

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par : HIMRI MOHAMMED EL FETEH

**Thème: MORTIERS SPECIAUX ET MORTIERS
INNOVANTS: ETAT DE L'ART.
MORTIERS TRADITIONNELS: MANIPULATIONS.**

Sous la direction de : Pr. BENMALEK M.L

Juin 2014

ملخص

الملاط يتكون من (الإسمنت أو الجير)، الرمل والماء بنسبة مناسبة وهو من أنواع مختلفة و له تطبيقات مختلفة. في هذا العمل لقد أجرينا بحث نظري مطول علي الملاط: الملاط التقليدي(الإسمنت , الجير و الخليط بين الإسمنت و الجير), والملاط الخاص و الملاط المبتكر. حددنا في كل مرة هذا الملاط, قدمنا خصائصه وتطبيقاته. بالنسبة للجزء العملي أجرينا اختبارات علي مكونات الملاط التقليدي ,الصياغة, نظافة الرمل, إبرة فيكا من أجل بداية و نهاية الأخذ, مسبار فيكا من أجل التناسق, مقياس الغلظ, الهجمات التي يسببها الحمض و المقاومة الميكانيكية...

وقد أجريه الدراسات التجريبية في مخبر الأشغال العمومية بالشرق عنابة بمساعدة مجموعة من عمال المخبر. الدراسة النظرية و العملية للملاط التي أجريه في هذه المذكرة تمثل مساهمة متواضعة لمعرفة الملاط التقليدي, الملاط الخاص والملاط المبتكر.

الكلمات المفاتيح: الملاط التقليدي ؛ الملاط المبتكر ؛ الملاط الخاص ؛ صياغتها؛ التطبيقات؛ التجارب في المخبر.

ABSTRACT

Mortars consist of a binder (cement or lime), sand and water in suitable proportions. They are of different types and have different applications.

In this work, we conducted a broad literature search mortars : traditional mortar (cement, lime and lime - cement mixture), special mortars and mortars innovative. We defined each time the mortars, presented their characteristics and presentation applications.

For the practical part, we conducted tests on both components of traditional mortars on the same mortars; formulation , clean sand, Vicat needle for the beginning and end of the cement , Vicat probe for consistency, pycnometry , acid attacks , strengths ...

The experimental study was conducted in the laboratory of Public Works (LTPEst) Annaba with the kind contribution of laboratory technicians.

The theoretical and practical study of mortars made under this specification represents a modest contribution to the knowledge of traditional mortars and new mortars.

Keywords: Traditional mortars; Innovative mortars; Special mortars; Formulation; applications; Laboratory tests.

RESUME

Les mortiers sont composés d'un liant (ciment ou chaux), de sable et d'eau en proportions convenables. Ils sont de natures différentes et ont différentes applications. Dans ce travail, nous avons réalisé une large recherche bibliographique sur les mortiers: les mortiers traditionnels (de ciment, de chaux et du mélange ciment-chaux), les mortiers spéciaux et les mortiers innovants. Nous avons à chaque fois défini ces mortiers, présenté leurs caractéristiques et exposé leurs applications.

Pour la partie pratique, nous avons réalisé des essais aussi bien sur les composants des mortiers traditionnels que sur les mortiers mêmes: formulation, propreté du sable, aiguille de Vicat pour le début et fin de prise du ciment, sonde de Vicat pour la consistance, pycnométrie, attaques acides, résistances mécaniques ...

L'étude expérimentale a été réalisée au laboratoire des travaux publics (LTPE_{st}) de Annaba avec l'aimable contribution des techniciens du laboratoire.

L'étude théorique et pratique sur les mortiers réalisée dans le cadre de ce mémoire représente une modeste contribution sur la connaissance des mortiers traditionnels et des mortiers nouveaux.

Mots clés : Mortiers traditionnels ; Mortiers innovants ; Mortiers spéciaux; Formulation; Applications; Essais de laboratoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père qui m'a tellement soutenu tout au long de ma vie

Ma mère pour m'avoir encouragé

Mes chers frères et ma sœur

Mes amis et collègues du département de génie civil

Tous ceux qui ont une relation proche ou lointaine avec moi.

Remerciements

Je remercie Dieu qui m'a donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Pr. BENMALEK M.L pour avoir accepté d'encadrer ce travail.

A mes chers parents, ma famille, collègues et amis.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des fonctionnaires de l'administration et aux enseignants du département de génie civil.

Je tiens à remercier les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Finalement mes remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Liste des tableaux

Tableau.1.1	Classification des ciments selon la vitesse de prise	13
Tableau.1.2	Les valeurs limites de la masse volumique et spécifique	22
Tableau.1.3	Utilisation du mortier ciment, quantité des constituants	24
Tableau.1.4	Quantité des constituants du mortier de chaux.....	24
Tableau.1.5	Utilisation du mortier bâtard, quantité des constituants.....	25
Tableau.1.6	Emploi des différents mortiers	28
Tableau.3.1	Type de granulats avec leur température max	50
Tableau.3.2	Dosage des mortiers.....	50
Tableau.3.3	Compositions indicatives en poids pour Ciment fondu.....	51
Tableau.4.1	Propriétés à l'état frais des composites élaborés.....	61
Tableau.4.2	Composition chimique du ciment.....	65
Tableau.4.3	Composition minéralogique selon Bogue.....	65
Tableau.4.4	Caractéristiques physiques du sable de carrière de KRISTEL	66
Tableau.4.5	Résistance à la traction par flexion des PA et PN.....	68
Tableau.5.1	Résultat du sable d'oued (Biskra).....	76
Tableau.5.2	Résultat du sable Oum Ali(Tébessa).....	76
Tableau.5.3	Les caractéristiques physiques des sables utilisées.....	77
Tableau.5.4	Caractéristiques chimiques de ciment Résistant aux Sulfates (CRS).....	79
Tableau.5.5	Résultat des essais de flexion et de compression.....	86
Tableau.5.6	Evolution de la perte en masse.....	88

Liste des figures

Fig.1.1	Stade de fabrication de ciment	05
Fig.1.2	Densimètre de le Châtelier	06
Fig.1.3	Pycnomètre	06
Fig.1.4	Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine	07
Fig.1.5	Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression	08
Fig.1.6	Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance	09
Fig.1.7	Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction de E/C	10
Fig.1.8	Détermination du temps de début de prise	10
Fig.1.9	Détermination du temps de fin de prise	11
Fig.1.10	Evolution du temps de prise en fonction de la température	12
Fig.1.11	Influence de la température sur la prise des ciments	12
Fig.1.12	Influence du E/C sur le temps de prise	12
Fig.1.13	Résistance du mortier normal	14
Fig.1.14	Aiguilles de Le Châtelier	14
Fig.1.15	Appareillage pour la mesure du retrait	15
Fig.1.16	Courbe granulométrique d'un sable	18
Fig.1.17	Volume des vides - volume de la matière	18
Fig.1.18	Porosité – compacité	19
Fig.1.19	Définition de l'équivalent de sable	20
Fig.1.20	Volume absolu	21
Fig.1.21	Volume total	22
Fig.1.22	Un mur en brique traditionnelle.....	25
Fig.1.23	Réglage d'une chape.....	26
Fig.1.24	Serrage d'un enduit à la spatule	27

Fig.2.1	Catal-Huyuk en Anatolie (Turquie)	30
Fig.2.2	Les pyramides d'Égypte.....	31
Fig.2.3	L'Opus Caementicium maçonnerie faite de mortier et de pierres	32
Fig.2.4	Le Panthéon de Rome.....	33
Fig.2.5	Le Colisée à Rome.....	33
Fig.2.6	Basilique de Constantin et Maxence de Rome.....	34
Fig.2.7	Le phare de Smeaton.....	35
Fig.2.8	Théâtre romain de Guelma.....	36
Fig.2.9	Portail d'entrée	36
Fig.2.10	Arcade	36
Fig.2.11	(l'Arc de Trajan) de Timgad.....	37
Fig.2.12	Le Théâtre de Timgad.....	37
Fig.2.13	Le capitoile de Timgad.....	37
Fig.2.14	Le Tombeau d'imdghassen.....	38
Fig.2.15	La Porte de Caracalla.....	38
Fig.2.16	La Basilique byzantine.....	39
Fig.2.17	Les Vestiges Romains de M'daourouch.....	40
Fig.2.18	Les Vestiges Romains d'Hippone.....	41
Fig.2.19	Le théâtre romain de Djemila.....	42
Fig.3.1	Mortiers-colles pour la pose de carrelages.....	44
Fig.3.2	Application d'un enduit minéral sur un mur de façade.....	45
Fig.3.3	Mortiers d'enduits imperméabilisants.....	46
Fig.3.4	Mortier d'imperméabilisation en couche mince.....	48
Fig.3.5	Fournil réalisé avec un mortier réfractaire.....	51
Fig.4.1	Eprouvette avec des fibres.....	54
Fig.4.2	Les fibres s'opposent à la propagation des microfissures.....	54
Fig.4.3	Des fibres en polypropylène.....	57

Fig.4.4	Aspect des déchets de caoutchouc.....	60
Fig.4.5	Masse volumique sèche des composites.....	61
Fig.4.6	Module d'élasticité dynamique des composites.....	62
Fig.4.7	Evolution de la résistance à la compression des composites.....	63
Fig.4.8	Evolution de la résistance à la flexion des composites.....	63
Fig.4.9	Evolution des VDE/VPE des composites	64
Fig.4.10	Courbes granulométriques du sable.....	66
Fig.4.11	Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers (PA et PN) en fonction de l'âge.....	68
Fig.4.12	Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl).....	69
Fig.4.13	Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% H ₂ SO ₄).....	69
Fig.5.1	Série des tamis.....	72
Fig.5.2	L'analyse granulométrique de sable d'oued (Biskra).....	73
Fig.5.3	L'analyse granulométrique du sable d'Oum Ali (Tébessa).....	73
Fig.5.4	Sable d'oued Biskra	75
Fig.5.5	Sable Oum Ali Tébessa.....	75
Fig.5.6	Sac de ciment CPJ-CEM II/A 42, 5.....	78
Fig.5.7	Sac de ciment CRS 400.....	79
Fig.5.8	Sac de chaux.....	80
Fig.5.9	Les éléments pour le mortier.....	81
Fig.5.10	Malaxeur de mortier.....	82
Fig.5.11	Moules normalisés "éprouvettes 4×4×16".....	82
Fig.5.12	Machine d'essais de résistance à la flexion.....	83
Fig.5.13	Machine d'essais à la compression.....	83
Fig.5.14	Moule rempli de mortier pendant le choc.....	84
Fig.5.15	Arasement de mortier dans le moule.....	84
Fig.5.16	Démoulage des éprouvettes.....	85

Fig.5.17	Les éprouvettes dans un bassin d'eau.....	85
Fig.5.18	Les éprouvettes en stockage.....	86
Fig.5.19	Résistances mécaniques à la flexion des mortiers à différents âges...	87
Fig.5.20	Résistances mécaniques à la compression des mortiers à différents âges.....	87
Fig.5.21	Perte de masse des différents mortiers à 14 jours d'immersion (5% H2SO4).....	88
Fig.5.22	Les éprouvettes dans la solution.....	89
Fig.5.23	Les masses perdues.....	89
Fig.5.24	Les éprouvettes lavées à l'eau.....	90

Sommaire

<i>ملخص</i>	I
<i>Abstract</i>	II
<i>Résumé</i>	III
<i>Dédicace</i>	XI
<i>Remerciements</i>	V
<i>Liste des tableaux</i>	XI
<i>Liste des figures</i>	VII
<i>Sommaire</i>	XI
<i>Introduction générale</i>	01
<u><i>Chapitre 1. Les mortiers traditionnels</i></u>	02
<i>1.1. Définition</i>	03
<i>1.2. Les composants des mortiers</i>	04
1.2.1.1. ciments	04
1.2.1.1. Caractéristiques de la poudre	05
1.2.1.1.1. Masse volumique	05
a) Masse volumique apparente	05
b) Masse volumique absolue	05
1.2.1.1.2. Surface spécifique (finesse Blaine)	06
a) Surface spécifique théorique	07
b) Surface spécifique réelle	07
c) Surface spécifique pratique	07
1.2.1.2. Caractéristique mesurée sur la pâte de ciment durcissant	08
a) La consistance	08
b) La prise	10
1.2.1.3. Caractéristiques mesurées sur mortier normal	13
a) Résistances mécaniques	13

b) Expansion des ciments	14
c) Retraits et gonflements	14
1.2.2. Les sables	15
1.2.2.1. Caractéristiques	17
a) Analyse granulométrique	17
b) Porosité- compacité- indice des vides.....	18
c) Propreté des granulats	19
d) Module de finesse	20
e) Foisonnement des sables	21
f) Masses volumiques	21
g) Absorption d'eau	22
1.2.3. L'eau de gâchage	23
1.2.4. Les adjuvants	23
1.3. La composition des mortiers	24
1.3.1. Les mortiers de ciment	24
1.3.2. Les mortiers de chaux	24
1.3.3. Les mortiers bâtards	24
1.4. Les utilisations des mortiers	25
1.4.1. Les joints de maçonnerie	25
1.4.2. Les chapes	26
1.4.3. Les enduits	27
1.4.4. Les scellements et les calages	27
<u>Chapitre 2. Les mortiers archéologiques</u>	29
2.1. Introduction	30
2.2. L'Opus Caementicium	32
2.3. La redécouverte	34

2.4. Exemples des constructions avec mortiers anciens en Algérie	36
2.4.1. Théâtre romain de la ville de Guelma	36
2.4.2. Thibilis de Sellaoua Announa (Guelma)	36
2.4.3. Les Ruines de Timgad (Batna)	36
2.4.4. Le Tombeau d'imdghassen (Batna)	38
2.4.5. La Porte de Caracalla (Tébessa)	38
2.4.6. La Basilique byzantine de Tébessa.....	39
2.4.7. Les Vestiges Romains de M'daourouch (Souk Arras)	40
2.4.8. Les Vestiges Romains d'Hippone(Annaba)	41
2.4.9. Les ruines de Djemila (Sétif)	42

Chapitre 3. Les mortiers spéciaux **43**

3.1. Mortiers-colles.....	44
3.2. Les mortiers d'enduits minéraux	45
3.3. Mortier d'imperméabilisation	46
3.3.1. Mortier de réalisation d'enduits imperméabilisants	46
3.3.1.1. Domaine d'emploi	46
a) Usage	46
b) Supports interdits	47
c) Conditions d'application	47
3.3.1.2. Caractéristiques techniques	47
a) Composition	47
b) Performance a l'état durci.....	47
3.3.2. Mortier d'imperméabilisation en couche mince	48
3.3.2.1. Domaine d'emploi	48
a) Usage	48
b) Supports interdits.....	48
c) Conditions d'application	49
3.3.2.2. Caractéristiques techniques	49
a) Composition	49

b) Performance a l'état durci	49
3.4. Mortier réfractaire	50
3.4.1. Granulométrie	51
3.4.2. Type de composition.....	51
3.5. Mortier hydrofuge	52
3.5.1. Principe	52
3.5.2. Avantages	52

Chapitre 4. Les mortiers innovants 53

4.1. Les Mortiers de fibres.....	54
4.1.1. Le rôle des fibres	54
4.1.2. Les caractéristiques comparées des fibres	55
4.1.3. Les type de fibres pour mortier	55
4.1.3.1. Les fibres en verre E et AR.....	55
a) Propriétés des fibres en verre	56
b) Elaboration des mortiers de fibre de verre	56
c) Projection	56
d) Applications	56
4.1.3.2. Fibres polypropylène	57
a) Propriétés des fibres de polypropylène.....	57
b) Les mortiers de fibres de polypropylène	57
c) Applications	58
4.2. Mortier de résine sans solvant à prise rapide.....	58
4.2.1. Propriétés.....	58
4.2.2. Domaine d'emploi.....	58
4.2.3. Application	58
a) Supports	58
b) Mise en œuvre	58
4.2.4. Caractéristiques physiques	59

4.3. Mortiers avec granulats de caoutchouc (Etude de cas).....	60
4.3.1. Matériaux et techniques expérimentales	60
4.3.2. Résultats expérimentaux et analyses.....	61
4.3.2.1. Allègement du matériau	61
4.3.2.2. Module d'élasticité dynamique.....	62
4.3.2.3. Résistances mécaniques (compression-flexion).....	62
4.3.2.4. Variations dimensionnelles et pondérales extrêmes	63
Conclusion.....	64
4.4. Mortier aux pouzzolanes (Etude de cas).....	65
4.4.1. Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers	65
a) Le ciment.....	65
b) Le sable	66
c) Les pouzzolanes (naturelles et artificielles)	67
4.4.2. Protocole expérimental.....	67
4.4.3. Résultats et interprétations	68
a) Résistance à la traction.....	68
b) Résistance à la compression	68
c) Durabilité	69
Conclusion.....	70

Chapitre 5. Partie pratique Essais réalisés sur mortier **71**

5.1. Les techniques expérimentales pour la caractérisation des éléments de composition	72
5.1.1. Le sable.....	72
a) Analyse granulométrique	72
b) Masse volumique	74
c) Mesure de la propreté de sable	75
d) Teneur en eau	76

e) Porosité	77
f) Compacité	77
5.1.2. Les liants.....	78
5.1.2.1. Les ciments	78
a) Ciment de Hadjar Essoud CPJ-CEM II/A 42,5.....	78
b) Ciment d’Ain El Kebira (SCAEK).....	79
c) Ciment (GCMC Jijel importation)	80
5.1.2.2. La chaux.....	80
5.1.3. L'eau de gâchage.....	80
5.2. Techniques expérimentales pour la caractérisation des mortiers	
<i>d'étude</i>	81
5.2.1. Principe.....	81
5.2.2. Préparation des mortiers.....	81
5.2.2.1. Composition du mortier	81
5.2.2.2. Equipement utilisé pour la préparation des mortiers.....	82
5.2.3. Processus de fabrication des mortiers étudiés.....	84
5.2.4. Résultats expérimentaux et discussion.....	86
5.2.4.1. Résistances mécaniques	86
5.2.4.2. L’effet de l’acide sulfurique (H ₂ SO ₄).....	88
Conclusion.....	90
Conclusion générale	91
Références bibliographiques	92

Introduction générale

Une construction est généralement réalisée par éléments dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Les propriétés des mortiers sont fonctions des propriétés physiques, mécaniques, tailles et formes des granulats, de la nature du liant ainsi que de la fabrication, proportions, modes préparatoires du mélange, moyens de mise en œuvre, et conditions de conservation. (Température humidité).

De plus, de nouveaux mortiers ont fait leur apparition et les applications se sont diversifiées et multipliées.

Pour ces raisons, nous avons choisi de réaliser un état de l'art sur ces matériaux afin de présenter une synthèse, une sorte de mise au point. Nous avons également réalisé une partie pratique sur les mortiers traditionnels en saisissant l'opportunité qui nous a été offerte dans le cadre de notre stage de fin d'étude au laboratoire LTPEst de Annaba.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est constitué de 5 chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons défini le mortier traditionnel, donné ses différents constituants et leurs caractéristiques propres, puis sur sa fabrication et ses emplois.

