

1 RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

BAGHDAD KHEIRA

BELKHAMSA KHALDIA

Sujet du mémoire

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES
MORTIERS A BASE DE LA FUME DE SILICE ET
RENFORCEE PAR DES FIBRES POLYMERE

Soutenu publiquement le /09/2020 devant le jury composé de :

Mr. CHEIKH .A
Mr. BELMAHI .S
Mdm.OUZIR.K
Mr. KHILOUN.M

Président
Encadreur
Examineur
Examineur

PROMOTION : 2019/2020

Remerciement

*En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, **de** m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire
Mr Belmahi Samir.*

*Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et
conseillé.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Enfin, je remercie mes parents, mon frère, mes sœurs tous mes Ami(e)s que j'aime Pour leur sincère amitié et confiance.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dedicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents ma mère et mon père pour leur patience,
leur amour, leur soutien et leur encouragements.*

*A mon frère et mes sœurs et
leurs enfants.*

A ma chère fille.

*A mes oncles et mes
tantes.*

A mes ami (e)s et collègues.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du
Moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
travail soit possible.*

Belkhamza Khaldia Merci

Dedicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents ma mère et mon père pour leur patience,
leur amour, leur soutien et leur encouragements.*

A mes frères

A mes oncles

A mes tantes

*A mes ami (e)s et
collègues*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du
Moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
travail soit possible.*

Baghdad Kheira Merci

Résumé

Les matériaux cimentaires sont handicapés par leur faible résistance à la traction et par leur fragilité, qui les rendent particulièrement sensibles à la fissuration notamment la fissuration de retrait. Si la fragilité est souvent palliée par le renforcement par des armatures, leur mise en place est difficile voire impossible dans certains cas. Le renforcement par des fibres est une solution alternative qui reste perfectible dans ce sens où celle-ci n'empêche pas la fissuration mais en limite l'ouverture.

La solution idéale est un matériau cimentaire capable de supporter des déformations importantes avant localisation de la fissure. Pour cet objectif, nous avons opté pour l'incorporation de granulats déformables et nous avons décidé d'utiliser un mortier à basse de fumée de silice renforcé de fibre polymère.

Des paramètres ont été étudiés tel que le dosage en fibre de polymère et le fumée de silice. Les résultats ont montré que les pourcentages de fumée de silice 5% et la fibre de polymère 0.2%

Des augmentations de résistance ont été obtenues par rapport au mortier ordinaire : environ de 2.49 MPA à la traction et de 31.59MPA la compression pour le polymère et d'environ de 4.44MPA à la traction et 64.05MPA à la compression pour la fumée de silice.

Mots clés : mortiers, fumée de silice, fibre polymère compression, traction.

ملخص

يتم إعاقه المواد الأسمنتية بسبب قوتها المنخفضة في الشد وهشاشتها ، مما يجعلها حساسة بشكل خاص للتشقق ، ولا سيما التكسير الانكماش. إذا تم التغلب على الهشاشة غالباً عن طريق التعزيزات، يكون تركيبها صعباً أو مستحيلاً في حالات معينة. يعد التعزيز بالألياف حلاً بديلاً يمكن تحسينه بمعنى أنه لا يمنع التشقق ولكنه يحد من فتحه.

الحل المثالي هو مادة اسمنتية قادرة على تحمل التشوهات الكبيرة قبل تحديد موقع الكراك. لهذا الغرض ، اخترنا دمج الركام المشوه وقررنا استخدام ملاط منخفض من دخان السيليكا المقوى بألياف البوليمر.

تمت دراسة المعلمات مثل جرعة ألياف البوليمر ودخان السيليكا. وأظهرت النتائج أن نسبي دخان السيليكا 5٪ وألياف البوليمر 0.2

تم الحصول على زيادات في القوة على الملاط العادي: حوالي 2.49 شد و 31.59 ضغط للبوليمر وحوالي 4.44 شد و 64.05 ضغط لبخار السيليكا.

الكلمات المفتاحية: الهاون، دخان السيليكا ، ضغط ألياف البوليمر ، الجر.

Abstract

Cementitious materials are handicapped by their low tensile strength and their fragility, which make them particularly sensitive to cracking, in particular shrinkage cracking. If the fragility is often overcome by reinforcement by reinforcements, their installation is difficult or even impossible in certain cases. Reinforcement with fibers is an alternative solution that can be improved in the sense that it does not prevent cracking but limits its opening.

