité (endommagement, rupture, fissuration,...). Ces raisons ont conduit l'intérêt de la communauté scientifique de se concentrer sur la modélisation de ces constructions mais plus particulièrement sur la modélisation des interfaces brique-mortier **[40]**.

III.1.2. Caractéristiques des constituants de la maçonnerie :

III.1.2.1. Les briques :

Les briques sont des pierres artificielles à base de terres argileuses (briques de terre moulée et cuites), de laitier (brique de laitier) ou à base de chaux et de silice (briques silico-calcaires).

Ce sont des unités prismatiques disponibles dans une grande variété de tailles, de textures, de couleurs et de formes. Elles peuvent être pleines, perforées ou creuses.

D'une manière générale, elles sont caractérisées par leur résistance à la compression et à la traction comme indiqué dans le **tableau I.6** :

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des briques. **[40]**,**[41]**.

Texture	Masse volumique (Kg/m^3)	Module élastique (Mpa)	Coefficient de Poisson	Résistance Compression (Mpa)	Résistance Traction (Mpa)
Granite	2600	50000	0.25-0.35	170	-
Calcaire	2000-2600	45000	0.2	5-25	25
Béton	2200-2400	40000	0.2	40	3
Brique creuse	3000	5000	0.3	20	8
Brique pleine	3000	15000	0.2	30	4

Les propriétés des briques varient avec le mode de fabrication.

Si l'on casse une brique produite par agglomération, on constate que l'état de surface de la cassure est "grain-eux" (mauvaise compacité).

Alors que pour les briques fabriquées à la filière : (la pâte est pressée dans un tuyau et ensuite passée par un laminoir avant d'être coupée en briques) la cassure est "lisse" (meilleure compacité).

- La densité étant liée à la compacité, les briques médiocres ont une densité voisine de 1,4 alors que les briques résistantes ont une densité supérieure à 2.
- La résistance à la compression des briques de bonne qualité est voisine de 40 Mpa.
- La résistance à la traction, mesurée par flexion, ne dépasse pas 12 Mpa **[42]**.

a. Briques de laitier :

Les briques de laitier s'obtiennent par le mélange sous presse (pression d'environ 30 Gpa) d'un mélange de laitier et de liant (chaux grasse, chaux au laitier ou ciment de laitier).

La fabrication de ces briques est totalement mécanisée. Elles ont des dimensions assez réduites puisqu'il faut en général 145 briques pour la construction d'un mètre carré de mur de 22 cm d'épaisseur. Elles sont surtout employées comme matériau de parement.

- Les briques pleines ont une résistance à la compression qui se situe autour de 15Mpa
- Les briques de céramique ont des résistances qui avoisinent les 40 Mpa.
- En traction, les résistances varient entre 6 et 12Mpa. Elles ont également un module d'élasticité compris entre 9 et 14 Gpa. Ce qui donne en moyenne pour un mur de briques de premier choix un module de 15 Gpa**[43]**.

b. Briques silico-calcaires :

La fabrication des briques silico-calcaires consiste à comprimer un mélange de silice 90 % et de la chaux grasse à une pression de 30 Mpa et à soumettre ce mélange à un jet de vapeur d'eau sous pression pendant plusieurs heures. Ces briques sont des matériaux de remplissage, la rugosité des surfaces permet l'accrochage des enduits. L'emploi des silico-calcaires légers ou denses donne des résistances à la compression qui peuvent aller respectivement jusqu'au 7 Mpa pour des densités de l'ordre de 0.8 et jusqu'à 60 Mpa pour les densités d'ordre de 2.2.

III.2. Propriétés mécaniques de la maçonnerie :

III.2.1. Comportement sous sollicitation de compression uni axiale :

La résistance à la compression des maçonneries dans la direction normale aux joints horizontaux est généralement considérée comme le seul critère qui permette de définir la résistance globale de la structure qui est un matériau composite. Les essais usuels qui sont utilisés pour obtenir cette résistance à la compression uni-axiale sont présentés sur la **figure III.1**.

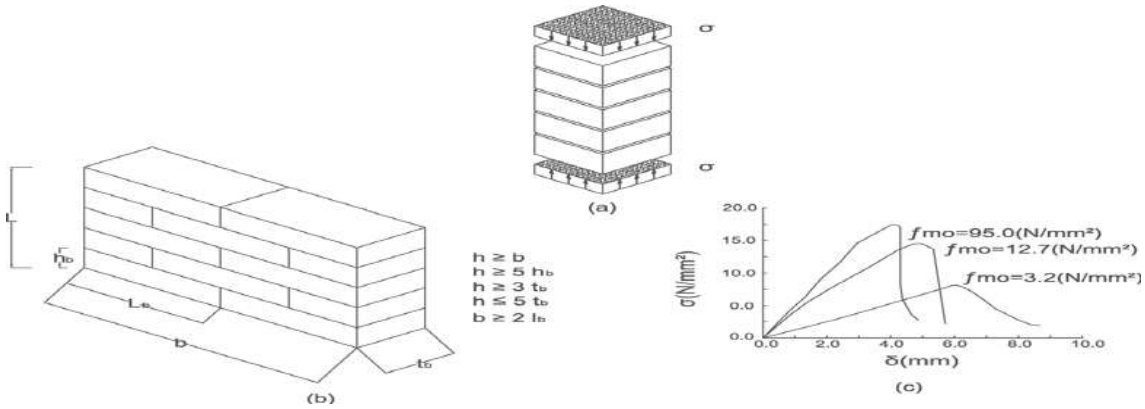


Figure III.1 : Comportement de la maçonnerie sous l'effet d'un effort normal aux joints horizontaux a) cas d'un empilement simple de briques. b) Spécimen RILEM. c) Diagramme contrainte **[44]**.

Le premier cas représenté est un essai sur une pile de brique (**figure III.1-a**) qui reste un essai peu représentatif de la maçonnerie du fait de la résistance de l'échantillon pendant l'essai **[45]**, le deuxième cas d'essai montré sur la (**figure III.1-b**) est appelé essai de RILEM **[44]**.

Le spécimen RILEM est assez large et représentatif, depuis les travaux de Hilsdorf **[46]**, il a été accepté par la communauté scientifique que la rupture des structures maçonnées est induite essentiellement par la différence des propriétés mécaniques entre les briques et les joints de mortier.

La compression uni-axiale de la maçonnerie conduit à un état de compression triaxiale dans le mortier et à une compression et à une traction bi-axiale dans les éléments de briques. D'aprés **[45]** que des fissures verticales apparaissent initialement sur les briques tout au long de la ligne médiane du spécimen, qui se continue au niveau des joints de mortier verticaux. Avec l'évolution des déformations, les fissures verticales apparaissent de plus en plus, ce qui conduit à la rupture du prisme par une cassure au milieu de celui ci. L'exemple illustrant ce cas est montré par la (**figure I.19-c**).

Le diagramme force-déplacement est obtenu sur un prisme de 500 × 250 × 600 mm^3, composé de briques pleines en boue. On remarque que l'augmentation de la vitesse de chargement mène à une rupture de plus en plus fragile.

L'essai uni axial dans la direction parallèle aux joints horizontaux a reçu une attention moins importante par la communauté scientifique. Cependant, la maçonnerie représente un matériau anisotrope et la résistance à l'effort de compression appliqué suivant les joints horizontaux peut avoir une influence sur la force ultime de rupture. D'après Hoffmann et Schubert **[47]**, le ratio entre les résistances à la compression parallèle et normale au joint horizontal est compris entre 0.2 et 0.8. Ces résultats ont été observés sur des éprouvettes de maçonnerie qui sont constituées par des briques pleines et perforées à base d'argile, de calcium silicate et aussi du béton léger.

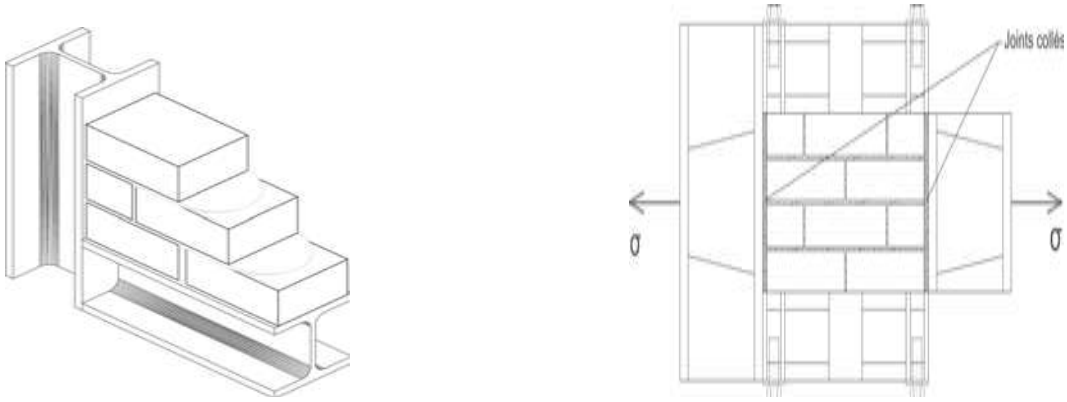
III.2.2. Comportement sous sollicitation de traction uni-axiale :

Pour une structure maçonnée soumise à une charge de traction dans le sens perpendiculaire aux joints horizontaux, la rupture est généralement causée par le décollement entre les briques et le mortier. Le comportement à la traction peut être caractérisé par la résistance d'adhérence entre la brique et le joint de mortier, donc par la tenue en traction de l'interface (élément/mortier). Il faut signaler que le mécanisme d'adhérence entre les briques et le mortier est peu connu.

Cependant, il semble que ce mécanisme est dû à un processus physico-chimique dans lequel la porosité des deux composants joue un rôle essentiel. Par conséquent, les sables fins dans le mortier diminuent l'adhérence. Par ailleurs, cette adhérence entre le mortier et les briques ne se produit pas sur toute la surface de contact. On peut estimer que la surface nette d'adhérence apparaît à l'intérieur de la surface de contact et en représente approximativement 59 % dans le cas d'un mur simple **[48]**,**[49]**.

Des essais ont été effectués par Backes **[50]** pour étudier le comportement des maçonneries soumises à un chargement de traction parallèle aux joints horizontaux.

Le spécimen est réalisé sur une structure métallique comme on peut le voir sur la **figure III.2-a** ; les deux profilés métalliques utilisés devront former un angle droit pour obtenir la précision souhaitée. Le chargement est effectué via les plateaux d'acier attachés au spécimen par une colle très résistante à la traction (**figure III.2- b**).



(a) (b)

Figure III.2 : Essai de traction dans la direction parallèle aux joints horizontaux
a) Phase de construction b) Dispositif de l'essai de traction.

Les diagrammes contrainte - déplacement sont représentés sur la **figure III.3 (a - b)** ;
Les résultats ont montré que :

- La rupture est produite le plus souvent par un glissement dans les joints horizontaux et une perte d'adhérence dans les joints verticaux.
- Lorsque la résistance à la traction des briques est plus faible que l'adhérence entre ces dernières et le mortier (dans le cas d'un mortier résistant par rapport aux briques perforées ou creuses), la rupture peut se produire par le dépassement de la résistance à la traction des briques. Ceci peut influencer la résistance à la traction globale de la maçonnerie qui est finalement dominée par la résistance à la traction des briques.

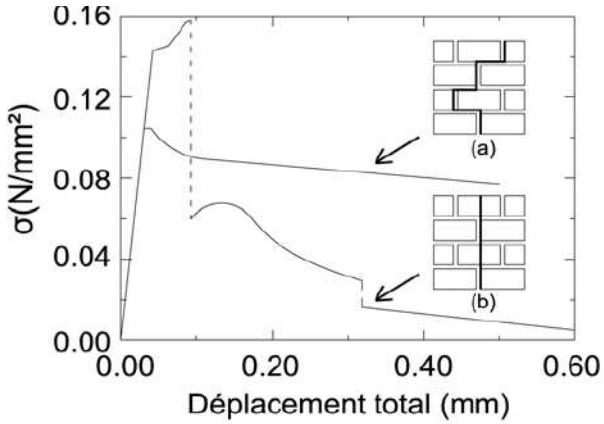


Figure III.3: Diagramme contrainte -déplacement pour un essai de traction suivant la direction parallèle aux joints horizontaux :
a) Rupture induite par le glissement dans les joints horizontaux et une perte d'adhérence dans les joints verticaux.
b) Rupture totale des joints et des briques. **[50].**

III.2.3. Comportement bi-axial :

L'anisotropie d'un élément en maçonnerie engendrée par la faiblesse des joints par rapport aux briques et/ou blocs nécessite l'analyse du comportement sous chargement bi-axial.

Le comportement doit être décrit par un tenseur de contraintes complet, c'est-à-dire tenir compte de l'anisotropie du matériau maçonnerie, qui implique des comportements différents suivant les axes matériels.

Les cas étudiés expérimentalement sur des maçonneries soumises à un chargement bi-axial sont montrés par la **figure III.4 [51]**,**[52]**.

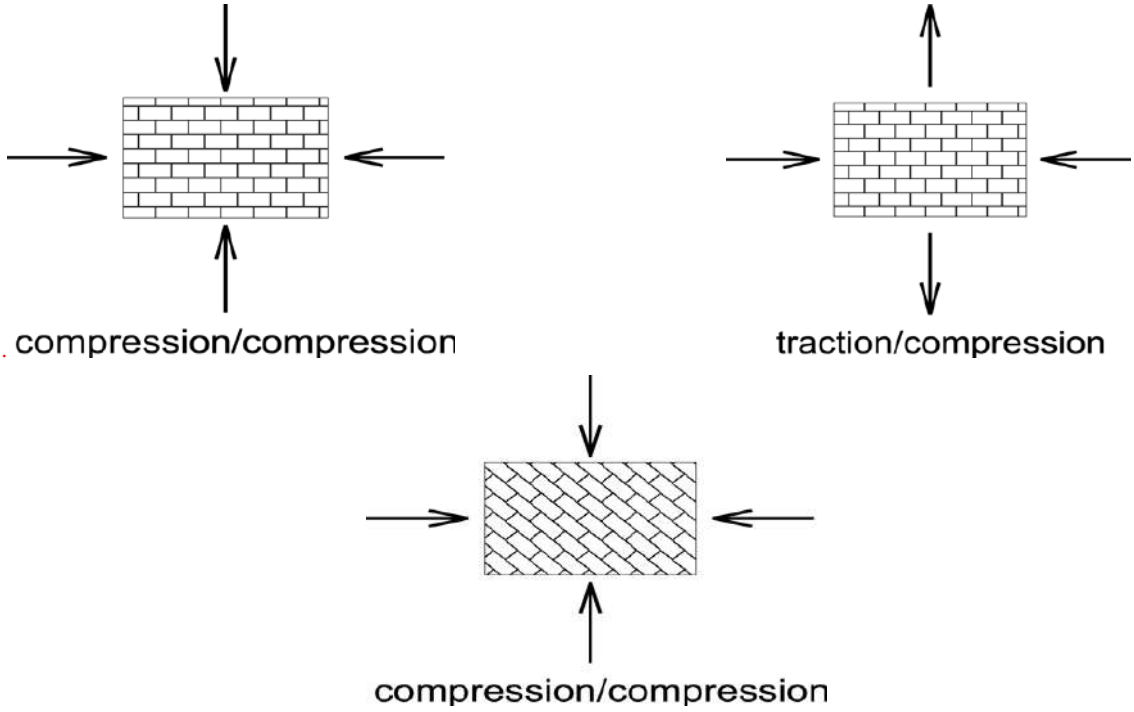


Figure III.4 : Essai bi-axial sur des panneaux de maçonnerie.

Ces tests ont été effectués sur des prismes représentatifs en briques à base d'argile. L'orientation des contraintes principales par rapport aux axes du matériau et le rapport des contraintes principales influent considérablement sur le mode de rupture et bien évidemment sur la résistance; les différents modes de ruptures sont illustrés par la **figure III.5**.

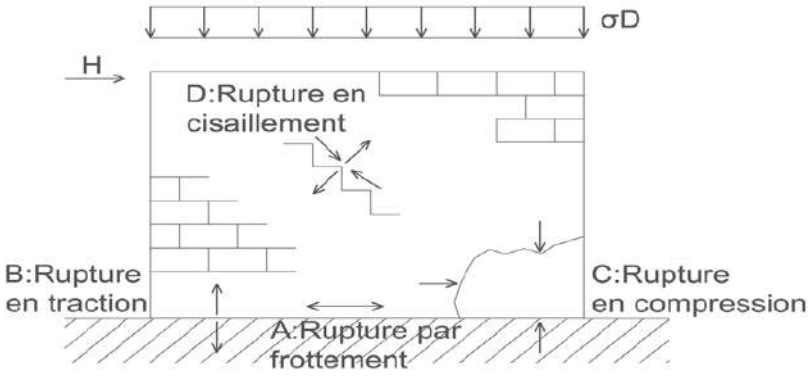
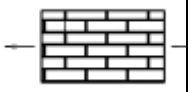
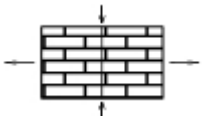
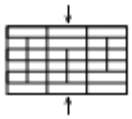
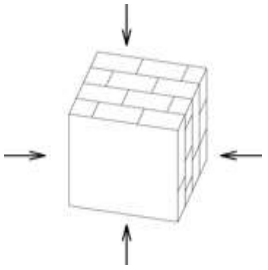
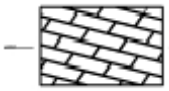
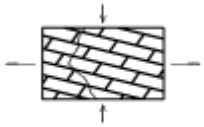
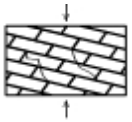
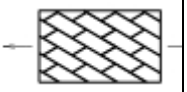
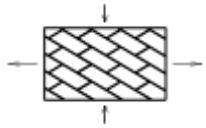
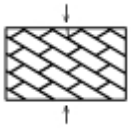
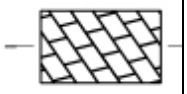
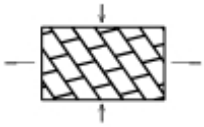
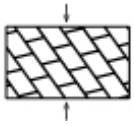
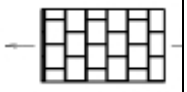
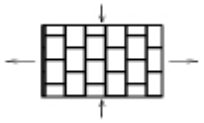
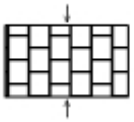


Figure III.5 : Modes de rupture d'un mur en maçonnerie soumis un chargement bi-axial

- Pour une traction uni-axiale, la rupture est produite par des fissures et le glissement des joints verticaux et horizontaux. La contrainte de compression latérale diminue la résistance à la traction, ce qui peut être expliqué par l'endommagement induit sur la maçonnerie par les glissements des joints et par les microfissures au niveau des briques.
- Dans le cas de chargement compression- traction, la rupture est induite soit par le glissement soit par la fissuration des joints combinés dans certains cas avec la fissuration des briques.
- Des cas similaires de rupture sont constatés pour la compression uni-axiale. Les plans de rupture sont toujours perpendiculaires au plan du panneau.
- Concernant le **tableau 1.7**, l'angle θ mesure l'orientation des efforts principaux par rapport aux axes horizontal et vertical. Pour ce qui est de l'essai bi-axial, pour la plupart des rapports de contraintes principales σ_1/σ_2, la rupture apparaît dans un plan parallèle aux surfaces libres du panneau, indépendamment de l'orientation des axes principaux. Ce mode de rupture se rencontre couramment dans les cas des murs doubles (composites) ou à âme remplie, où les interfaces entre les différentes couches verticales sont des surfaces mécaniquement faibles. Si une des contraintes principales est dominante, la rupture se produisant de façon perpendiculaire aux surfaces libres, est provoquée par le glissement dans les joints. Dans ce dernier cas, l'anisotropie due à l'orientation des joints joue un rôle considérable **[40]**,**[51]**.

Tableau III.1 : Modes de rupture d'une maçonnerie constituée de briques à base d'argile soumise à un chargement bi-axial. **[53]**

Angle θ	Traction Uni-axiale	Traction/ compression	Compression Uni-axiale	Compression Bi-axiale
θ = 0°				
θ = 22,5°				
θ = 45°				
θ = 67,5°				
θ = 90°				

III.2.4. Comportement au cisaillement :

Les murs en maçonnerie peuvent être soumis à des efforts horizontaux, tels que le vent, les poussées de terre et les tremblements de terre, dans leurs plans et aussi suivant le plan perpendiculaire aux murs. L'évaluation de la résistance des maçonneries due aux efforts de cisaillement permet de prévoir et estimer la stabilité et la fiabilité de la structure.

III.2.5. Modes de rupture dus au cisaillement dans le plan du mur :

Dans ce cas, le mur est soumis à des efforts horizontaux, en plus d'un chargement vertical dans le plan du mur. Ce chargement bi-axial est simplifié par le schéma proposé par la **figure III.6** illustrée précédemment.

Le mur est soumis à un chargement vertical uniforme le long de la partie supérieure qui vient s'ajouter une charge horizontale concentrée.

Les différents modes de ruptures obtenus sont :

1. Rupture due au frottement et au cisaillement horizontal au niveau des joints horizontaux

2. Rupture en traction dans les joints inférieurs du mur causée par le moment d'encastrement,
3. Rupture en compression de la maçonnerie à la base du mur induite par la force de traction transversale dans les unités et enfin rupture due au cisaillement.

Dans ce dernier cas, la combinaison des efforts de compression et de traction conduit à une rupture diagonale du mur. Ce mode de rupture peut être décomposé en une rupture des joints horizontaux et une rupture en traction des briques.

Pour un effort vertical et une force de cisaillement faibles, la rupture diagonale se produit le long des joints verticaux et horizontaux et prend une forme d'escalier.

Pour le cas d'un effort vertical de forte intensité et une faible force de traction dans les briques, la rupture diagonale passe à travers les briques et le long des joints verticaux.

Ce dernier mode est appelé aussi rupture fragile ou effondrement. Il est généralement causé par la dégradation de la rigidité de la maçonnerie d'une part, d'autre part, la rupture des joints est considérée comme étant une rupture ductile parce que même après l'apparition de fissures en forme d'escalier, des forces horizontales peuvent encore induire du frottement **[40]**.

III.2.5.1.Théorie de rupture en cisaillement d'un mur dans son plan d'après Mann/Muller :

La théorie de rupture conçue par Mann et Muller **[54]**, pour une maçonnerie chargée dans le plan du mur, suppose que le transfert de la contrainte de cisaillement dans les joints verticaux est négligeable voire même inexistant. En fait, cela est dû à de faibles efforts horizontaux de compression et à l'absence totale d'efforts de cisaillement dans les joints verticaux, du fait que le frottement est activé. De plus, les joints verticaux qui devraient être complètement remplis de mortier ne le sont souvent pas correctement remplis en pratique.

Ainsi les bords du mortier ont tendance de se détacher des briques lorsque le mortier se rétrécit. Cela signifie donc qu'on réduit considérablement la force d'interaction entre l'unité et le mortier. De ce fait, les efforts de cisaillement ne peuvent être transférés.

En outre, les efforts de cisaillement agissant dans les joints verticaux créent un moment de torsion agissant sur les unités individuellement. Pour atteindre le moment d'équilibre, la contrainte axiale est distribuée autour des faces supérieure et inférieure de la brique. La distribution de la contrainte de compression est représentée par une progression en escalier suivant le modèle montré sur la **figure III.5** précédente qui a été vérifiée par des essais expérimentaux.

En utilisant ce modèle, Mann et Muller ont développé une enveloppe de rupture (**Figure III.6**) **[40]** qui permet d'avoir une relation entre les efforts de cisaillement et la contrainte de cisaillement axiale verticale. La rupture prend place au-dessus de cette courbe.

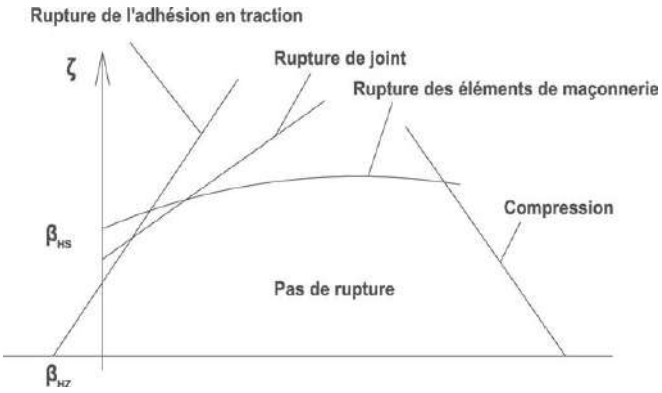


Figure III.6 : Enveloppe des différents cas de ruptures.