Le chapitre 2 a été consacré à une recherche sur les mortiers archéologiques.

Dans les chapitres 3 et 4 nous avons décrit les mortiers spéciaux et mortiers innovants.

Le chapitre 5, nous l'avons consacré à la présentation des résultats d'essais réalisés sur les mortiers traditionnels et sur leurs composants.

A la fin du mémoire, nous avons présenté une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des étapes parcourues.

Chapitre 1

Les mortiers traditionnels

1.1. Définition :

Le terme mortier désigne un mélange de liant (ciment ou chaux) et de sable gâché avec une certaine quantité d'eau, des adjuvants et des colorants peuvent aussi être ajoutés. Selon qu'il contient plus au moins de liant, un mortier est dit gras ou maigre [1].

On distingue les mortiers de leur composition et de leur utilisation:

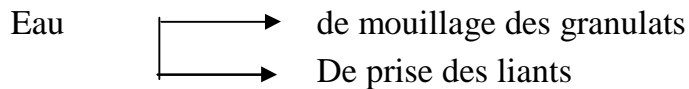
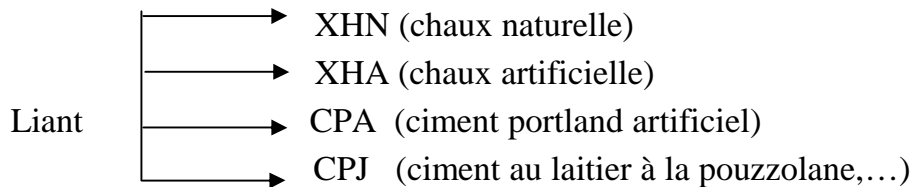
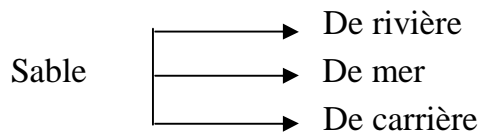
- Mortier de ciment fabriqué avec du ciment artificiel de type portland blanc ou gris, il est très résistant.
- Mortier de chaux fabriqué avec de la chaux hydraulique. Moins résistant et moins étanche que le mortier de ciment, il est plus souple et laisse respirer les murs.
- Mortier bâtard, fabriqué avec un mélange de ciment et de chaux, avec des caractéristiques intermédiaires entre le mortier de ciment et le mortier de chaux.
- Mortier réfractaire à base de ciment fondu.
- Mortier rapide à base de ciment prompt.
- Mortier pour hourdage: C'est le mortier utilisé pour construire, c'est lui qui assemble les éléments de maçonneries. On utilise du mortier de ciment ou du mortier bâtard.
- Mortier pour enduit: C'est le mortier qui est utilisé en revêtement de murs. On utilise du mortier de ciment, du mortier de chaux ou du mortier bâtard.

Les mortiers peuvent être:

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris,
- Préparés sur le chantier à partir des mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire),
- Livré par une centrale: Ce sont les mortiers prêts à l'emploi, dans les dernières années, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange de constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès: rénovation, travaux souterrains [2].

1.2. Les composants des mortiers :

Un mortier est constitué par le mélange de :



(Sable + Liant) + Eau = Mortier
 Malaxage à sec → mouillage → obtention d'une pâte plastique
 qui durcit progressivement [3]

Les liants peuvent être du ciment, de la chaux ou un divers mélange de ces matériaux.

1.2.1. Ciments :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue issu du broyage du clinker avec ou sans ajouts qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même dans l'eau. [4]

Le clinker comme produit de la cuisson dans un four rotative à une température de 1500°C d'un mélange d'argile, calcaire, et matériaux minéraux possède une composition minéralogique complexe influente sur les qualités physiques et mécaniques du ciment [5].

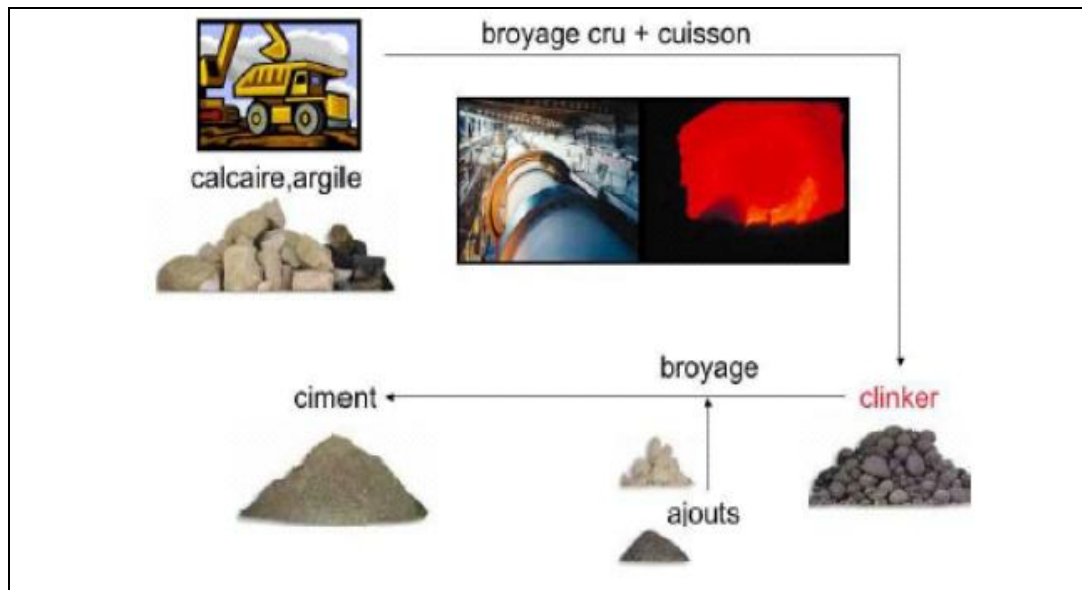


Fig.1.1 : Stade de fabrication de ciment [6].

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normale » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196.1 d'août 1995)

1.2.1.1. Caractéristiques de la poudre :

1.2.1.1.1. Masse volumique :

a) Masse volumique apparente :

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus).

Elle est de l'ordre 1000 Kg/m^3 (1Kg par litre) en moyenne pour un ciment. [1]

b) Masse volumique absolue :

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 Kg/m^3 suivant le type de ciment. [4]

Divers matériels ont été mis au point, pour mesurer la masse volumique d'un corps, parmi lesquels on peut citer : le densimètre de Châtelier, le pycnomètre Liant à liquide ... [7]

Densimètre le Châtelier : est représenté par la figure suivante :

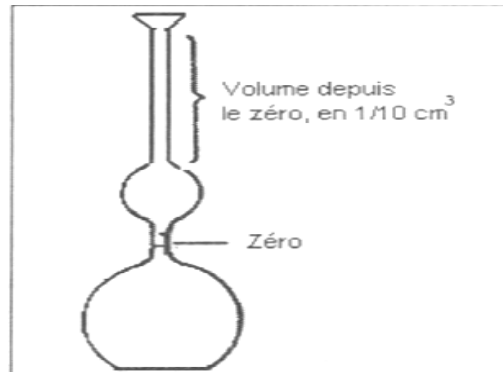


Fig1.2 : Densimètre de le Châtelier [8]

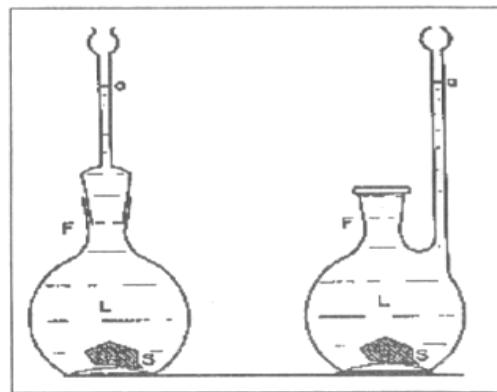


Fig.1.3 : Pycnomètre [8]

1.2.1.1.2. Surface spécifique (finesse Blaine) :

Les ciments se représentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante : lors de gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande est plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment pare g de poudre.

(Granulats sol ciments et b béton) elle comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g [4]

On distingue 3 types de surface spécifique :

a) surface spécifique théorique :

Elle est aisément calculable lorsque les particules sont constituées par des volumes géométriques simples, semblables en forme et en volume.

b) surface spécifique réelle :

Elle concerne un ensemble de particules de forme irrégulière et dont la surface est garnie de pores, fissures. Cette surface n'est pas calculable. Sa mesure relève des techniques de laboratoire de recherche.

c) surface spécifique pratique :

Elle représente certaine fraction de la surface réelle, dont la connaissance est suffisante dans la plus part des cas. Elle est mesurée par des techniques simples (perméabilimètre de Blaine). [8]

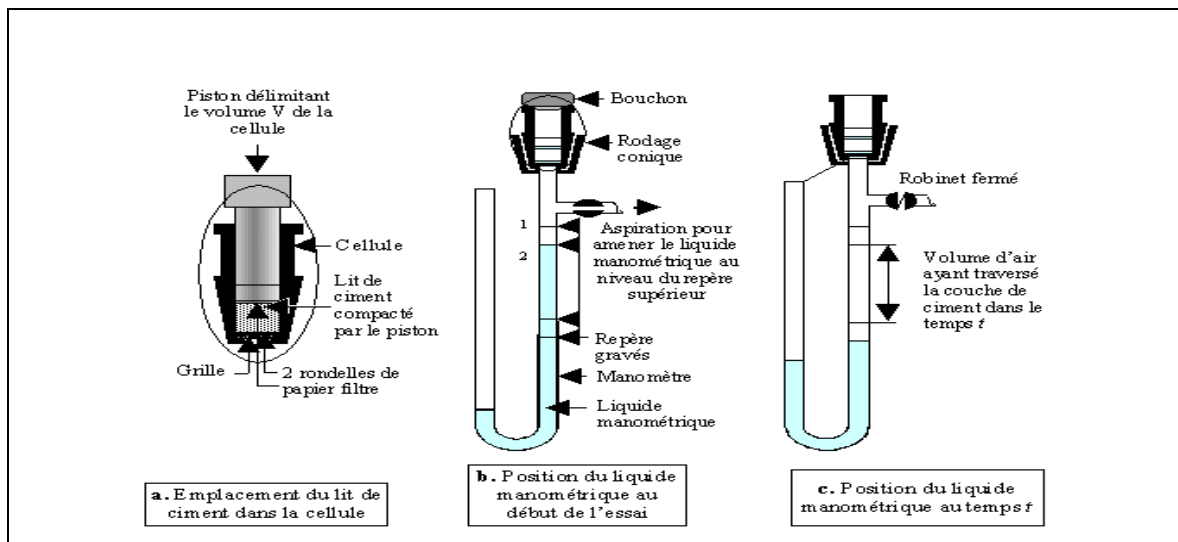


Fig.1.4: Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine. [9]

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée. [9]

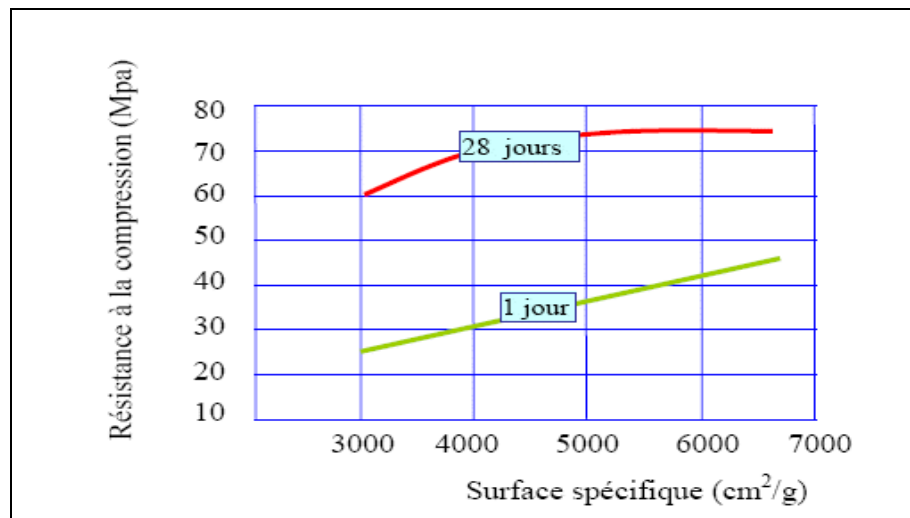


Fig.1.5: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression [9]

1.2.1.2. Caractéristiques mesurée sur la pâte de ciment durcissant :

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps.

Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée.

Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, on dit qu'il fait prise, et le matériau commence alors à s'apparenter plus à un solide qu'à un fluide.

La pâte de ciment est essentiellement constituée d'eau et de ciment. Vis-à-vis de ces deux éléments sa composition est définie par le rapport E/C.

Dans ce rapport E et C représentent les concentrations d'eau et de ciment exprimées en masse pour un volume unité de pâte. Dans cette pâte il y a aussi un certain volume d'air occlus qui n'est pas connu a priori car il dépend de la consistance de la pâte et des moyens employés pour la mettre en place. Bien souvent, un ou plusieurs adjuvants sont également associés au ciment pour influencer sur les qualités de la pâte.

a) *La consistance :*

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité [10]

Lorsqu'on mélange une poudre de ciment à de l'eau il se forme une pâte molle que l'on peut travailler, mouler...

Mais au bout d'un certain temps (allant de quelques minutes à quelques heures) sa viscosité augmente brutalement marquant le début de prise.

L'essai de consistance a pour but de déterminer la quantité d'eau à ajouter au ciment pour que la prise se fasse dans les bonnes conditions. [7]

Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance :

1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3.
2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358. [10]

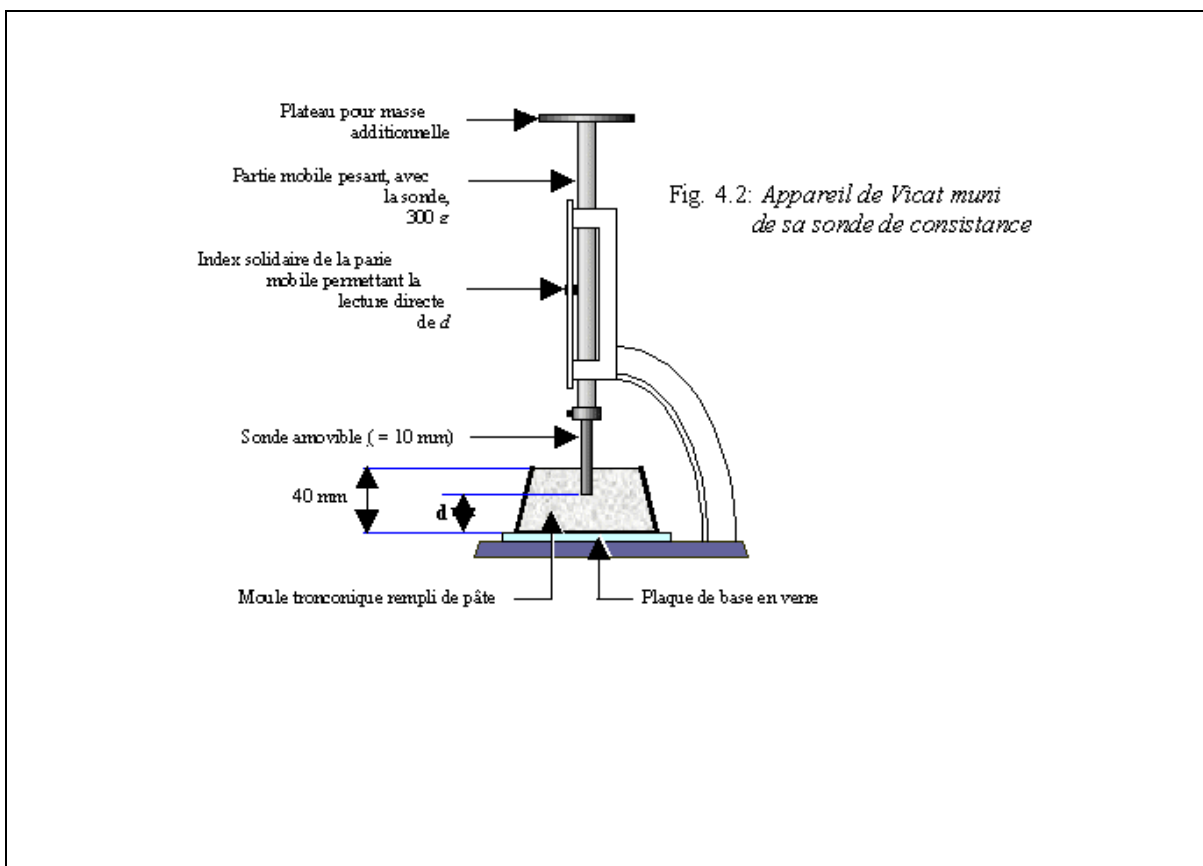


Fig.1.6: Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance [11].

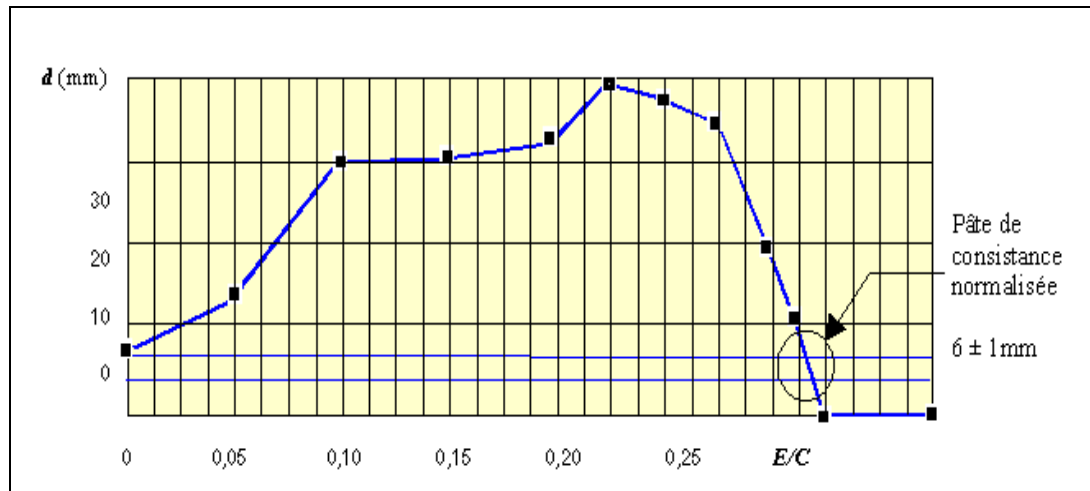


Fig.1.7: Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction de E/C [11]

b) La prise (Norme NF P 18-362):

La durée de prise d'un ciment est généralement caractérisée par :

- le début de prise
- la fin de prise [7]

Il est nécessaire de connaître les débuts et fin de prise des liant hydrauliques afin de pouvoir évaluer le temps indispensable 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 qui donne deux repères pratiques : début de prise, et la fin de prise. [8]

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

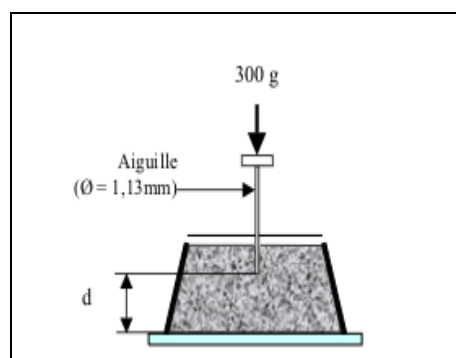


Fig.1.8: Détermination du temps de début de prise

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

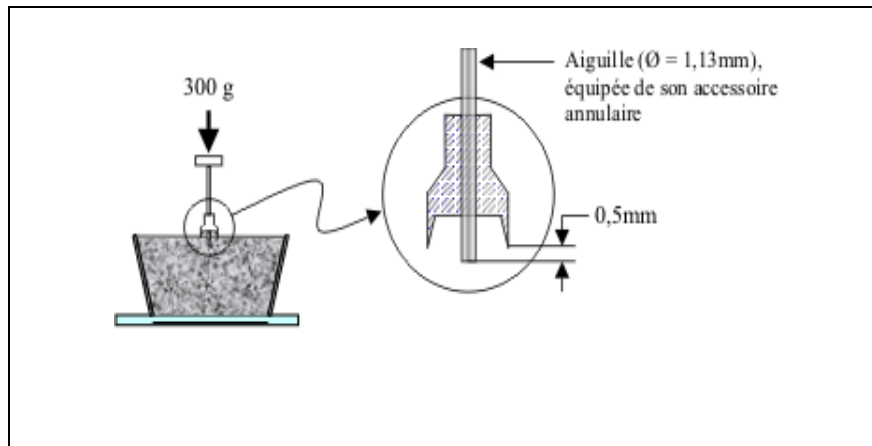


Fig.1.9: Détermination du temps de fin de prise

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C,
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise.