The ideal solution is a cementitious material capable of withstanding significant deformations before locating the crack. For this purpose, we have opted for the incorporation of deformed aggregates and we have decided to use a low silica fume mortar reinforced with polymer fiber.

Parameters were studied such as the dosage of polymer fiber and silica fume. The results showed that the percentages of silica fume 5% and the polymer fiber 0.20%

Strength increases were obtained over regular mortar: approximately 2.49MPa tensile and 31.59MPa compressive for polymer and approximately 4.44MPa tensile and 64.05MPa compressive for silica fume.

Keywords: mortars, silica fume, polymer fiber compression, traction.

Sommaire

Remercîment	
Dédicace	
Résumé	
Sommaire.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux :	vi
Introduction Générale.....	1
<i>Chapitre I: Généralités sur les mortiers</i>	
I.1 Introduction :.....	2
I.2. Le mortier.....	2
I.2.1. Le ciment.....	3
I.2.1.1. Chimie du ciment	4
I.2.1.2. Constituants d'un ciment.....	5
I.2.1.3. Différents types des ciments courants	7
I.2.2 Le sable	8
I.2.3. Eau de gâchage.....	9
I.2.4. Les additifs	10
I.2.4.1. Les adjuvants.....	10
I.2.4.2. Les ajouts	11
I.2.5. La fumée de silice :	13
I.2.5.1 Définition de la fumée de silice :	13
I.2.5.2 principes de fabrication	14
I.2.5.3. Caractéristiques techniques et contrôle de production :.....	14
I.2.5.4. Les différents aspects d'une fumée de silice	15
I.2.5.5. Mode d'utilisation	15
I.2.5.6. Avantages de la fumée de silice :	16
I.3. Types de mortier	17
I.3.1. Le mortier-ciment.....	17
I.3.2. Le mortier-hydrofuge	17
I.3.3. Le mortier réfractaire	18
I.3.4. Le mortier de chaux	19
I.3.5. Le mortier-colle.....	19
I.4. Les emplois des mortiers	20
I.4.1 Les joints de maçonnerie.....	20

I.4.2. Les enduits	21
I.4.3 Les chapes	22
I.4.4. Les scellements et les calages	22
I.5. Qualités d'un bon mortier	23
I.5.1. Homogénéité	23
I.5.2. Ouvrabilité.....	23
I.5.3. Prise assez lente.....	24
I.5.4. Adhérence	24
I.5.5. Faible retrait hydraulique	24
I.5.6 Imperméabilité	24
I.5.7. Résistance à la compression.....	24
I.6. Conclusion	25

Chapitre II : Les fibres et les bétons de fibre

II.1. Introduction	26
II.2. Les fibres	26
II.2.1 Nature des fibres	27
II.2.1.1. Fibres organiques	27
II.2.1.2. Les fibres métalliques	30
II.2.2 Utilisation des fibres dans la construction	32
II.2.3 Le rôle des fibres.....	33
II.3. Le béton fibré.....	34
II.3.1 Composition du béton fibré	35
II.4. Conclusion	36

Chapitre III : Caractérisation et identifications des matériaux

III.1.Introduction	37
III.2.Caractéristiques des matériaux	37
III.2.1. Le ciment	37
III.2.2. Le sable.....	39
III.2.2.1. Masses volumiques.....	40
III.2.2.2 Analyse granulométrique.....	42
III.2.2.3. L'équivalent de sable (la norme NF P 18 -598) :	43
III.2.3. La fumée de silice.....	45
III.2.3.1. Caractéristique de la fumée de silice :	46
III.2.3.2. Action de SILTEK POWDER.....	47
III.2.3.3 Mode d'utilisation.....	47

III.2.4. Master Fibre.....	49
III.2.5. Eau de gâchage	50
III.2.5.1. Importance du rapport eau/ciment	50
III.3. Méthodes d'élaboration.....	50
III.3.1. Formulation des mortiers.....	50
III.3.2. Composition des mortiers.....	51
III.3.3. Malaxage des mortiers.....	51
III.3.4 : Préparation des éprouvettes :.....	52
III.4. Conclusion.....	55