Les quatre modes de rupture associés sont les suivants (**figure III.7**) :

1. Rupture traction- adhésion entre les joints de mortier et les briques de maçonnerie :
dans ce cas la contrainte de compression perpendiculaire aux joints horizontaux est moins importante à cause d'un faible chargement. Cependant, les faibles contraintes axiales dans une région de la brique deviennent uniquement des contraintes de traction.
Si la force d'adhésion de traction est augmentée, alors le joint horizontal se rompt en partie.

2. Rupture de joint : la rupture par frottement au niveau du joint horizontal se produit lorsque l'effort de cisaillement (la somme de l'effort de cisaillement et de la résistance de friction) est important au milieu de la brique qui est la région la moins chargée.
Ce type de rupture se produit lorsqu'on a une charge moins importante et avec des briques résistantes à la traction. La rupture occasionnée est alors diagonale, en forme d'escalier le long des joints horizontaux et verticaux.

3. Rupture en traction des unités : ce type de rupture se met en place sous l'effet d'un chargement vertical important et en présence de briques moins résistantes en traction.
Dans ce cas là, la résistance au cisaillement dans le joint horizontal augmente uniquement pour une bonne résistance de frottement. Les unités doivent transférer l'effort de cisaillement à partir de deux directions ; parce qu'il n'est pas possible de transférer la contrainte de cisaillement vertical sur le joint vertical, avec les contraintes de compression perpendiculaire, ceci va induire initialement des contraintes de traction diagonale dans les briques. Si la force de traction dans les unités est dépassée, des fissures diagonales peu profondes apparaissent sur les briques et continuent au niveau des joints verticaux.

4. Rupture de la maçonnerie en compression : un chargement vertical important conduit à la ruine de la maçonnerie. A cause de l'importance des contraintes axiales qui se développent sur les briques individuellement, et qui ont dépassé la résistance à la compression de la maçonnerie. Il en résulte ainsi des contraintes de compression diagonales.

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. **[40], [54]**

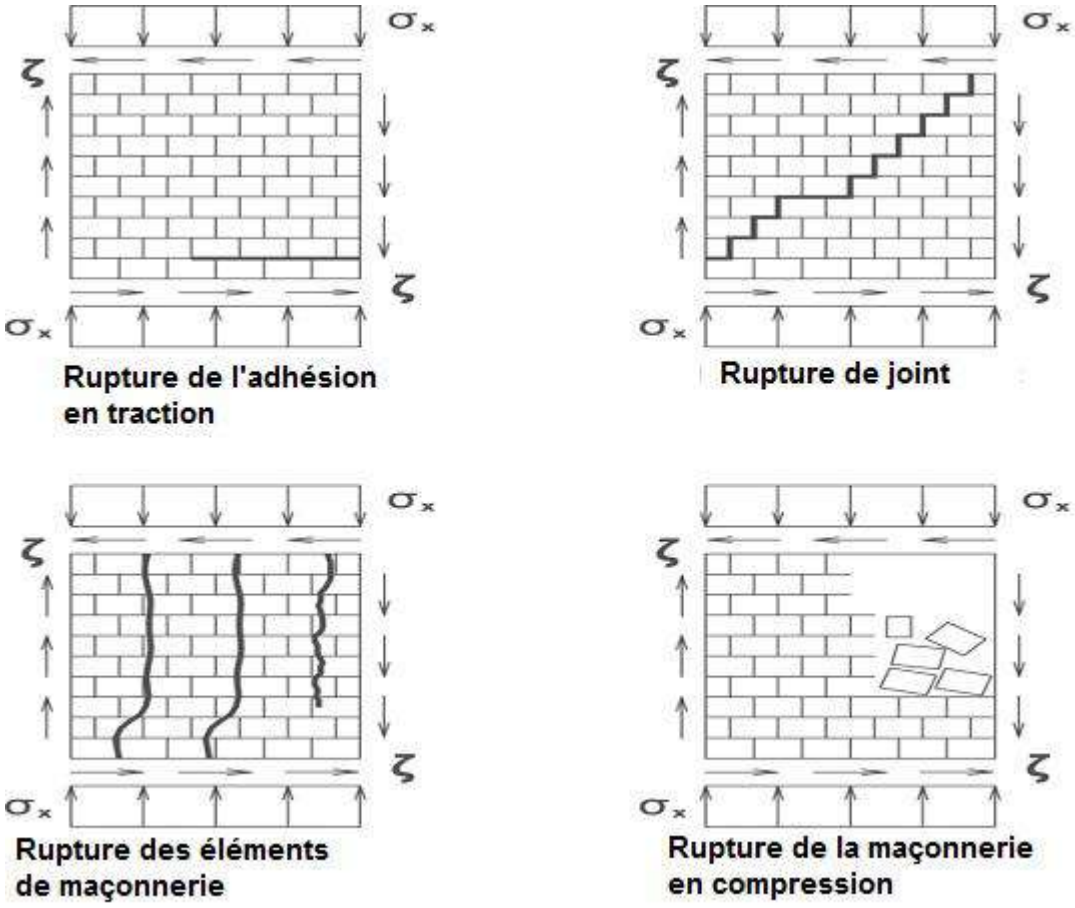


Figure III.7 – Modes de ruptures pour un mur de maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement **[54]** .

III.2.6. Essais de cisaillement :

III.2.6.1. Essai sur couplet de briques :

Le comportement des murs soumis au cisaillement pur, ou combiné avec la compression peut être évalué à l'aide de plusieurs types d'essais. On peut opérer ces essais sur des panneaux de grandes dimensions ou sur de simples montages de triplets de briques. Les plus simples essais de cisaillement sont exécutés sur deux briques liées par du mortier (couplets) ou sur un assemblage de trois briques (triplets) (**Figure III.8**). **[55],[56]**

Ces essais permettent de déterminer la résistance au cisaillement pur ($\boldsymbol{\sigma_c}$=0), et le coefficient de frottement ou de frottement **μ** en utilisant la combinaison cisaillement avec compression. Cet essai s'effectue jusqu'à un niveau de compression limite, au-delà duquel le panneau ou l'assemblage cesse de supporter la contrainte de compression maximale **[55],[56]**.

Les essais de cisaillement avec compression sur panneaux sont plus réalistes que les spécimens de couplets ou triplets, on a uniquement un joint de mortier parallèle à l'action de la charge. Par contre dans le panneau, on en trouve des joints verticaux et horizontaux, comme on le trouve réellement au niveau des murs à grandeur réelle. Les essais expérimentaux réalisés sur des couplets, triplets ou murs soumis aux cisaillements avec compression ont montré que plus la contrainte de compression augmente, plus la résistance au cisaillement augmente en suivant la relation suivante :

$$\boldsymbol{\tau = \tau_o + \mu\sigma_c}$$

Avec :

$\boldsymbol{\tau_o}$: contrainte au cisaillement initial (pour $\sigma_c = 0$) μ Coefficient de frottement

$\boldsymbol{\sigma_c}$: Contrainte de compression

(Abdou L. et al **[55] [56])**ont effectué des essais pour étudier le comportement de la combinaison briques mortier sous chargement/déchargement de cisaillement et sous chargement monotonique de cisaillement; dans le but d'analyser :

- Si une dégradation de la rigidité se produit
- Si le comportement des joins de mortiers dépend du type des briques (pleines ou creuses)
- Comment le critère classique de Mohr Coulomb s'adapte

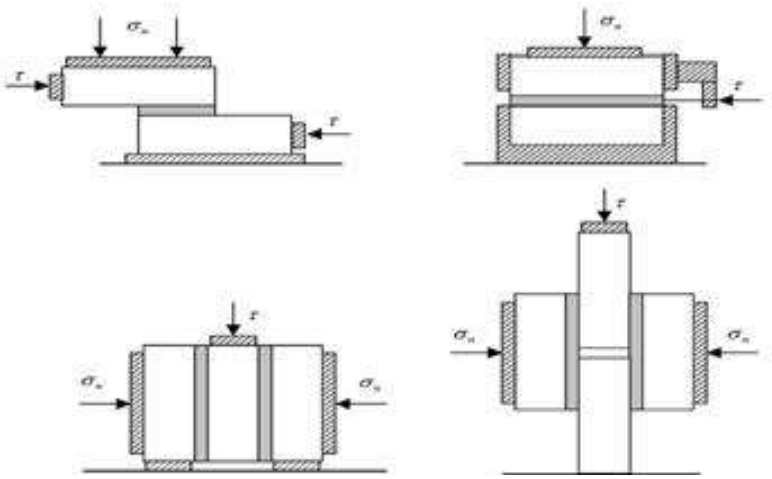


Figure III.8 : Assemblage des briques utilisées pour étudier le comportement en cisaillement, Abdou et al (2006) **[56]**.

Ils ont constaté que :

- Le comportement du joint de mortier est supposé être élastoplastique pour les deux types de briques (pleines et creuses) ; en remplissant les trous des briques avec du mortier conduit à une augmentation du module de cisaillement pour ce type de brique.
- Lorsque le cisaillement est combiné avec la compression, la fissuration du joint de mortier est décrite par le critère de Mohr Coulomb **[55] [56].**

III.2.6.2. Essai sur murets :

Dans le but de déterminer les paramètres du comportement au cisaillement de la maçonnerie, (Gabor A et al (2006) **[55], [57])** ont effectué un essai conformément aux recommandations RILEM, le dispositif expérimental (**figure III.9**) est conçu de telle manière qu'on peut simultanément appliquer une charge statique horizontale de confinement et une charge verticale de cisaillement croissante.

Le comportement mécanique du muret est caractérisé par un comportement très rigide dans le domaine élastique avec des déplacements de l'ordre des microns.

Lorsque la contrainte maximale de cisaillement est obtenue, un comportement doux suivi d'un glissement entre deux briques adjacentes.

La fissuration se manifeste au niveau de l'interface (briques/mortier) mais il a été remarqué que la contrainte maximale de cisaillement correspond au moment de la rupture de murets **[57]**.

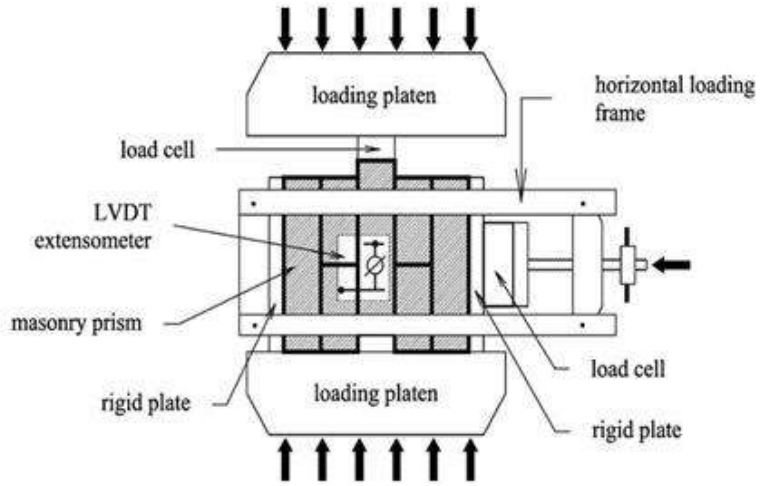


Figure III.9 : Essai de cisaillement sur prisme en maçonnerie

Dans le but d'analyser un essai approprié qui reproduit l'état prédominant de contraintes de cisaillement dans un panneau en maçonnerie ,il est important de connaitre la distribution des contraintes de cisaillement dans le panneau et comment elles sont générées expérimentalement **[57]**.

Si on considère un élément de maçonnerie carré homogène et élastique soumis seulement aux contraintes de cisaillement, les contraintes principales crées seront inclinées de 45° par rapport aux axes des joints de mortiers horizontaux et verticaux, une de ces contraintes est une contrainte de compression et l'autre et une contrainte de traction, leurs valeurs sont égales avec la valeur de la contrainte de cisaillement initiale.

Il est supposé que la fissuration se produit si la contrainte principale de traction atteint la résistance à la traction diagonale de la maçonnerie, cette fissuration est en même temps un glissement au niveau des joints de mortier et la fissuration des briques.

III.3. Comportement de la maçonnerie en compression diagonale :

III.3.1. Introduction :

L'analyse des murs en maçonnerie dans les structures soumises aux charges horizontales montre que les fissures apparaissent le long de la diagonale comprimée. Ceci est le même mode de rupture que celui qui est produit par traction diagonale (**figure III.10**) **[55] [58]**.

La compression diagonale est une caractéristique très importante dans la conception des structures à remplissages en maçonnerie soumises aux efforts horizontaux dû aux séismes ou au vent, et soumises également aux efforts gravitaires dûs aux charges permanentes ou aux surcharges d'exploitation. Etant donné que les différentes charges peuvent intervenir en même temps, leur résultante sera composée d'un effort incliné **[58]**.

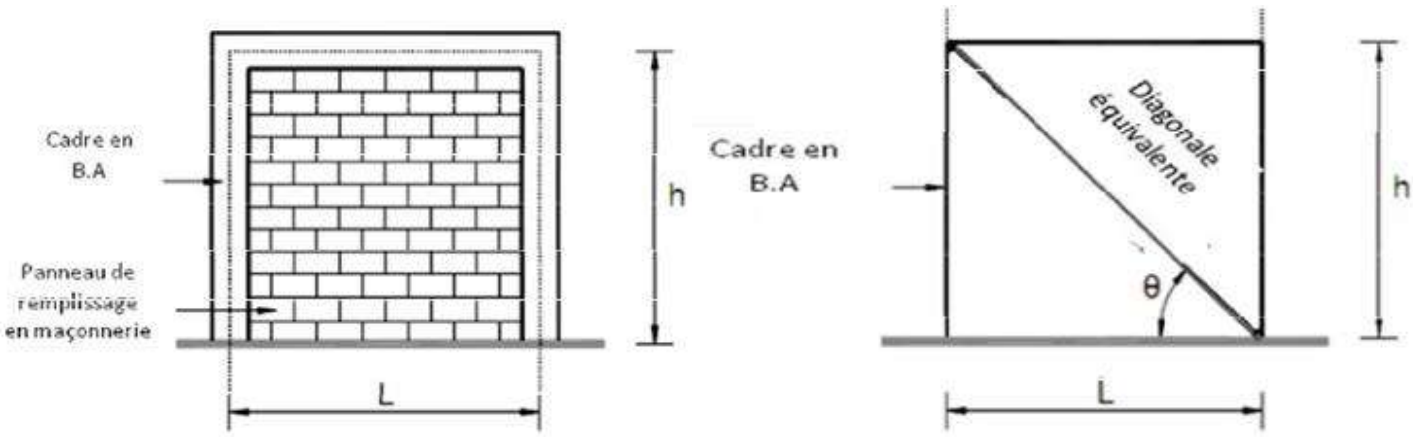


Figure III.10: Diagonale équivalente d'un panneau avec remplissage en maçonnerie **[58].**

III.3.2. Comportement structural des remplissages en maçonnerie sous charges horizontales :

Quand un panneau en maçonnerie est sujet à des charges horizontales, les modes de rupture qui peuvent avoir lieu sont **[55] [59]** :

- Ecrasement local des maçonneries ou du mortier prés du lieu de l'application de la charge ou de la réaction.
- Fissuration de tension le long des joints de mortier.
- Fissuration de cisaillement le long du joint de mortier.

Carte C and Stafford Smith (1969) **[59]** ont étudié la rigidité et la résistance de la maçonnerie remplissant les cadres soumises à des charges horizontales, ils ont établi les remarques et conclusions suivantes :

- Quand un portique à remplissage est sujet à des charges horizontales, la rigidité horizontale peut être estimée en considérant que le remplissage est remplacé par un équivalent support diagonal.

- Le panneau de maçonnerie normalement s'affaiblit par cisaillement le long des joints de mortier ou à travers le mortier et la maçonnerie.

- Le mode de rupture est gouverné partiellement par la géométrie de la structure qui influence les grandeurs relative au cisaillement et les contraintes de tension diagonale dans le panneau.

- Le grand rapport (longueur/hauteur) du panneau correspond à une possibilité de rupture par tension plus petite.

- Le mode de rupture est gouverné aussi par la résistance au cisaillement et le frottement interne de la maçonnerie.

III.3.3. Essai de compression diagonale :

D'après Gabor.A, (2006) **[57]**, lorsque des charges de compression et de traction sont appliquées simultanément le long des deux diagonales d'un panneau en maçonnerie, elles produisent un état de contrainte de cisaillement pur qui engendre la rupture par fissuration le long de la diagonale comprimée.

Mais ce type d'essai n'est pas facile à exécuter, donc il est préférable d'exclure la charge de traction le long d'une des diagonales et appliquer seulement la charge de compression.

Cette compression appliquée suivant une diagonale va produire une contrainte équivalente à une compression bi-axiale et une contrainte de cisaillement le long des joints de mortier.

La contrainte de compression et de cisaillement ayant la même intensité qui égale à la moitier de la contrainte de compression appliquée le long de la diagonale.(**figure III.11**).

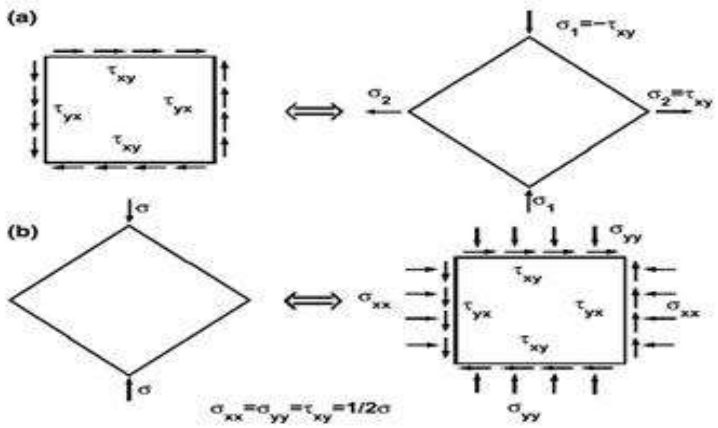


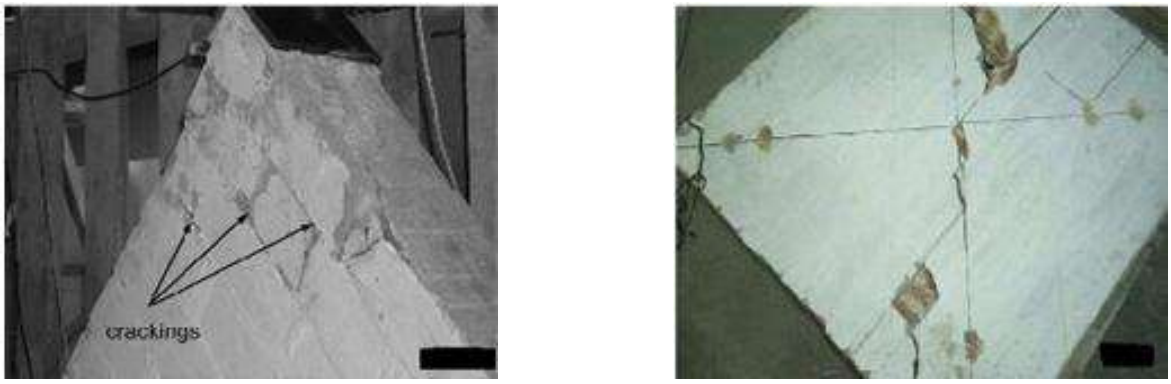
Figure III.11 : (a) Panneau carré homogène soumis à l'effet de cisaillement pur. (b)État de contrainte produit dans un panneau carré soumis à la compression diagonal. **[57]**

Les recommandations de l'essai RILEM propose un essai de compression inclinée sur un panneau en maçonnerie dans le but d'estimer la résistance de traction de la diagonale. Deux panneaux ont été utilisés (**figure III.12**) et (**figure III.13)** :

- Un panneau ayant la longueur de contact : r = h/10
- Un panneau ayant la longueur de contact : r = h /6



Figure III.12 : Essai RILEM de compression diagonale



(a) r = 1/10 (b) r = 1/6

Figure III.13 : Fissuration et rupture du panneau (essai RILEM)

Pour le premier cas on obtient une rupture localisée avec un écrasement et un glissement des joints de mortier.

Pour le second cas on note un type généralisé de rupture, la fissuration se produit le long de la diagonale comprimée.

IV.1. LES MATÉRIAUX COMPOSITES :

IV.1.1. Introduction :

Les matériaux composites résultent d'un assemblage d'au moins de deux ou plusieurs composants de natures différentes non miscibles, dont les propriétés se complètent pour constituer un nouveau matériau qui possède des propriétés plus performants que les composants seuls ne possèdent pas.

Exemples : le béton armé= composite (béton+ armature en acier)

IV.1.2. Polymères renforcés de fibres « PRF » :

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse composés principalement de renforts (fibres) continues, ou discontinues, imprégnés par un liant appelé matrice (résines), d'où les propriétés mécaniques sont notamment gouvernée s par le comportement (résistance et rigidité) des fibres.

Ils sont disponibles sous la forme de tiges, des grilles, des feuilles et des brins d'enroulement.**[60]** .**[61]**

Ces composants doivent êtres compatibles et solidaires entre eux, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Les fibres présentent des résistances en traction et des modules d'élasticité nettement supérieurs aux matrices polymères qui assurent la cohésion du matériau composite. .**[60] [62]**

Les fibres utilisées pour le renforcement présentent un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture. (**figure IV.1).**

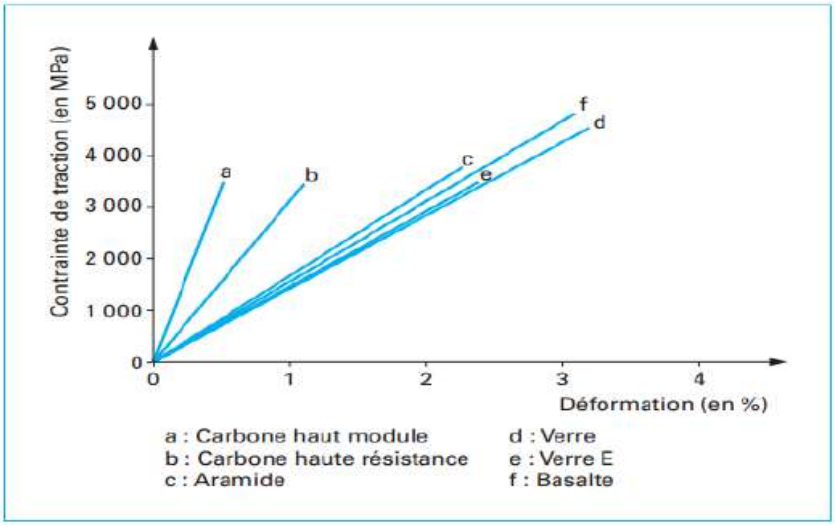


Figure IV.1 : Différentes lois de comportements des fibres.**[60] [62]**

Dans le domaine du génie civil, les composites unidirectionnels sont les plus courants.

Le comportement mécanique des matériaux composites dépend de plusieurs facteurs :

- Le type et l'orientation de fibre,
- La fraction volumique de fibres,
- Le type de matrice et la méthode de fabrication.

IV.1.3. Les constituants d'un polymère renforcé de fibres :

IV.1.3.1. Les fibres :

Les fibres (renforts) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité du PRF. Elles sont constituées de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5µm et 25µm.(**figure IV.2**).