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de:

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

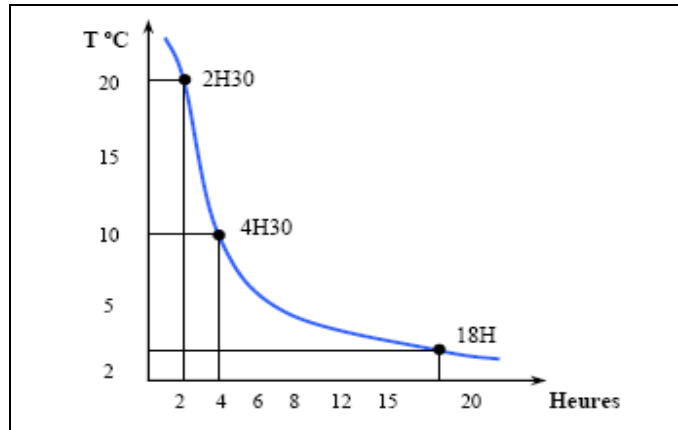


Fig. 1.10: Evolution du temps de prise en fonction de la température

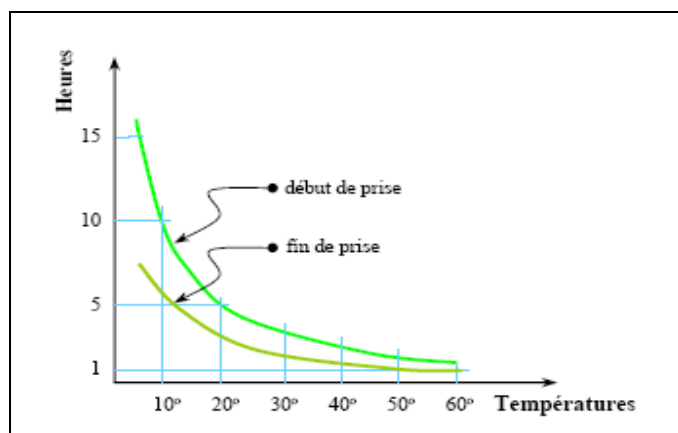


Fig. 1.11: Influence de la température sur la prise des ciments [9]

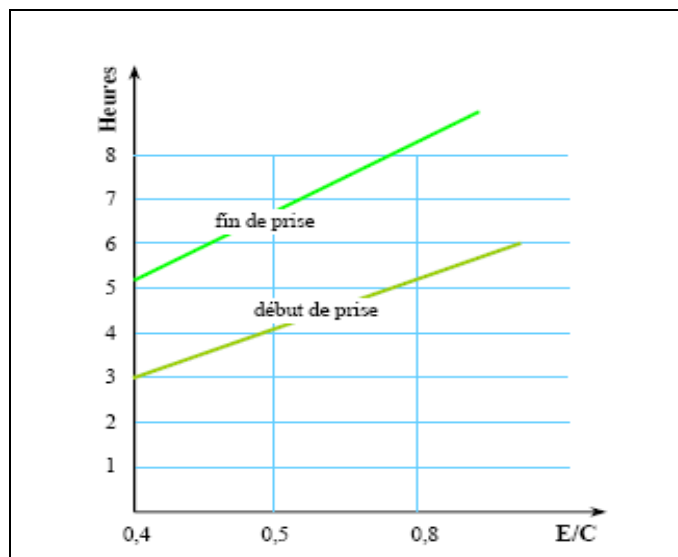


Fig.1.12: Influence du E/C sur le temps de prise [9]

A base des résultats des essais de prise la normalisation française « NF P 15-431 » donne le classement suivant aux ciments :

Qualification de prise	Temps de prise
Ciment à prise rapide	5 à 8 minutes
Ciment à prise demi	8 à 30 minutes
Ciment à prise lente	30 minutes à 6 heures
Ciment à prise très lente	Plus de 6 heures

Tableau .1.1: classification des ciments selon la vitesse de prise. [5]

1.2.1.3. Caractéristiques mesurées sur mortier normal :

a) Résistances mécaniques :

Les ciments sont classés d'après leurs résistance mécaniques minimales, à la rupture par compression à 7 et 28 jours d'Age, mesurées sur des éprouvettes (4*4*16 cm) en mortier « normale ». [7]

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance, ce mortier est réalisé conformément à la norme NF EN 196-1.

Le sable utilisé est un sable appelé « sable normalisé » de composition minéralogique et de courbe granulométrique fixée. [10]

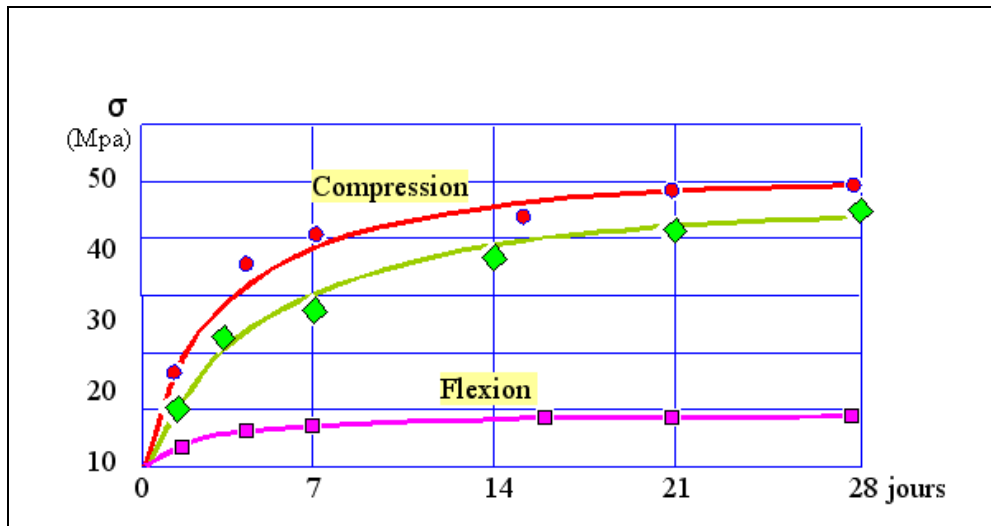


Fig.1.13 : Résistance du mortier normal [9]

b) Expansion des ciments :

Elle se mesure suivant un procédé normalisé par la norme NF EN 196-3 et grâce aux aiguilles de Le Chatelier ; effectués sur mortier normal. Il permet de s'assurer la stabilité du ciment l'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (NF P 15-433 de février 1994). [4]

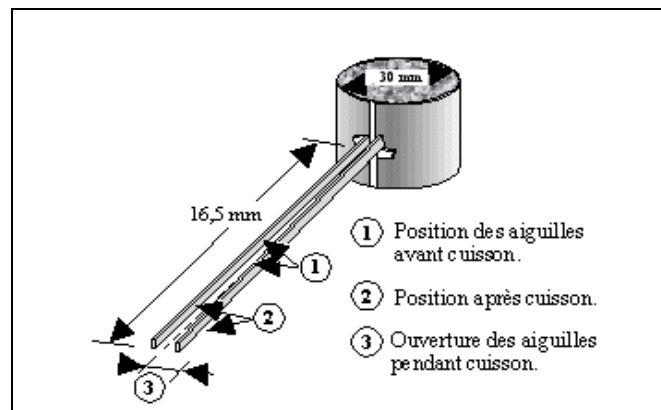


Fig.1.14: Aiguilles de Le Châtelier [9]

c) Retraits et gonflements (variation dimensionnelle) :

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée généralement sur des éprouvettes (4*4*16 cm) confectionnées avec un mortier « normal » caractérisant ainsi le liant [7]

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. (Norme NF P 15- 361)

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).

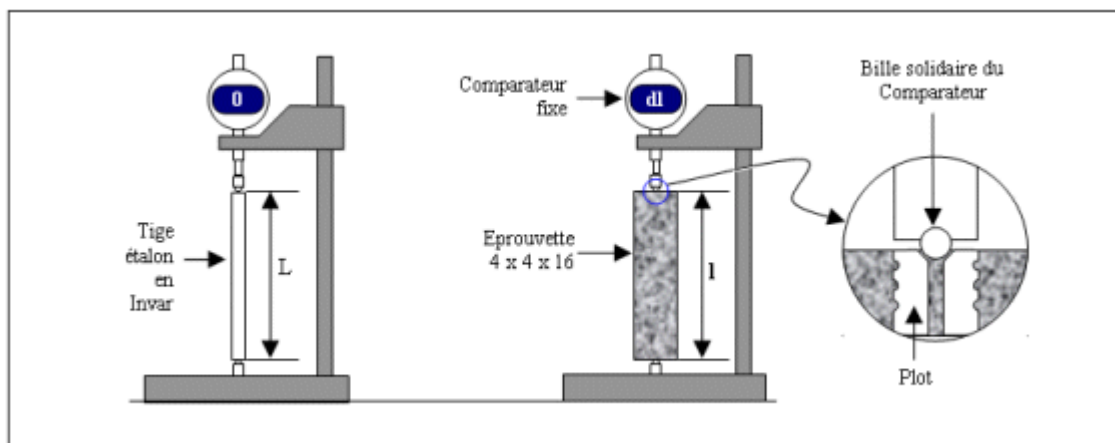


Fig.1.15: Appareillage pour la mesure du retrait [12]

1.2.2. Les sables:

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix.

Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - sable de laitier;
 - sable d'oxydes de fer, de chromite;
 - corindon;
 - sable de briques concassées;
 - liège torréfié;
 - polystyrène expansé;
 - vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm. [13]

Les sables entrent dans la composition des mortiers, des bétons, des matériaux préfabriqués ou ils participent à la résistance à l'écrasement, d'où la recherche d'un sable dur, et compact. C'est souvent par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons. Il faut que les grains de sable demeurent plus durs que la pâte de ciment durcit qui les enveloppe : ils donnent de la cohésion au mélange, mortier ou béton.

A côté des rôles cités précédemment :

- il permet l'économie de liant sans réduire la résistance du mélange ;
- facilite la prise en assurant la porosité du mortier, et son aération ;
- il combat le retrait du ciment pur et atténue le gonflement du mortier de chaux ;
- il constitue un excellent terrain de fondation, il n'est pas affouillé, de fait de son incompressibilité et de sa mobilité, ce qui permet une bonne répartition des pressions.
- Il constitue un lit sous carrelage, et permet l'enrobage des canalisations [8]

1.2.2.1. *Caractéristiques :*

a) *Analyse granulométrique :*

L'analyse granulométrique d'un matériau divisé a pour but de déterminer les dimensions des grains qui le constituent.

D'une manière générale, les particules d'un matériau divisé ont une forme quelconque et la définition de leurs n'est pas aisée.

Les granulats des mortiers sont analysés par des tamis ou passoire. La dimension d'un grain est alors, par définition le diamètre de la passoire qui le laisse juste passer. [7]

Tout granulats est désigné par 2 nombres (d/D) représentent respectivement la plus petite (d) et la plus grande dimension (D) de ses grains. Tout interpelle (d/D) ainsi défini également appelé classe granulaire. [8]

- *Courbe granulométrique :*

Les Courbes granulométriques sont tracées en coordonnées semi logarithmiques. En ordonnées on porte le pourcentage, en poids, des tamisât sous les tamis dont les mailles sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

Toutefois, il convient de signaler si la dimension D des grains est mesurée sur tamis ou sur passoire.

$D_{\text{passoires}} = 1.25 D_{\text{tamis}}$

On obtient en effet les mêmes résultats à travers un tamis de maille D_t qu'à travers une passoire à trous D_p .

Seulement, lors d'une représentation graphique, les dimensions D tamis seront décalées d'une graduation par rapport à la graduation D passoire.

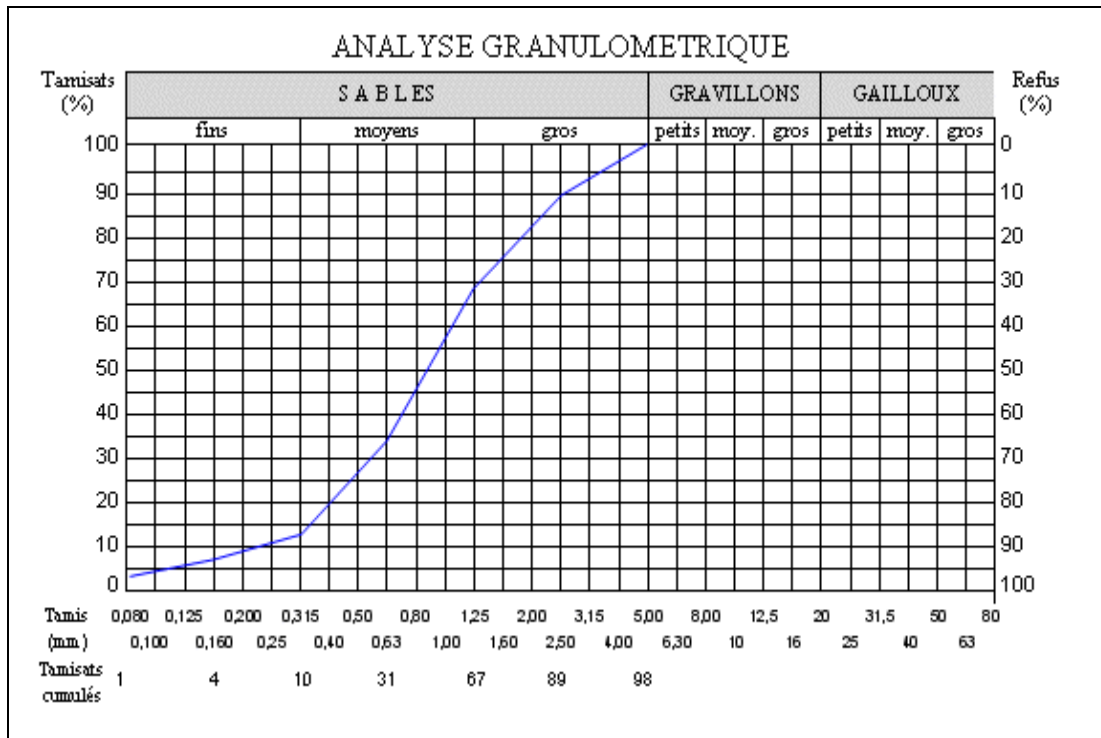


Fig.1.16: Courbe granulométrique d'un sable [14]

b) Porosité- compacité- indices des vides :

On appelle porosité P d'un granulat ou d'une roche le volume v des vides contenus dans l'unité de volume V de matière :

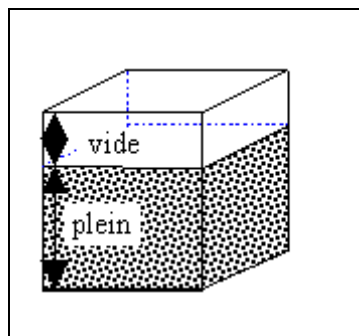


Fig.1.17 : volume des vides - volume de la matière. [15]

$$P = \frac{v}{V} 100 \%$$

La compacité est le rapport du volume de matière pleine au volume total :

$$C = \frac{V-v}{V} 100\% \quad [7]$$

Pour les sables la compacité est de l'ordre 0.70 à 0.60 [4]

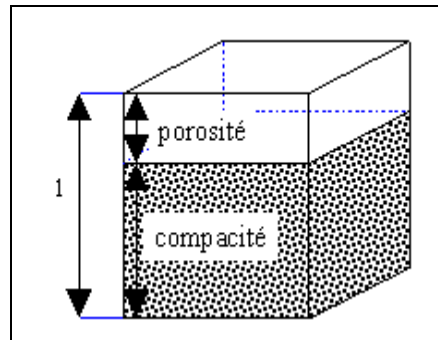


Fig.1.18: porosité - compacité

La porosité et la compacité sont liées par relation:

$$p + c = 1 [15]$$

L'indice des vides est le rapport : $I = \frac{v}{V - v}$; ou $I = \frac{p}{c}$

c) Propreté des granulats :

Tous les granulats contiennent une quantité, plus au moins grande, d'impuretés. Les impuretés ont un caractère commun : ils influent négativement sur les qualités essentielles des mortiers. Cependant on peut les classer en 2 catégories :

- impuretés prohibées : particule de charbon, de bois, l'argile, micas ...
- impuretés tolérées, dans les limites qui seront à définir parmi les quelle on peut citer : les éléments très fin et /ou solubles, les matières organique, les sulfates, les sulfures . . .

Les sables constituent la partie fine des granulats d'un béton. Ils sont donc la partie qui à la plus grande surface spécifique et conditionnent par leur adhérence au ciment les propriétés du béton.

Pour déceler la présence d'éléments fins dans le sable, et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique, un essai est couramment pratique : la mesure de l'équivalent de sable.