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Calcul et Résultats.....	56
IV.2.1. Calcul	56
IV.2.1.1. Résistance à la flexion	56
IV.2.1.2 La résistance à la compression	56
IV.2.1.3 formules de calcul	58
IV.2.2 Résultats	59
IV.2.2.1 Mortier témoin.....	59
IV.2.2.2 Mortier à basse de fibre de polymère	59
IV.2.2.3 Mortier à basse de fumée de silice	60
IV.2.2.4 Mortier min poly 0.2% avec max F-S 5%	60
IV.2.2.5 Mortier max poly 0.26% avec min F-S 2%:.....	60
IV.2.2.6. Résistance à la traction	61
IV.2.2.7. Résistance à la compression	63
IV.3 Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références bibliographies	69

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les mortiers

Figure I.1 Mélange de mortier.....	3
Figure I.2 Le ciment.	4
Figure I.3. Le sable.....	9
Figure I.4. Différents ajouts cimentaires	12
Figure I.5. Une calcite dans le système rhomboédrique.	13
Figure I.6. Le mortier-ciment.....	17
Figure I.7. Le mortier-hydrofuge	18
Figure I.8. Le mortier réfractaire.....	18
Figure I.9. Le mortier de chaux.....	19
Figure I.10. Le mortier-colle	20
Figure I.11. Les joints de maçonnerie	21
Figure I.12. Les enduits.....	21
Figure I.13. Les chapes.	22

Chapitre II : Les fibres et les bétons de fibre

Figure II.1. Exemples de fibres : organique, métallique et céramique.....	26
Figure II.2 Fibre d'inox.....	30
Figure II.3 Micrographies de la poudre d'aluminium F3731.	32
Figure II.4.béton fibres.....	35
Figure II.5. Représentation schématique d'un matériau composite.....	35

Chapitre III : Caractérisation et identifications des matériaux

Figure III.1. Le sac de ciment Chamil.....	39
Figure III.2. Le sable utilisé.	40
Figure III.3. La masse volumique absolue (éprouvette graduée).....	41
Figure III.4. Essai de la masse volumique apparente.....	41
Figure III.5. Équipements d'analyse granulométrique.....	42
Figure III.6. Essai d'équivalent de sable	44
Figure III.7. Courbes granulométriques de sable (Guelta).....	45
Figure III.8. Courbe de foisonnement du sable.....	45
Figure III.9. le sac de siltek Powder.....	48

Figure III.10.de fibre polymère	49
Figure .III.11 Préparation et Huilage des moules.....	53
Figure III.12. Remplissage et vibration des moules en mortier.	53
Figure III.13 moules remplis en mortier.	54
Figure III.14 : Malaxeur pour mortier.	54

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 Essai de Traction.	56
Figure IV.2 Machine de traction.	57
Figure IV.3 : Essai de compression.....	58
Figure IV.4 machine de pression.....	58
Figure IV. 5 résistances de traction déférente type de mortiers à 14 jours et à 28 jours (MPa).....	61
Figure IV. 6 résistances de compressions déférentes types de mortier à 14 jours et à 28 jours (Mpa).....	63

Liste des Tableaux

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre I : Généralités sur les mortiers

Tableau I.1. Les quatre principaux constituants du clinker.....	5
Tableau I.2. Les notations cimentière qui simplifier l'écriture des phases solides.....	5
Tableau I.3. Les différents types de ciments courants.	8
Tableau I.4. Différentes actions des adjuvants.....	11

Chapitre II : Les fibres et les bétons de fibre

Tableau II.1 Les familles de fibres.....	27
Tableau II.2 Caractéristiques des polymères thermodurcissables ^[18]	28
Tableau. II.3 Caractéristiques des polymères thermoplastiques ^[18]	29
Tableau II.4 caractéristiques de l'aluminium.....	31
Tableau II.5 Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base ciment	33

Chapitre III : Caractérisation et identifications des matériaux

Tableau III.1. Propriétés chimique du ciment.....	37
Tableau III.2 Compositions minéralogique du clinker.....	37
Tableau III.3 Propriétés physiques du ciment.....	38
Tableau III.4 Temps de début et de fin de prise du ciment utilisé.....	38
Tableau III.5 Propriétés mécaniques du ciment.....	38
Tableau III.6.masses volumiques apparents et absolues des sables étudiés.....	40
Tableau III.7.représentant respectivement les résultats de l'analyse granulométrique de sable par tamisage.....	43
Tableau III.8. Les données techniques de la fumée de silice.....	46
Tableau III.9.analyse chimique de fumée de silice.....	46
Tableau III.11 Caractéristique de master fibre.....	49
Tableau III.12. Composition de l'eau de gâchage (mg/l).....	50
Tableau III.12 Composition des cinq types de mortier formulés.....	51