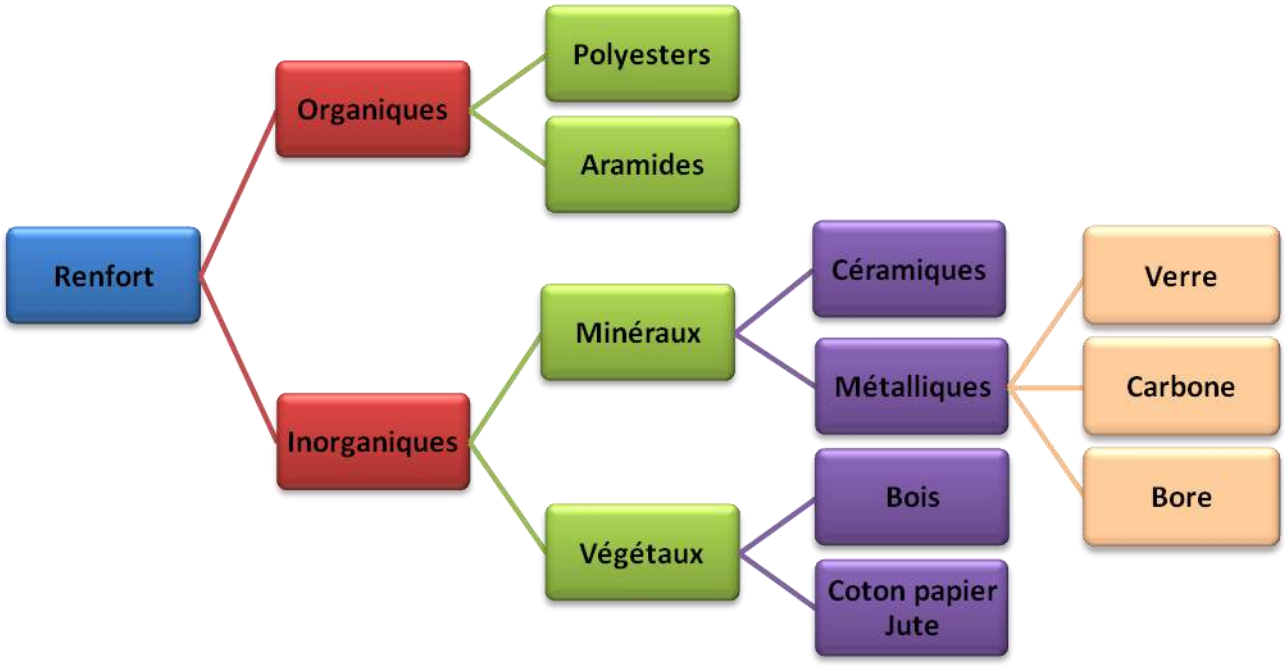


Figure IV.2 : Organigramme des différentes familles de fibres

Les exigences structurelles **[60] ,[63]** et fonctionnelles souhaitables des fibres dans les matériaux composites sont :

- Un module d'élasticité élevé,
- Une haute résistance et une bonne élongation à la rupture en traction,
- Une bonne répartition des efforts entre les différentes fibres,
- La stabilité des propriétés lors de la manipulation et la fabrication,
- L'uniformité du diamètre des fibres et de la surface,

- Une dureté élevée,
- La durabilité et un coût acceptable.

En génie civil, les fibres les plus utilisées pour fabriquer les renforts en PRF, sont :

a. Les fibres de carbone (PRFC) :

Les fibres de carbone peuvent être obtenues à partir de brut de pétrole ou de charbon, ou bien de manière synthétique au moyen de poly-acrylonitrile.

Il existe de deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation.

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation. De plus, ils sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques.**[60]**

b. Les fibres de verre (PRFV) :

Les fibres de verre sont moins chères et présentent une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité, ce qui les rend la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'auto mobiles.

Par contre les plus grands inconvénients des fibres de verre sont les problèmes de relaxation (sensibilités à l'humidité) et leur dégradation par des phases alcalines, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.**[60]**

Les différents types de fibres de verre, classés selon leurs applications spécifiques, sont:

- Verre E (Electrique) possédant d'excellentes propriétés d'isolation électrique (le moins cher) ;
- Verre S (Résistant) ayant de très hautes résistances et rigidité à la traction (le plus cher) ;
- Verre C (Chimique) stable chimiquement dans les environnements acides ;
- Verre AR (Alcali-Résistant) utilisé pour prévenir la corrosion par l'attaque alcaline dans des matrices cimentaires.

c. Les fibres d'aramides (PRFA) :

Les fibres d'aramide ont été introduites en 1971, elles sont obtenues à partir de polymères polyamides aromatisés.

La structure de la fibre d'aramide est anisotrope et donne une plus grande résistance et un module dans la direction longitudinale de la fibre.**[60]**,**[64]**.

Les fibres d'aramide sont produites par plusieurs fabricants sous différents noms de marque telles que :

- Kevlar (Dupont, USA) ;
- Twaron (Akzo, Pays-Bas) ;
- Technora (Teijin, Japon) ;
- SVM (Russie).

Les principaux avantages de ces fibres portes sur :

- leur très grande ténacité qui leur confère une bonne résistance au choc et à la fatigue ;
- un comportement élastique en traction et ductile en compression.

Par contre Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées et aux radiations « ultra violet ».

d. Les fibres de basaltes (PRFB) :

Ces fibres sont obtenues par la transformation de laves d'origine volcanique. Elles sont composées de minéraux comme le plagioclase, le pyroxène et l'olivine et présentent des propriétés chimiques très intéressantes, essentiellement ses résistances au feu.

Les fibres de basaltes sont utilisées dans des applications des barres d'armature en composite, les résultats des essais physiques ayant montré une résistance maximale à la traction jusqu'à (04) fois supérieure à la résistance à la traction d'une barre d'armature classique en acier.**[60]65].**

Les différents types de fibres peuvent être transformés suivant des techniques, telles que le tissage, tricotage, tressage pour réaliser des surfaces textiles ou étoffes. Il est possible de générer des tissus de renfort bi ou tridimensionnel.**[60]**,**[66] (figure IV.3)**

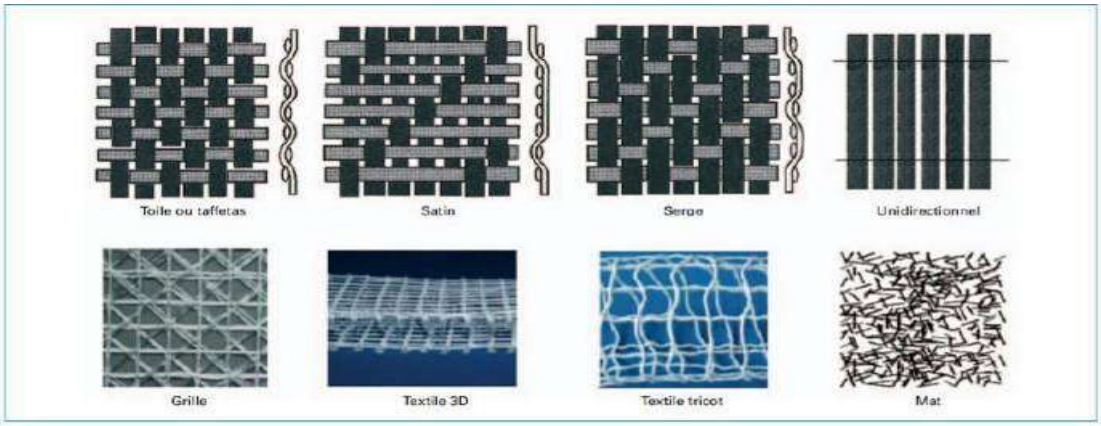


Figure IV.3 : Quelques formes disponibles de renfort en fibres.

IV.1.3.2. Les Caractéristiques des fibres et renforts :

La fonction mécanique du renfort doit être préalablement définie, car le positionnement de la fibre définit une direction privilégiée des caractéristiques mécaniques (**tableau IV.1**); ainsi les matériaux composites sont beaucoup plus efficaces dans la direction des fibres. **[60]**,**[67]**

Tableau IV.1 : Résumé sur les principales caractéristiques des fibres de renforcement.**[60]**,**[67]**

Type de fibres	Densité ($kg.m^3$)	Résistance en traction (Mpa)	Module de Young (GPA)	Allongement rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique ($10^{-6}/C^o$)	Coefficient de poisson
Verre E	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
Verre S	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
Verre alcali résistant	2270	1800 - 3500	70 - 76	2.0 - 3.0	-	-
ECR	2620	3500	80.5	4.6	6	0.22
Carbonne (haut module)	1650	2500 - 4000	50 - 500	0.5	-1.2… -0.1	0.20
Carbonne (haute résistance)	1750	3500	240	1.1	-0.6… -0.2	0.20
Aramide (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramide (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramide (Kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramide (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-6.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramide (SVM)	1430	3800 - 4200	130	3.5	-	0.35
Basalte (Albarrie)	2800	4840	89	3.1	8	0.30

Le **tableau IV.2 :** présente une étude comparative rapide de quelques fibres présentées dans cette section : d'après U.Meier.**[65] [68]**

Tableau IV.2 : Comparaison qualitative entre les fibres .**[65] [68]**.

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibre de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquat
Résistance alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bon

IV.1.3.3. Les matrices :

La matrice est un polymère, thermodurcissable (le plus fréquent) ou thermoplastique, **(Figure IV.4),** elle a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi quelques fonctions comme la protection du renfort contre les conditions environnementales et les attaques externes, la répartition des charges et l'assemblage des fibres pour donner la forme voulue du composites.**[60]**

Les différents paramètres qui influencent les propriétés mécaniques des polymères sont :

- la température ;
- la forme et la distribution des masses moléculaires ;
- la cristallinité;
- la fréquence

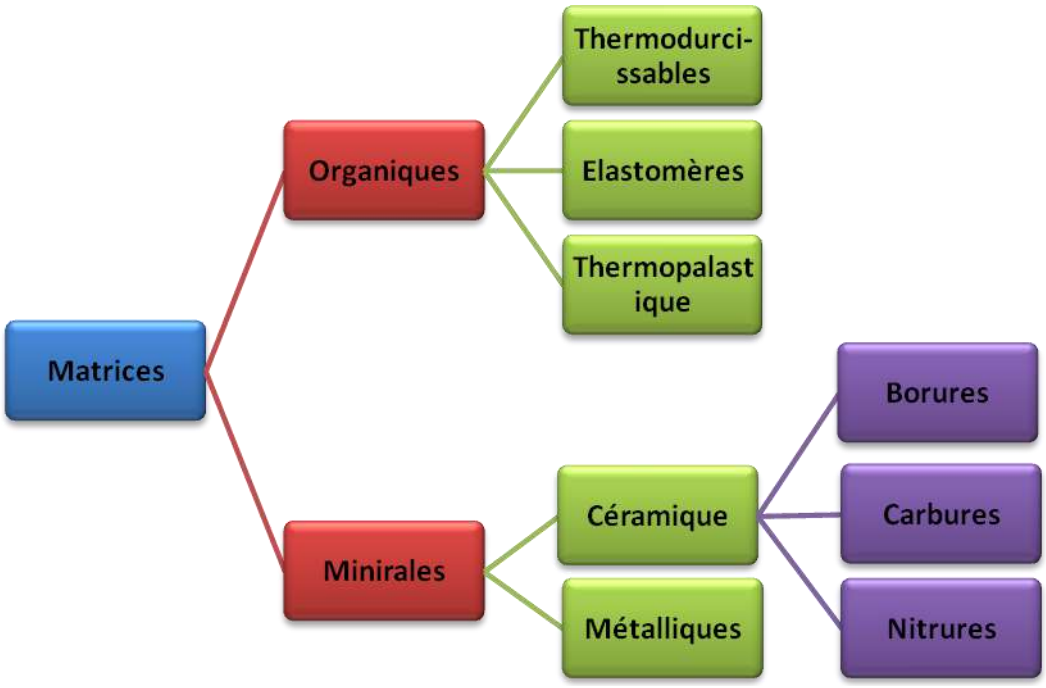


Figure IV.4 Organigramme des différentes familles de matrices. **[60]**

Deux grandes familles de matrices polymères sont actuellement utilisées:

a. Les résines thermodurcissables (TD) :

Elles sont associées à des fibres longues, leur structure à la forme d'un réseau tridimensionnel, dont la transformation est irréversible. Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise-en œuvre des matériaux composites.

Parmi ceux qui sont les plus utilisés: **(tableau IV.3) [60].**

- les résines polyesters (UP) : sont généralement utilisées avec les fibres de verre ;
- les résines vinylesters : sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyesters ne sont pas suffisantes ;
- les résines époxyde (EP) : qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone ;
- les résines polyimides thermodurcissables (PIRP) : pour des applications à haute température;
- les résines phénoliques (PF) : utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes.

Tableau IV.3: Caractéristiques physiques et mécaniques des résines thermodurcissables (TD) **[60].**

Type de résine	Masse spécifique (kg/dm^3)	Module d'élasticité (Gpa)	Coefficient de poisson	Résistance en traction (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Allongement à la rupture (%)	Tenue à la température en continu (C°)
Polyester	1.2	2.9 – 3.1	0.4	50 – 60	1400	2 – 3	120
Vinylester	1.1	3.4 – 3.5	0.4	70 – 85	1200	2 – 5	100 – 140
Epoxyde	1.1 – 1.4	3	0.4	50 – 120	1600	3 – 8	150 – 200
Polyimide	1.4 – 1.5	4 – 20	0.4	30 – 40	-	< 1	250 – 300
Phénolique	1.3	3.8 – 7	0.4	50	1100	1 – 1.5	120 – 150

b. Les Résines thermoplastiques (TP) :

Les Résines thermoplastiques **[60]** sont associées à des fibres courtes, et forment une structure réversible dont ils peuvent être recyclés et utilisés plusieurs fois. Malgré ces bonnes tenues mécaniques, elles présentent quelques inconvénients comme :

- la mauvaise adhérence sur les fibres,
- la viscosité élevée et les coûts de fabrication.

Les principales familles thermoplastiques utilisées dans les composites PRF et leurs propriétés sont représentées dans le **(tableau IV.4) :**

- le polyester-éther-cétone (PEEK) ;
- le polypropylène (PPS);
- le poly sulfone (PSUL).

Tableau IV.4 : Propriétés des résines thermoplastiques (TP). .**[60].**

Matrices	Propriétés					
	Densité (kg/m^3)	Résistance en traction (Mpa)	Module de traction (Gpa)	Allongement en traction (%)	Coefficient de poisson	Coefficient de dilatation Thermique ($10^{-6}/C°$)
polyester-éther-cétone (PEEK)	1320	100	3.24	50	0.40	47
Polypropylène (PPS)	1360	82.7	3.3	5	0.37	49
poly sulfone (PSUL).	1240	70.3	2.48	75	0.37	56

Le **tableau IV.5** présente une étude comparative rapide des différents types de matrices polymères présentées dans cette section :

Tableau IV.5 : Comparaison entre les deux types de résines. .**[60]**.

Matrices	**Thermoplastiques TP**	**Thermodurcissables TD**
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	Perdus ou recyclés en charge
Condition de travail	propreté	émanation pour « méthode humide »

V.1. Renforcement des structures par matériaux composites renforcés de fibres :

V.1.1. Historique et avantages :

Initialement développée par les industries navales et aéronautiques dans la décennie de1940,puis étendus à plusieurs autres industries, dont l'industrie automobile et pétro-chimique dans les années (1960). En raison de leurs:

- Bonnes performances mécaniques telles que la résistance spécifique élevée et la rigidité ;
- Faible densité ;
- Grande endurance à la fatigue ;
- Amortissement élevé ;
- Un faible coefficient thermique ;
- Une résistance au feu et à la corrosion ;
- L'élimination de la nécessité d'échafaudages et réduction des coûts de main-d'œuvre;
- Légèreté et durabilité, même lorsqu'ils sont soumis à des environnements relativement agressifs.

Ces caractéristiques (**tableau I.13**) avantageuses leurs intérêt croissant dans l'industrie de la construction, les principales applications industrielles de réhabilitations sont apparues en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996. .**[60] [69]**

Tableau I.13: Propriétés de matériaux composites par secteur.**[60] [69]**

Domaine d'application	Aéronautique	Automobile	Ferroviaire	BATIMENT	Construction industrielle	Industrie nautique	Médical	Electricité	Sports& loisirs
Durée de vie									
- Rigidité	-	-	-	X	-	X	X	X	X
- Résistance mécanique	-	-	-	X	X	X	X	-	X
-Tenue à la fatigue	X	-	-	-	-	X	-	-	-
-Résistance à la corrosion	X	X	-	X	-	X	X	X	-
- Etanchéité	-	-	-	X	X	-	-	-	-
Sécurité									
-Tenue aux chocs	-	X	-	-	-	X	X	-	X
-Tenue au feu	X	-	X	X	X	-	-	X	-
-Isolation thermique	-	-	-	X	X	-	-	X	-
-Isolation électrique	-	-	-	-	-	-	-	X	
-Amortissement, vibration	-	-	-	-	X	-	-	-	X
Conception									
-Intégration de fonctions	X	X	-	-	-	-	-	X	-
-Formes complexes	X	X	X	X	-	-	-	-	X
-Transparence ondes	-	-	-	-	-	-	-	X	-
-électromagnétiques	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-Allègement de structures	X	X	-	-	-	-	X	-	X

V.1.2. Applications :

La plupart des applications à travers le monde de la technique de renforcement par PRF «polymère renforcé de fibres» à structures historiques, se trouvent dans de vieux bâtiments de maçonnerie. Cependant, les structures faites de d'autres matériaux aussi, comme le bois et en fonte, ou même vieux béton, ont reçu la mise à niveau à l'aide de PRF. .**[60] , [70].**

En général, la techniques de renforcement avec des matériaux composites peut être utilisé pour améliorer la ductilité ainsi que la capacité de résistance en flexion et au cisaillement de tous les éléments structurels (poteaux, poutres, dalles, murs porteurs), les

éléments du pont (piles, tablier) et dans certains cas, des structures en béton précontraint existants.(**figure V.1**)

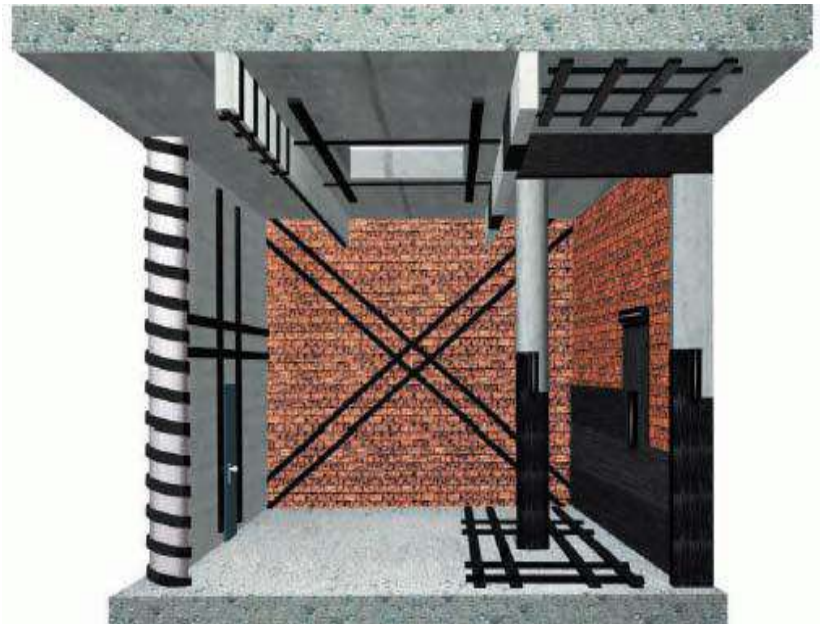


Figure V.1 : Eléments de structure pouvant être renforcé par matériaux composites.

V.1.3. Le principe de la réparation :

D'après l'Association Française de Génie Civil (AFGC), Le principe de la réparation peut- être décrit par le schéma ci- dessous (**figure V.2)** où il est possible d'identifier les différents éléments du procédé constructif : **[60] [70]**

1- Le composite : association d'un renfort (fibres) avec une matrice (polymère).
2- L'interface : est constituée soit de la colle soit de la résine.
3- La couche de béton ou maçonnerie qui peut être traitée en surface (nettoyage, sablage, couche d'imprégnation, ragréage).

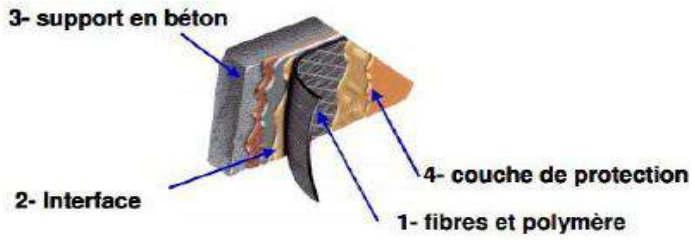


Figure V.2: Principe d'une réparation par matériaux composites.

V.1.4. Réhabilitation des murs :

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse **[68]**. Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en un bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué.

Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande.

L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de **X** pour chacun des étages (**figure V.3**).

Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.



Figure V.3 : Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse).

V.2. Essai de compression diagonale sur maçonnerie renforcée (FRP) :

Dans le cadre d'une étude sur le comportement d'ouvrages en maçonnerie situé en zone sismique, Koufache N et al (2007) **[55] [72]**ont réalisé une recherche bibliographique et des essais destructifs sur des panneaux en briques creuses, construits suivant les recommandations techniques de la **RILEM** (**figure V.4**).

Des murs renforcés et non renforcés par des matériaux composites ont été testés.

Trois types de renforts ont été utilisés :

Les fibres de verre, de carbone et le tissu de verre.

Du fait de l'objectif du renforcement, une orientation perpendiculaire des fibres du renfort à la diagonale comprimée a été retenue.

Avant l'application des composites, des murs ont été enduits par un mortier, la rupture s'est produite par un décollement du complexe mortier-composite sans endommagement du renfort.

Cette remarque est donc très importante pour la suite de notre étude.

Les résultats des essais sur les murs renforcés et la comparaison avec ceux des murs non-renforcés révèlent un gain considérable en terme de résistance : 50% pour les renforts de fibres de verre et jusqu'à plus de 75% pour les tissus de verre et fibres de carbone.

Concernant la réponse globale des murs, les résultats obtenus ont révélé une importante augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité, de 50 à 60% par rapport aux murs non-renforcés. La rupture s'est produite dans un premier temps entièrement dans la maçonnerie sans endommagement du renfort, mais il a été observé des déformations dans le composite au niveau des joints du mortier. Cette déformation est beaucoup plus élevée que dans les blocs (briques). Ainsi, lorsque le joint du mortier se fissure, il y a une redistribution de l'effort vers la partie du renfort qui se trouve au voisinage de la fissure. Par conséquent, la disposition des matériaux de renforcement a un effet très important sur le comportement local de la structure, du fait de la distribution des contraintes et de la déformation de la structure. **[73]**

Merzoud .M et al (1999) **[55] [73]** a effectué des essais de compression diagonale sur deux catégorie de muret (h/l=1.0 et h/l =0.6) avec différents longueurs d'appuis et pour différents types de briques.

Ils ont constaté que :

- La résistance des panneaux de maçonnerie est principalement basée sur la résistance au cisaillement, le coefficient d'absorption et l'adhésion entre briques et mortier.
- La résistance des panneaux carrés a été dans la plupart des cas supérieure à celle des panneaux rectangulaires.
- L'utilisation des plaques de chargement ayant une longueur de contact égale à 1/8 du coté ne permet pas de connaitre le comportement réel des panneaux de point de vue rigidité à cause de la rupture préliminaire par écrasement des coins de chargement, à cet effet il est recommandé d'utiliser une longueur de contact

minimale; l'augmentation des longueur de contact augmente la résistance au cisaillement, la tension diagonale ainsi que la largeur de la diagonale comprimée mais diminue la résistance à la compression diagonale **[55]** .

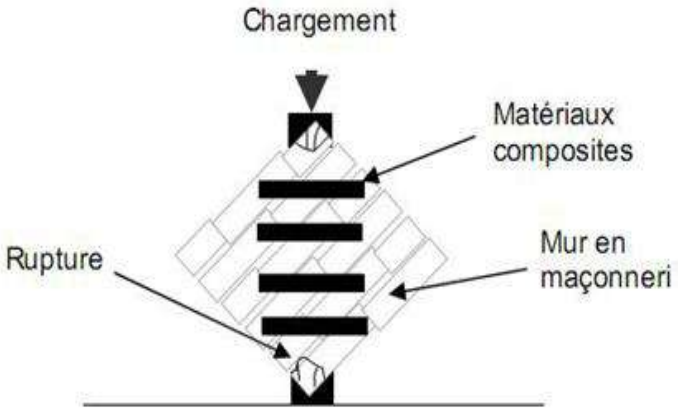


Figure I.39 : Essais de compression diagonale sur des murs renforcés.

VI.1. APPAREILLAGE DE LA MACONNERIE :

Les éléments de maçonnerie dans un mur doivent être appareilles au mortier de sorte que le mur se comporte comme un unique élément structural. (**figure VI.1)**.