Cet essai consiste à faire flocculer, dans des conditions normalisées de temps et d'agitation, les impuretés du sable. [7]

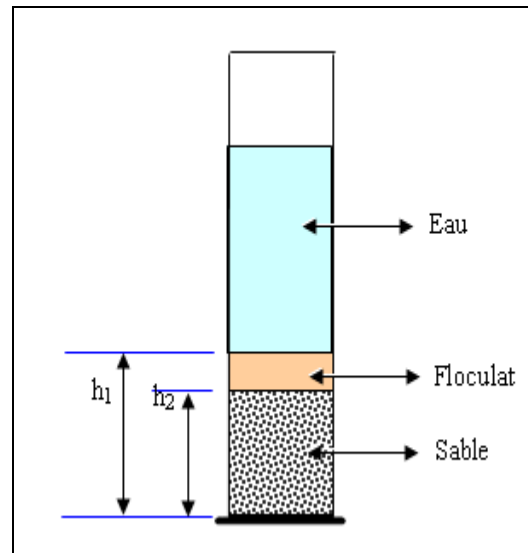


Fig.1.19: Définition de l'équivalent de sable [14]

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100$$

- ❖ $ES < 60$ ———> Sable argileux à ne pas utiliser.
- ❖ $60 < ES < 70$ ———> Sable légèrement argileux : admissible pour béton courants avec risque de retrait important.
- ❖ $70 < ES < 80$ ———> Sable propre : convient bien pour les bétons de haute qualité.
- ❖ $ES > 80$ ———> Sable très propre : absence presque totale de fines argileuses.

d) Module de finesse :

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins. [7]

Dreux admet qu'un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,2 à 2,8.

On distingue quatre types de sable par exemple suivant les normes soviétiques on fonction du module de finesse M_f et qui sont comme suite :

- Sable gros $M_f \geq 2.5$
- Sable moyen $2 \leq M_f \leq 2.5$
- Sable fin $1.5 \leq M_f \leq 2$
- Sable très fin $1 \leq M_f \leq 1.5$ [16] [17]

e) Foisonnement des sables :

Lors de la confection de mortiers, le dosage des granulats est réalisé de deux façons :

- pondéralement
- ou volumétriquement

Le volume apparent occupé par un poids donné de sable sec varie avec son humidité. Ce phénomène peut donc avoir une influence importante lorsque le dosage du mortier est réalisé volumétriquement.

On appelle coefficient de foisonnement (f), d'un sable le rapport :

$$F = \frac{V_{humide} - V_{sec}}{V_{sec}} 100\%$$

f) Masses volumiques :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Cependant, on distingue deux volumes apparents : le volume absolu et le volume apparent. On est donc conduit à définir deux masses volumiques :

- 1- la masse volumique absolue qui est la masse de l'unité de volume absolu (volume de matière pleine) d'un corps. [7]

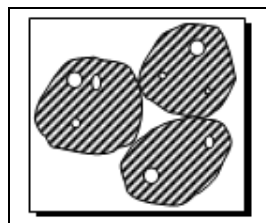


Fig.1.20 : volume absolu

Volume hachuré = Volume absolu (sans pores) [15]

$$P_{\text{absolue}} = \frac{P_2}{P_1 + P_2 - P_3}$$

Avec :

P_1 : masse de récipient plein d'eau

P_2 : masse d'échantillon du corps étudié

P_3 : masse du corps dans le récipient, rempli à nouveau d'eau [8]

2- la masse volumique apparente qui est la masse de l'unité de volume apparent (y compris les vides) d'un corps.

De même on distingue la densité absolue et la densité apparente.

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) [7].

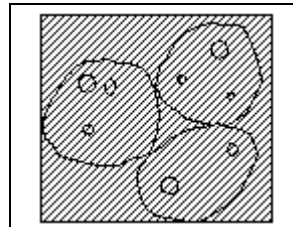


Fig.1.21 : Volume total

Volume hachuré = Volume du récipient [15]

$\rho = p / \text{volume apparent}$

Avec :

P : masse de l'échantillon

Volume apparent : volume connu de l'échantillon

En général les masses volumiques absolues et apparentes des granulats pour béton sont dans les limites illustrées dans ce tableau :

Masse volumique	Kg/m ³
apparente	(1400 – 1600)
absolu	(2500 – 2700)

Tableau .1.2: les valeurs limites de la masse volumique et spécifique

g) Absorption d'eau :

C'est une mesure des pores accessible à l'eau. Elle est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement.

Le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption A_b , qui ne doit dépasser 5% [8]

1.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier, nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

Attention: un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours.

Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008 [18].

1.2.4. Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits qui, ajoutés en faible quantité au mortier, améliorent certaines propriétés.

Ils se classent en deux catégories :

- Les adjuvants ayant une action sur les caractéristiques de mise en œuvre des mortiers
- Ceux intervenant sur les propriétés des mortiers, qui ont fait leur prise.

-ils facilitent la mise en œuvre des mortiers

- amélioration de la carbonisation

-le maintien de l'ouvrabilité (réteneur d'eau) [4]

1.3. La composition des mortiers :

On distingue différents types de mortiers :

1.3.1. Les mortiers de ciment :

Leur dosage volumétrique en ciment et en sable est en général de 1:3, tandis que le rapport eau sur ciment (E/C) est d'environ 0,35. Ces mortiers sont imperméables à l'air et très résistants, prennent et durcissent rapidement.

Utilisation	Pose de briques et blocs	Mortier de chape
Matériaux		
Ciment	50 kg	50 kg
Sable	120 à 130 kg	180 kg
Eau	50 litres	50 litres
Nature du mélange à	onctueux	pâteux

Tableau .1.3: Utilisation du mortier ciment, quantité des constituants.

1.3.2. Les mortiers de chaux :

Moins résistants que les mortiers de ciment, présentent un temps de durcissement plus lent, ils sont utilisés comme enduit.

Chaux	Sable	Eau	Nature du mélange à
40 kg	110 à 120 kg	50 litres	onctueux

Tableau .1.4: Quantité des constituants du mortier de chaux.

1.3.3. Les mortiers bâtards :

Le liant qui compose ces mortiers est le mélange de ciment et de chaux, généralement en parties égales, augmentant sa facilité de mise en œuvre. C'est le juste milieu entre le mortier de ciment et le mortier de chaux. [19]

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment [18]

Utilisation	Corps d'enduit (sous couche d'enduit)	Enduit de finition
Matériaux		
Ciment	50 kg	25 kg
Chaux	40 kg	40 kg
Sable	40 kg	40 kg
Eau	75 litres	50 litres
Nature du mélange à	presque liquide	onctueux

Tableau .1.5: Utilisation du mortier bâtard, quantité des constituants. [19]

1.4. Les utilisations des mortiers :

1.4.1. Les joints de maçonnerie :

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, brique), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer.

Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente. La norme XP P 10-202-1 « DTU 20.1. Ouvrage en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs. » Fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiement, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.



Fig.1.22 Un mur en brique traditionnelle. [20]

1.4. 2. Les chapes :

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également Avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme NF P 14-201 « DTU 26.2. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques. ».



Fig. 1.23 : Réglage d'une chape.

1.4. 3. Les enduits :

Ce domaine d'application, qui constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers, rappelons simplement qu'à côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels. Ces produits font l'objet d'une procédure d'Avis technique par le CSTB.



Fig.1.24 : Serrage d'un enduit à la spatule

1.4. 4. Les scellements et les calages :

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, scellements d'éléments de second œuvre, scellements de mobiliers urbains, scellements de regards de visite, assemblage d'éléments préfabriqués... [21]

F.Letertre et H.Renaud [3] donnent les détails suivants sur les emplois des mortiers :

travaux	Nature de liant	Dosage de sable Kg/m ³
Maçonnerie en élévation :		
• faiblement chargées	XHN ou XHA	250 à 300
• chargées	XHN ou XHA	300 à 400
Enduits intérieurs	XHN ou XHA 861 L	400 à 500
Enduits extérieurs au mortier bâtard	XHA + CPA 2/3 1/3	350 à 550
Maçonneries fortement chargées	CPJ 35	300 à 400
Enduits étanches	CPJ 35	500 à 600
Chapes étanches	Ou	Soit approximativement :
Couche d'usure à l'intérieur ou à l'extérieur	CPA 45	1 vol. de ciment pour 2 vol. de sable
Jointoiements et rejointoiements	CPA 45	
Coulis divers, plaques, carreaux de ciment	CPA 45	

Tableau 1.6. : Emploi des différents mortiers.

Chapitre 2

Les mortiers archéologiques

2.1. Introduction :

Les mortiers antiques présentent un intérêt autre qu'archéologique : ils sont la preuve de l'existence de matériaux artificiels qui ont traversé les siècles. Ceci devient important dans notre civilisation postindustrielle confrontée avec le problème du stockage des déchets de toute nature. Retour sur une des inventions les plus remarquables de l'histoire de l'ingénierie.

Pendant la préhistoire et au début de l'antiquité époque assyrienne et babylonienne, on utilisait de la terre argileuse comme liant pour maçonner les pierres.

Le plâtre est le plus ancien liant cuit qui ait été trouvé, pour la réalisation des mortiers ou enduits en architecture. Les plus vieilles traces de son utilisation remontent à environ 7 000 ans avant J.-C., sur le site de Catal-Huyuk en Anatolie (Turquie). [22]



Fig.2.1: Catal-Huyuk en Anatolie (Turquie). [23]

Lors de la construction des pyramides, les Égyptiens utilisèrent un plâtre obtenu par cuisson d'un gypse. Il était utilisé pour lubrifier l'assise des grosses pierres qu'on déplaçait avant de les mettre en place. Toutefois, ces matériaux n'étaient pas très efficaces en présence d'humidité élevée et d'eau. C'est aux environs de 4 000 ans avant J.-C. que les anciens découvrirent que la pierre calcaire, lorsque brûlée et combinée à de l'eau, produisait un matériau qui durcissait avec le temps. [22]



Fig.2.2: Les pyramides d'Égypte. [24]

Le début de l'utilisation de la chaux dans les mortiers est vague, mais il a été avéré que les murs de la ville de Jéricho bâtis en briques de terre crue, étaient enduits à la chaux. On sait que les grecs (c'est à Chypre qu'apparaît, hérité d'Asie, au VIIIe-VIIe siècle, le liant de chaux), puis les romains, utilisaient couramment la chaux dans les mortiers. Vitruvius, un architecte romain, donnait les grandes lignes pour la préparation des mortiers de chaux : « Lorsqu'elle est éteinte (la chaux), 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 rivières ou de l'océan, deux parties de sable pour une partie de chaux. On obtient ainsi la bonne proportion pour le mélange. » [22]

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. Ils durcissent lentement et ne prennent pas sous l'eau.

2.2. *L'Opus Caementicium* :

À partir du Ier siècle av. J.-C., les romains améliorèrent la technique du mortier et créèrent les premiers mortiers hydrauliques l'*Opus Caementicium* : ils ajoutent à la chaux, du sable et de l'argile, ainsi que des matériaux pulvérulents (cendre volcanique, pouzzolane ou testa : sorte de brique ou de tuile d'argile kaolinite, cuite entre 600 et 900 C).

Ces mortiers étaient destinés à des applications où la présence d'eau ne permettait pas une carbonatation adéquate du mortier. [22]

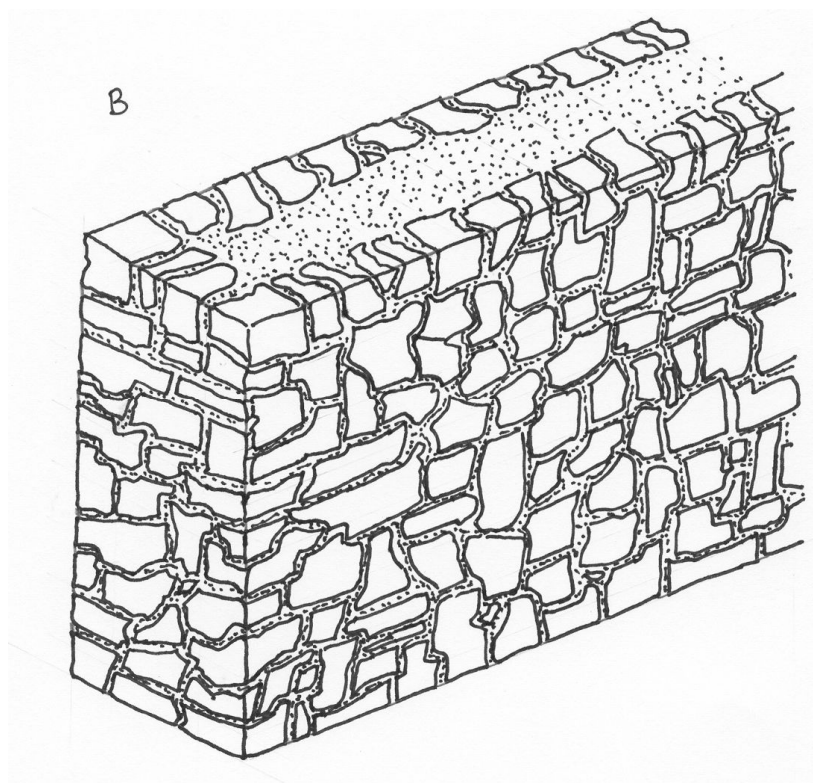


Fig.2.3: L'*Opus Caementicium* maçonnerie faite de mortier et de pierres. [25]

Les grands bains romains datant environ de l'an 27 avant J.C., le Panthéon, ce fantastique temple surmonté de la plus grande coupole maçonnée au monde, le Colisée et l'énorme basilique de Constantin, sont parmi les premières œuvres architecturales romaines recourant au mortier de béton.



Fig.2.4: Le Panthéon de Rome. [26]



Fig.2.5: Le Colisée à Rome. [27]



Fig.2.6: Basilique de Constantin et Maxence de Rome. [28]

Cet âge d'or du mortier va se terminer en occident avec les invasions barbares. Repris dans les constructions Byzantines, ce « ciment romain » va être utilisé à peu près jusqu'au XVIIe siècle, mais avec des fortunes très diverses : le savoir-faire des romains se perdant au fil des siècles, la qualité des mortiers médiévaux est très médiocre et l'amélioration de la stabilité et de la complexité des bâtiments sera désormais due aux progrès de l'architecture et de la stéréotomie ou art de la taille des pierres. [22]

2.3. La redécouverte :

Les progrès les plus importants dans l'utilisation des pouzzolanes dans les mortiers sont survenus au cours du XVIIIe 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. On ajoutait également de la terre pouzzolanique d'Italie pour donner plus de résistance. Ce mélange de mortier a servi à construire le phare Eddystone. Ce bâtiment tiendra alors 126 ans avant qu'il soit nécessaire de le remplacer. [22]

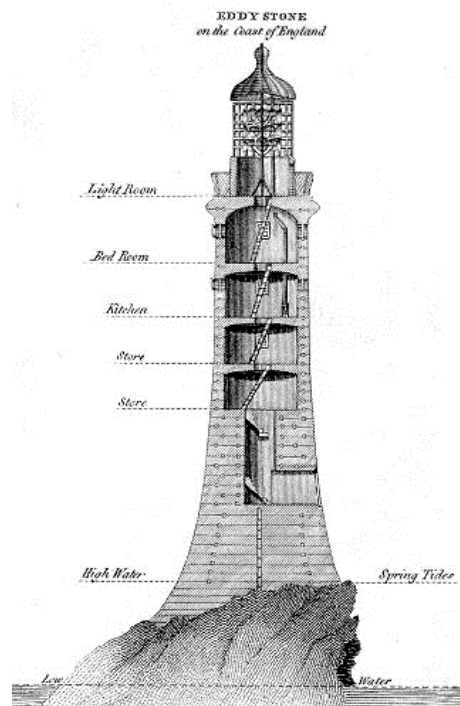


Fig.2.7: Le phare de Smeaton [29]

D'autres ont poursuivi des recherches sur le ciment entre 1756 et 1830, comme Joseph Parker en Angleterre qui brevète un produit appelé ciment naturel, ainsi que Louis Vicat et Léon Lesage en France. L'année 1817 est historique. Cette date constitue le point de départ de ce qui peut être considéré comme le renouveau de l'industrie de la construction.

En ce début de XIXe siècle, Louis Vicat (1786-1861) en élaborant sa théorie de l'hydraulicité fut le premier à déterminer de manière précise les proportions de calcaire et de silice nécessaires à l'obtention d'un mélange qui, après cuisson à une température donnée et broyage, donne naissance à un liant hydraulique industrialisable : le ciment artificiel.

Joseph Aspdin, un constructeur/maçon anglais, brevète 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, qui sont ensuite calcinés et broyés en fines particules. 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.

La première usine de ciment est créée en 1846 à Boulogne-sur-Mer bien que les premiers ciments (prompts) aient été fabriqués dès 1823 à Pouilly, en Côte-d'Or, puis plus tard à Vassy, dans l'Yonne, et à Port de France, dans l'Isère. Dans les années 1850, la résistance du ciment artificiel atteint environ 1/10^e des ciments d'aujourd'hui mais dépasse déjà les performances de la chaux et des ciments prompts. [22]

2.4. Exemples des constructions avec mortiers anciens en Algérie :

2.4.1. Théâtre romain de la ville de Guelma :

Ce site archéologique, qui fut édifié vers la fin du deuxième siècle avant Jésus Christ par une femme connue sous le nom « Ania Elia Ristota », religieuse de son état, a nécessité pour les besoins de sa construction 30.000 pièces de Louis d'or. [30]



Fig.2.8: Théâtre romain de Guelma. [30]

2.4.2. Thibilis de Sellaoua Announa (Guelma) :



Fig.2.9: Portail d'entrée. [31]



Fig.2.10: Arcade. [31]

2.4.3. Les Ruines de Timgad (Batna) :

Timgad (anciennement thamugadi), site archéologique de la cité romaine d'Algérie située à 1070 m D'altitude, sur le versant septentrional de l'Aurès, au sud de Constantine et au sud-est de Batna.

Cette colonie, établie sur une voie romaine, fut fondée par l'empereur romain Trajan en 100 Ap. J-C., [30]



Fig.2.11: (l'Arc de Trajan) de Timgad. [31]



Fig.2.12: Le Théâtre de Timgad [31]



Fig.2.13: Le capitol de Timgad [31]

2.4.4. Le Tombeau d'Imdghassen (Batna) :

Le mausolée numide connu sous le nom d'Imdghassen, situé à 35 Km au Nord Est de Batna entre Ain-yagout et el-Madher. Érigé entre le III^e & le IV^e siècle avant J. C. Imdghassen se présente sous la forme d'une immense bazina de 59 m de diamètre.