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1: Les Résultats du mortier ordinaire témoin (14 jours et à28 jours).....	59
Tableau IV.2: Les Résultats du mortier à basse de fibre polymère (14 jours et à 28 jours). ...	59

Tableau IV.3: Les Résultats du mortier à basse de fumée de silice 3.5% (14 jours et à 28 jours).....	60
Tableau IV.4 : Les Résultats du mortier min poly 1.2g avec max de fumée de silice 5% (14 jours et à28 jours).....	60
Tableau IV.5 : Les Résultats du mortier max poly 0.26%avec max de fumée de silice 2% (14 jours et à 28 jours).....	61

Introduction Générale

Introduction Générale

Le mortier est un matériau de construction les plus utilisés dans le monde, divers domaines à savoir. Bâtiments, ouvrages d'arts, construction spéciales. Ils sont composés essentiellement de liants hydrauliques, de granulats, d'eau et parfois des adjuvants et des additifs. L'utilisation de matériaux de renforcement ou de recyclage à pour objectif soit pour augmenter les performances, soit pour minimiser les couts soit les deux à la fois. Néanmoins cette procédure nécessite des études et des essais pour confirmer ou abandonner une telle idée ou résultat.

L'amélioration de la qualité de mortier et la réponse à des besoins de construction par l'introduction de nouveaux matériaux présentent des caractéristiques de sécurité, de confort et d'économie est l'objectif de des recherches actuelles.

L'étude entreprise de ce mémoire vise à atteindre un objectif principal c'est l'amélioration des caractéristique mécanique et physique du mortier par les l'ajout d'un pourcentage fixe de fibre polymère et le fumée de silice, on ajoute de fibre polymère et fumée de silice au mortier pour diminué la porosité et améliorer la résistance mécanique, notre travail réalisé au cours de la préparation de ce mémoire est présenté en deux grandes parties :

Cette étude est articule en quatre chapitres :

La première partie est une étude bibliographique et elle comprend deux chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre présente des généralités sur le mortier : définition les composants du mortier ses propriétés et caractéristiques de mortier.

Dans le 2^{ème} chapitre représente une généralité sur la fibre, la fibre polymère ainsi que le béton de fibre et les adjuvantes, leurs définition, origines différents types, classifications ainsi que leurs avantages et inconvénients.

La deuxième partie est une étude expérimentale et elle comprend deux chapitres :

Dans le 3^{ème} chapitre comprend la présentation des matériaux utilisés dans la formulation des mortiers et leurs caractéristiques.

Dans le 4^{ème} chapitre nous avons présenté les résultats discutés ainsi que les conclusions retenues l'interprétation des résultats des essais.

La rédaction de ce travail se termine par une conclusion générale et les perspectives pour les futurs travaux.

Chapitre I

Généralités sur les mortiers

I.1 Introduction :

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

Dans ce chapitre on parle d'une manière générale sur les matériaux utilisés dans le mortier : Le ciment et ses caractéristiques, le mortier et ses différents types, l'eau utilisée, d'où fumée de silice et enfin la fibre polymère.

I.2. Le mortier

Le mortier est un matériau de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction, enduire un mur et autres. En général les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- liant (ciment ou chaux)
- eau
- sable
- adjuvants

La figure I.1, présente un mélange de mortier à l'état frais. Le mortier représente généralement une consistance plastique à très plastiques.



Figure I.1 Mélange de mortier.

I.2.1. Le ciment

Le ciment Portland est un matériau de construction réputé économique et de très bonne qualité. Suivant la norme EN 197-1, le ciment Portland est classé dans la catégorie CEM I. Polyvalent et économique ce type de ciment est très répandu dans l'industrie de la construction. Il convient à la fabrication de béton armé comme de béton précontraint où une résistance élevée est recherchée. Il s'emploie aussi pratiquement pour toutes les formes d'ouvrages et d'architecture compliquée.

Un ciment est dit naturel lorsqu'il résulte de la simple cuisson à température modérée (500 °C à 1200 °C) d'une marne ou d'un calcaire argileux (Ciment prompt et ciment romain). Il est dit artificiel (Ciment moderne appelé Ciment Portland) lorsqu'il résulte de la cuisson à plus haute température (1450 °C) d'un mélange moulu de calcaire de marne ou d'argile (figure I.2) .



Figure I.2 Le ciment.

Les Romains furent les premiers sans doute à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir au contact de l'eau.