VI.1.1. Appareillage de la maçonnerie pour les éléments de formes régulières et de dimensions uniformes :

Pour assurer une adhérence appropriée, les éléments devraient être appareillés d'un lit à l'autre avec un recouvrement égal à au moins 0,4 fois la hauteur de l'élément ou 40 mm, en prenant la plus grande de ces deux valeurs. Dans les angles ou les jonctions,
le recouvrement des éléments ne doit pas être inferieur à la largeur des éléments ou 0,4 fois la hauteur des éléments, en prenant la plus faible de ces deux valeurs. Des éléments de maçonnerie accessoires devraient être utilises de sorte à obtenir le recouvrement spécifique dans le reste du mur **[74]**,**[75]**.

I.21.2. Orientation des plans de stratification d'un mur en maçonneries :

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

I.21.3. Adhérence :

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

Si le calcul repose sur la résistance au cisaillement ou à la flexion, des prescriptions relatives aux caractéristiques de la maçonnerie concernée et aux procédures d'humidification appropriées doivent être incluses dans la spécification de conception.

Si la résistance au cisaillement ou a la flexion de la maçonnerie est évaluée a partir d'essais menés conformément aux parties correspondantes de la norme **NF EN 1052[76]**, il devrait être spécifie que les matériaux, les types d'appareillage et la conservation doivent être identiques à ceux des essais.

I.21.4. Finitions des joints :

Les finitions des joints doivent être appropriées pour atteindre l'aspect et les performances requises du mur (**figure VI.1**).

Lors de la spécification des finitions des joints, les facteurs suivants devraient être pris en compte le support requis pour l'application des finitions ; **[74] [77]**

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

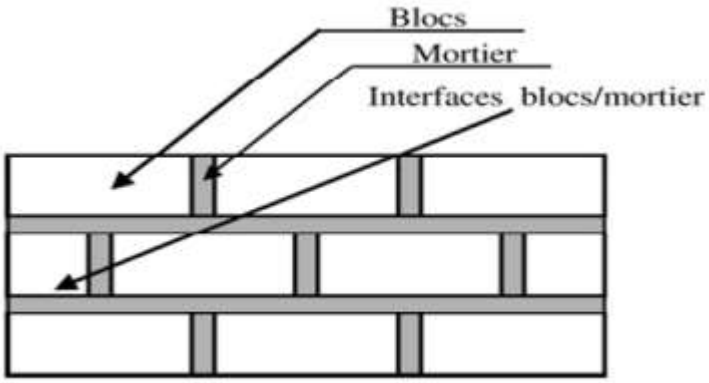


Figure VI.1 : Appareillage d'un mur en maçonneries **[77]**.

VI.2. FONCTIONNALITES ET PATHOLOGIES DE LA MACONNERIE

VI.2.1. Fonctionnalités de la maçonnerie :

La maçonnerie a de différents avantages fonctionnels dont la personne a besoin ; La **figure VI.2** représente quelques fonctionnalités de cette dernière :

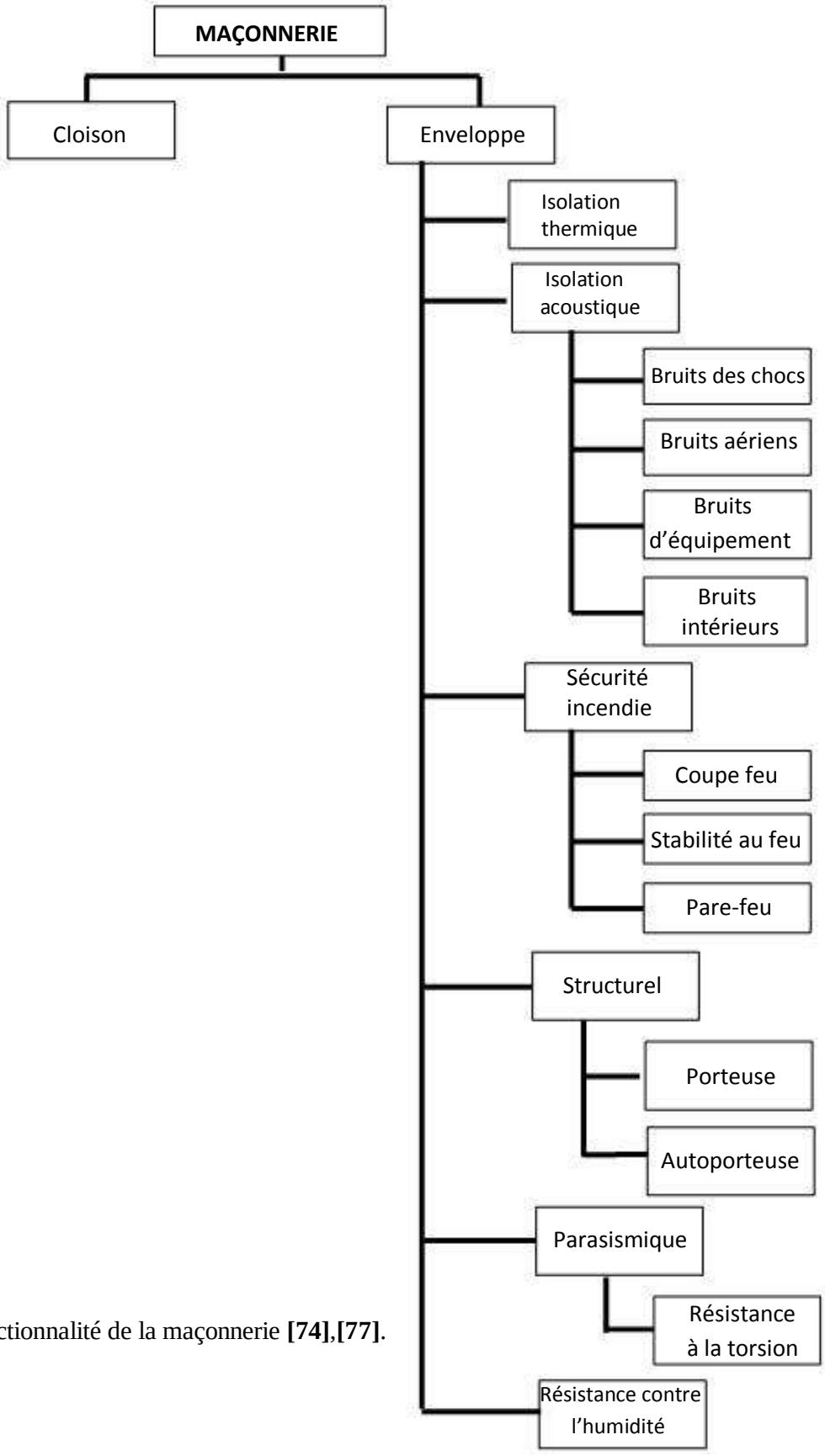


Figure VI.2 : Fonctionnalité de la maçonnerie **[74]**,**[77]**.

VI.2.2. Pathologies de la maçonnerie :

L'analyse des sinistres montre en effet que, si la fonction ≪ porteuse ≫ ne donne guère lieu a déboires, par contre la fonction « paroi » est, elle, victime de fréquents problèmes d'origines diverses, que l'on peut répertorier selon quatre familles principales :

- Les désordres par tassement de fondation,
- Les fuites des liaisons fenêtres-gros œuvres,
- Les désordres des enduits,

Les fissures de la maçonnerie, liées au fonctionnement de la paroi et dites pour cela « structurelles » sous l'effet de certaines sollicitations internes ou externes. **[74]**,**[78]**.

En dehors des problèmes strictement structurels (tassements, fondations, séismes, ...) on peut classer les pathologies en deux grandes catégories : celles liées à l'humidité et celles liées a la pollution atmosphérique. **[74]**,**[78]**.

Les pathologies destructives peuvent affecter soit la brique soit le mortier de pose, soit les deux. En outre, les joints peuvent être dégarnis et ne plus jouer leur rôle.

C'est en fait la désagrégation du mortier de pose qui fragilise, puis détruit, les structures en maçonnerie de brique ; en effet, le mortier constitue à la fois la partie la plus "stratégique" et la plus faible de l'ensemble, et la rupture de sa continuité, pour quelque cause que ce soit, met en péril toute la Maçonnerie.

Des contraintes dues a des tassements différentiels, ou séismes, qui peuvent dépasser la résistance du mortier et le fissurer, un tassement différentiels du sol entraine l'enfoncement du mur dans sa partie la plus lourde ou la moins bien fondée, comme explique la **figure VI.3** sur l'influence du tassement sur un mur. **[74]**,**[78]**.

En outre nous citons le cisaillement comme étant la conséquence des poussées horizontales perpendiculaires au plan des murs causés par les vents et séismes, ces dernières sont particulièrement dangereuses si le mur n'est pas suffisamment lourd et chargé, le cisaillement fait naitre des contraintes (traction sur le béton et compression dans la brique creuse) au niveau des planchers et les murs en maçonnerie en se diffusant et concentrant obliquement en un angle sous forme d'une voute qui provoquent par la suite des contraintes tangentielles dans les briques qui finit par l'effondrement. **[74]**,**[78]**.

Les fissures qui révèlent ce désordre prennent naissance à partir du dessous du niveau du sol. En se développant vers le haut, elles englobent des parties de maçonnerie qui se désorganisent en s'affaissant au rythme du tassement du sol. (**figure VI.3**).



Figure VI.3 : Cause de pathologie de la maçonnerie **[74],[78]**.

Les trois principales causes de fissuration des murs extérieurs des pavillons sont : le retrait des mortiers, l'hétérogénéité des matériaux et la flexion des planchers. Ces fissures, qui sont le plus souvent traversantes, sont à l'origine d'infiltrations d'eau.

Il existe plusieurs causes de ces fissures dites structurelles (**Figure VI.4**), on en cite :

• Les variations de température ou d'humidité et cela est dû par exemple à la présence de plusieurs matériaux sur la paroi et qui à cause de leur comportement différent à la chaleur ou à l'humidité créent des fissures.

• L'absence ou la mauvaise mise en œuvre des chaînages horizontaux et verticaux au niveau des planchers,

• Une mauvaise réalisation des appuis et des linteaux au niveau des fenêtres.

• Les fissures de retrait différentiel des matériaux de la paroi, du fait de la perte en eau de ces différents éléments.

Étant donné que les blocs de maçonnerie sont liés les uns aux autres, leur retrait ne peut s'effectuer librement et donc cela provoque des fissures.

L'intensité de ce phénomène de rétraction est liée à la quantité d'eau présente en excès par rapport au minimum nécessaire à la prise du mortier ou du béton **[74]**.

- La flexion et le retrait des planchers : le plancher est réalisé à l'aide de poutrelles préfabriquées en béton armé ou précontraint. Ce plancher peut subir une légère déformation dans sa partie centrale, elle s'accompagne des fois par la rotation de l'appui sur le mur de la façade.
- La dislocation entre les blocs sous les déformations trop importantes de la construction.



Figure VI.4 : Pathologies de la maçonnerie ;
Exemple de fissures dues au cisaillement.

VI.3. CONCLUSION :

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue, elle est applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan « maçon » qui réalise la plupart des constructions pavillonnaires. Elle se caractérise par ses matériaux support ; brique, parpaing, mortier ou chacun d'entre eux présente des avantages, et des inconvénients. Notre intérêt dans cette étude est de connaitre le comportement de la maçonnerie a partir d'un modèle réduit sous l'effet de différentes sollicitations (cisaillement, compression simple, compression diagonal) et la valorisation de la chaux comme liant dans les mortier utilisés.

Chapitre VII
Matériaux et essais

VII.1. Introduction :

Le travail expérimental mené dans cette première étape, a été établie dans le but d'observer et d'étudier l'effet de l'introduction de la chaux comme liant dans le mortier sur son comportement physiquo-mécanique et sur sa durabilité.

Ce chapitre décrit les essais expérimentaux réalisés en laboratoire ainsi-que les matériaux utilisés.

Par définition, on appelle mortier le matériau obtenu en gâchant dans un malaxeur des proportions convenable du ciment, où de la chaux où les deux en même temps, de l'eau et du sable.

C'est le diamètre D du gros granulat qui détermine l'appellation :

- Mortier pour $D \leq 5mm$,
- Béton $D \geq 4mm$.

VII.2. Programme expérimental et protocole d'essais :

Pour le besoin de cette étude, nous avons utilisé cinq (05) dosages différents pour le mortier comme suit :

MR1 : Mortier dosé à 0% de chaux et 100% (ciment seul).

MR2 : Mortier dosé à 25% de chaux et 75% de ciment.

MR3 : Mortier dosé à 50% de chaux et 50% de ciment.

MR4 : Mortier dosé à 75% de chaux et 25% de ciment.

MR5 : Mortier dosé à 100% de chaux et 0% de ciment.

Sachant que dans tous les mortiers leurs formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues selon la norme **NF EN 998-2[79]**:

- La nature et le type du squelette granulaire.

- Les dosages en sable, ciment, chaux, eau.

La caractérisation des mortiers, à l'état durci, nécessite de définir les éprouvettes sur lesquelles seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essais.

Les différents essais réalisés au cours de ce travail sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau VII.1 : Les essais réalisés sur les mortiers à l'état frais Et à l'état durci

	ESSAI	**NORME**
Etat Frais	Maniabilité	**NF P 18-452 [35] et NF P 15- 437 [36]**
Etat Durci	Compression sur éprouvettes cubiques (4x4x16 cm^3)	**EN 196-1 [38]**
	Traction par flexion sur éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm^3)	**EN 196-1 [38]**
	Retrait sur éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm^3)	**NF P 18-404 [39]**

VII.2.1. Matériaux utilisées :

Pour confectionner des éprouvettes en mortier pour nos différents essais, nous avons besoins des granulats (sable) du ciment, de la chaux, et de l'eau de gâchage.

VII.2.1.1. Le sables :

Un seul type de sable est utilisé au cours de cette étude est il s'agit d'un sable de mer lavé de provenance de sablière de MOSTAGANEM, située à 250 Km à l'ouest d'Alger, de classe granulaire est 0/3 **(figure VII.1)**.



Figure VII.1: Le sable utilisé.

VII.2.1.2. Le ciment :

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale, il s'agit d'un ciment portland composé CPJ - CEM II/B 32.5R, produit par la cimenterie d'Oggaz (Mascara) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme **NF P 15 301 [17]**.

a. Ciment CPJ-II B 32.5 R :

Est un ciment gris, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux(CaO) à fonction basique et la silice (SiO2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al2O3) et le fer (Fe2O3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C.

- En présence de l'eau aura lieu la réaction d'hydratation qui consiste en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates et du calcium hydratés.
- Ce type de ciment présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme, **NF P 15 301[17] -EN 196-1 [38].**

b. Analyse et caractérisation :

b.1. Analyse chimique du ciment et composition minéralogique du clinker :

Le tableau **VII.2** résume l'Analyse chimique du ciment CPJ - CEM II/B 32.5R et la composition minéralogique du Clinker, selon la fiche technique du ciment (Annexes).

Tableau VII.2 : l'Analyse chimique du ciment et la composition minéralogique du clinker.

Nature d'analyse	Type d'analyse	(%)
Analyse chimique du ciment	Perte au feu (**EN 196-2**) **[75]**	11,0 - 15,20
	Teneur en sulfates SO_3 - (**EN 196-2**) **[75]**	1,9 - 2,8
	Teneur en oxyde de magnésium MgO	1,7 - 2,4
	Teneur en chlorures - (**EN 196-2**) **[75]**	0,01 - 0,04
Composition minéralogique du clinker	Silicate tricalciques C_3S	55,0 - 64,0
	Aluminates tricalciques C_3A	6,0 – 8,2

b.2. Essais physique *:*

- **La finesse :**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise.

La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine.

Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme **NF P 15-476 [80]**.

- **La consistance normale :**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme **NF P 15-431 [81]**.

- **Le temps de prise :**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte d'une consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme **NF P 15-473[37],** le **tableau VII.3** résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau VII.3 : Résumé des résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Essai	Résultat d'essai
Finesse suivant la méthode de Blain (**EN 196-6, NF P 15-476**)	4500-5500
Consistance normale de la pâte de ciment (%) **NF P 15-431**	26.8-31.0
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	0.5-2.5
Début de prise (min)	120-200
Fin de prise (min)	200-300

b.3. Essais mécaniques sur le ciment :

Selon la fiche technique **(Annexe)**, les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme **NF EN 196-1 [38],** sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé : 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le **tableau VII.4.**

Tableau VII.4 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

Age (jours)	**Résistance à la compression Rc (Mpa)**
02	≥ 10.0
28	$32.5 \leq \mathbf{Rc} \leq 52.5$



Figure VII.2 : Ciment CPJ-II B 35.5.

VII.2.1.3. Chaux :

La chaux éteinte (NHL) est issue de la carrière de chaux de Hassasna de SAIDA. Elle est fabriquée par la société BMSD selon les normes -**NF-P15-311[15]- NF-EN-459-1[16]**.
Ces propriétés physiques et chimiques représentées ci-dessous (**tableau VII.5)** :

Tableau VII.5 : La fiche technique des Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida **[Annexe]**

Caractéristiques de base	**La fiche technique de la chaux**
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO [%]	> 83.3
MgO [%]	< 0.5
Fe_2O_3 [%]	< 2
Al_2O_3 [%]	< 1.5
SiO_2 [%]	< 2.5
SO_3 [%]	< 0.5
Na_2O [%]	0.4 - 0.5
CO_2 [%]	< 5
$CaCO_3$ [%]	< 10
Densité spécifique [g/cm^3]	2
Plus de 90 µm [%]	< 10
Plus de 630 µm [%]	0
Matériau insoluble [%]	< 1
Densité apparente [g/l]	600-900



Figure VII.3 : Représente la chaux éteinte (**NHL**) de Hssasna.

VII.2.1.4. la Briques :

La brique creuse utilisée pour les essais de groupe BOURAS de SETIF, en terre cuite. Leur dimensions est de (210×100×50) cm^3; les creux ont pour dimensions (15×10×10) cm^3 et leur nombre est de 8 creux par brique, et 16 trous disposés sur deux rangés**. Figure VII.4**

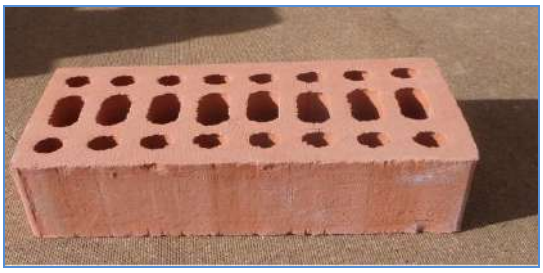


Figure VII.4: brique utilisée

VII.2.1.5. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents mortiers est l'eau potable, exempte d'impuretés, conforme à l'exigence de la norme **NF P 18-303[28]**,

VII.2.2. Les essais:

VII.2.2.1. Les essais effectués sur les granulats :

a. Masses volumiques :

La masse volumique apparente et absolue du sable utilisé a été déterminée conformément à la norme **NF P18-650[23] ;**

a.1. Masse volumique apparente :

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume **1 L (figure VII.5)** par le matériau, en- suite on mesure la masse de ce dernier et on applique l'équation suivante :

$$\rho_{app} = {}^{M}/_{l} \ \text{(Kg/m}^3\text{)} \qquad \textbf{(Equation VII.2)}$$



Figure VII.5 : Le cône et le récipient.

a.2. Masse volumique absolue (ρ) (Essai de pycnomètre) : NF P 18-650[23]

Le pycnomètre est une fiole jaugée de grande précision. La mesure de masse volumique se fait par une série de trois pesées successives

a – On remplit la fiole d'un liquide, dans notre cas c'est l'eau jusqu'au repère, on pèse une masse $\mathbf{m_1}$.

b – On ajoute à côté de la fiole une petite quantité du solide à mesurer, on pèse une masse $\mathbf{m_2}$.

c – On met le solide dans le pycnomètre et on ajuste le volume du liquide jusqu'au repère, on pèse une masse $\mathbf{m_3}$.

A partir de ces trios (03) mesures, on calcule masse volumique absolue (**ρ**) selon l'équation suivante:

$$\rho = \frac{m_2}{(m_1+m_2)-m_3} \qquad \textbf{(Equation VII.1)}$$



Figure VII. 6 : Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre.

b. Equivalent de sable :

La propreté des sables est contrôlée par l'essai dit « Equivalent de sable » (**E.S**) dont le principe est rappelé ci après **[12]**.

On agit une certaine quantité de sable dans une solution lavante, l'opération se fait suivant un processus très exactement défini par la norme **NF P 18-598 [22]**, puis on laisse reposer :

La hauteur du dépôt de sable visible étant $\mathbf{h_1}$, celle de la hauteur totale y compris le floculat $\mathbf{h_2}$ l'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$E.s = 100\ h1/h2 \qquad \textbf{(Equation VII.2)}$$

La hauteur de dépôts de sable h_1 peut se mesurer à l'aide d'un piston lesté que l'on dépose doucement sur le sable après avoir lu la hauteur $\mathbf{h_2}$. (**figure VII.7 (a) et (b))**

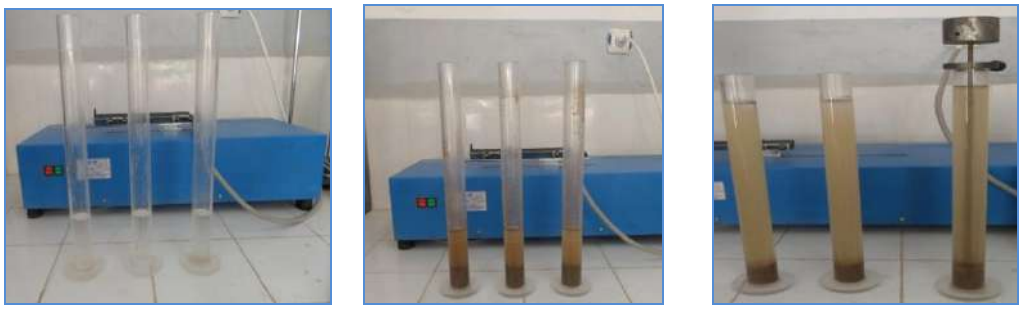


Figure VII.7 (a) : Procédure de mesure de l'équivalent de sable

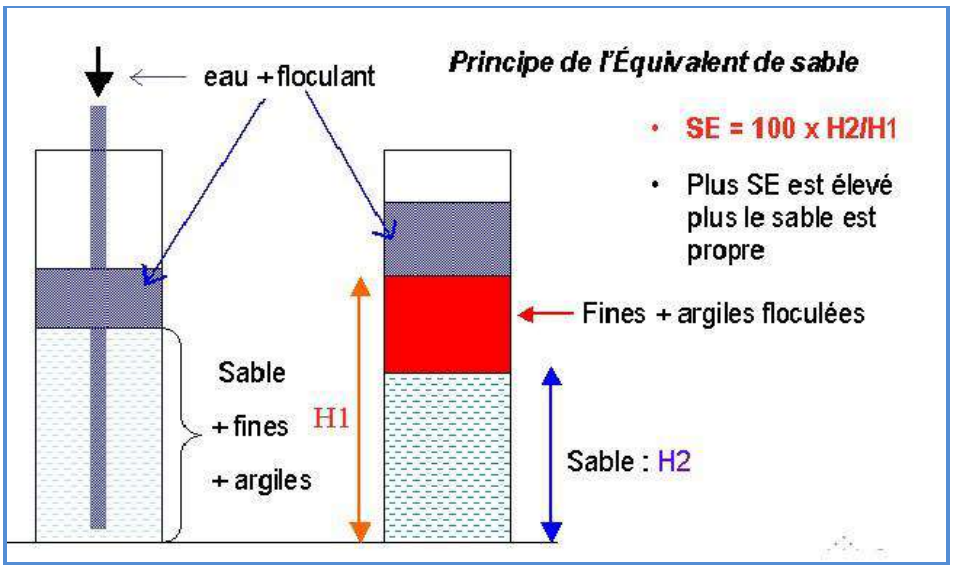


Figure VII. 7 (b) : Procédure de mesure de l'équivalent de sable

b.1. Précautions d'emploi :

- Matériel propre et solution lavante récente
- Attention aux orifices du tube laveur (à nettoyer en cas de besoin)
- Eviter toute vibration pour les éprouvettes en cours d'essai

b.2. Expression des résultats :

On Calcul pour chaque éprouvette (ESV) et (ES) avec une précision décimale et retenir les moyennes arithmétiques, arrondies chacune à l'entier le plus proche.

$$E_s = 100 * h_2'/h_1 \quad \textbf{(Equation VII.3)}$$

$$E_{sv} = 100 * h_2/h_1 \quad \textbf{(Equation VII.4)}$$

c. Granulométrie :

L'analyse granulométrique a été réalisée sur un échantillon de **1000 g** de sable conformément à la norme **NF P 18-560 [20]**, passé à travers une série de maille décroissante **(figure VII.8)** dont on pèse le refus de chaque tamis, affin de tracer la courbe granulométrique **[82]** puis on déduit le module de finesse (**M *f***).