Fig.2.14: Le Tombeau d'Imdghassen [32]

2.4.5. La Porte de Caracalla (Tébessa) :

L'arc de Triomphe dit arc ou porte de Caracalla, fut construit en l'an 211 ou 212 Ap. J.-C. et terminé vers l'an 214-215 Ap. J.-C. [32]

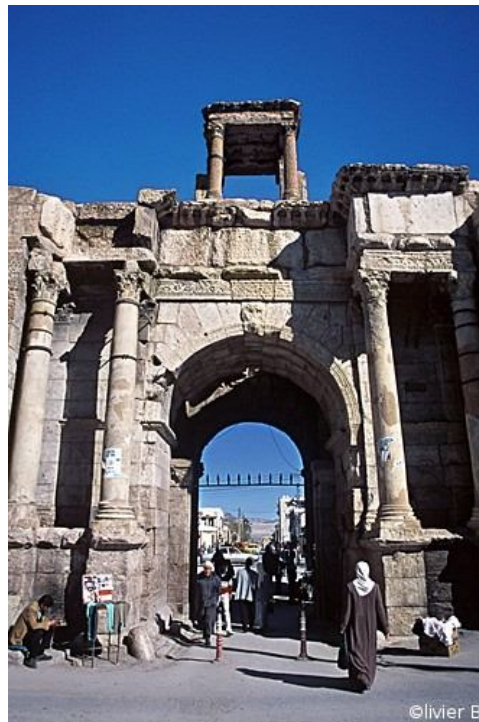


Fig.2.15: La Porte de Caracalla [32]

2.4.6. *La Basilique byzantine de Tébessa :*

La basilique, consacrée à une sainte locale, sainte Crispin, et datant de la fin du 4^{ème} siècle, est l'une des plus grandes d'Afrique. [32]



Fig.2.16: La Basilique byzantine [32]

2.4.7. Les Vestiges Romains de M'daourouch (Souk Arras) :

Une ville antique située à 50 km de Thagaste (Souk-Ahras) au nord-est du pays dans les Aurès.

Successivement berbère, romaine, vandale et byzantine. C'est sur le site d'une ancienne ville numide que la cité romaine de Madaure, fut fondée sous les Flaviens. Mentionnée dès le III^e siècle, elle ne survécut pas aux invasions arabes du VII^{ème} siècle. [33]



Fig.2.17: Les Vestiges Romains de M'daourouch [31]

2.4.8. Les Vestiges Romains d'Hippone(Annaba) :

Ancien comptoir phénicien, implanté au XIe siècle avant J.C., elle devient une ville numide prospérée, alliée de Carthage jusqu'à la chute de celle-ci.

Au IIIe siècle avant J.C., Gaïa, père de Massinissa, fit d'Hippone une des capitales de son royaume.

Après la défaite de Jugurtha, 'Hippone numide fut annexée à la province romaine d'Africa Nova.



Fig.2.18: Les Vestiges Romains d'Hippone [31]

2.4.9. Les ruines de Djemila (Sétif) :

Se trouvent à 900 mètres d'altitude, et à 30 kilomètres au Nord d'El Eulma, ou à 43 kilomètres au départ de Sétif en direction du Nord-Est. Les ruines s'étendent sur un plateau de forme presque triangulaire, incliné du Sud au Nord.

Son théâtre qui pouvait contenir 3000 spectateurs a été construit au-delà des remparts vers l'an 160 après J.-C. Sa largeur totale est de (69,70m), soit plus grande que celle de Timgad (63,60m). [32]



Fig.2.19: Le théâtre romain de Djemila. [30]

Chapitre 3

Les mortiers spéciaux

3.1. Mortiers-colles :

Les mortiers-colles pour la pose de carrelages sont des mélanges de liants hydrauliques (ciments) extraits de matériaux naturels et de polymères organiques, de charges minérales inertes, additifs et adjuvants. Ces mélanges sont dosés, mélangés et contrôlés en usine et conditionnés en sacs sous forme d'une poudre homogène, prête au mélange sur chantier avec de l'eau de gâchage.

Leurs fonctions et emplois sont variés pour la pose de tous types de dalles et carreaux céramiques, terre-cuites ou de pierres naturelles en :

- murs intérieurs et extérieurs ;
- sols intérieurs ou extérieurs ;
- piscines, bassins, douches, etc.

Leur emploi constitue une technique courante pour la pose de carrelages sur une grande variété de supports :

- béton, enduits ou chapes ;
- plaques de plâtre cartonées, carreaux de plâtre ou de terre-cuite, etc.

Leurs propriétés et caractéristiques sont définies dans la norme NF EN 12004. [34]



Fig.3.1: Mortiers-colles pour la pose de carrelages.

3.2. Les mortiers d'enduits minéraux :

Les mortiers d'enduits minéraux sont des mélanges de liants (ciments, chaux) extraits de matériaux naturels, de charges silico-calcaires et pigments inertes, additifs et adjuvants. Ces mélanges sont fabriqués en usine et sont conditionnés en sacs ou silos sous forme d'une poudre homogène, prête au mélange sur chantier avec l'eau de gâchage.

Leurs fonctions et emplois sont variés :

- dressage et égalisation des murs de maçonnerie ou de béton ;
- protection, imperméabilisation des murs et parois à l'eau de pluie et aux intempéries ;
- décoration, parement des bâtiments neufs, comme du bâti ancien ou historique ;
- dosés, mélangés et contrôlés en usine, ils sont disponibles dans une grande variété de couleurs et permettent de réaliser une multitude de modénatures et aspects selon les techniques d'enduisage traditionnelles et le savoir-faire des maçons et enduiseurs professionnels ;
- après mise en œuvre sur le chantier, le mortier d'enduit durci constitue un matériau minéral solide inerte dont la composition est similaire aux roches naturelles. Ces mortiers d'enduits sont définis par la norme NF EN 998-1. [34]



Fig.3.2: Application d'un enduit minéral sur un mur de façade.

3.3. Mortier d'imperméabilisation :

3.3.1. Mortier de réalisation d'enduits imperméabilisants :



Fig.3.3: Mortier d'enduits imperméabilisants [35]

Destiné à la réalisation d'enduits d'imperméabilisation en couche mince, sur les parties enterrées des bâtiments.

S'utilise aussi bien en intérieur qu'en extérieur de locaux. S'applique de façon manuelle et de façon mécanique, directement sur la maçonnerie à traiter.

Peut-être recouvert mais peut également rester nu.

Fait prise et agit par cristallisation.

Possède une très bonne adhérence et une excellente résistance aux chocs après durcissement. [35]

3.3.1.1. Domaine d'emploi :

a) Usage :

- Produit destiné à traiter les parois enterrées des bâtiments afin d'éviter le passage et les remontées d'eau.
- Murs de fondations, sous-sols, caves, fosses d'ascenseur, garages, locaux techniques, murs de descente de garage, chaufferie...
- Piscines privatives, bassin en béton.
- Coupures de capillarité.
- Cuvelage sur support béton.

b) Supports interdits :

- Tous supports à base de Gypse (Plâtre).
- Peintures, R.P.E.
- Bois en direct.
- Supports anciens et peu résistants.
- En sols.
- Murs instables.

Ne pas employer :

- Sur murs en élévation de façades (en remplacement d'un enduit d'imperméabilisation monocouche ou traditionnel).
- En ragréage ou en dressage de murs.
- En remplacement d'une étanchéité de terrasses.

c) Conditions d'application :

- Températures comprises entre +5°C et +35°C.
- Ne pas appliquer sur supports gelés ou en cours de dégel, chauds ou en plein soleil, trempés ou sous pluie battante et par vent fort.

3.3.1.2. Caractéristiques techniques :***a) Composition :***

- Liants hydrauliques.
- Fillers, sables de quartz.
- Agents de rétention d'eau, régulateurs de prise.
- Hydrofuge de masse.

b) Performance a l'état durci :

Densité T/m ³ :	1,6 à 1,7
Résistance en flexion MPa :	4,5 à 7,5
Passage d'eau sous pression de 0,5 MPa :	Néant
Passage d'eau en contre pression de 0,5 MPa :	Néant
Réaction au feu :	M0

3.3.2. Mortier d'imperméabilisation en couche mince :

On l'utilise Pour parois enterrées et piscines.



Fig.3.4: Mortier d'imperméabilisation en couche mince [35]

3.3.2.1. Domaine d'emploi :

a) Usage :

- Produit destiné à traiter les parois enterrées des bâtiments afin d'éviter le passage et les remontées d'eau.
- Murs de fondations, sous-sols, caves, fosses d'ascenseur, garages, locaux techniques, murs de descente de garage, chaufferie...
- Piscines privées, bassin en béton.
- Coupures de capillarité.
- Cuvelage sur support béton.

b) Supports interdits :

- Tous supports à base de Gypse (Plâtre).
- Peintures, R.P.E.
- Bois en direct.
- Supports anciens et peu résistants.
- Murs et sols instables ou à risque de fissuration.

Ne pas employer :

- Sur murs en élévation de façades (en remplacement d'un enduit d'imperméabilisation monocouche ou traditionnel).
- En ragréage ou en dressage de murs.
- En remplacement d'une étanchéité de toiture-terrasse.

c) Conditions d'application :

- Températures comprises entre + 5° C et + 35° C.
- Ne pas appliquer sur supports gelés ou en cours de dégel, chauds ou en plein soleil, trempés ou sous pluie battante et par vent fort. [35]

3.3.2.2. Caractéristiques techniques :***a) Composition :***

- Liants hydrauliques.
- Fillers, sables de quartz.
- Agents de rétention d'eau, régulateurs de prise.
- Hydrofuge de masse.

b) Performance a l'état durci :

- | | |
|---|---------------|
| – Densité T/m ³ : | 1.6 à 1,7 |
| – Résistance en flexion : | 4,5 à 7,5 MPa |
| – Résistance en compression : | ≥ 20 MPa |
| – Passage d'eau sous pression de 0,5 MPa : | Néant |
| – Passage d'eau en contre-pression de 0,5 MPa : | Néant |
| – Réaction au feu : | M0 |

3.4. Mortier réfractaire :

La tenue à la température des mortiers de Ciment fondu dépend du type de granulats utilisés. Ceux-ci peuvent être, soit d'origine naturelle (exemple le sable siliceux), soit d'origine synthétique (exemple ALAG®, la chamotte). [36]

Type de granulat	Température maximale admis
Silico calcaire	450°C
Siliceux	500°C
ALAG®	1100°C
Chamotte	1250°C

Tableau.3.1: Type de granulat avec leur température max [36]

Pour le scellement des briques réfractaires destinées aux montages ou réparations des barbecues ou des cheminées, nous utilise le mortier prêt à l'emploi fondulit à base de Ciment fondu résistant jusqu'à 1000°C

En ce qui concerne la mise en œuvre des mortiers à base de granulats naturels se référer aux conseils de mise en œuvre des mortiers à base de Ciment fondu et de granulats naturels.

Nous nous intéresserons dans ce qui suit au mortier à base de chamotte

Les informations ci-après sont données à titre indicatif :

Température maximale admise : 1200°C

Le dosage recommandé peut varier de 500 kg/m³ à 600kg/m³

En règle générale, les dosages utilisés sont les suivants :

Type	Dosage
Mortier fin (chamotte 0 - 2 mm)	600 kg/m ³
Mortier (chamotte 0-5 mm)	500 kg/m ³

Tableau.3.2: Dosage des mortiers [36]

3.4.1. Granulométrie :

Comme pour tout mortier, il convient de mélanger des grains (agrégats) de dimensions variées selon les règles de l'art, afin d'obtenir une bonne compacité du mortier.

La taille des grains les plus gros est en relation avec l'épaisseur des pièces que l'on désire fabriquer.

En pratique, on ne dépasse généralement pas 2mm de l'épaisseur minimale des pièces.

3.4.2. Type de composition :

Le tableau ci-dessous donne des compositions indicatives en poids pour Ciment fondu et en litre pour la chamotte. Pour cette dernière la densité apparente retenue est de 1,25 et le poids spécifique de 2,5 :

Caractéristiques de l'ouvrage à réaliser	Classe granulaire (mm)	Avec 50 kg de Ciment fondu	
		Granulats (litre)	Eau (litre)
Mortier jointoiment pour les petites pièces	0-0,2 mm	27	25
	0,2-2 mm	57	

Tableau.3.3: Compositions indicatives en poids pour Ciment fondu [36]



Fig.3.5: Fournil réalisé avec un mortier réfractaire. [37]

3.5. Mortier hydrofuge :

Le mortier hydrofuge est un traitement de surface qui lutte contre l'humidité, Ces traitements sont conçus pour combattre l'humidité de façon superficielle. Si votre problème d'humidité est plus sérieux, vous devrez avoir recours à un traitement de masse, tel que l'injection de résine ou le drainage. [38]

3.5.1. Principe :

-Permet de boucher les pores d'un mur lorsqu'il est appliqué dessus.

-empêcher la surface de respirer et ainsi la rendre imperméable.

- reboucher les trous et fissures éventuels :

- composé de durcisseur et de résine ;
- à appliquer sur murs intérieurs, enterrés ou en sous-sol ;
- à utiliser pendant la belle saison.

3.5.2. Avantages :

- moins de fissures dans votre mur ;
- adhérence sur tous les supports, secs ou humides ;
- bonne résistance chimique et mécanique. [38]

Chapitre 4

Les mortiers innovants

4.1. Les Mortiers de fibres :



Fig.4.1: Eprouvette avec des fibres. [39]

Les fibres naturelles ont été utilisées depuis bien longtemps, pour renforcer des matériaux très divers : terre, plâtre, brique..., mais l'association avec le ciment, le mortier ou le béton est un procédé relativement récent.

Le brevet sur l'amiante ciment date de 1902, les premiers emplois de fibres d'acier interviennent en 1923. Les fibres de verre, bien que connues depuis le début du siècle, n'ont fait l'objet d'essais d'incorporation au mortier qu'à partir de 1950.

Aujourd'hui, le renforcement du mortier ou du mortier par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites, dont les applications sont très variées. [39]

Les composites « ciment fibres » et « mortier fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation...

4.1.1. Le rôle des fibres :

Pour bien comprendre le rôle joué par les fibres, il faut préciser que le terme « fibre » est ici réservé à des matériaux d'une longueur d'environ 60 mm (fibres « courtes »). Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du mortier évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile. [39]



Les fibre courte contourner par la fissure

Verouillage d'une fissure par des fibres longe

Fig.4.2:Les fibres s'opposent à la propagation des microfissures. [39]

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives a :

- la déformabilité avant rupture (rupture ductile) ;
- la résistance aux chocs ;
- la résistance à la fatigue ;
- la résistance à l'usure ;
- la résistance mécanique du mortier aux jeunes âges ;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et microfissures.

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du mortier avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architecturale. [39]

4.1.2. Les caractéristiques comparées des fibres :

Pour apprécier l'apport des fibres au mortier et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

En effet, si comme on vient de le voir, les fibres ont un rôle qui apparaît commun, il se traduit par des résultats, donc des applications différentes en fonction de leur nature.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en:

- fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose ;
- fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques ;
- fibres synthétiques organiques : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide.

4.1.3. Les type de fibres pour mortier :

4.1.3.1. Les fibres en verre E et AR :

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. Leur emploi dans le mortier nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres Ajouts au mélange, au moment du gâchage, qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres « AR » (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue. [39]

a) Propriétés des fibres en verre :

Les caractéristiques mécaniques élevées de ces fibres ont déjà été mentionnées : 3000 MPa et plus pour la résistance à la traction.

Il faut également souligner leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °C). Ce critère ajouté à un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux mortiers de fibres de verre une bonne résistance au feu.

Les essais en cours doivent permettre d'améliorer l'évolution des caractéristiques du mortier de fibres de verre lors de son vieillissement.

Il est en effet important de pouvoir conserver au mortier de fibres une grande part de sa déformabilité d'origine (allongement 0,8 à 1 %), qui est l'un de ses principaux avantages.

b) Elaboration des mortiers de fibre de verre :

Ce procédé consiste à fabriquer un mortier dans un malaxeur et à y ajouter 4 à 5 % en poids de fibres de verre coupées (entre 15 et 60 mm de longueur). Ce mélange peut être moulé ou pressé, mais dans tous les cas la vibration doit être de faible amplitude pour maintenir une répartition homogène des matériaux.

c) Projection :

On utilise un pistolet pneumatique permettant de projeter simultanément le mortier déjà prémélangé et la fibre approvisionnée en bobines tressées (stratifiées), qui est automatiquement coupée et dispersée dans le flux de mortier.

Le débit et l'orientation du pistolet permettent à un opérateur expérimenté de contrôler l'épaisseur et l'homogénéité de la couche de mortier projeté. [39]

d) Applications :

Sur chantier, les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches, ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication, les domaines d'application sont très vastes :

- panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé ;
- éléments de bardage et éléments décoratifs ;
- mobilier urbain ;
- éléments divers : coffrets, coffrages, habillages ;
- produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux...

4.1.3.2. *Fibres polypropylène :*

Bien qu'il existe d'autres fibres dérivées des plastiques (fibres acryliques, aramides...), on a privilégié ici les fibres de polypropylène qui sont actuellement les plus utilisées. Obtenues par extrusion du polypropylène, les fibres se présentent en faisceaux qui se séparent lors du malaxage et se répartissent de façon multidirectionnelle.



Fig.4.3: Des fibres en polypropylène. [42]

a) Propriétés des fibres de polypropylène :

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au mortier et leur allongement à rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du mortier.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 °C, mais leur fusion n'affecte pas la résistance du mortier.

b) Les mortiers de fibres de polypropylène :

La fabrication du mortier avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors du malaxage.

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du mortier et sa cohésion.

Le grand avantage des mortiers de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs.

Les dosages couramment pratiqués sont de l'ordre de 0,05 à 0,2 % en volume, (0,5 à 2 kg de fibres par m³ de mortier). [39]

c) Applications :

Des propriétés précédentes découlent les applications des mortiers de fibres de polypropylène:

- mortiers projetés ;
- sculptures ;
- enduits.

4.2. Mortier de résine sans solvant à prise rapide :**4.2.1. Propriétés :**

- Hautes caractéristiques mécaniques ;
- Retrait linéaire très faible ;
- Mortier 3 fois plus solide que le béton ;
- Mise en service immédiate, toute l'année ;
- Adhérence exceptionnelle sur tous supports (béton, bois, plâtre), à n'importe qu'elle température (même inférieur à 0°C) ;
- Durcissement en un temps extrêmement court, moins d'une heure en moyenne) ;
- Très faible retrait ;
- Application ne nécessitant aucun matériel de mélange ;
- Coût très faible d'utilisation ;
- Peut être chargé avec des agrégats pour remplir de très forts volumes. [40]

4.2.2. Domaine d'emploi :

Il est utilisé comme chape à très haute résistance à l'abrasion que comme système de ragréage, de calage ou de scellement.

- **Ragréage** : chaussées, trottoirs, îlots, canalisation, mobiliers urbains, jardinières, nez de marche...
- **Calage** : matériels de signalisation, potences, portiques, arceaux, barrières de sécurité...
- **Scellement** : candélabres, tirants, caténaies...

4.2.3. Application :**a) Supports :**

- Adhère sur béton sec et acier dégraissé (le support béton doit être nettoyé de toutes substances étrangères et notamment des huiles et graisses afin d'obtenir une surface de liaison saine pour le mortier POLYREP)
- Le mortier et bétons hydrauliques supports doivent avoir au moins 28 jours d'âge et être convenablement préparés. [40]

b) Mise en œuvre :

- Température d'application mini / maxi : -10 ° C
- Application possible jusqu'à - 20 ° C avec accélérateur

- Pas besoin d'outil spéciaux pour appliquer le mortier : truelle, taloche, métallique, règle peuvent être utilisées afin d'obtenir une surface homogène sans travailler davantage le mortier.