Pour cela ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles d'où l'appellation bien connue de "pouzzolaniques" pour certains matériaux qui permettent de fixer la chaux en présence d'eau.

Restée longtemps ignorée cette réaction fut expliquée par Louis Vicat en 1817 qui établit la théorie sur l'hydraulicité de ce mélange. Ses travaux donnent les proportions précises de calcaire et de silice nécessaires pour réaliser le mélange qui après cuisson et broyage sera un liant hydraulique artificiel : le ciment. En 1824 Aspdin un Ecossais donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et atteignait la dureté de la pierre de la région.

La première usine de ciment a été créée par Dumont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Depuis l'industrie cimentière s'est considérablement développée avec des fabrications sans cesse améliorées. En 1870 il fallait 40 heures pour produire une tonne de clinker constituant de base du ciment. Aujourd'hui il faut trois minutes.

I.2.1.1. Chimie du ciment

Les quatre principaux constituants du clinker sont les suivants (tableau I.1) :

Tableau I.1. Les quatre principaux constituants du clinker.

le silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S)	50 à 70 %
le silicate bi calcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S)	15 à 30 %
l'aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	5 à 10 %
l'aluminoferrite tétra calcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	5 à 15 %

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes (tableau I.2):

Tableau I.2. Les notations cimentière qui simplifier l'écriture des phases solides.

Phases solides	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	H ₂ O
Notation cimentière	C	S	A	F	s	H

I.2.1.2. Constituants d'un ciment

On distingue les constituants principaux (matériau minéral représentant une proportion supérieure à 5 % en masse du mélange) et les constituants secondaires (matériau minéral représentant une proportion inférieure ou égale à 5 % en masse du mélange) [7].

a. les constituants principaux

On distingue sept grandes classes de constituants principaux :

- **le clinker Portland**

Il est obtenu par calcination d'un mélange fixé avec précision de matières premières contenant des éléments couramment exprimés en oxydes CaO SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 . Le clinker Portland est constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium de pratiquement un tiers en masse de phases contenant de l'aluminium et du fer ainsi que d'autres composants en très faibles quantités.

- **le laitier granulé de haut fourneau**

Il est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

- **les matériaux pouzzolaniques**

Ce sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses ou une combinaison de celles-ci. Les matériaux pouzzolaniques ne constituent pas par eux-mêmes des liants hydrauliques. Cependant lorsqu'ils sont finement broyés ils réagissent à température ambiante en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium dissous pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistance.

- **les cendres volantes**

Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcique. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques les secondes peuvent avoir en plus des propriétés hydrauliques.

- **le schiste calciné**

Il est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. Il contient des phases du clinker (silicate bi calcique et aluminate mono calcique) ainsi que des oxydes réagissant de façon pouzzolanique (SiO_2). Le schiste calciné finement broyé présente outre des propriétés pouzzolaniques des propriétés fortement hydrauliques.

- **le calcaire**

Le calcaire est une roche sédimentaire composée en grande partie ou entièrement de carbonate de calcium (CaCO_3).

- **la fumée de silice**

Elle provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages Ferro silicium. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse de silice amorphe.

b. Les constituants secondaires

Les constituants secondaires peuvent être des matériaux minéraux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants principaux sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment.

Ils permettent d'améliorer les propriétés physiques des ciments. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques latentes ou pouzzolaniques. De plus ces constituants ne doivent pas accroître sensiblement la demande en eau du ciment ni diminuer la résistance du béton ou du mortier à la détérioration et la protection des armatures contre la corrosion.

I.2.1.3. Différents types des ciments courants

Selon que des constituants autres que le gypse sont ou non ajoutés au clinker lors opérations de fabrication on obtient les différents types de ciments définis par la norme.

Le tableau (I.3) représente les différents types des ciments courants normalisés avec indication pour chacun d'eux de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent.

Tableau I.3. Les différents types de ciments courants.

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l'un de constituants suivant : laitier-pouzzolanes-endures-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
C PJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94%	de 6 à 20% de l'un quelconque des constituants sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	0 à 5%
CPJ-CEMII/B		65 à 79 %	de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	35 à 65 % de laitier de haute-fourneau	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CLK-CEMIII/C		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEMIV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35% de pouzzolanes cendres siliceuses ou fumées de silice ces dernières étant limitées à 10%.	0 à 5 %
CPZ-CEMIV/B		45 à 64 %	36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

I.2.2 Le sable

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de roches ou de récifs figure (I.3). Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents: minéraux variant selon la nature de la roche mère.