Figure VII.8 : Tamiseuse électrique

VII.2.2.2 Les essais effectués sur le mortier :

a. Essai sur mortier à l'état frais :

a.1. Ouvrabilité du mortier :

Selon les normes **NF P 18-452 [35]** et **NF P 15-437 [36]** le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) **[14]**.

Dans cet essai la consistance est caractérisée par le temps épuisé par le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier LCPC voir la (**figure VII.9).**



Figure VII.9 : Maniabilimètre à mortier avec la tige de piquage.

Le temps (**t)** mis par le mortier pour s'écoule caractérise sa consistance, l'état du mortier avant et après l'éssai est illustré dans la **figure VII.10 et figure VII.11.**

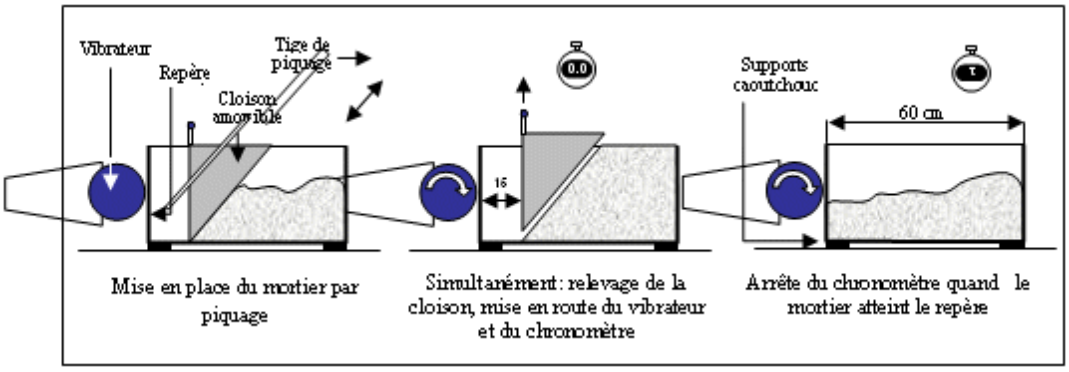


Figure VII.10 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.




Figure VII.11 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement.

b. Essai sur mortier à l'état durci :

b.1. Protocol d'essais :

A raison de dix éprouvettes par essai et trois âges (3, 7,28 j), cinq dosages différents du mortier sont étudier, le nombre d'essais effectué sur les mortiers réalisés est résumé comme suite :

Tableau VII.6 : Résumé des essais effectués sur mortier.

Essai	Nombre d'essai
Essai d'ouvrabilité	15
Essais de traction par flexion	60
Essais de compression simple	120
Essais de retrait	10

b.2. Confection et Cure des éprouvettes :

La norme **EN 196-1 [38]** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Le mortier préparé, est remplit dans un moule (4x4x16) cm^3. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois, à la fin le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans une cure, dans l'eau à 20° C ± 2° C, lorsqu'il s'agit des essais de gonflement ou à l'air libre pour les essais de traction ou de compression, jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

La norme **NF P 15-301, [17]** définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 3, 7 et 28 jours.

Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges (dans notre cas) ils devront être réalisés dans les limites de temps indiqués dans le **tableau VII.7** ci-dessous.

Tableau VII.7: Les limites du temps d'écrasement**.**

Age	**24h**	**72h**	**7j**	**≥ 28j**
Précision	± 15 min	± 45min	± 2h	± 8h



Figure VII.12: Conservation des éprouvettes à l'air libre.

b.3. Composition des mortiers :

Lors de la formulation du mortier on a utilisé (05) dosages différent (0% de chaux, 25%, 50%, 75% et 100%) (**Tableau VII.8)** à base de sable de mer lavé, après plusieurs essais on a c'est fixé sur un rapport **E/C** variable pour les mortiers affin d'avoir une meilleur ouvrabilité.

Tenir compte de l'absorption d'eau des granulats utilisés, l'eau de gâchage utilisé pour la réalisation des différents types de mortier est donné par l'équation suivante :

$$E_{eff} = E_{libre} + E_{abs} \quad \textbf{(Equation .VII.6).}$$

- E_{eff} : Eau efficace

- $\mathbf{E_{libre}}$: Eau libre nécessaire au malaxage.
- $\mathbf{E_{abs}}$: Eau absorbée par les granulats.

Tableau VII.8 : Compositions des mortiers réalisés.

	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5
Ciment (g)	**450**	**337.5**	**225**	**112.5**	**-**
Chaux (g)	**-**	**112.5**	**225**	**337.5**	**450**
Sable (g)	**1350**	**1350**	**1350**	**1350**	**1350**
E/C	**0.60**	**0.66**	**0.74**	**0.81**	**1.00**

b.4. Malaxage des mortiers :

La procédure de malaxage pour les cinq types de mortiers (différents dosages de la chaux) est représentée dans le **tableau VII.9**

Tableau VII.9 : Opérations du malaxage du mortier.

Opérations	Etat du malaxeur	Durée
Introduction du sable+ ciment ou ciment + chaux	A l'arrêt	**-**
Malaxage	Vitesse lente	30 s
Introduction l'eau	Vitesse lente	30 s
Malaxage	Vitesse rapide	30 s
Raclage de la cuve	A l'arrêt	15 s
Repos		1min 15s
Malaxage	Vitesse rapide	60s



Figure VII.13 : Les étapes de confection des éprouvettes de mortier.

b.5. Essai de traction par flexion :

Conformément à la norme **EN 196-1 [38],** l'essai consiste à rompre en traction par flexion (par trois points) **(figure VII.14),** une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L **[14]**.

Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm^3, à 3, 7, et 28 jours.

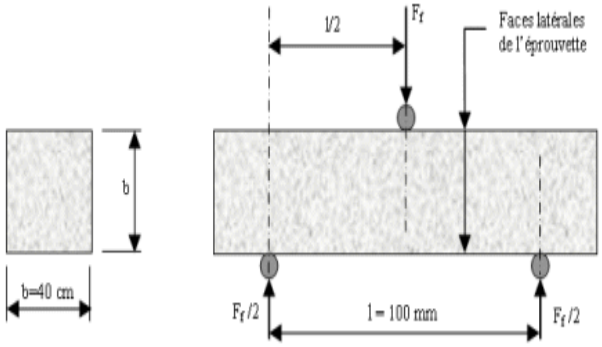


Figure VII.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion.

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = (M/I)\ \text{ı} \quad \textbf{(Equation VII.7)}$$

Avec:

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge :

$$M = {}^{F_f\ L}/_{4} \quad \textbf{(Equation VII.8)}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale **:** $I = {a^4}/{12}$ **(Equation VII.9)**

ν : La distance de la fibre la plus éloignée **:** $\nu = {a}/{2}$ **(Equation VII.10)**

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\sigma_t = {1.5\ F_f\ L}/{a_3} \quad \textbf{(Equation VII.09)}$$

$$f_{t28} = {0.9 F_t L}/{a_3} \quad \textbf{(Equation VII.10)}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la **(figure VII.15)**



Figure VII.15 : Rupture des éprouvettes en traction par flexion.

b.6. Essai de compression :

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme **EN 196-1 [38]** par compression axiale sur demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm^3, à 3,7,28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme a la norme **NF P 18-412 [83] (figure VII.19).**

Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante, la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai (3.7.28) jours **[82].**

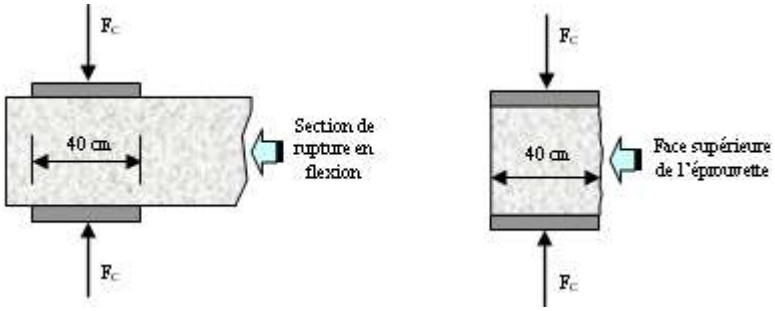


Figure VII.16 : Dispositif de rupture à la compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la **figure VII.17,** la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = {}^{F_c}/_{b^2} \qquad \textbf{(Equation VII.11)}$$



Figure VII.17 : Essai de compression.

c. Essai de retrait :

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en mortier. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du mortier **[82]**

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm^3 conformément à la norme **NF P 18-404 [39]** , Ces éprouvettes au nombre de deux par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un rétractomètre **(figure**

VII.18) munis d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 5 semaines) La conservation des éprouvettes est faite à l'aire libre



Figure VII.18 : Rétractomètre et son étalonnage

c.1. Mesure des variations de longueur :

La mesure a eu lieu, ou l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03 mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,…etc.). Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations) même métal que l'appareil.

c.2. Mesure des variations de masse :

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1 g chaque éprouvette à chacun des temps utilisés pour mesurer le retrait.

c.3. Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160 mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

c.4. Conduite de l'essai :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur (L) = 160 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps (t), l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dL\ (t) \qquad \textbf{(Equation VII. 12)}$$

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \qquad \textbf{(Equation VII. 13)}$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par (**ε**)et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L = dl(t) - dl(t_0)/L \qquad \textbf{(Equation VII 14)}$$

Δl(t) est obtenue en faisant la moyenne sur les 2 éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air, Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette.

Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou le froid, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement) **[84].**

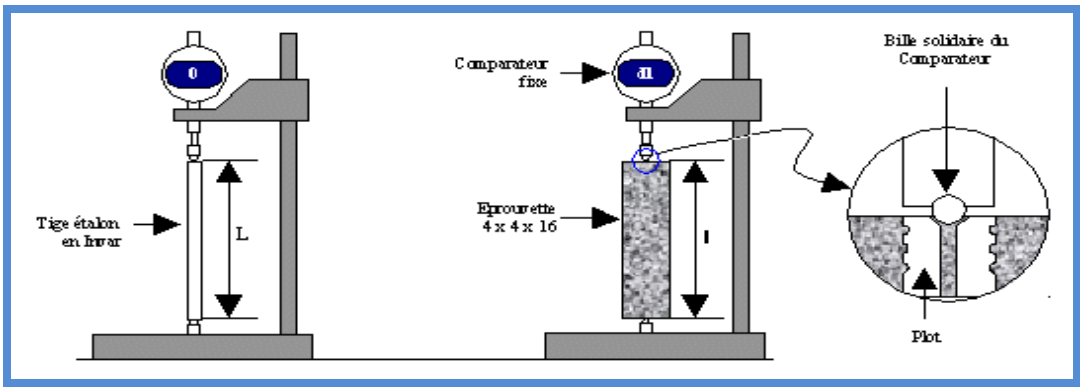


Figure VII.19 : Principe de mesure du retrait.

d. Essai de mesure du temps de prise (Vicat) :

L'attention des utilisateurs est de plus en plus attirée par les propriétés des mortiers et des bétons à l'état frais, avant la prise et le durcissement. Les caractéristiques du mortier et du béton sont fondamentales et varient avec la nature du liant, le dosage en eau et le mode de préparation.

La pâte de ciment ou de la chaux de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantités d'eau différentes, L'état pâteux intermédiaire entre liquide et solide est caractérisé par sa consistance qui peut être molle, plastique ou bien ferme. L'essai de consistance doit être réalisé suivant les prescriptions ordinaires, c'est à dire à 20°C ± 1°C et à une hygrométrie supérieure à 65%.

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des pâtes de ciment ou de la chaux(des liants hydrauliques en général) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat (du nom de l'ingénieur français inventeur de l'appareil **(figure. VII.20)** qui donne deux repères pratiques : Le début de prise et la fin de prise.

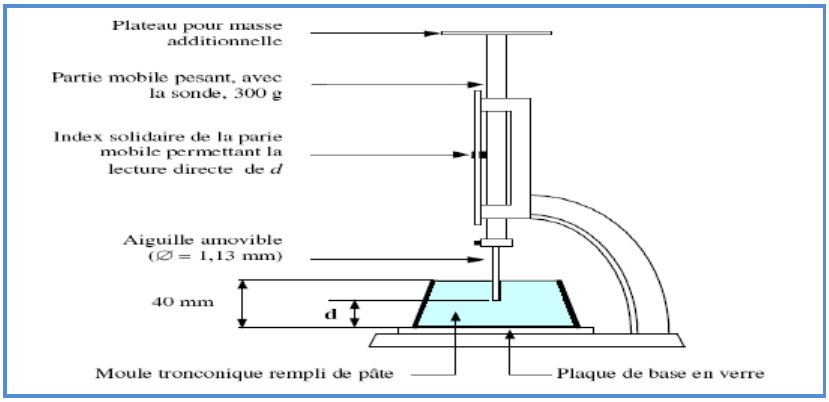


Figure VII.20 : Appareil de VICAT

d.1. Essai de consistance :

L'essai de consistance selon les normes **NF P 15-431[81] –NF EN 196- 3 [85]** permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. (**figure VII.21**).

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau qui doit être mélangé toujours suivant le même processus avec une masse de liant, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 ± 1) mm du fond du moule.

L'appareillage utilisé pour cette essai est le suivant :

- Balance, permettant de peser à 1g prés ;
- Cylindre ou burette graduée permettant de mesurer 1% du volume mesuré ;
- Malaxeur avec une cuve de 5L ;
- L'appareil de Vicat avec sa sonde cylindrique de diamètre (10,00±0,05) mm et de longueur effective (50± 1) mm. La masse totale des parties mobiles doit être de (300± 1)g. Le moule Vicat destiné à contenir la pâte pendant l'essai doit être en caoutchouc dur de la forme tronconique, d'une profondeur (40,0±0,2) mm e de diamètre inférieurs et supérieurs de (70±05) mm et (80±05) mm respectivement. Ce tronc de cône doit reposer sur une plaque en verre d'au moins 2,5 mm.

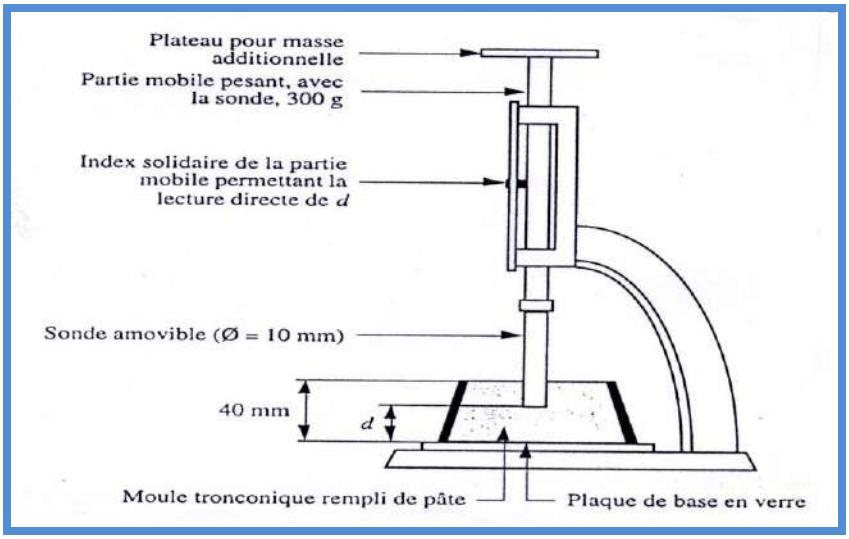


Figure VII.21 : Appareil de VICAT avec sonde de consistance.

d.2. Conduite de l'essai :

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur pour obtenir les résultats estimés.

1 – On pèse **500g ± 1g** de ciment et le verser dans le godet du malaxeur.

2- On Gâche le ciment avec une quantité d'eau (on commence avec un rapport de masse **E/C = 0.24**).

3- la pâte est malaxée pendant **90 secondes**, à vitesse lente

4- on arrête le processus pendant **15 secondes**, on démonte le godet et on remet avec une spatule toute la pate adhérente à la cuve au-delà de la zone de malaxage.

5- On remonte le godet et on malaxe durant **90 secondes** à vitesse rapide.

6- On remplie le moule tronconique avec la pâte obtenue, on arase la surface en prenant appui sur le bord du moule.

7- On porte le moule plein sur l'appareil de Vicat, et on règle le niveau zéro de la sonde (la sonde est tangente avec le bord du moule).

8- On centre le moule dans l'axe de la sonde, on abaisse la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pate, on desserre la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.

9- Après **30 secondes**, On note la valeur de l'enfoncement 'd' lue sur l'index de l'appareil (**figure VII.24**).

• Si **d = 6mm ± 1mm**, l'essai est concluant et la consistance est normale.

• Si **d = 5mm**, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.

• Si **d = 7 mm**, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.

d.3. Essai de prise :

Les réactions qui se passent dès l'instant ou l'eau est ajoutée au ciment et qui se poursuivent dans le temps sont très complexe.

L'hydratation est modifiée lorsque le ciment reçoit des constituants secondaires (laitier de haut fourneau, cendres volantes de centrale thermiques, etc), ou des adjuvants chimiques.

Les constituants anhydres du ciment, mis en présence d'eau donneraient naissance à une solution sursaturée. Des hydrates se formeraient dans cette solution et précipiteraient en donnant des microcristaux : cela correspondrait au début de prise.

L'essai de prise doit être réalisé à une température de 20°C et à une hygrométrie supérieure à 90%.

L'essai de prise permet de déterminer le temps de prise, ce qui correspond au temps écoulé du moment de gâchage du ciment jusqu'au début de prise.

Il est réalisé pour mesurer le début de prise sur pâte à consistance normalisée à l'aide d'un appareil simple de laboratoire qui est l'appareil classique de Vicat équipé d'une aiguille de diamètre **1.13 mm**,**(charge de 300g ± 1g)**.

Le début de prise est l'intervalle de temps passé entre l'instant de gâchage du liant et celui ou l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule de **(4 ± 1) mm.**

La fin de prise est obtenue lorsque l'enfoncement de la sonde n'est que **0.5 mm**.

d.3.1. Conduite de l'essai :

L'essai est réalisé suivant la norme **NF P 15-473[37] -EN 196- 3 [85]**, avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur.

1- On prépare une pâte à consistance normalisée, le temps t_0 est celui de du moment de gâchage du liant.

2- On remplie immédiatement de pâte le moule tronconique et on arase la surface en prenant appui sur le bord du moule.

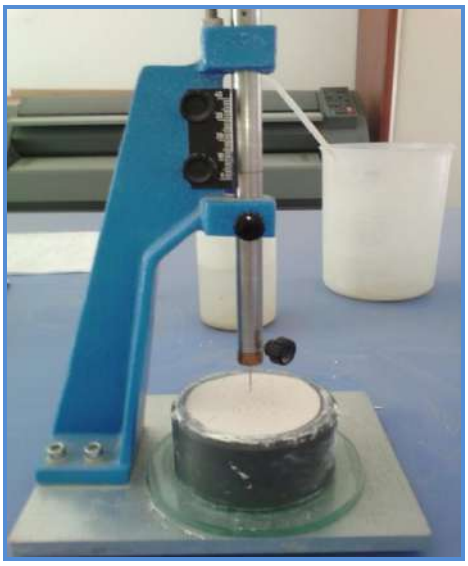
3- On règle le niveau zéro de l'aiguille.

4- On centre le moule dans l'axe de la sonde, on abaisse la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, et on desserre la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.

5- Après 30 secondes**,** On note la valeur de l'enfoncement 'd' lue sur l'index de l'appareil.

6- On place le moule dans une armoire humide (20 ±1)°C et 90% d'humidité relative (Un bain d'eau dans lequel il est possible de maintenir les moules remplies à (20 ±1)°C peut être utilisé, pourvu qu'il puisse être prouvé que les mêmes résultats d'essais sont obtenus

7- On Procède de la même façon à des intervalles de temps de 5 mn près, jusqu'à observation du début de prise et la fin de prise. **(figure VII.22)**.



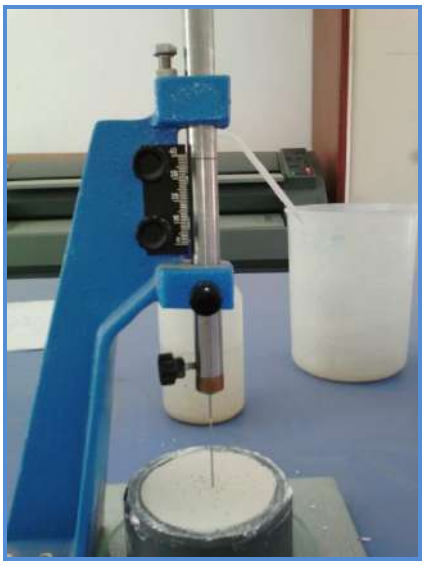


Figure VII.22 : Mesure du temps de début et fin de prise

VII.2.2.3. Essai mécanique sur maçonnerie :

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

Les maçonneries sont des matériaux composites qui présentent des propriétés différentes selon les directions, à cause des joints de mortiers qui se comportent comme des plans de faiblesse, plusieurs facteurs peuvent expliquer la difficulté pour modéliser une maçonnerie:

- son anisotropie,
- les dimensions des blocs (pierres ou briques),
- l'épaisseur des joints,
- les propriétés intrinsèques des blocs et du mortier,
- la disposition des joints d'assise et des joints verticaux
- la mise en œuvre (le " coup de main " de l'homme).

Par conséquent, la maçonnerie constitue généralement un assemblage anisotrope et inélastique caractérisé par une résistance à la traction souvent faible.

Notre étude concerne les panneaux de maçonnerie en briques en terre cuite creuse, testés sous chargement uni axial.

Nous montrons dans cette deuxième étape de l'étude l'importance du rôle des joints. Ces derniers sont souvent à l'origine de la rupture et nous décrirons les différents modes de rupture rencontrés.

Nous avons réalisé des modèles réduit conçues avec la briques creuse et différent mortier, pour cela nous avons utilisé (05) types de mortier, un mortier ordinaire à **0%** de

chaud, trois mortiers batard dosé respectivement à **25%, 50%, 75%** de chaux et enfin un mortier à **100%** de chaux.

Les essais qu'on a requis sont :

- Essai de compression diagonale suivant la norme **ASTM 1052[86]**,
- Essai de cisaillement suivant la norme **NF EN 1052-3[87]**,
- Essai de compression simple suivant la norme **NF EN 1052-1[88]**,

qui ont été réalisés au **CNERIB** (Centre national

a. Confection des murets :

Nous avons put réaliser pour les besoins de cette étude, 05 murets de **type I**, 03 murets de **type VII**, 05 **triplet**, 03 **colonnes ou prisme** en brique, 04 murets de **type I** renforcés en fibre de verre ou grillage, le tous confectionnés sur chantier et stocké à l'aire libre .

a.1. Matériel utilisé :

Le matériel utilisé pour la confection des murets est le suivant (voir la **figure VII.23)**: truelles, auge, fil à plomb, niveau, réglettes, scie à brique et transpalette.



Figure VII.23 : Outils utilisés.

a.2. Préparation du mortier :

Le mode opératoire pour la fabrication du mortier a été fondé sur une seule exigence : une maniabilité a vue acceptable.

Le but était de définir un intervalle de teneurs en eau dans lequel le mortier serait maniable. Le mélange des matériaux a été réalisé manuellement, a la truelle.

Préalablement, le mélange était fait avec tous les matériaux secs. Ensuite, l'eau était ajouté jusqu'a ce que la maniabilité a vue soit acceptable. Nous avons choisi de contrôler la maniabilité du mortier a vue pour s'approcher de l'utilisation par les maçons sur les chantiers.

Il est a noté que les mortiers étudié ont un rapport pondéral ciment ou chaux/sable de l'ordre **(1/3)**, (**tableau VII.10).**

Tableau VII.10 : Récapitulatif des dosages de liant dans les mortiers.