On peut utiliser un coffrage en bois graissé ou recouvert d'une feuille de polyéthylène ou de formica pour des applications verticales.

- Pour des applications de plus de 15 mm on peut utiliser des agrégats durs non poreux et parfaitement secs pour « rallonger » le mortier.

La plus forte granulométrie ne doit pas excéder le 1/3 de l'épaisseur de la surface à réparer. [40]

4.2.4. Caractéristiques physiques :

Résistance à la compression :

- En 1 heure 30 mn : 68,1 MPa
- En 6 heures : 86,6 MPa
- En 24 heures : 89 MPa
- En 7 jours : 94 MPa
- En 14 jours : 94,2 MPa

Résistance à la traction :

7,5 MPa

Allongement à la rupture :

0,6 %

Densité :

2,15 g/cm³

Coefficient de dilatation linéaire :

3,3 – 10⁻⁵ 1° / C

Dureté à la bille :

262 MPa

Absorption d'eau, 4 jours :

60 mg / 50 – 50 – 4 mm

Perméabilité à la vapeur d'eau :

1,3 – 10⁻⁸

Résistivité électrique en surface :

6,5 – 10¹² Ohm

Résistivité électrique transversale :

7,5 – 10¹³ Ohm - cm

Retrait :

0 %

Durcissement :

entre – 10 °C et + 40 °C

4.3. Mortiers avec granulats de caoutchouc (Etude de cas) :

Nous présentons ci-après les principaux résultats sur ces mortiers obtenus par A. Benazzouk et coll. [41]

L'objectif de cette étude est d'examiner les potentialités de l'incorporation de particules de caoutchouc, de taille inférieure à 1 mm, dans une matrice cimentaire en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers. Le matériau étudié est un mortier dans lequel le sable a été substitué par ces particules de caoutchouc à des teneurs volumiques de 0, 25, 50, 75 et 100%. Dans un premier temps, nous avons évalué l'effet des particules de caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques du composite. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux variations dimensionnelles du matériau, lorsque celui-ci passe d'un état sec au contact accidentel de l'eau liquide. Ces dernières correspondent aux Variations Dimensionnelles Extrêmes (VDE). Les résultats ont montré que malgré une baisse significative des résistances mécaniques, correspondant à un allègement allant jusqu'à 42%, le composite est compatible avec l'utilisation en matériau léger de construction de "classe II", suivant les recommandations de la RILEM1

. L'examen des VDE a mis en évidence l'effet des particules de caoutchouc sur la réduction de la sensibilité à l'eau du matériau.

4.3.1. Matériaux et techniques expérimentales :

Les particules de caoutchouc utilisées sont issues de la transformation par déchiquetage de déchets de l'industrie automobile. Il s'agit de fines particules récupérées dans les dépoussiéreurs, de taille inférieure à 1 mm, contenant des fibres textiles dans une proportion estimée à 20% volumique. La masse volumique apparente de ces particules est de 180 kg/m³. La figure 4 montre l'aspect de ces particules de caoutchouc.



Fig.4.4: Aspect des déchets de caoutchouc.

Le sable utilisé est un sable fin siliceux de granulométrie inférieure à 1 mm. Le ciment utilisé est du type CPA CEMI 52,5 CP2, suivant la norme NF P15-301 (Afnor, 1994). Pour la fabrication des composites, le dosage en ciment a été maintenu constant, avec un rapport eau/ciment = 0,5 correspondant à un affaissement normal compris entre 8 et 9 cm. Le sable a été substitué par les particules de caoutchouc à des teneurs volumiques de 0, 25, 50, 75 et 100%. Après homogénéisation du matériau frais, celui-ci est mis en place dans des moules de dimensions (40 mm x 40 mm x 160 mm). Pour les mesures des VDE, les échantillons ont été munis à leurs extrémités de plots métalliques. Pour chaque essai, trois échantillons ont été préparés et conservés en salle de conservation à température et hygrométrie contrôlées ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, HR=98%), pendant 28 jours. Avant les essais, les échantillons ont été séchés dans une étuve à $70 \pm 2^\circ\text{C}$. Les propriétés des matériaux à l'état frais sont données par le tableau 1.

Teneur en Caoutchouc (%)	Affaissement (cm)	Entraînement d'air (%)
0	8,5	2,8
25	9,4	4,2
50	11,6	6,4
75	12,2	7,7
100	12,8	8,6

Tableau.4.1: Propriétés à l'état frais des composites élaborés.

4.3.2. Résultats expérimentaux et analyses :

4.3.2.1. Allègement du matériau :

La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de caoutchouc, est donnée par la figure 5. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Elle varie de 1950 à 1120 kg/m, pour une teneur en particules de caoutchouc allant de 0 % (mortier de référence) à 100% ; Ce qui correspond à un allègement de l'ordre de 42,5%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allègement des structures. Outre la faible densité du caoutchouc, l'allègement du composite est également liée à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice. En effet, les mesures de l'entraînement d'air ont montré que celui-ci varie de 2,8% (pour le mortier de référence) à 8,6% pour une composition de 100% en caoutchouc (tableau 1). Cette augmentation est liée à la nature non-polaire du caoutchouc, qui entraînerait de l'air dans la matrice.

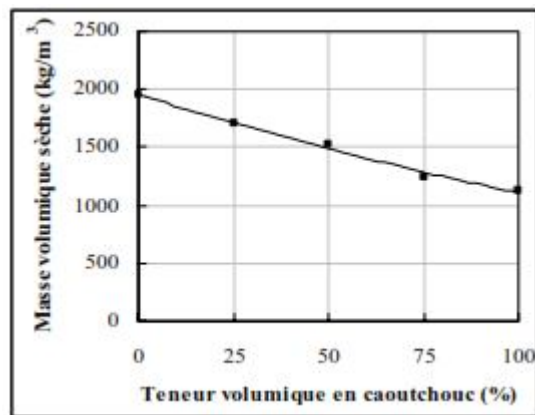


Fig.4.5: Masse volumique sèche des composites.

4.3.2.2. Module d'élasticité dynamique :

Les résultats, donnés par la figure 6, montrent que l'ajout de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, réduit le module d'élasticité dynamique de 23 à 3,2 GPa, pour une teneur en caoutchouc allant de 0 (mortier de référence) à 100%. Cette diminution est due à la nature du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores. En effet, les mesures de la célérité dans le caoutchouc ont donné lieu à une valeur de l'ordre 175 m/s, alors que celle mesurée dans le mortier de référence est de 3600 m/s. Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ce qui augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations.

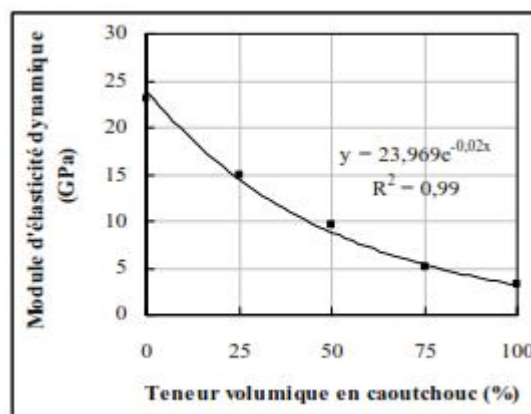


Fig.4.6: Module d'élasticité dynamique des composites.

4.3.2.3. Résistances mécaniques (compression-flexion) :

La variation de la résistance à la compression du composite, à 28 jours, à différentes formulations, est donnée par la figure 7. La résistance diminue considérablement avec

l'augmentation de la teneur en particules de caoutchouc. Pour une composition allant de 0 à 100%, la résistance à la compression varie de 36 MPa, pour le mortier de référence, à 6,5 MPa ; soit une réduction de l'ordre de 82%. La perte de résistance est liée, d'une part, à la nature élastique des particules de caoutchouc et d'autre part, à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc. Cette eau excédentaire est caractérisée par l'augmentation de l'affaissement, suivant le tableau 1.

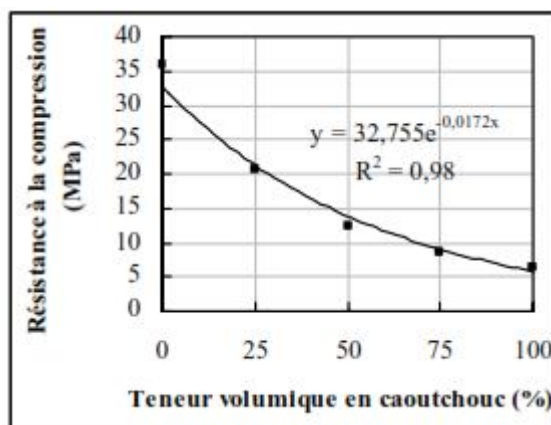


Fig.4.7: Evolution de la résistance à la compression des composites.

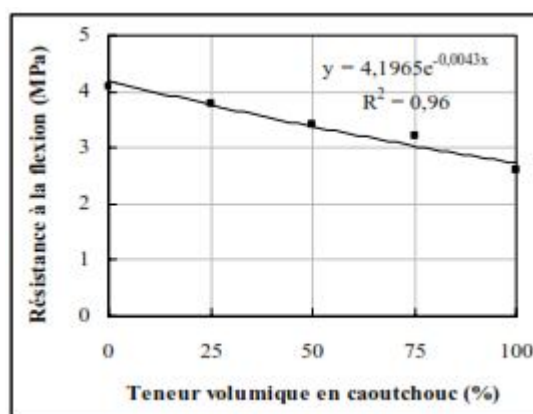


Fig.4.8: Evolution de la résistance à la flexion des composites.

4.3.2.4. Variations dimensionnelles et pondérales extrêmes :

L'évolution des variations dimensionnelles entre l'état sec et l'état saturé du composite, à différentes teneurs en caoutchouc, en fonction de la durée de cure est donnée par la figure 9 a. Les résultats montrent que les déformations dépendent de la formulation du composite, avec une cinétique de gonflement très rapide dans les premiers jours. Les déformations se produisent principalement durant les trois premiers jours. Au-delà, elles se stabilisent progressivement. A saturation, correspondant à 30 jours d'immersion, les VDE varient de 0,966 mm/m, pour le mortier de référence à 0,256 mm/m pour une teneur en caoutchouc de 100% ; Soit une réduction de l'ordre de 73,5%. Cette réduction des VDE est probablement liée à la

nature élastique des granulats qui amortit les contraintes exercées lors des déformations du matériau. Les valeurs des variations pondérales extrêmes (VPE), correspondant, sont données par la figure 9 b. Celle-ci montre une diminution de la quantité d'eau absorbée en fonction de la teneur en caoutchouc. Ceci est dû à la différence de volume accessible à l'eau en raison de la nature non-sorptive du caoutchouc, mais aussi à la présence d'une porosité fermée supplémentaire, non accessible à l'eau, due à l'entraînement d'air.

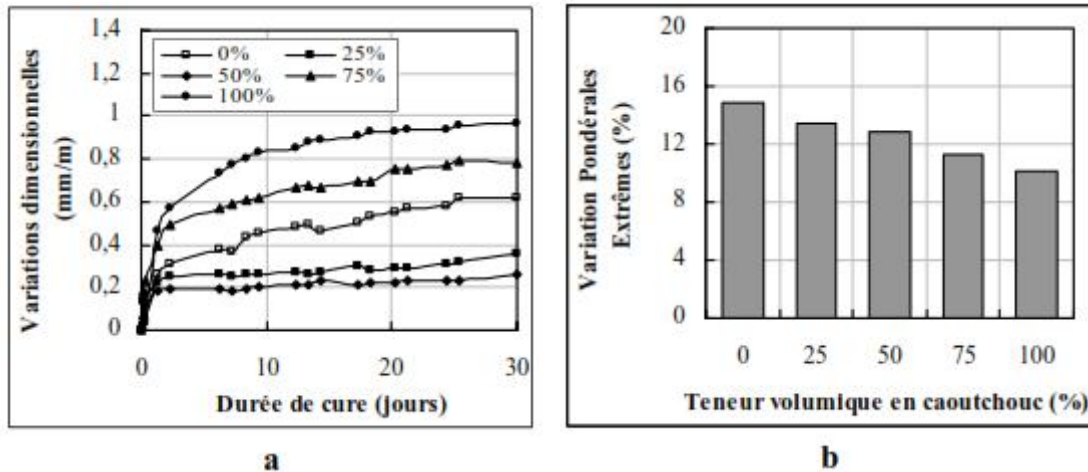


Fig.4.9: Evolution des VDE/VPE des composites.

Conclusion :

L'examen du comportement physico-mécanique a montré un allègement du composite allant jusqu'à 42,5%. Malgré une baisse significative de la résistance à la compression.

La baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle à la compression. De plus, les mesures du module d'élasticité dynamique ont mis en évidence des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations de ce composite.

Les résultats ont également montré que l'ajout de particules de caoutchouc, permettait de réduire les variations dimensionnelles du matériau. La limitation de ces variations dimensionnelles est une caractéristique importante pour la durabilité des matériaux, notamment le contact accidentel avec l'eau qui génère des contraintes pouvant conduire à la fissuration. Ceci peut avoir des conséquences sur l'impact d'un environnement agressif, puisque la résistance vis-à-vis de la carbonatation, la diffusion des ions et l'action du gel dépendent de l'état de la structure du matériau.

4.4. Mortier aux pouzzolanes :

Nous présentons ci-après les principaux résultats sur ces mortiers obtenus par M.BENKADDOUR et coll. [42]

Dans ce type des mortiers nous étudions l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhmidi) et la pouzzolane artificielle à base de la vase calcinée de barrage Ferrgoug (Mascara) sur les résistances mécaniques et les performances de durabilité vis-à-vis des milieux acides des mortiers confectionnés. Pour cela, nous avons comparé le comportement des mortiers élaborés à base de ciment seul (CPA 42.5) et celui des mortiers contenant différents dosages de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. L'étude a montré une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance aux agressions chimiques par rapport au mortier sans ajout.

4.4.1. Caractérisation des matériaux entrant dans la composition des mortiers :

Les mortiers sont composés de deux matériaux le liant (ciment) et le sable mélangés à l'eau. Dans certaines compositions une partie du ciment peut être remplacée par d'autres matériaux tels que la pouzzolane naturelle ou artificielle.

a) Le ciment :

Le ciment utilisé pour la confection des mortiers est un CEM I 42.5. Il a une surface spécifique Blaine de $3585\text{cm}^2/\text{g}$ et une densité de 3,2. La composition chimique et celle minéralogique selon les formules de Bogue sont données par les tableaux 2 et 3 respectivement.

<i>Oxydes</i>	<i>%</i>
SiO ₂	22.07
CaO	63.83
Al ₂ O ₃	6.41
Fe ₂ O ₃	4.16
MgO	0.21
SO ₃	1.49
PF	1.73
Total dont :	99.89
- SiO ₂ non combinée	92.29
- CaO Libre	0.16

Tableau.4.2: Composition chimique du ciment.

Phase	Clinker			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	38.09	34.62	9.95	12.65

Tableau.4.3: Composition minéralogique selon Bogue.

b) Le sable :

C'est un sable de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Kristel (Oran est) de dimension 0/3mm.

Afin d'avoir un sable dont la courbe granulométrique se situe à l'intérieur du fuseau normalisé, nous avons procédé à une correction de la granulométrie en mélangeant 40% de sable de mer et 60 % de sable de carrière (fig. 10). Ses paramètres physiques sont résumés dans le tableau 4 :

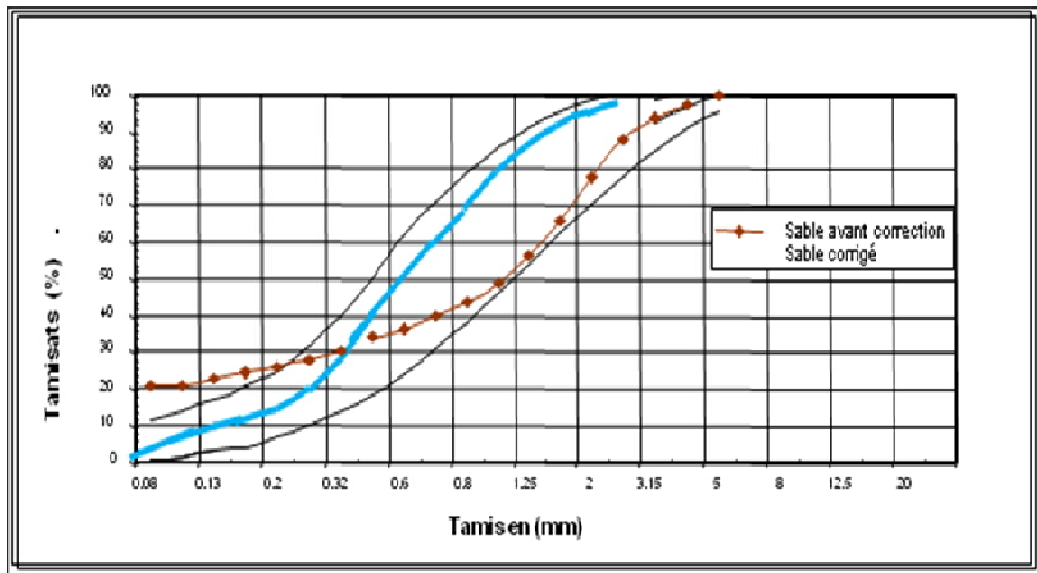


Fig.4.10: Courbes granulométriques du sable.

Paramètres physiques		valeurs
Masse volumique absolue (g/cm^3)		2.64
Masse volumique apparente (g/cm^3)		1.6
Coefficient d'uniformité Cu		10.62
Coefficient de courbure Cc		1.8
Equivalent de sable	Visuel (%)	76.96
	Piston (%)	69
Module de finesse		2.27
Pourcentage de fines (%)		10
Valeur du bleu méthylène « VB »		1.27

Tableau.4.4: Caractéristiques physiques du sable de carrière de KRISTEL.

c) Les pouzzolanes (naturelles et artificielles) :

Toute la quantité de la vase utilisée est prélevée dans la zone de rejet en aval de barrage de Ferrgoug. Nous avons préparé une pouzzolane artificielle en suivant les étapes suivantes :

- Après séchage en étuve à 105°C les vases ont été broyées et tamisées par voie sèche. Les tamisât qui passent à 80µm et qui représentent plus de 95% du prélèvement sont récupérés pour la cuisson. La calcination a été effectuée par petites quantités, en fonction de la capacité des fours disponibles.
- Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques la vitesse de cuisson a été réglée à 7° par minute, la température de calcination 750°C, le maintien à une température constante pendant 1heure.
- Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité.

La pouzzolane naturelle utilisée est de provenance du gisement de Bouhmidi (Béni-Saf), extraite à la côte 210m. Elle nous a été fournie par la cimenterie de Zahana en quantité suffisante pour nos besoins à l'élaboration du plan expérimental. Toute la pouzzolane utilisée comme substituant au ciment est homogénéisée, séchée, concassée et réduite en poudre (80µ) à l'aide d'un micro broyeur.