Le granite va par exemple donner :

- un sable riche en quartz micas et feldspaths.
- des débris calcaires de coquillage et de corail.
- d'autres éléments comme des déchets (bille de plastique).

Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler, il ne peut pas former de pentes stables de plus de 30°. Pour les géologues la notion de sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (la dimension des grains comprise entre 0,063 et 5 mm) et un aspect minéralogique (faisant référence à la nature des grains).



Figure I.3. Le sable

I.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage (figure I.4) joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux par réaction entre les constituants anhydres des ciments mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Donc, l'eau permet au ciment de faire prise et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. L'eau est un constituant très important pour la qualité d'un mortier ou d'un béton, alors trop d'eau (rapport E/C élevé) peut entraîner des conséquences négatives notamment pour la résistance.

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.

I.2.4. Les additifs

I.2.4.1. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les super plastifiants (haut réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges. D'après quelques études de recherches l'ajout des adjuvants peut provoquer quelques problèmes dans le mélange tel que :

- On ajoute les adjuvants qui servent à aérer en vue d'améliorer la maniabilité et la durabilité du mortier. Toutefois, des recherches ont démontré que des contenus d'air dans le mortier en excès de 12 % augmentent la probabilité que l'humidité y pénètre en plus de diminuer l'adhérence.
- On utilise quelque fois un antigel ou autre produit semblable pour abaisser le point de congélation du mortier afin de poser de la brique par temps froid. Toutefois, pour que cette méthode soit efficace, il faut ajouter une quantité considérable et cela diminue considérablement l'adhérence, en plus de contribuer à l'efflorescence et à l'effritement des surfaces du briquetage.
- Les accélérateurs comme le chlorure de calcium servent à accélérer l'hydratation du mortier par temps froid en vue d'éviter de chauffer les matériaux du mortier. Toutefois, le chlorure de calcium chlorite tend à corroder l'armature dans le mortier. Les accélérateurs, même ceux qui ne contiennent pas de chlorure de calcium, ont tendance à causer de l'efflorescence.
- Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique permettent habituellement d'obtenir une maçonnerie solide. Par contre, une mauvaise composition, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique

défectueuse ne peuvent pas être corrigées par l'emploi d'adjuvants. Selon l'effet recherché, on peut distinguer trois grandes familles d'adjuvants.

Tableau I.4. Différentes actions des adjuvants. [1]

Action	Rôle	Domaine d'emploi
La prise	Il diminue le temps ou prise ou durcissement du ciment.	Bétonnage pour temps froid, décoffrage rapide, travaux sous l'eau.
	Il augmente le temps de prise.	Bétonnage par temps chaud, avec coffrage glissant.
L'ouvrabilité	A teneur en eau égale, il augmente l'ouvrabilité du béton et mortier.	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	A même maniabilité, il augmente les résistances.	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	Il provoque un fort accroissement de maniabilité.	Fondation, dalles, raideurs, béton pompé.
Les résistances aux agents extérieurs	Il entraîne la formation de microbulles d'air uniformément.	Béton exposé au gel, bétons routiers
	Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers.	Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité.

1.2.4.2. Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

a. Les cendres volantes

Il existe quatre classes qui sont :

Classe F : moins de 10% de CaO ; Grande proportion de Silice et d'Alumine, structure: verre d'Aluminosilicate, Composition: cristaux de mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), quartz, hématite, magnétite.

Classe C : de 15 à 35% de CaO , Plus réactif que la classe F.

Classe F et C : 60 à 85% de verre ; 10% à 30% phases cristallines ; 10% carbone non calciné et diamètre de $1\mu m$ à $100\mu m$.

b. Le laitier de haut fourneau

Laitier acide: Pourcentage élevé de la silice fondue de 50 à 60%, Alumine et 25 à 30% de chaux. Le rapport pondéral (Silice/Chaux) ≤ 1.10 .

Laitier basique: Rapport pondéral: $\text{CaO/SiO}_2 \geq 1.3$, composé de 40 à 55% de CaO, 25 à 35% de SiO₂, 12 à 25% d'Al₂O₃.

c. Les pouzzolanes

Pouzzolane naturelle : L'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

Pouzzolane artificielle : Matière essentiellement composée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et de schiste cuit.

d. Les colorants

On peut donner la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6% du poids du ciment portland. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée. L'ajout d'une trop grande quantité de pigment diminuera la résistance et la durabilité. Le poids maximal de pigment ne devra pas dépasser, en poids, 1% du ciment, sauf dans le cas de noir de carbone qui ne devrait pas représenter plus de 2%.