Dosage	Chaux	Ciment	Sable
MR1 (0% chaux)	0	1	3
MR2 (25% chaux)	1/4	3/4	3
MR3 (50%chaux)	1/2	1/2	3
MR4(75% chaux)	3/4	1/4	3
MR5 (100% chaux)	1	0	3

a.3. Méthodologie de confection des murets :

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

1. On découpe à la scie les blocs de briques aux dimensions demandée.

2. les briques sont mouillées préalablement, pour éviter l'absorption de l'eau du mortier pendant la réalisation de la maçonnerie,

4. On étale le mortier suivant l'épaisseur et ce à l'aide de différents gabarits fixant ainsi les dimensions du joint,

4. On Vérifié la planéité du mur avec la règle en bois,

5. Les murets sont ensuite transportés et stockés,

6. L'écrasement est effectué, après 28 jours de cure, aux conditions du laboratoire.

b. Les essais :

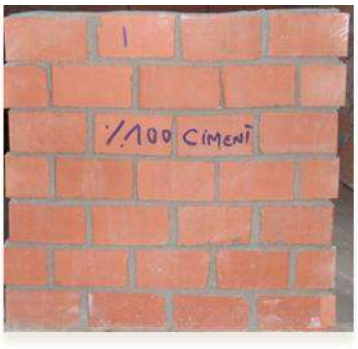
b.1. Essai de compression diagonale :

Cet essai a été réalisé suivant la norme **ASTM 1052[86]**, afin de connaître le comportement et la résistance à la compression diagonale des éléments en maçonnerie.

Il consiste à encastrer un coin du mur et à appliquer une charge uniformément répartie sur un sabot (corps très rigide) qui est placé sur le coin opposé du mur. La force est évolutive pendant le temps de chargement jusqu'à la rupture du panneau en maçonnerie.

b.1.1. Protocole d'essai :

Après la réalisation des murets de **type I** (un muret pour chaque type de mortier) (**figure VII.24)** suivant la procédure décrite précédemment**,** la résistance à la compression sur des petits murets en brique est obtenue par l'essai de compression diagonale au moyen d'une presse hydraulique de type (CONTROLLS) **[Annexe]**, à deux échelles de capacité **3 MN** pilotée par ordinateur.



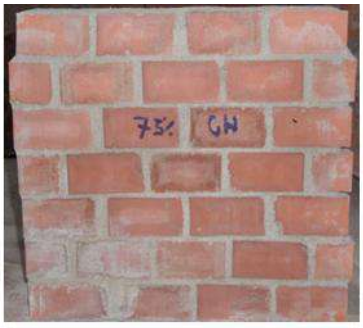
MU1 (MR1)



MU2 (MR2)



MU3 (MR3)



MU4 (MR4)



MU5 (MR5)

Figure VII.24 : Murets de **type I.**

Le muret est placé et centré entre les deux plateaux de la presse à l'aide des sabots métallique, puis chargé progressivement à vitesse constante égale à 10 KN/s jusqu'à la rupture, des comparateur ont été placés sur des réglette en aluminium collée sur la face du muret afin d'enregistré les déplacement horizontaux et verticaux.(**figure VII.25)**.



Figure VII.25 : Essai de compression diagonale sur muret **type I**.

b.2. Essai de cisaillement :

L'essai le plus simple à exécuter et à contrôler en laboratoire pour caractériser le comportement de la maçonnerie sous charge de cisaillement est celui montré sur la **figure VII.26.**

La résistance au cisaillement d'un mortier est étudiée sur des triplets qui s'appuient sur les deux briques d'extrémités. Il est obtenu par l'application d'une charge sur la face supérieure de la brique intermédiaire. Cette mise en chargé est précédée préalablement à une pré-compression latérale sur ce triplet**.**



Figure VII.26 : Essai de cisaillement sur triplet.

b.2.1. Protocole d'essai :

L'essai réalisé sur des triplets (**figure VII.27)** (un triplet pour chaque type de mortier) selon La norme **NF EN 1052-3 [87]** consiste à déterminer la résistance initiale au cisaillement dans le plan des joints d'assise horizontaux de la maçonnerie, à l'aide d'un corps d'épreuve soumis à un essai de cisaillement jusqu'à la rupture. Cette norme nous donne également toutes les indications nécessaires concernant la préparation des corps d'épreuve.

La contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$\tau = {}^{F}/_{2 \times S} \qquad \textbf{(Equation VII.15)}$$

Cet essai nous permet également d'établir la relation linéaire de Mohr-Coulomb en fonction de l'adhérence entre le mortier et la brique par la relation suivante :

$$\tau = c + \sigma \cdot tg\varphi \qquad \textbf{(Equation VII.16)}$$

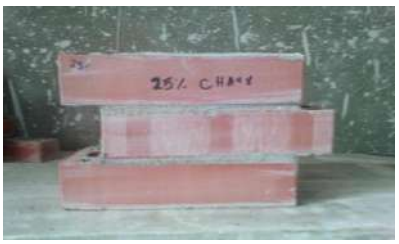
Où :

c: Cohésion du mortier

$tg\varphi$: Angle de frottement du mortier



TRIP1 (MR1)



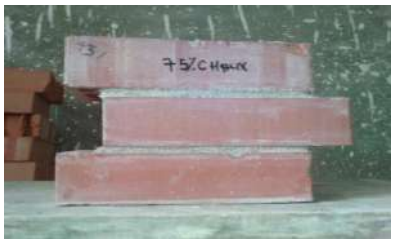
TRIP2 (MR2)



TRIP3 (MR3)



TRIP4 (MR4)



TRIP5 (MR5)

Figure VII.27 : les différents triplets de l'essai de cisaillement.

b.3. Essai de compression centrée sur murets :

La résistance à la compression sur des petits murets en brique est obtenue par l'essai de compression centrée au moyen d'une presse hydraulique de type (CONTROLLS), à deux échelles de capacité 3 MN **[Annexe]**. Le muret est placé et centré entre les deux plateaux de la presse, puis chargé progressivement à vitesse constante égale à 10 KN/s jusqu'à la rupture.

b.3.1. Protocole d'essai :

L'essai à été réalisé suivant la norme **EN 1052-1 [88]**, qui consiste a mesuré la résistance à la compression de la maçonnerie perpendiculairement aux joints horizontaux ,elle est déduite de la résistance de murets en maçonnerie soumis à l'essais jusqu'à la rupture. Il convient que les matériaux, la fabrication et le mode de liaison soient conformes aux ceux utilisés dans la pratique.

Les deux murets de **type II**, confectionnés avec deux types de mortiers (**MR3, MR5**) (**figure VII.28)** selon la méthode décrite précédemment, sont placés un à un entre les deux plateaux de la presse, une poutre de répartition de la charge à été placée sur le coté supérieure, les murets sont chargés uniformément en compression jusqu'à la rupture d'où la charge maximale (Nmax) atteinte est enregistrée.

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est déterminée à partir de la résistance mesurée sur les divers murets.

Les déplacements horizontaux et verticaux sont enregistrés à l'aide des comparateur qui ont été placés sur des réglettes en aluminium collée sur la face du muret, (**figure VII.29) ;** Il est a rappelé que la maçonnerie à une très bonne résistance à la compression suivant le plan perpendiculaire au joint du mortier.



MU1 (MR3)



MU2 (MR5)

Figure VII.28 : Murets de **type II**.



Figure VII.29 *:* Essai de compression centrée sur muret de **type II.**

b.4. Essai de compression diagonale sur murets renforcés :

L'essai consiste à testé deux murets fissurés de type I renforcé par la fibre de verre afin d'évalué l'efficacité du renforcement et le comportement du muret sous chargement.

Le comportement des murets est étudié en force et en déplacement afin d'évaluer la résistance et la ductilité ainsi que le mode de rupture correspondant à chaque cas de renforcement.

b.4.1. Muret renforcé par la fibre de verre (FRP) :

b.4.1.1. Protocole d'essai :

Pour le besoin de cette essai nous avons construit deux murets de **type I** avec du mortier bâtard **MR3**, après 24H nous avons réalisé une rainure tous le long de la diagonale du muret afin de l'affaiblir, le renforcement du muret est réalisé en appliquant une première couche d'imprégnation en résine époxydique à deux composants **(figure VII.30)** , puis nous avons collé la fibre de verre sur la face du muret en diagonale du premier muret et sur les deux diagonales en forme de X sur le deuxième. En suite trois couches de résine sont appliquées sur la fibre de verre. **(figure VII.31).**



Résine **Durcisseur** **Fibre de verre**

Figure VII.30: différents composants de la colle.





Réalisation de la rainure Muret à une file de fibre Muret à deux files de fibre

Figure VII.31 : Différente étapes de renforcement du muret en fibre de verre.

Le muret est placé et centré entre les deux plateaux de la presse à l'aide des sabots métallique équerre puis chargé progressivement à vitesse constante égale à 10 KN/s jusqu'à la rupture, des comparateur ont été placés sur des réglette en aluminium collée sur la face du muret afin d'enregistré les déplacement horizontaux et verticaux (**figure VII.32)** .

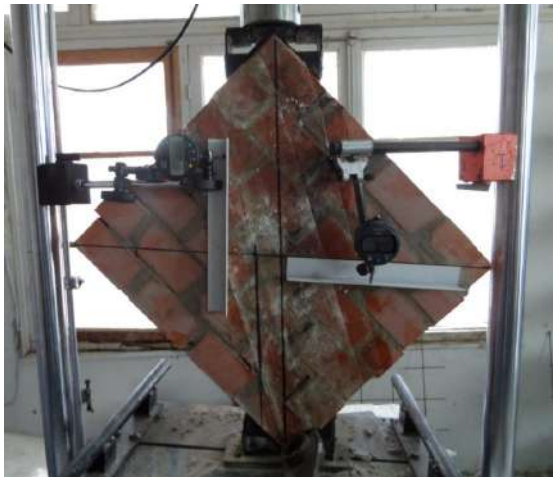


Figure VII.32: Essai de compression diagonale sur muret **type I** renforcé par **FRP**.

b.4.2. Muret renforcé par l'enduit en ciment et grillage :

b.4.2.1. Protocole d'essai :

De la même façon que l'essai précédent, on a choisie deux murets de **type I** réalisés avec le mortier bâtard **MR3**, ou nous avons appliqué une couche de 3 à 4 mm d'enduit, après quelques minutes de séchage de l'enduit on a appliqué la deuxième couche, un grillage à été appliqué sur la face du muret comme renforcement, sauf que ce dernier a été appliqué avant la réalisation de la deuxième couche d'enduit et cela pour le premier

muret, alors que pour le deuxième muret le grillage a été appliqué après la deuxième couche d'enduit. **(figure VII.33).**

Il est a rappelé que des clous ont été collé sur les quatre coins avant l'application d'enduit afin de maintenir le grillage en place.



Collage des clous **1er couche d'enduit** **Application du grillage**

Figure VII.33 : les étapes de réalisation du renforcement du muret par grillage.

Le muret est placé et centré entre les deux plateaux de la presse à l'aide des sabots métalliques équerre puis chargé progressivement à vitesse constante égale à 10 KN/s jusqu'à la rupture, des comparateurs ont été placés sur des réglette en aluminium collées sur la face du muret afin d'enregistrer les déplacements horizontaux et verticaux.(**figure VII.34)**.



Figure VII.34 : Essai de compression diagonale sur muret **type I** renforcé par grillage.

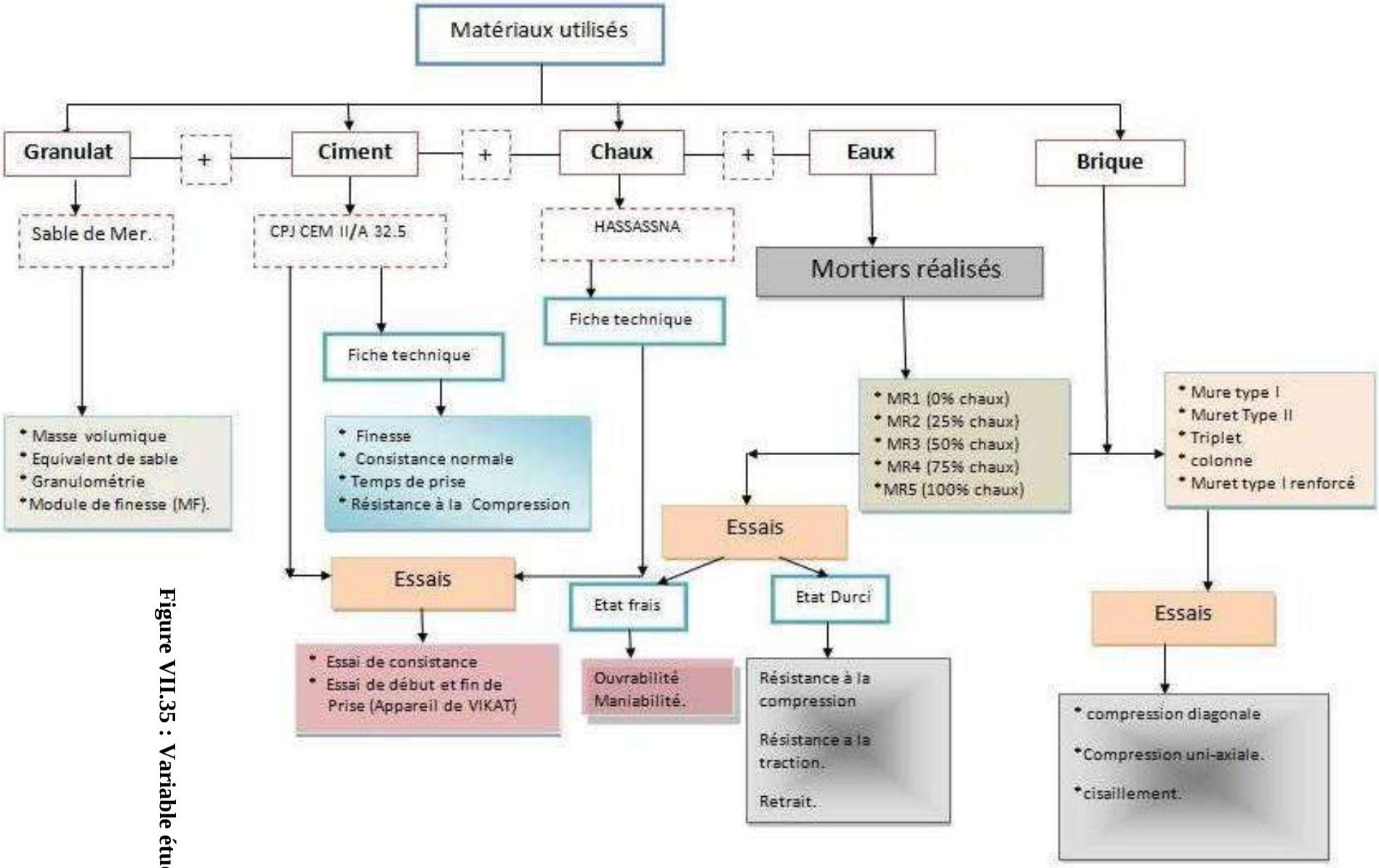


Figure VII.35 : Variable étudié

Chapitre VIII
Résultats et interprétations

Chapitre VIII

Résultats et interprétations

VIII.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur les granulats, sur le mortier ainsi-que les différents essais mécaniques sur murets.

VIII.2. Caractérisation des granulats :

Les résultats des différents essais de caractérisations réalisées sur les sables sont résumés dans le **tableau VIII.1** et sur la **figure VIII.1** suivante:

Tableau VIII.1 : Caractéristiques du sable utilisé.

Caractéristique		**Normes**
Type de Sable	Roulé	
Provenance	Mostaganem	
Classe granulaire	0/3	NF P-560 **[20**
Module de finesse	2.00	NF P-560 **[20**
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.69	NF P-650 **[23**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.42	NF P-650 **[23**
Equivalent de sable (%)	92.5%	NF P-598 **[22**
Taux d'absorbation d'eau (%)	4%	NF P-560 **[20**

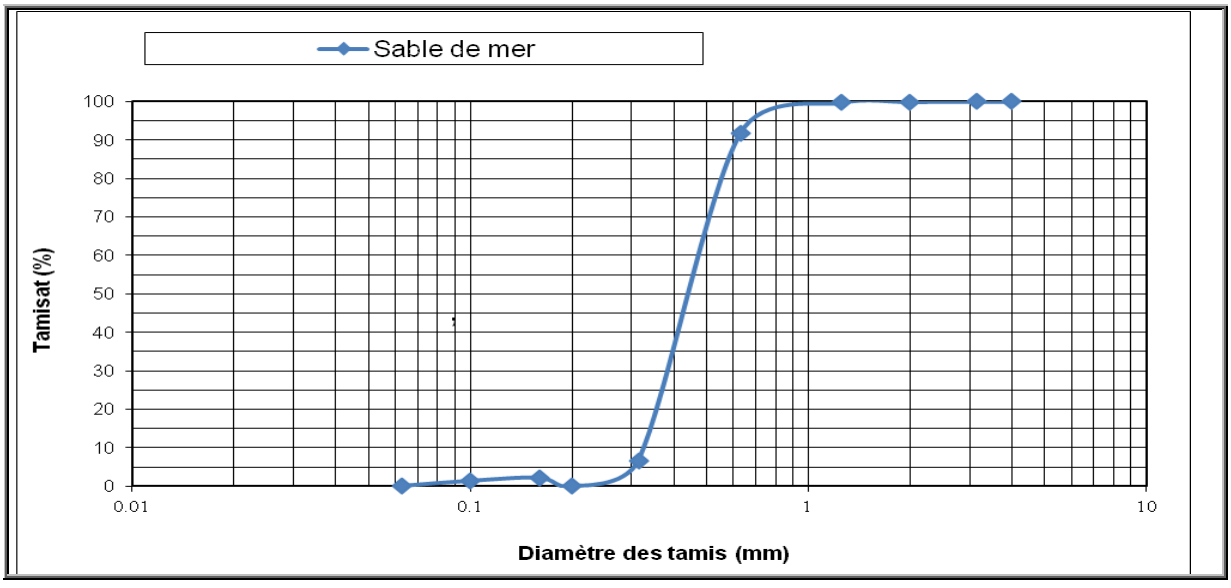


Figure VIII.1 : La courbe granulométrique du sable utilisé.

VIII.3. Caractérisation des mortiers :

Les résultats obtenus des essais réalisés sur le mortier sont données ci-après et sont regroupés selon deux modes : à l'état frais et à l'état durci.

VIII.3.1. Etat frais :

a. Ouvrabilité :

Les résultats sont représentés sur le **(tableau VIII.2)** et l'histogramme **(figure VIII.2)** et nous permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différentes mortiers réalisés. **[35] [36].**

Tableau VIII.2 : Temps d'écoulement des différents mortiers.

Type de mortier	Temps d'écoulement (S)	E/(Ciment+Chaux)
MR1 (0% Chaux)	7.5	0.60
MR2 (25% Chaux)	8.0	0.66
MR3 (50% Chaux)	8.0	0.74
MR4 (75% Chaux)	8.5	0.81
MR5 (100% Chaux)	9.0	1.00

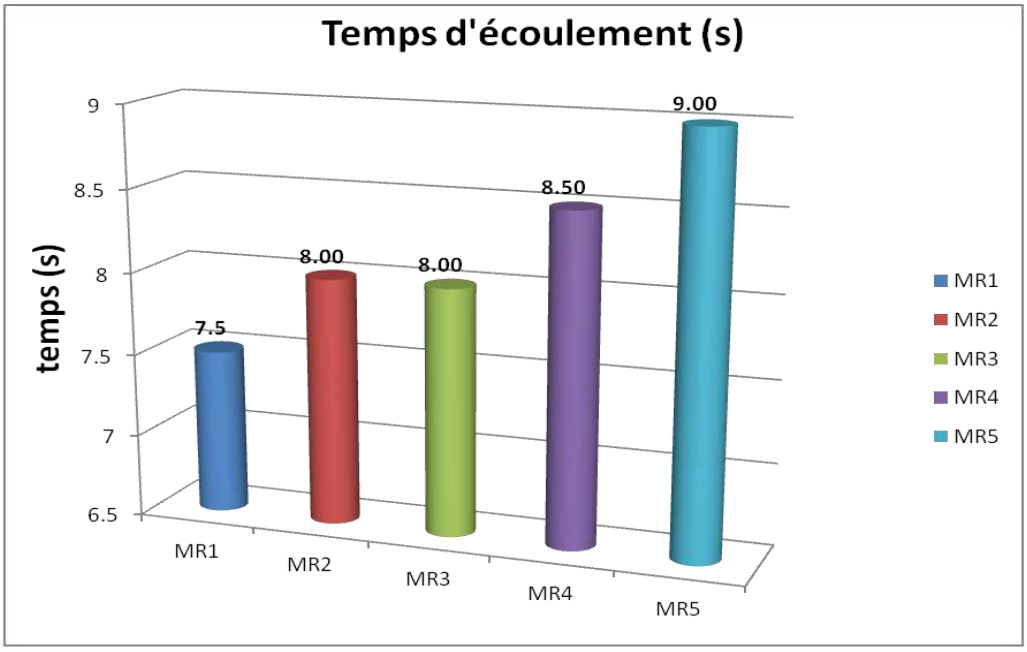


Figure VIII.2 : Temps d'écoulement des différents mortiers réalisés.

Pour être plus proche de la réalité dans la préparation des mortiers c'est-à-dire mélanger à la truelle et ouvrabilité à vue, on a formulé les mortiers avec le rapport E/C variable d'un type de mortier à un notre, ce qui en résulte un temps d'écoulement à peut prêt le même pour tous les mortiers.

b. Essai de prise :

D'après les résultats obtenue sur le **tableau VIII.3 et** la lecture du graphe (**figure VIII.3**), on remarque que la pâte de chaux nécessite une fin du prise plus lente que la pâte du ciment.

On remarque aussi la fin de prise des pâtes bâtardée (chaux-ciment) est proportionnelle au dosage de la chaux, cette prise lente est expliquée par la réaction chimique de la chaux avec l'air. **[37]**

Tableau VIII.3 : le début et la fin de prise des différents mortiers réalisés.

Type de pâte	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
0% chaux	1	4
25% chaux	1	4
50% chaux	2	5
75% chaux	4	6
100% chaux	5	>7

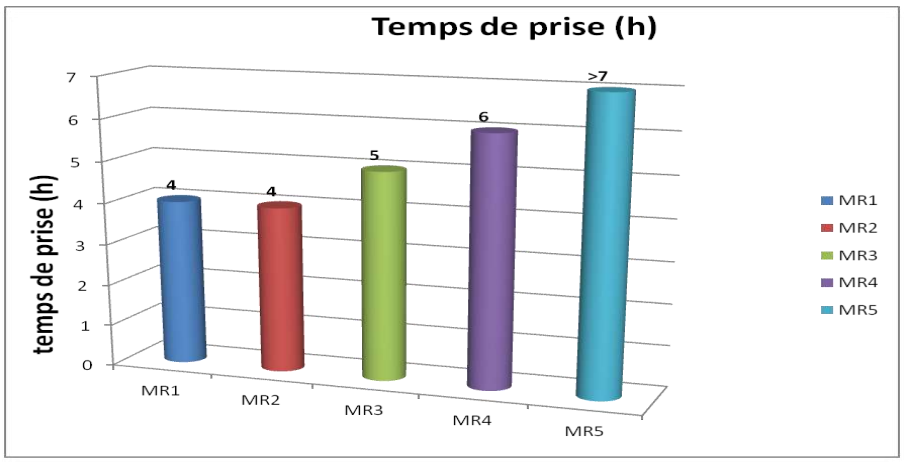


Figure VIII.3 : Temps de prise des mortiers réalisés.