4.4.2. Protocole expérimental :

Deux types des éprouvettes de mortiers (1/3 de ciment + 2/3 de sable) sont confectionnés selon la norme NF EN 196-1. Dans le premier type d'éprouvettes nous avons incorporé de la pouzzolane naturelle à différents dosages (0%, 10%, 20% et 30%). Dans le deuxième type d'éprouvettes, la pouzzolane artificielle a été incorporée avec les mêmes dosages.

Pour la caractérisation de la résistance mécanique les éprouvettes sont de dimension 40x40x160mm³ et de dimension 50x50x55 mm³ pour la résistance chimique. Après démoulage à 24h et une cure sous l'eau de 28 jours.

Les premiers (40x40x160mm³) ont subi des essais de traction par flexion puis les demi-prismes obtenus ont été rompus en compression à différents âges (2j, 7j et 28j). Les deuxièmes 50x50x55 mm³ sont mises en solution acide de même concentration 5% HCl et 5% H₂SO₄. Des essais de mesure de masse sont effectués à 1j, 7j, 14j, 21j et à 28 jours selon la norme ASTM C267-96.

Les sept séries de mortier ainsi obtenus sont désignés respectivement par : T (témoin), 10PN (10% de pouzzolane naturelle), 20PN (20 % de pouzzolane naturelle), 30PN (30 % de pouzzolane naturelle), 10PA (10% de pouzzolane artificielle), 20PA (20 % de pouzzolane artificielle), 30PA (30 % de pouzzolane artificielle).

4.4.3. Résultats et interprétations :

a) Résistance à la traction :

Le tableau 5 présente les Rf des PA et des PN à différents âges.

Pourcentage d'ajout (%)	Résistance à la traction par flexion (MPa)					
	2j		7j		28j	
	PN	PA	PN	PA	PN	PA
0	4,63	4,63	6,71	6,71	8,71	8,71
10	3,83	4,03	5,72	6,05	7,14	8,02
20	3,16	3,50	5,18	6,02	6,74	6,45
30	2,42	2,70	4,29	4,94	5,93	6,28

Tableau.4.5: Résistance à la traction par flexion des PA et PN.

b) Résistance à la compression :

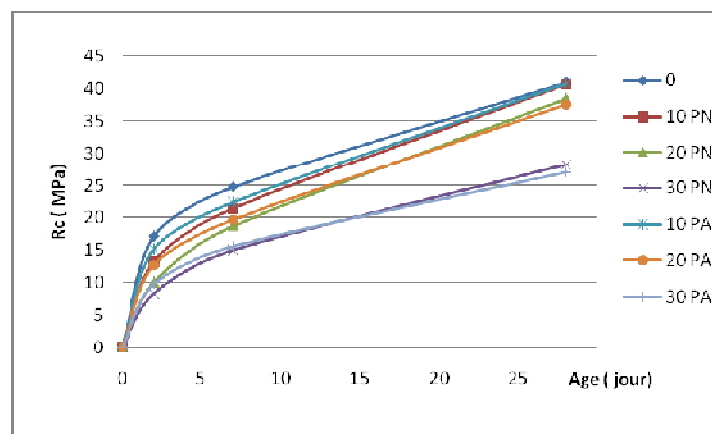


Fig.4.11: Evolution de la résistance mécanique des différents mortiers (PA et PN) en fonction de l'âge.

L'analyse permet d'apporter les commentaires suivants :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.
- La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours.

Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle et pouzzolane artificielle (la vase calcinée). Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et artificielle et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle et artificielle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise).

c) Durabilité :

Après 24h jusqu'à 28 jours les différents PN et PA augmentent leurs aptitudes à résister aux attaques acides.

On constate une perte de masse permanente à compter de 1 jour jusqu'à 28 jours d'immersion dans les acides.

Pour les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de P.N et immergés dans HCl la réduction de la perte de masse est de 44.6%, 54.63% et 45.61% respectivement. Et pour ceux immergés dans H₂SO₄ la réduction de la perte de masse est de 21.66%, 61.02% et 65.89 respectivement par rapport au mortier témoin.

Pour les mortiers contenant 10%, 20% et 30% de P.A et immergés dans HCl la réduction de la perte de masse est de 24.76%, 33.5% et 30.98% respectivement. Et pour ceux immergés dans H₂SO₄ la réduction de la perte de masse est de 48.70%, 75.38% et 84.80% respectivement par rapport au mortier témoin.

Les figures 12 et 13 nous reportent la comparaison entre les différents mortiers immergés dans 5% de HCl (12) et dans 5% H₂SO₄ (13).

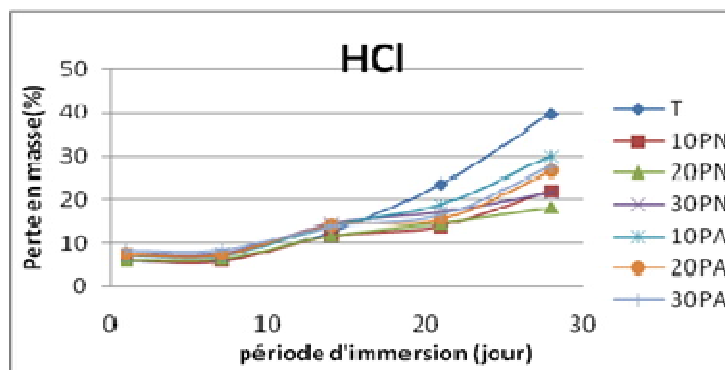


Fig.4.12: Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl).

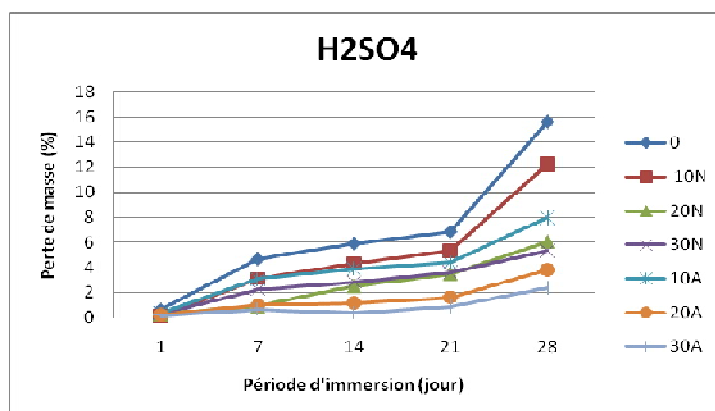


Fig.4.13: Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% H₂SO₄).

L'apport des ajouts minéraux, sans tenir compte de leur contribution du point de vue économique et écologique, se manifeste en :

- la fixation de l'hydroxyde de calcium par l'ajout actif,
- diminution de la porosité de la pâte de ciment durci, ce qui freine la pénétration des agents agressifs.

On remarque que l'incorporation des additions minérale augmente la résistance chimique des mortiers dans les milieux agressifs (acide).

La perte de masse est due au fait que le Ciment Portland Artificiel, après hydratation, a libéré une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre (CH) qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'acide.

Pour le mortier en contact avec l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse. Pendant que l'attaque se poursuit, tous les composants du ciment sont par la suite décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (étrangéité), qui, après cristallisation, peut causer l'expansion du mortier. La couche du gypse précipitée est facilement lixiviée ayant pour résultat une perte de masse considérable.

Dans les ciments avec ajouts, la quantité de CH étant de manière significative moins importante que dans le ciment sans ajout, cela est dû à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux. Par conséquent, les pores capillaires sont réduites par formation des gels CSH, bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où une réduction de la perte de masse.

Conclusion :

- Les résultats obtenus dans cette étude aboutir aux conclusions suivantes :

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

- L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4 . Nous préconisons :

- 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique.
- 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique.

Chapitre 5

**Partie pratique : Essais réalisés sur mortiers
traditionnels**

Le mortier est constitué de composants dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont différentes, chacun joue un rôle dans le comportement et la quantité du mortier.

Ce chapitre présente une étude expérimentale des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés, ainsi que les modes opératoires et l'appareillage utilisé pour leurs déterminations.

Les essais ont été effectués au laboratoire des travaux publics LTP_{Est} (Annaba), pendant la période de stage.

5.1. Les techniques expérimentales pour la caractérisation des éléments de composition :

5.1.1. Le sable :

Aux niveaux de laboratoire on a trouvé 2 types de sable :

- Sable d'oued de région de Biskra
- Sable d'Oum Ali de région de Tébessa

Le sable utilisé pour les essais provient de la région de Biskra (sable d'Oued).

a) Analyse granulométrique :

Nécessaire pour connaître la distribution granulaire et la classe granulaire du sable, elle a été déterminée par tamisage successif conformément à la norme NF EN 933-2.



Fig.5.1: Série des tamis.

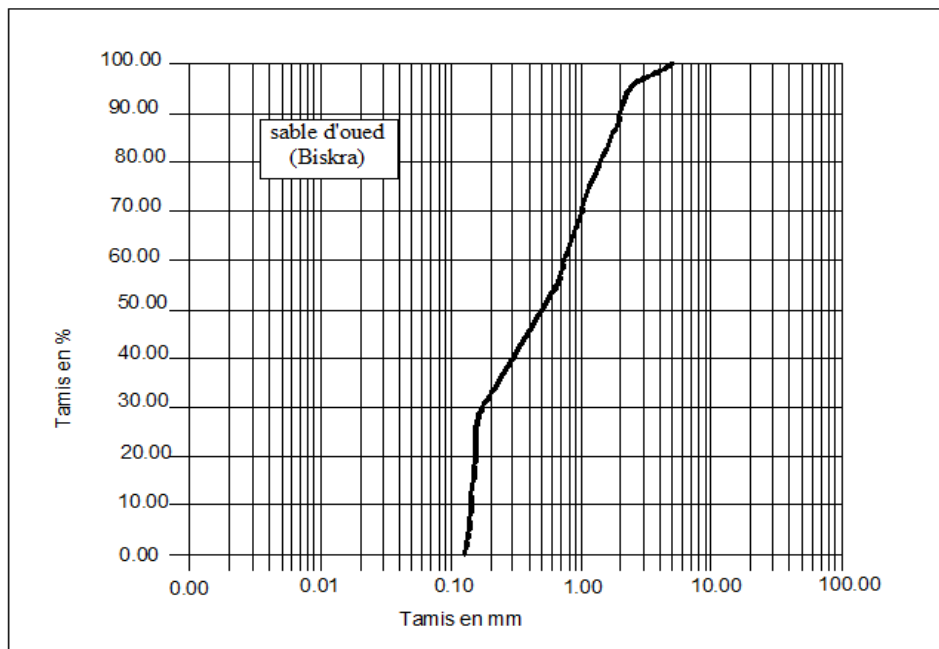


Fig.5.2: L'analyse granulométrique de sable d'oued (Biskra).

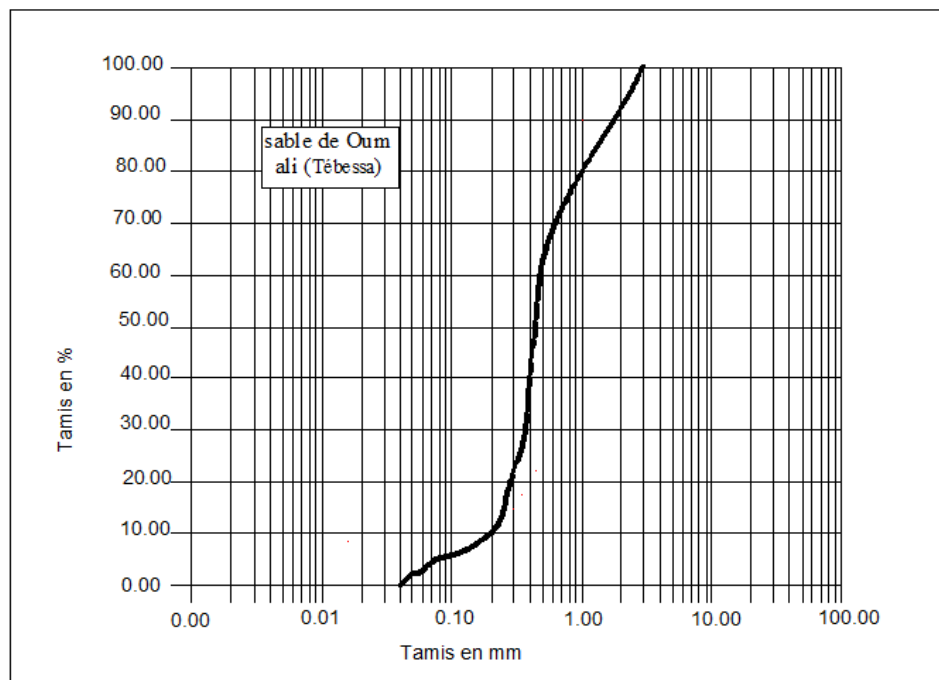


Fig.5.3: L'analyse granulométrique du sable d'Oum Ali (Tébessa).

b) Masse volumique :

Il faut distinguer entre :

- ❖ masse volumique apparente
- ❖ masse volumique absolue

- **La masse volumique apparente :**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient, elle a été mesurée selon la norme NF P 18-554

Une quantité de 300 gramme de sable (M) a été pesé puis introduite dans une éprouvette graduée.

Après lecture du volume (V), la M_v apparente est calculée par la relation suivante :

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

- **La masse volumique absolue (spécifique) :**

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides, elle a été mesurée selon la norme NF P 18-554

- mettre dans une éprouvette graduée un volume d'eau : V_1
- peser une masse sèche de l'échantillon : $M = 300g$
- verser l'échantillon dans l'éprouvette remplie d'eau, éliminer aussi que possible les billes d'air
- relever le volume : V_2
- calculer :

$$M_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

- répéter 3 fois la manipulation et calculons la moyenne

Equipement utilisé :

- Etuve pour sécher le sable à 105°
- éprouvette graduée
- balance de précision

c) Mesure de la propreté de sable :

A été mesurée au moyen de l'essai d'équivalent de sable conformément à la norme NF P18-597.

L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable .Une procédure normalisé permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci. L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier.



Fig.5.4: Sable d'oued Biskra



Fig.5.5: Sable Oum Ali Tébessa

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h_1 : sable propre seulement.
- hauteur h_2 : sable propre + éléments fins,

On en déduit l'équivalent de sable qui est par convention égal à : $ES = \frac{h_1}{h_2} 100$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ESP (équivalent de sable au piston).

Les valeurs minimales de l'équivalent de sable sont :

60 % pour l'équivalent de sable visuel et 60 % pour l'équivalent de sable.

✓ **Equipements utilisés :**

- > Eprouvette graduée + un piston
- > Tube Laveur,
- > Solution lavante,
- > Règle de mesure,
- > Bonbonne de 5 litres et son bouchon, avec siphon et tube souple de 1.50 m

	Premier éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette (gramme)	120 g	120 g
h1 (millimètre)	12.4	11.9
H2 (millimètre)	8.9	8.3
ES= (h2/h1)100	71.8	69.7

Tableau .5.1: Résultat du sable d'oued (Biskra).

Equivalent de sable(ES)=la moyenne de deux éprouvettes.

ES=70.75% \longrightarrow Sable propre.

	Premier éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette (gramme)	120 g	120 g
h1 (millimètre)	17.0	17.0
H2 (millimètre)	8.8	8.7
ES= (h2/h1)100	51.76	51.18

Tableau .5.2: Résultat du sable Oum Ali(Tébessa).

Equivalent de sable(ES)=la moyenne de deux éprouvettes.

ES=51.47% \longrightarrow Sable argileux à ne pas utiliser.

d) Teneur en eau :

Nous faisons remarquer qu'au moment des essais, la teneur en eau du sable, déterminée Par :

- Peser l'échantillon au gramme près, soit M sa masse
- Sans lavage préalable, sécher l'échantillon à l'étuve à 105° jusqu'à une masse constante, soit M'
- La teneur en eau W est :

$$W = \frac{M - M'}{M'} 100$$

e) Porosité :

C'est le rapport de volume des vides v contenus dans l'unité de volume V de matière, elle est déterminée par la relation :

$$P = \frac{v}{V}$$

Avec :

v : volume des vides

V : volume du sable total

f) Compacité :

Est le rapport du volume de matière pleine au volume total, elle est déterminée par la relation :

$$C = \frac{V-v}{V} = 1 - \frac{v}{V} \quad \text{ou } C+P=1$$

Ou encore : % C + % P = 100

<i>caractéristiques</i>	<i>Sable Oum Ali Tébessa</i>	<i>Sable d'oued Biskra</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.47	2.60
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.85	1.56
Porosité (%)	30.86	31.90
Equivalent de sable (%)	51.47	70.75
Teneur en eau (%)	1.73	1.65

Tableau .5.3: Les caractéristiques physiques des sables utilisées.

5.1.2. Les liants :

5.1.2.1. Les ciments :

On a utilisé 3 types de ciments :

a) Ciment de Hadjar Essoud CPJ-CEM II/A 42,5 :

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse, en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme à la norme NA 442 :2000.

Composition :

- Clinker : 80 à 94%
- Ajouts : 06 à 20% (Laitier)

Caractéristiques Physiques :

- Temps de début de prise mesuré sur pâte pure = 60 minutes ;
- Retrait à 28 jours d'âge sur mortier normal = 1000 μ m/m ;
- Stabilité mesurée sur éprouvette de pâte pure = 10 mm. [34]



Fig.5.6: Sac de ciment CPJ-CEM II/A 42, 5. [34]

Caractéristiques Mécaniques :

Les résistances à la compression font apparaître une valeur moyenne des résultats à 28 jours d'âge voisine 42,5 MPa.

Les valeurs limites garanties sont :

- 10,0 MPa à 02 jours ;
- 40,0 MPa à 28 jours.

Caractéristiques Chimiques :

- La teneur en sulfates (SO_3) dans le ciment $< 2.5\%$;
- La teneur en chlorures (Cl^-) = 0,1%.

b) Ciment d'Ain El Kebira (SCA EK) :

Ciment Résistant aux Sulfates (type HTS), commercialisé sous le nom CRS 400, le ciment CEMI 42,5 est un ciment pour travaux dans les milieux fortement agressifs. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme à la norme NA 443 :2002.



Fig.5.7: Sac de ciment CRS 400. [33]

Composition:

- Clinker : 95 à 100% ;
- Ajouts: 0 à 3% (Laitier, pouzzolane, calcaire). [33]

Caractéristiques Chimiques :

Ciment	Sulfate(SO_3)	$< 2,5\%$
	Chlorures (Cl^-)	$< 0,1\%$

Tableau .5.4: Caractéristiques chimiques de ciment Résistant aux Sulfates (CRS).

Caractéristiques Physiques :

- Temps de début de prise mesuré sur pate pure;
- Retrait à 28 jours d'âge mesuré sur mortier normal s 1000 mm ;
- Stabilité mesurée sur éprouvette de pate pure s 10 mm.