Figure I.4. Différents ajouts cimentaires

(1: Cendre volante classe C, 2: métakaolin, 3: fumée de silice, 4: cendre volante classe F, 5: laitier, 6: schiste.

e. Les calcites

Ce sont des ajouts incolores de couleur blanche, jaune, brune, rouge, et noire. Elles se composent que de CaCO_3 , leur densité varie entre 2,6 et 2,8, leur Indice de réfraction varie entre 1,48 et 1,65. Elles éclatent dans la flamme et libèrent CO_2 , le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl .



Figure I.5. Une calcite dans le système rhomboédrique.

f. Les fillers : Ce sont des éléments fins de diamètre inférieur à 2 mm, provenant du concassage et de broyage de la roche naturel.

I.2.5. La fumée de silice :**I.2.5.1 Définition de la fumée de silice :**

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage. La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toute fois, compte tenu de la très grande finesse de ces additions et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne.

I.2.5.2 principes de fabrication

La fumée de silice est obtenue pendant la production du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. Certaines impuretés contenues dans les matières premières (alcalines par exemple) sont également réduites, volatilisées et oxydées dans le four.

I.2.5.3. Caractéristiques techniques et contrôle de production :

Les caractéristiques de la fumée de silice dépendent de plusieurs facteurs. Le type de production en four à arc (Si ou FeSi) peut par exemple influencer sur la teneur en SiO₂ et les différentes impuretés de la fumée de silice. Le mélange de réducteurs utilisé dans le four peut, quant à lui, conduire à des colorations différentes du produit (de gris clair à gris foncé), sans pour autant en changer les performances. Enfin, la dernière étape de densification permet d'ajuster la densité apparente du produit.

La fumée de silice se présente sous la forme de particules individuelles, avec un diamètre compris entre 50 et 200 nanomètres. Ces sphères contiennent majoritairement du SiO₂, avec des quantités variables en oxydes de Ca, Al, Na, K comme impuretés principales. La fumée de silice est un produit amorphe et non cristallin.

I.2.5.4. Les différents aspects d'une fumée de silice

La fumée de silice non densifiée (ND) a une densité apparente faible, ce qui rend sa manipulation difficile. Par un traitement de densification, il est possible d'augmenter sa densité apparente et ainsi faciliter son transport. La densité apparente dépend du mode de densification qui peut être mécanique (DM) ou pneumatique (DP). Elle est généralement comprise entre 400 et 650 kg/m³. En augmentant la densité du produit, on améliore la coulabilité et la manipulation du produit, mais on diminue sa capacité à se disperser dans l'eau. L'utilisateur doit donc trouver un compromis entre la manipulation et la dispersion potentielle du produit. La densification ne change pas les propriétés physico-chimiques du produit. La fumée de silice est aussi disponible sous une forme prête à l'emploi : le slurry, suspension aqueuse avec environ 50 % en masse de fumée de silice. Le slurry est un produit stable dans le temps, avec une basse viscosité et donc facile à pomper et à utiliser. Son procédé de fabrication conduit à un produit très finement dispersé dans l'eau et donc dans le béton lors du malaxage.

I.2.5.5. Mode d'utilisation

La fumée de silice est utilisée pour compléter et corrigé la courbe granulométrique d'une composition de mélanges hydrauliques, pour réduire le ressuage des bétons et principalement utilisée dans tous les bétons et les mortiers de hautes performances et dans la préparation de :

- coulis de protection ;
- coulis pour injection de consolidation ;
- coulis expansifs ;
- bétons et mortiers à haute résistance mécanique ;
- bétons et mortiers à haute imperméabilité ;
- bétons pré comprimés résistants à l'action chimique ;
- bétons et mortiers pour utilisation sous-marine, spécialement en milieu agressif ;
- Mortiers thixotrope pour réfection et réparation et dans toutes les configurations où il est demandé aux mortiers ou aux bétons des caractéristiques supérieures, telles que : Résistances

mécaniques ; Résistances chimiques ; Résistances à l'usure et à l'abrasion ; Imperméabilité ; Stabilité et cohésion ; Durabilité.

I.2.5.6. Avantages de la fumée de silice :

Performances à l'état frais :

a. Maniabilité :

Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression. Cette particularité offre en particulier les avantages suivants :

- Moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- Transfert par pompages ou pression possible sur de grandes distances ;
- Projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton projeté.

b. Performances à l'état durci :

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

c. Durabilité

L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins. L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer.