VIII.3.2. Etat durci :

a. Résistance à la compression :

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur trois (3) éprouvettes à l'âge de 7, 14 et 28j avec des dosages en chaux de 0% ,25%, 50%, 75%,100%, respectivement pour des mortiers MR1,MR2,MR3,MR4,MR5, les résultats sont illustrés dans la **figures VIII.4,** et le **tableau VIII.4 [38]**:

Tableau VIII.4: Variation de la Resistance à la compression des mortiers réalisés à (7j,14j,28j)

Type de Mortier		Résistance à la compression (Mpa)			
	Age (j)	0j	7j	14j	28j
MR1 0% chaux		0	10.29	13.43	21.69
MR2 25% chaux		0	7.80	10.39	14.84
MR3 50% chaux		0	5.20	7.67	10.81
MR4 75% chaux		0	4.50	5.62	7.56
MR5 100% chaux		0	2.38	2.40	2.70

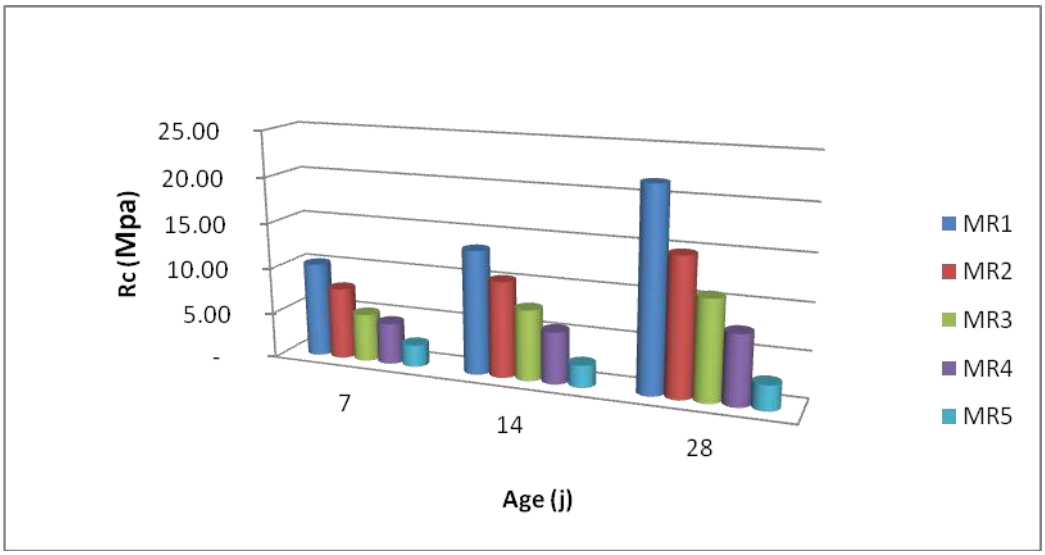


Figure III.4 : Variation de la Résistance à la compression des mortiers.

D'après la lecture de ce graphe on remarque une augmentation continue de la résistance à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'âge (7,14, et 28 jours).

Cette augmentation est due à l'hydratation du liant au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité.

On remarque aussi que l'introduction de la chaux fait diminué la résistance et cela et due à sa finesse par rapport au ciment et sa résistance et nettement plus faible.

b. Résistance à la traction par flexion :

La mesure de la résistance à la traction par flexion est importante surtout pour identifier l'adhérence liant / grains.

Les résultats sont présentés dans la **figures VIII.5** et dans le **tableau VIII.5,** leurs analyse est faite de la même façon que celle de la résistance à la compression.

On remarque aussi que l'introduction de la chaux fait diminué la résistance cela est due que cette dernière est plus fine que le ciment et sa résistance et nettement plus faible. **[38]**

Tableau VIII.5: Variation de la résistance à la traction des mortiers réalisés à (7j,14j, 28j)

Type de Mortier		Résistance à la traction (Mpa)			
	Age (j)	0j	7j	14j	28j
MR1 0% chaux		0	2.74	2.95	3.75
MR2 25% chaux		0	2.30	2.55	2.95
MR3 50% chaux		0	1.85	1.95	2.45
MR4 75% chaux		0	1.92	2.05	2.25
MR5 100% chaux		0	1.58	1.71	1.95

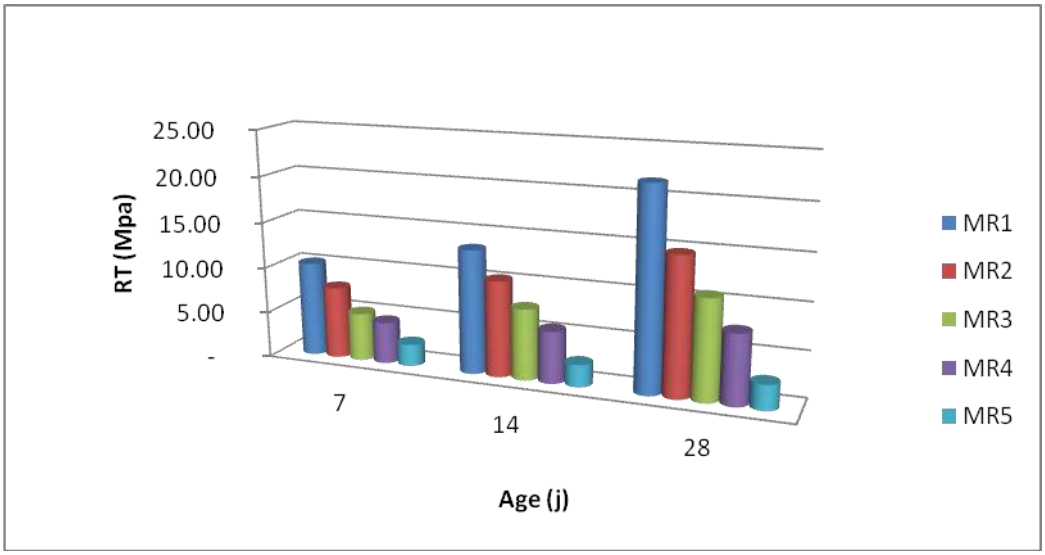


Figure VIII.5 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers.

d. L'essai de retrait :

Les résultats des essais de retrait à l'air libre sont illustrés sur la **figures VIII.6**, on remarque que les valeurs du retrait varient les 7 premiers jours pour tous les mortiers.

En ce qui concerne le retrait relatif au mortier MR5 a augmenté durant les 7 premiers jours puis reste constant et cela et dus principalement à la prise lente de la chaux de même que le mortier MR4, ce qui explique l'influence du dosage de la chaux sur le retrait à 28 jours.**[39]**

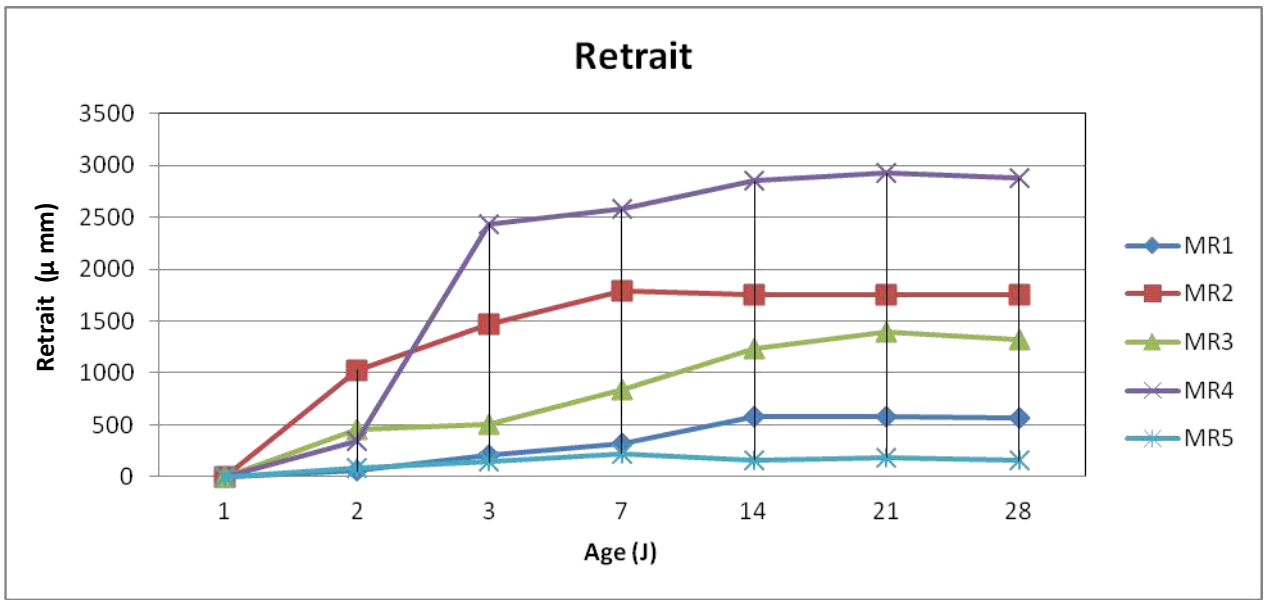


Figure VIII.6 : Variation du retrait des mortiers.

VIII.4. Essai mécanique sur murets :

VIII.4.1. Essai de compression diagonale sur murets non renforcés :

a. Mode de rupture :

Tous les modes de rupture des murs testés sont représentés dans la **figure VIII.7**. Sous ces conditions aux limites et de chargement (vitesse de chargement :10 KN/s), la rupture observée de ces murs non-renforcés est caractérisée par :

- Une rupture le long de la diagonale comprimée et décollement du joint sous forme d'escalier pour les deux premiers murets (MR1, MR2),
- Concernant le muret (MR3) on a remarqué une rupture combiné du joint c'est à dire la première sous forme d'escalier et la deuxième sous forme d'un glissement le long du centre du muret,
- pour les deux derniers murets (MR4, MR5) on a remarqué une rupture du joint par glissement le long du milieu du muret.



Muret type I 0% chaux



Muret type I 25% chaux



Muret type I 50% chaux



Muret type I 75% chaux



Muret type I 100% chaux

Figure VIII.7 : Mode de rupture des murets type I en compression diagonale.

b. Analyse des résultats :

Toutes les courbes de (force – déplacement latéral) en tête des murets testés sont représentées sur la **Figure VIII.8**, l'ensemble des courbes présente un comportement linéaire.

Toutes les courbes se caractérisent par une première phase linéaire, puis apparaît un comportement non-linéaire avec l'apparition des fissures, ce qui a été observé par Gabor A (2006) **[57].**

Nous avons remarqué la rupture brutale avec éclatement du joint pour les deux premiers murets réalisés avec le mortier 0% de chaux et 25 % de chaux.

En revanche pour les autres murets ou le pourcentage de la chaux est plus important présentent une rupture progressive et douce.

Donc on constate que l'ajout de la chaux diminue la résistance maximale en compression voir la (**figure VIII.9**).

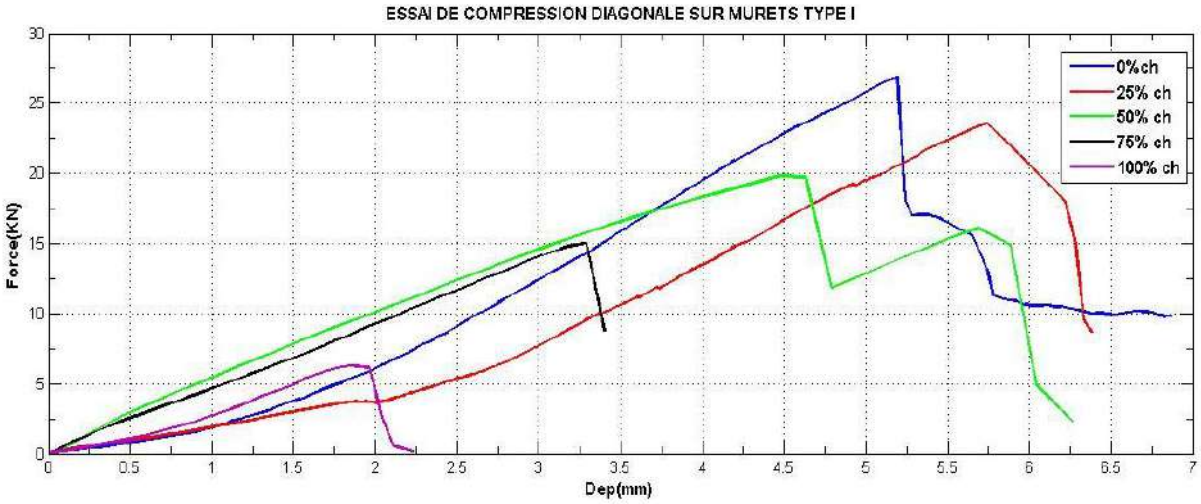


Figure VIII.8 : Compression diagonale : Contrainte - déformation des murets type I.

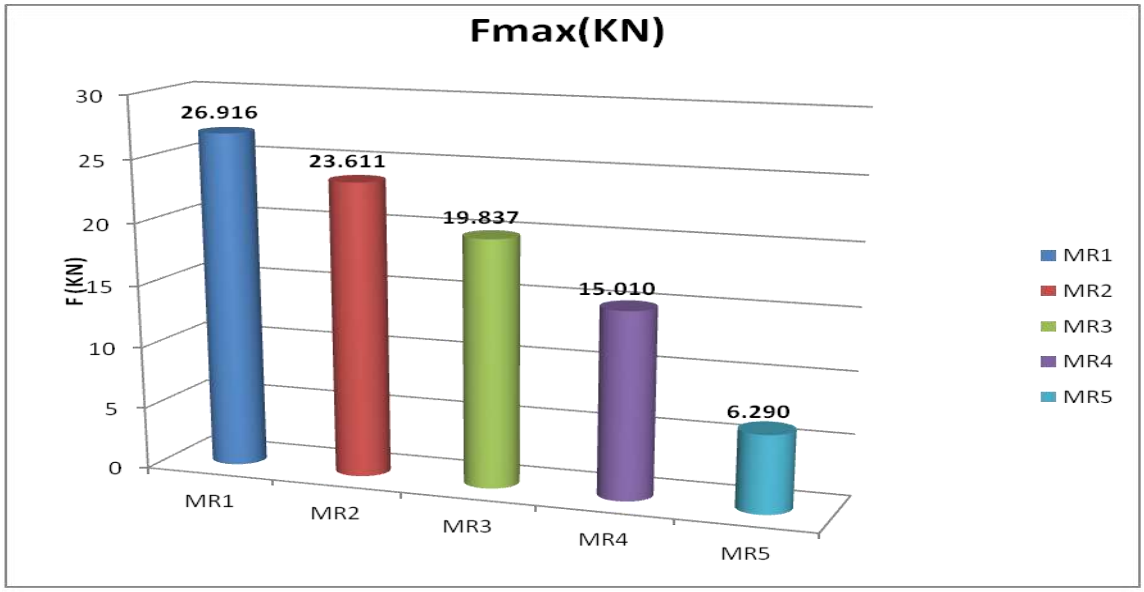


Figure VIII.9 : Histogramme de contrainte maximal par type de mortier utilisé.

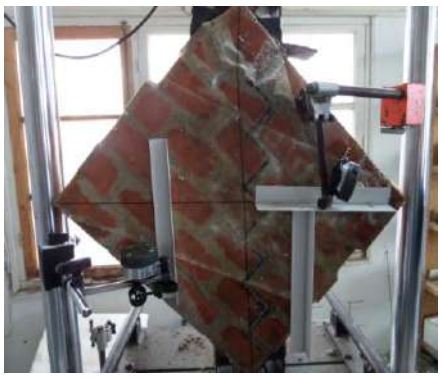
VIII.4 .2. Essai de compression diagonale sur murets renforcés par GPRF :

a. Mode de rupture :

Nous avons remarqué dans le premier essai que la rupture s'est produite dans le premier muret (une seule diagonale renforcée) sous forme d'escalier suivant la diagonale comprimée déjà fragilisé et renforcé par la GPRF; Cependant pour le deuxième cas et malgré la fissure réalisée sur le muret avant l'essai, on a remarqué que la rupture s'est produite sous forme de glissement, ce qui explique que le renforcement des deux diagonales du muret a bien fonctionné et on a put évité l'effondrement brutal du muret dans les deux cas **figure VIII.10**.



Rupture Muret renforcé
une seul diagonal



Rupture Muret renforcé des
deux diagonal

Figure VIII.10: Mode de rupture des murets (type I) renforcés par GPRF en compression diagonale.

b. Analyse des résultats :

D'après la (**figure VIII.11)** on a remarqué que les deux murets ont un comportement linéaire jusqu'à la rupture. On a constaté un gain de résistance et du ductilité de 25.5% entre un muret renforcé suivant une diagonale et de 34.6% entre un muret renforcé suivant deux diagonale, par rapport un muret normal non renforcé et pour le même type de mortier ce qui coïncide avec les résultats de Koufache N (2007),**[55]**,**[72**]. **(figure VIII.11** et **Figure VIII.12)**.

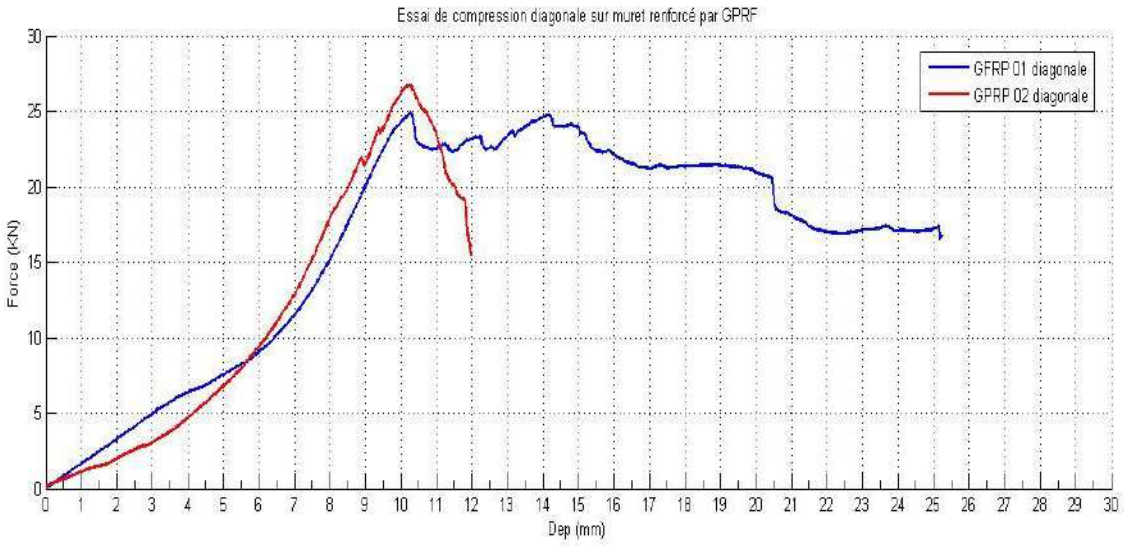


Figure VIII.11 : Diagramme déformation des murets type I renfoncés par GFRP

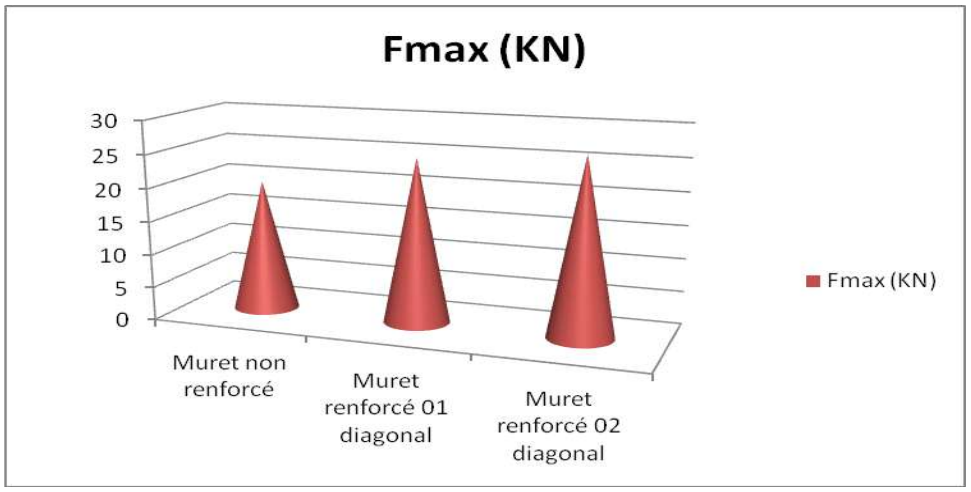


Figure VIII.12: Comparaison de la contrainte maximale entre un muret non renforcé et muret renforcé par GFRP.

VIII.4 .3 Essai de compression diagonale sur murets renforcés par Grillage :

a. Mode de rupture :

Nous avons remarqué d'après la **figure VIII.13** que la rupture pour les deux muret renforcé s'est produite sous forme d'escalier suivant la diagonale comprimée avec décollement brutal du renfort avant l'apparition des fissures puis l'effondrement brutal des deux murets due à la rigidité apportée par le renfort (enduit+grillage). **(figure VIII.13)**.



Figure VIII.13 : Mode de rupture des murets type I renforcés par grillage en compression diagonale.

b. Analyse des résultats :

Selon la **figure VIII.14** on a remarqué que les deux murets ont un comportement linéaire jusqu'à la rupture. On a constaté aussi un gain de force de 5% entre un muret renforcé par grillage en dessus et de 10% entre un muret renforcé par grillage en dessous le tous par rapport un muret normal non renforcé et pour le même type de mortier (**figure VIII.14** et **figure VIII.15**).

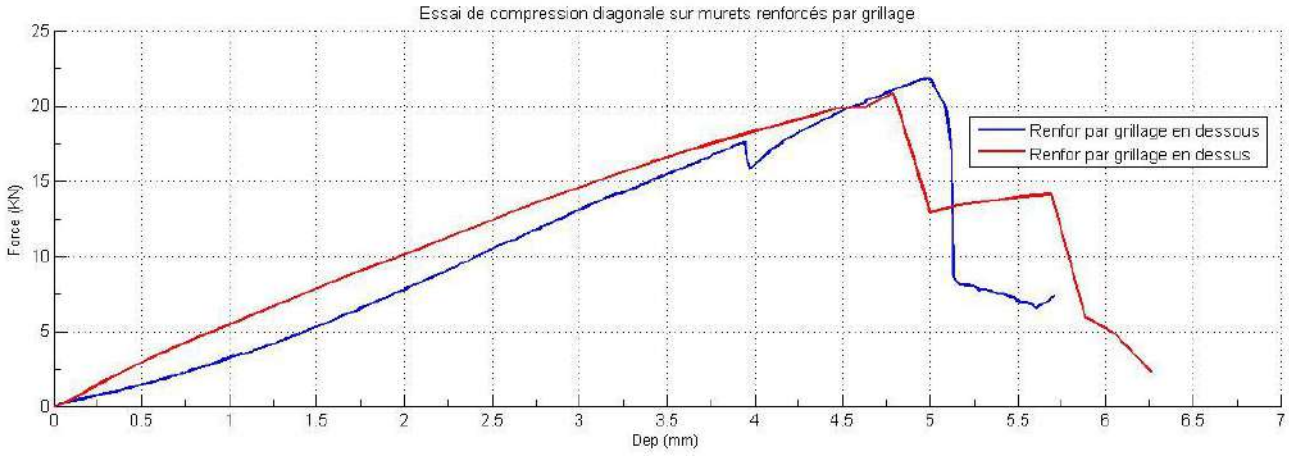


Figure VIII.14: Diagramme déformation du muret type I renfoncé par grillage.

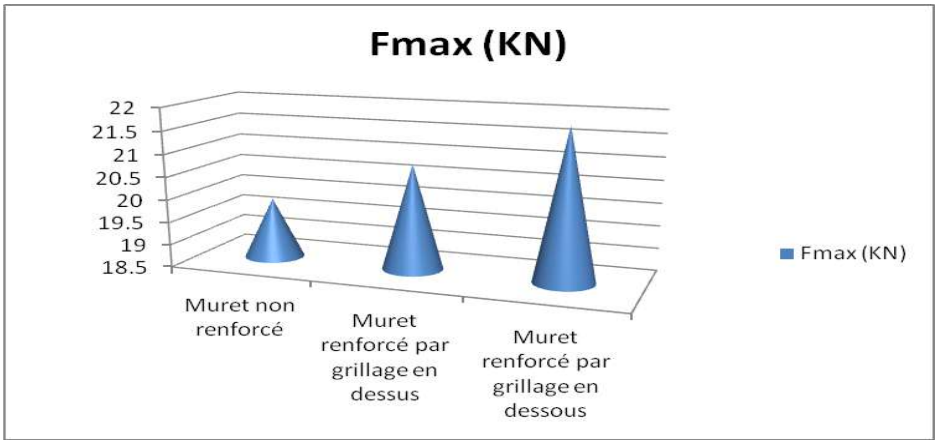


Figure VIII.15: comparaison de la contrainte maximale entre un muret non renforcé Et un muret renforcé par grillage.