Caractéristiques Mécaniques :

Les valeurs limites des résistances à la compression sont :

$\geq 10,0$ N/mm² à 02 jours ;

$\geq 40,0$ N/mm² à 28 jours.

c) Ciment (GCMC Jijel importation) :

Ciment CPA-CEM I/A 42,5 de la Sarl GCMC Jijel.

5.1.2.2. La chaux :**On a utilisé :**

- **La chaux seule (100%chaux) ;**
- **Un mélange (50%ciments+50%chaux).**

Le type de ciment utilisé est ciment Hadjar Essoud CPJ-CEM II/A 42,5.



Fig.5.8 : Sac de chaux.

5.1.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage qui est une eau potable du robinet. Elle a été caractérisée expérimentalement au LTP_{Est} (laboratoire des travaux publics de l'Est D R Annaba)

5.2. Techniques expérimentales pour la caractérisation des mortiers d'étude :

5.2.1. Principe :

Les essais réalisés sont :

- ❖ Essai physico mécanique sur mortier pour mesurer :
 - La résistance mécanique a la compression selon la norme NF-P-15-401
 - Essais de résistance mécanique à la flexion selon la norme NF-P-15-401.
- ❖ Attaque des mortiers par les acides :

Pour la caractérisation de la résistance chimique vis-à-vis des acides. Les échantillons des mortiers pour l'essai sont les échantillons après faire l'essai de flexion pour 2 jour on a pris une des deux pour l'essai, Après 28 jours de cure, les échantillons sont immergés dans une solution de 5% d'un acide sulfurique fort (H_2SO_4).

La variation du poids des éprouvettes est examinée à différents âge, Le jour de l'essai les parties de mortier ayant subi une dégradation visible sont nettoyées soigneusement avec de l'eau, par la suite les échantillons sont séchés pendant une demi-heure à l'air libre, la résistante chimique en milieu acide est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette.

5.2.2. Préparation des mortiers :

5.2.2.1. Composition du mortier:

Pour 1 moule normalisé on utilise les quantités suivant :

- sable = 1350 g.
- liant (ciment ou chaux) = 450 g.
- eau de gâchage = 225 ml.

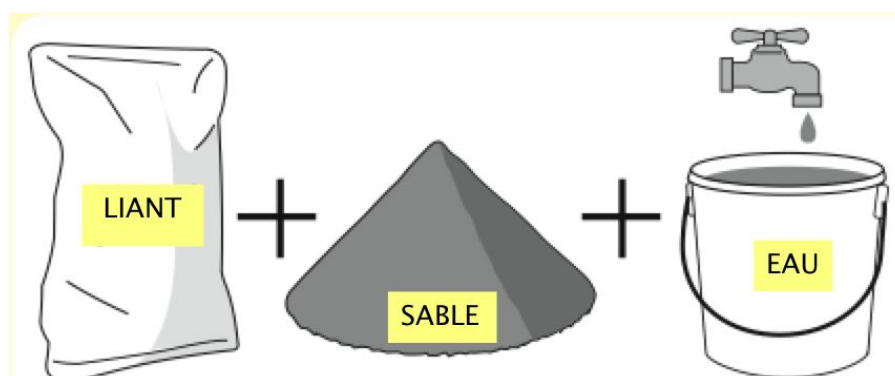


Fig.5.9: Les éléments pour le mortier.

5.2.2.2. *Equipement utilisé pour la préparation des mortiers :*

- Un malaxeur :



Fig.5.10: Malaxeur de mortier.

- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés “éprouvettes $4\times 4\times 16$ ”):



Fig.5.11: Moules normalisés “éprouvettes $4\times 4\times 16$ ”.

- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$:



Fig.5.12: Machine d'essais de résistance à la flexion.

- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$:



Fig.5.13: Machine d'essais à la compression.

5.2.3. *Processus de fabrication des mortiers étudiés :*

On mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur et verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivants. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

On remplit un moule 4 x 4 x 16. 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. Après ça le moule est arasé :



Fig.5.14: Moule rempli de mortier pendant le choc.



Fig.5.15: Arasement de mortier dans le moule.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau :



Fig.5.16: Démoulage des éprouvettes.



Fig.5.17: Les éprouvettes dans un bassin d'eau.

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



Fig.5.18: Les éprouvettes en stockage.

5.2.4. Résultats expérimentaux et discussion :

5.2.4.1. Résistances mécaniques :

Les résultats obtenus de l'évolution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion des éprouvettes des mortiers conservées dans l'eau sont représentés sur le Tableau 5 est les figures 19 et 20 suivantes :

	Flexion 2j(MPA)	Compression 2j (MPA)	Flexion 7j(MPA)	Compression 7j (MPA)	Flexion 28j(MPA)	Compression 28j (MPA)
Hadjar soude	2.2	11.83	5.2	23.50	5.4	36.47
chaux	0	0	4.3	2.4	4.9	3
bâtard	1.4	7.17	4.2	16.40	5.6	25.82
GSMC Jijel	4.1	26.30	5.2	30.10	5.9	47.36
HTS	2.8	14.27	3.7	21.50	5.7	41.21

Tableau .5.5: Résultat des essais de flexion et de compression.

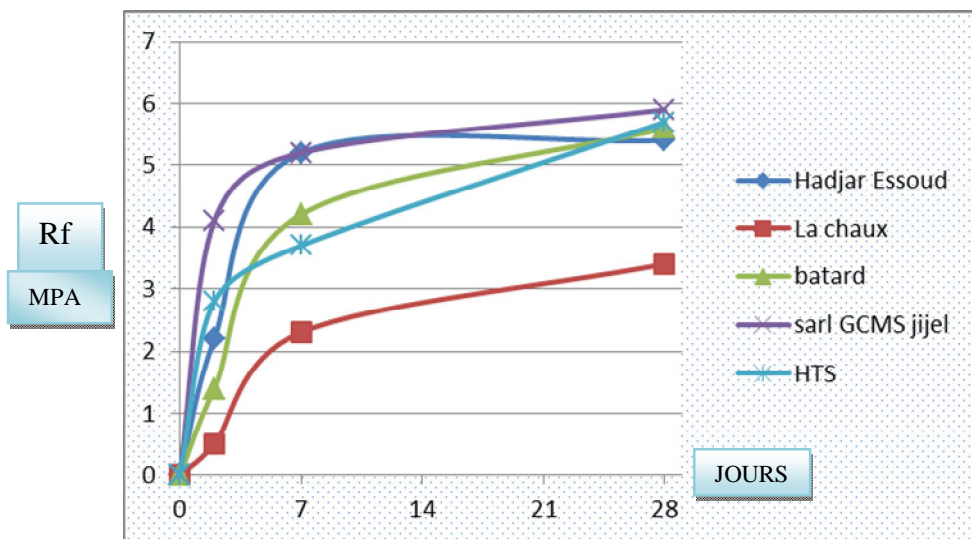


Fig.5.19: Résistances mécaniques à la flexion des mortiers à différents âges.

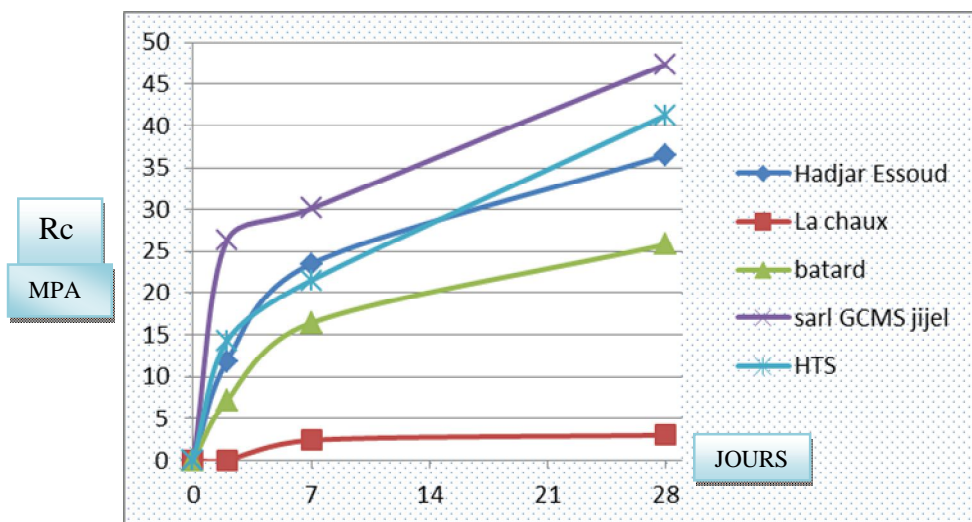


Fig.5.20: Résistances mécaniques à la compression des mortiers à différents âges.

Nous remarquons une augmentation continue de la résistance à la flexion et à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'Age (2, 7, et 28 jours).

Cette augmentation est due à l'hydratation du liant au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité.

5.2.4.2. Effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4) :

Mettre une quantité de solution (5 % H_2SO_4) dans un Plat en verre et puis nous avons mis les éprouvettes des mortiers est chaque semaine on lave les éprouvettes est on mesure les pertes de masse, le tableau suivant représente l'évolution de la perte en masse des différents mortiers conservés dans une solution acide de (5 % H_2SO_4).

	Hadjar Essoud	Sarl GCMS Jijel	HTS
Poids de l'éprouvette	300.20g	267.48g	295.00g
perte de masse 7j	35,5 g	31,2 g	11,25 g
perte de masse 14j	70.49g	63.05g	21.35g

Tableau .5.6: Evolution de la perte en masse.

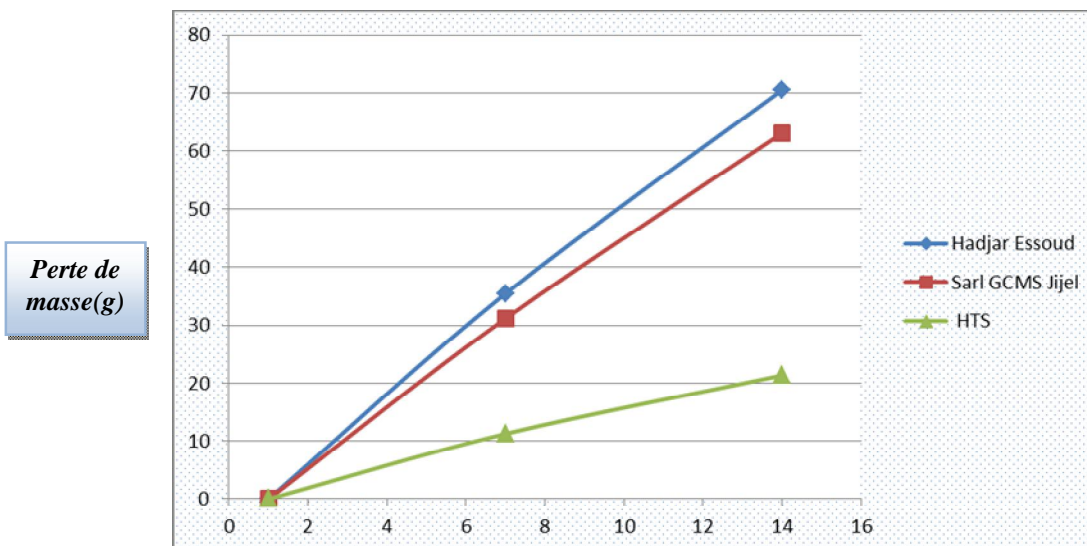


Fig.5.21: Perte de masse des différents mortiers à 14 jours d'immersion (5% H_2SO_4).

La figure 22 montre le changement du volume des 3types de mortiers après immersion dans une solution de 5% d'acide fort (H_2SO_4) pendant 14 jours:



Fig.5.22: Les éprouvettes dans la solution.

La figure 23 montre perte des masses en dessous de plat :



Fig.5.23: Les masses perdues.

La figure 23 montre les éprouvettes après lavage avec l'eau :

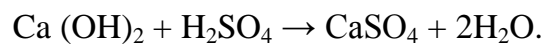


Fig.5.24: Les éprouvettes lavées à l'eau.

Conclusion :

L'augmentation continue de la résistance à la flexion et à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'Age (2, 7, et 28 jours) est due à l'hydratation du ciment au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité.

Le suivi de la perte de masse des différents mortiers immergés dans une solution de l'acide sulfurique (5% H_2SO_4), nous à mener à noter des pertes de masse continues au cours de temps. Cette perte est due au dépôt du gypse, qui se forme suite à la réaction entre la portlandite et L'acide sulfurique selon la réaction chimique :



Conclusion générale

Ce travail sur les mortiers nous a permis de recueillir beaucoup d'informations sur les mortiers traditionnels et sur les mortiers nouveaux, de même qu'il nous a permis de réaliser des essais pratiques sur les éléments de composition.

Le chapitre 1 de ce travail nous a introduits dans le monde des mortiers: nous avons en effet connu les différents constituants des mortiers et leurs caractéristiques propres, puis sur sa fabrication et ses emplois.

Le deuxième chapitre nous a permis de connaître l'histoire des mortiers ainsi que quelques sites archéologiques dans le monde ainsi qu'en Algérie où le mortier a été abondamment utilisé, tels que:

- Théâtre romain de la ville de Guelma
- Thibilis de Sellaoua Announa (Guelma)
- Les ruines de Timgad (Batna) : l'arc de Trajan, le théâtre de Timgad, le capitole.
- Le tombeau d'Imdghassen (Batna)
- La Porte de Caracalla (Tébessa),
- La basilique byzantine de Tébessa
- Les vestiges romains de M'daourouch (Souk Arras)
- Les vestiges romains d'Hippone (Annaba)
- Les ruines de Djemila (Sétif).

Dans les chapitres 3 et 4 nous avons décrit les mortiers spéciaux et mortiers innovants qui ont fait leurs apparitions ces dernières années et nous avons recensé leurs propriétés et leurs diverses applications.

Les propriétés des mortiers sont fonctions des propriétés physiques, mécaniques, tailles et formes des granulats, de la nature du liant ainsi que de la fabrication, proportions, modes préparatoires du mélange, moyens de mise en œuvre, et conditions de conservation. (Température humidité). Pour ces raisons, nous avons réalisé une partie pratique sur les mortiers traditionnels en saisissant l'opportunité qui nous a été offerte dans le cadre de notre stage de fin d'étude au laboratoire LTPEst de Annaba. Les résultats des essais réalisés sur les mortiers traditionnels et sur leurs composants sont présentés et commentés dans le chapitre 5 de ce mémoire.

Nous avons en fin de mémoire présenté cette conclusion générale qui synthétise l'ensemble des étapes parcourues.

Références bibliographiques

[1] Centre d'information sur le ciment et ces application ; « *fiche technique : constituants des bétons et des mortiers* » ; collection technique cimbéton (Tome 1); paris ; septembre 2005.

[2] J.Baron ; « *le béton hydraulique* » ; édition : presse des ponts et chaussées ; 01 avril 1995

[3] F.Letertre – H.Renaud ; « *Technologie de bâtiment –gros œuvre : travaux de maçonneries et finition* » ; édition faucher ; 1978.

[4] « *Encyclopédie du bâtiment EB₁* » ; sous la direction de serge Levasseur ; édition T.I.

[5] S. Richane ; « *Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton* » ; Mémoire de magister ; M'sila ; 2004.

[6] M.S.Bouglada ; « *effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier* » ; mémoire de magister ; université de M'SILA ; 2008.

[7] A.Brahma ; « *Le béton* » ; édition OPU ; 1996.

[8] Y. Cherait – Z. Nafa ; « *Élément de matériau de construction et essais* » ; édition OPU ; 2007.

[9] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 2 : les ciments* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux_cinq.html.

[10] R.Dupain – R. Lanchon – JC. Saint- Arroman ; « *Granulat sol ciment et béton* » ; 3^{ème} édition ; édition Casteilla ; 2004.

[11] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 4 : la pâte de ciment* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_quatre_deux.html.

[12] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 5 : les mortiers* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_cinq_exp.html.

[13] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 5 : les mortiers* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_cinq_deux.html.

[14] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 3 : les granulats* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_trois_exp.html.

[15] Cours en ligne : « *matériaux de construction chapitre 3 : les granulats* » ; disponible sur site web : http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_trois_quatre.html.

[16] G.Dreux ; « *Nouveau guide de béton* » ; 2eme édition ; édition Eyrolles ; paris ; 1979.

[17] G.Dreux – J.Festa ; « *nouveau guide du béton et des ces constituants* » ; édition : Eyrolles ; 1998.

[18] centre d'information sur le ciment et ces application ; « *fiche technique : ciment et béton l'essentiel* » ; collection cimbéton ; paris ; janvier 2005.

[19] les matériaux : [http : // www.brico.be/wabs/fiches/pdf/fr/2-8.pdf](http://www.brico.be/wabs/fiches/pdf/fr/2-8.pdf).

[20] [http : // www.www.maison.com](http://www.www.maison.com).

[21] centre d'information sur le ciment et ces application ; « *fiche technique : les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre* »; collection technique cimbéton (Tome 2); paris ; octobre 2006.

[22] [http:// www.francebtp.com/](http://www.francebtp.com/) Auteur: Cédric Béal.

[23] [http : // www.inanna.virtualave.net](http://www.inanna.virtualave.net)

[24] [http : // www.wikipedia.org/wiki/Pyramides d'Égypte](http://www.wikipedia.org/wiki/Pyramides_d'Égypte).

[25] [http : // www.romanaqueducts.info](http://www.romanaqueducts.info).

[26] [http : // www.centerblog.net](http://www.centerblog.net)

[27] [http : // www.Getyourguide.fr](http://www.Getyourguide.fr).

[28] [http : // www.rome-roma.net](http://www.rome-roma.net).

[29] [http : // www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org).

[30] [http : // www.djazair50.dz/?Le-théâtre-romain-de-Guelma-Un](http://www.djazair50.dz/?Le-théâtre-romain-de-Guelma-Un).

[31] [http : // www.olivier-brestin.com](http://www.olivier-brestin.com).

[32] [http : // www.jijel-archeo.123.fr](http://www.jijel-archeo.123.fr).

-
- [33] [http : // www. epervier-sam.skyrock.com](http://www.epervier-sam.skyrock.com).
- [34] [http : // www.snmi.org](http://www.snmi.org).
- [35] <http://www.chausson-materiaux.fr>.
- [36] [http: //www.cimentfondu.com/fr](http://www.cimentfondu.com/fr).
- [37] <http://www.monfourabois.pagesperso-orange.fr>.
- [38] <http://www.humidite.comprendrechoisir.com/infos/mortier-hydrofuge>.
- [39] <http://www.iut-tice.ujf-grenoble.fr>.
- [40] <http://www.polyresine.fr>.
- [41] Amar Benazzouk, Omar Douzane, Thierry Langlet, Katiba Mezreb, Fayçal Labbani, Jean-Marc Roucoult; «*Effet des granulats de caoutchouc sur Les propriétés d'un mortier de ciment* ». Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
- [42] Mokhtaria BENKADDOUR, Fatiha KAZI AOUAL, Abdelaziz SEMCHA; «*Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane Artificielle* ». Revue Nature et Technologie. N° 01/Juin 2009. Pages 63 à 73