III.4.4. Essai de cisaillement sur triplets :

a. Mode de rupture :

Nous avons remarqué d'après la **figure VIII.16** que la rupture des triplet sous l'effet de contrainte de cisaillement s'est produite par le brisement d'une brique des trois, est cela pour les mortiers MR2,MR3 et MR4 respectivement composés de 25%, 50% et 75% de chaux contrairement au triplet réalisé uniquement en mortier de ciment MR1, ce qui explique que la chaux retarde l'apparition des fissure et augmente l'adhérence brique mortier.



Figure VIII.16 : Mode de rupture des triplets sous l'effort de cisaillement.

b. Analyse des résultats :

La **figure VIII.17** illustre le comportement des triplets vis-à-vis du cisaillement sous l'effet d'une pré-compression appliquée de 2Mpa d'où on remarque que le taux de cisaillement maximal diminue avec l'augmentation de la quantité de la chaux dans les joints de mortier ce qui coïncide avec les résultats d' Abdou et al (2006) **[56]**.

Par conséquent, la **figure VIII. 17** a montré également que le pourcentage de 25%, 50% et 75 % de chaux dans les joints de mortier diminue le pic de la contrainte de cisaillement.

Alors on conclut que l'augmentation du dosage de la chaux retarde l'apparition des fissures.

Il est clairement observé que la présence de la chaux déplace le pic de la contrainte de cisaillement vers un grand déplacement. Contrairement au cas du mortier avec 0% de chaux, ce phénomène est atteint pour de très petits déplacements, ce qui accélère la rupture des triplets.

Alors selon la **figure VIII.18**, on constate que plus on augmente le dosage de la chaux plus la contrainte de cisaillement est réduite.



Figure VIII.17: Diagramme contrainte déformation des triplets sous l'effort de cisaillement.

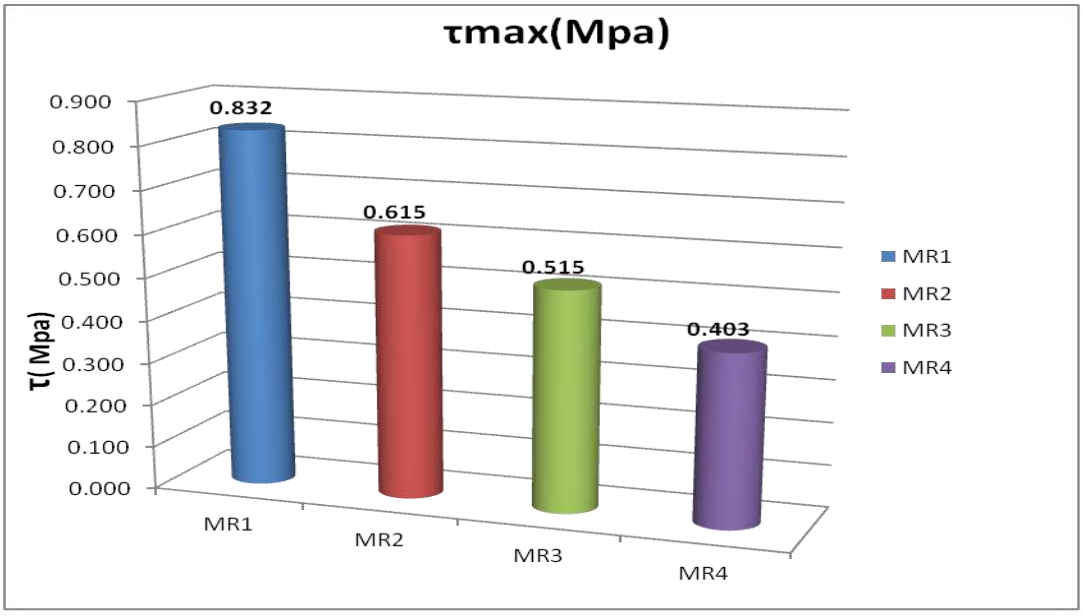


Figure VIII.18 : Histogramme de contrainte de cisaillement maximal par type de mortier utilisé.

VIII.4.5. Essai de compression simple sur murets type II :

a. Mode de rupture :

Nous avons remarqué d'après résultat représenté sur la **figure VIII.19** que la rupture pour les deux murets s'est produite par des fissuration dans la maçonnerie perpendiculairement au plan du joint de mortier avec l'évolution des déformations, ce qui explique que l'effort a été absorbé par la maçonnerie, les fissures verticales apparaissent de plus en plus, ce qui conduit à la rupture du muret par une cassure au milieu de celui-ci, le même phénomène a été observé par Hoffmann et Schubert **[47]**.



Figure VIII.19 : Mode de rupture des murets en compression simple.

b. Analyse des résultats :

La **figure VIII.19** illustre le comportement des murets sous l'effort de compression d'où on a observé un comportement linaire toute en augmentant la charge due principalement à la répartition uniforme de la charge sur la maçonnerie et qu'une grande quantité de la force est absorbé par cette dernière.

On a constaté que la nature du joint n'influe pas trop sur le résultat de l'essai puisque une grande quantité de l'effort a été absorbé par la maçonnerie et la force maximale ne varie pas trop entre les deux types de murets. (**Figure VIII.20).**

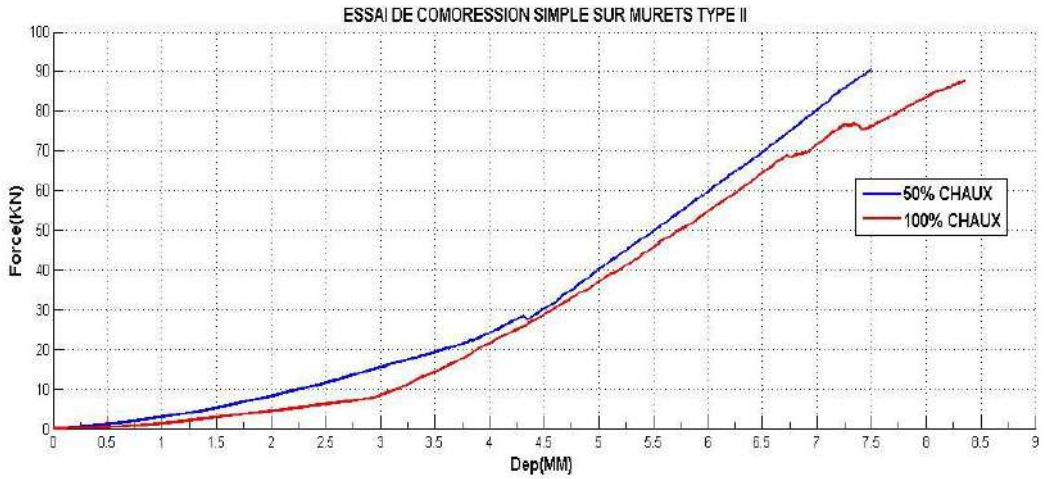


Figure VIII.19: Diagramme déformation des murets type II en compression simple.

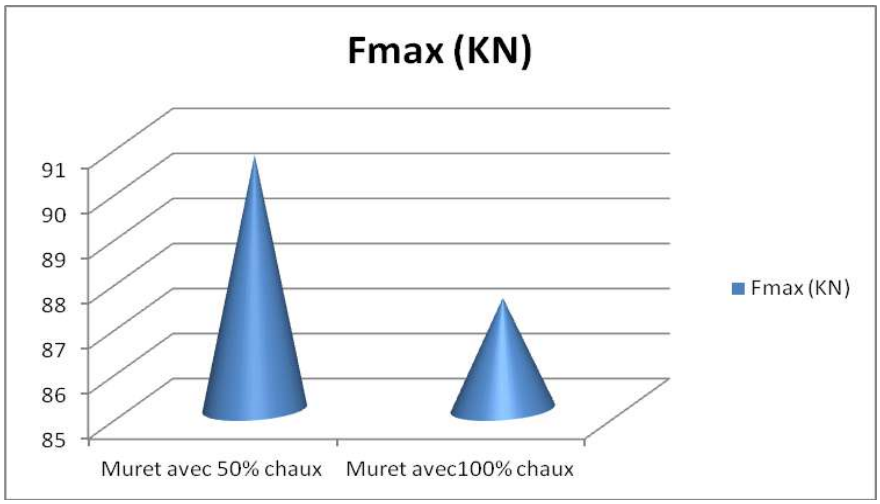


Figure VIII.20 : Histogramme de contrainte maximal par type de mortier utilisé.

VIII.5. Conclusions générale et recommandations :

En conclusion le comportement de la maçonnerie est imprévisible néo moins avec l'étude de ce dernier avec des modèle réduit nous a donner des résultats concluant suivant :

- Puisque notre sable est propre c'est ne contient ni de matière organique ou argileuse il faut augmenter le dosage du liant affin de combler le vide entre les grains de sable et avoir une bonne cohésion par conséquent avoir une meilleure résistance à la compression et à la traction.

- La chaux par ses caractéristiques physico-chimique ainsi que mécanique présente un excellent matériau pour l'entretient des vieux bâtisse, le seul inconvénient sa résistance en compression à court terme, dont on a put améliorer en la mélangeant avec du ciment.

- La chaux ne développe toute sa résistance à 28 jours, a cause se sa prise lente qu'est due à sa formule chimique.

- Le rapport E/C est proportionnel à la quantité de la chaux dans le mortier.

- La nature du joint influe sur le comportement mécanique de la maçonnerie (muret).

- Le renforcement de la maçonnerie avec de la fibre de verre améliore le comportement mécanique ainsi que la ductilité de cette dernière et présente une excellente alternative pour la réparation des ancien monuments notamment par sa rapidité d'exécution et son faible cout.

On recommande de tester d'autres types de mortiers et matériaux qui peuvent remédier aux problèmes rencontré dans l'entretien et la réparation des monuments historique par exemple : un mortier à base de ciment prompt.

Nous proposons aussi de teste d'autre méthode de renfort de la maçonnerie ainsi que d'autres matériaux de renfort par exemple la fibre de lin qui est une tendance de nos jours.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Listes des références bibliographiques

[1] - **Ecole d'Avignon** «Technique et pratique de la chaux », VIIIéme tirage, éd. Eyrolles. Paris1997).

[2] - **Vitruvius. De Architectura**. Book II, V. Frank Granger's translation. Heinemann, 1931).Vitruve, Les dix livres d'architecture corrigés et traduits en 1684 par C. PERRAULT. éd. pierre Mardaga, Paris. P76.

[3] - **Cowper, A.D**. Lime and Lime Mortars. Building Research Station. London: HM Stationery, 1927)

[4] - **McKee, Harley J**. Introduction to Early American Masonry - Stone, Brick, Mortar and Plaster. National Trust for Historic Preservation, Columbia University, 1973. p 68).

[5] - **ASTM C270-51** (Standard Specification for Unit Masonry).

[6] - **BENKHANOUF AREZKI.** Caractérisation des mortiers archéologiques, le cas des sites historiques de Djemila et de la Citadelle d'Alger, thèse de magistere UNIVERITE DE BOUMERDES)2006.

[7] - **M. GAID** « l'Algérie sous les Turcs » éd. Mimouni. Alger 1991.

[8] - **J. P. ADAM** « La construction romaine, matériaux techniques ». Deuxième édition, G. M. Picard, Paris 1989).

[9] - **ANNE BOSSOUTROT** « Analyse et restauration des enduits » les travaux antérieurs. Paris 1991).

[10] - **REVUE** : « Pétroarchéologie de mortiers » GALLOS-ROMAINS application de méthodes analytiques à l'étude des thermes du vieil-Evreux, Paris1993.

[11] - **GEORGE TORRACA** « les matériaux de construction poreux, science des matériaux pour la conservation architecturale » Traduit de l'original anglais par C. DI MATTEO. ICCROM. Rome 1986).

[12] - **G. DREUX – J. FESTA**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». éd. Eyrolles, Huitiéme édition,Paris 1998).

[13] - **Y. M. FROIDEVAUX**, « Technique de l'architecture ancienne : Construction et restauration ». éd. Pierre Mardaga, Bruxelles 1986).

[14] - **R. ROUBAUD**. IUP (institut universitaire professionnalisé)Valorisation du patrimoine, Enduits extérieurs à la chaux, sept 2009.

[15] - NF P 15-311.

[16] - EN 459-1.

[17] - NF P 15-301.

[18] - **J. P. DELPECH**, « Pratique du moulage ». IIIéme éd : Eyrolles, Paris 1999).

[19] - NF P 18 304.

[20] - NF P 18-560.

[21] - **DOCUMENT TECHNIQUE UNIFIE**, n° 26.1, référence AFNOR DTUP 15-201 : Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Chapitre 2 : Matériaux, mai 1990.

[22] - NF P 18-598.

[23] - NF P 18-650.

[24] - NF P 18-555.

[25] - NF P 18-598.

[26] - **M. Venual**, «la pratique des ciments, mortiers et bétons ». éd : Du Moniteur. Tome1, Paris 1989.

[27] - **V. Biston**, « Manuel théorique et pratique du chaufournier ». 1836, Réédition Léonce Laget, Paris 1981).

[28] - NF P 18-303.

[29] - **DOCUMENT TECHNIQUE UNIFIE, n° 26.1**, référence AFNOR DTUP 15-201 : Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. Chapitre 2 : Matériaux, mai 1990.

[30]- **M. BENCHEIKH, M. BELOUADAH**, M. CYR, et P. CLASTRES, « Effet des adjuvants sur la perméabilité et la porosité d'un béton à base de matériaux locaux sous conditions climatiques ». Séminaire Bebelzouar, juin 2003.

[31]- **DESSART, J. JODOGNE**, J. PAUL«chimie minérale notions de chimie nucléaire», Ed : A. DE BOECK. Tome II, Bruxelles 1979.

[32]- **J. TOURNON**, « Construction en Terre et tremblements de terre ».

[33] - **J. P. ADAM**, « La construction romaine, matériaux techniques ». Deuxième édition, G. M. Picard. Paris 1989,p32).

[34] - **Centre National d'Etude et de Recherches Intégrées du Bâtiment**, CNERIB. Travaux d'enduit pour bâtiments : DTR E 6.1.

[35]- NF P 18-452.

[36] - NF P 15-437.

[37] - NF P 15-473.

[38] - NF EN 196-1.

[39] - NF P 18-404.

[40] - **Fazia FOUCHAL**. Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées ; Université de Reims Champagne-Ardenne, Thèse de Doctorat, décembre (2006).

[41] - **Hendry A., Sinha B., Davies S**. Design of Masonry Sructures, E et FN Spon, an imprint of Chapman Hall, 2-6 Boundary Row, London SF1 8HN, UK, first edition. ISBN0 - 419- 1500-3, 1997.

[42] - **Michel Prat**, modélisation des ouvrages, EDITION HERNES 1995.

[43] - **Dupain R., Lanchon R., Saint-Arroman J.C**., Granulats, Sols,ments et Bétons,Ed CASTEILLA, Paris, 1995).

[44] - **Wesche K. Ilantzis A.** General recommandations for methods of testing load bearing walls. Materials and Structures, RILEM, 13(78), p.433-445, 1980.

[45] - **Mann W., Betzler M**. Investigation on the effect of different forms of test samples to test the compressive strength of masonry, in : Proc. 10th. Brick and block Masonry Conf., eds. N.G. Shrive and A. Huizer, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada,p. 1305-1313, 1994.

[46] - **Hilsdorf H.K**., Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression, in : Designing, engineering and constructing with masonry products, eds. F.H. Johnson, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA, p. 34-41, 1969.

[47] - **Hoffmann G. Schubert P**. Compressive strength of masonry parallel to the bed joints, in : Proc. 10th. Brick and block Masonry Conf., eds. N.G. Shrive and A. Huizer, University of Calgary, Alberta, Canada, p. 1453-1462, 1994.

[48] - **Lourenço P.B**. Computational Strategies for Masonry Structures. PhD thesis, Technical University Delft. Delft University Press, The Netherlands, ISBN 90-407-1221-2,1996.

[49] - **Der Pluijm Robert. Van**. Material properties of masonry and its components under tension and shear. Proc. 6th Canadian Masonry Symposium, eds V.V Neis, Saskatoon, Saskatchewan, Canada : 675-686, 1992.

[50] - **Backes H.P**. On the behaviour of masonry under tension in the direction of the bed joints (in German). Dissertation, Aachen University of technology, Aachen, Allemagne, 1985.

[51] - **Page A.W**. The biaxial compressive strength of brick masonry. Proc. Instit. Civ.Engrs., Part 2, 71, p. 893-906, 1981.

[52] - **Page A.W**. The strength of brick masonry under biaxial compression- tension. Int. J.Masonry Constr. , 3(1) , p.26-31, 1983.

[53] - **Dhanaserkar M**. Page A. W., Kleeman P. W., The failure of brick masonry under biaxial stresses. Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, 79 ,p. 295-313, 1985.

[54] - **MannW. et Muller H**., Abrasion Resistance of masonry Wind proof, Berlin :Ernst Sohn. In : Manerwerk-Kalender 10, pp.95-114, 1985.

[55] - **Nawel MEZIGHECHE,** Comportement des remplissages dans les structures sous différentes sollicitations : cas de la maçonnerie, thèse de magistere, université de annaba (2010).

[56] - **Abdou. L** « Modélisation du comportement mécaniques des murs en maçonnerie charges dans leur plan » Phd thesis, université Marne La Valée , France (2005).

[57] - **Gabor. A, E. Ferrier, E. Jacquelin, P. Hamelin** «Analysis and modelling of the inplane shear behaviour of hollow brick masonry panels » Construction and Building Materials 20 (2006), pp 308–321.

[58] - **Asteris P.G** ≪ Finite Element Micro-Modeling of Infilled Frames≫ Electronic Journal of Structural Engineering 8 (2008), pp 1-11.

[59]- **Carter C, Stafford Smith B«** Structural behaviour of masonry structural infilled frames subjected to racking loads» International conference on Masonry structural systems, College of Engineering, the University of Texas at Austin , May (1969) ,pp 226-233.

[60]- **CHETTAH Mahieddine et GUERRAICHE Newfel,** Renforcement des poutres en béton armé à l'effort tranchant par matériaux composites – Étude comparative règlementaire-, Thèses de Master en génie civil , UNIVERSITE DES FRERES MENTOURICONSTANTINE, juin 2015.

[61] - **Sandeep S. Pendhari, Tarun Kant, Yogesh M. Desai**. Application of polymer pomposites in civil construction: A general review, (2008) 114– 124.

[62] - **P. HAMELIN**. Polymères renforcés de fibres (FRP) -Identification et champs d'application - C950,Technique de l'ingénieur, 2010, p2.

[63] - **MOHRA ABDELLAH ; YAGOUBI AISSA**. Renforcement des poutres flexionnelles en béton armé pardes matériaux composites en utilisant la technique EBR, thèse de Master en Génie Civil, Université MentouriConstantine, 2013.

[64] - **fib-TG 9.3. 2001**. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Fédération internationale du béton (International Federation for Structural Concrete), Lausanne, Suisse.

[65]- http://www.instron.tm.fr/wa/solutions/Tensile-Strength-of-Basalt-Fiber- Reinfor.aspx.

[66] - **Laurence CARAMARO**. Textiles à usage technique- n2511, Technique de l'ingénieur, 2006.

[67] - **Raphaelle Sadone**. Comportement de poteaux en béton arme renforces par matériaux composites et soumisa des sollicitations de type sismique et analyse d'éléments de dimensionnement. Other. Université Paris-Est,2011.

[68] - **U. Meier**. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, 1995, p 342.

[69] - **Jean LUYCKX**. Composites à fibres de carbone dans le génie civil- AM 5 620, Technique de l'ingénieur, p8.

[70] - **T.C. TRIANTAFILLOU**. STRENGTHENING OF HISTORIC STRUCTURES WITH ADVANCED COMPOSITES: A REVIEW, 2003.

[71] - **P. HAMELIN – E. FERRIER**. Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériauxcomposites, AFGC, 2003.

[72] - **Koufache N**, **Kesteloot S, Djelal Ch**, **Delfabro JM, Benslimane I** « Renforcement des ouvrages d'assainissement en maçonnerie à l'aide de matériaux composites – Etat de l'art» 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai (2007), Bordeaux.

[73] - **Merzoud M , Habita M.F** «Résistance à la compression diagonale des murs en maçonnerie » Colloque Maghrébin de Génie Civil, pp 151-157 CMGC (1999).

[74] –**HAMZA CHERIF , AMEL KARA ALI.** Etude du comportement de la maçonnerie sous chargement de cisaillement,, THESE MASTER, UNIVERSITE ABOU BEKRE BELKAID , TLEMCEN 2014.

[75] - NF EN 1996-2.

[76] - NF EN 1052.

[77] - **GHANEM AL ALDJAIA.** Analyse non linéaire des structures plane en béton armé tenant compte du remplissage en maçonnerie, thèse magistère, UNIVERSITE MOULOUD MAMERI TIZI OUZOU 2013.

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

[79] - NF EN 998-2.

[80] - NF P 15-476.

[81] - NF P 15-431.

[82] - **DUPAIN.R et all**, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2éme édition CASTEILLA, Paris,2000).

[83] - NF P 18-412.

[84]- **NASR-EDDINE KEDJOUR** « Le laboratoire de béton » : office des Publications universitaires, Alger, 2003).

[85] - NF EN 196- 3.

[86] - ASTM 1052.

[87] - NF EN 1052-3.

[88] - NF EN 1052-1.

[89] -NF EN 1052.

[**90]-Lourenço P.B.**, Analysis of masonry structures with interface elements : Theory andapplication. Report 03-21-22-0-01, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 1994.

Annexes

FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT CM. v04

CHAMIL

CPJ- CEM–II/B 32,5 R NA 442

CHAMIL est un ciment gris, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO^2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al^2O^3) et le fer (Fe^2O^3), ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

CHAMIL présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442 et la norme EN 197-1.

Domaine d'utilisation :

CHAMIL est utilisé pour tous les travaux courants qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau et qui n'exigent pas de hautes résistances mécaniques.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Béton structurel
- Fabrication des éléments préfabriqués (parpaings, buses, caniveaux,…ect)
- Fabrication des carreaux de dalle
- Travaux de finition.



Algerian Cement Company (SPA) Direction générale Ciment Blanc Algérien (SPA)

Ain Kebira - Setif, Wilaya (ACC) 01, Rue des Pins Haïdra, Alger Usine Oggaz (CIBA)
Tel: +213.35.50.76.20 Tél: +213 (0) 21 48 16 65 BP 97, 29350, Mascara
Fax: +213.35.56.70.36 Fax : +213 (0) 21 48 16 71 Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 86 86

LAFARGE لافارج

CHAMIL

CPJ- CEM–II/B 32.5 R NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT CM. v04

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	11.0–15.20
Teneur en sulfates SO3 (%), (NA 5042):	1.9 –2.8
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.7–2.4
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0.01–0.04

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C3S (%) :	55.0 - 64.0
Aluminates tricalciques C3A (%) :	6.0 - 8.2

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	26.8– 31.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4500–5500
Retrait à 28 jours en µm/m :	<1 000
Expansion en mm :	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min) :	120 - 200
Fin de prise (min) :	200- 300

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 32.5 & ≤ 52.5

Algerian Cement Company (SPA) Direction générale Ciment Blanc Algérien (SPA)

Rammam Gdaia, M'sila (ACC)
Tel. +213.35.50.78.20
Fax. +213.35.50.70.30

02, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax.: +213 (0) 21 48 19 11

Lbina Oggaz (CBA)
BP 57, 29300, Mascara
Tél. / Fax: +213 (0) 45 84 89 86

LAFARGE لافارج

FICHE TECHENIQUE DU CIMENT CHAMIL

FICHE TECHENIQUE DE LA CHAUX DE SAIDA.

SARL BMSD UNITE CHAUX - SAIDA

FICHE TECHNIQUE DE LA CHAUX BROYEE

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

paramètres	valeur(%)
CaO	>83,30
MgO	<0,50
Fe_2O_3	<2,00
Al_2O_3	<1,50
SiO_2	<2,50
SO_3	<0,50
Na_2O+k_2O	0,4 à 0,5
CO_2	<5,00
$CaCO_3$	<10,00
Insoluble dans HCL	<1,00

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

paramètres	valeur(%)
Densité	600 à 900 g/l
Constante volumique	Bonne
Poids spécifique	20 g/cm³
Refus 630 µ	0,00%
Refus 90 µ	<10,00%



PRESSE HYDROLYQUE AVEC MATERIEL D'AQUISITION