I.3. Types de mortier

Il est important de savoir qu'il existe de multiples types de mortiers plus ou moins adaptés en fonction des usages. Ils peuvent être classés selon leurs origines de fabrication en usine ou sur chantier comme suit :

I.3.1. Le mortier-ciment

Ils sont fabriqués à partir de ciment (figure I.6) notamment du type Portland ou Portland composé. Le ciment est lui-même un mélange de calcaire et d'argile broyé chauffé et réduit en poudre. Ce matériau reste utile pour toutes les constructions classiques (murs chapes etc.) qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il sèche également plus vite que la plupart des autres matériaux.



Figure I.6. Le mortier-ciment

I.3.2. Le mortier-hydrofuge

Comme son nom l'indique le mortier hydrofuge (figure I.7) est un mortier résistant à l'eau qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- Boucher des fissures.
- Enduire un mur.
- Réaliser des chapes.

On l'utilise dans les lieux humides (salle de bain extérieur etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches comme un bassin de piscine.



Figure I.7. Le mortier-hydrofuge

I.3.3. Le mortier réfractaire

Mortier au ciment fondu résistant à de hautes températures (jusqu'à 1 800 °C) pour la construction des fours (figure I.8) des foyers de cheminée [14]. Ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur.

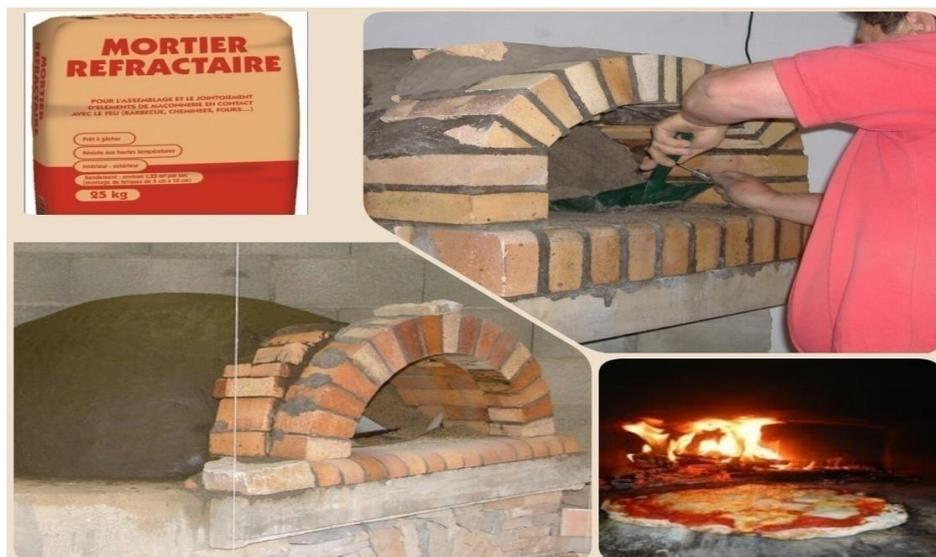


Figure I.8. Le mortier réfractaire.

I.3.4. Le mortier de chaux

Ce type de mortier à base de la chaux (figure 1.9) durcit plus lentement et se travail plus facilement. Sa structure peut être perméable. Il est obtenue par calcination du calcaire et il se divise en deux catégories principales : mortier de chaux hydraulique et mortier de chaux aérienne. La différence est que le premier peut durcit au contact de l'eau et de l'air et le deuxième durcit seulement à l'air. Ce type de mortiers est moins résistant par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux) ainsi sa durée du durcissement est plus lente par rapport à un mortier de ciments.



Figure I.9. Le mortier de chaux

I.3.5. Le mortier-colle

C'est un mortier adhésif qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol (figure I.10). Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement des carrelages muraux ou au sol ou encore des dalles. Il est utilisé en intérieur et en extérieur.



Figure I.10. Le mortier-colle

I.4. Les emplois des mortiers

I.4.1 Les joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), 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 (figure I.11) 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 jointoiment, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.



Figure I.11. Les joints de maçonnerie

I.4.2. Les enduits

Un enduit en construction consiste en une couche de mortier appliquée sur un mur (figure I.12) ou en extérieur sur le manteau d'isolation de ce mur. Le crépi est un enduit qui se fait sur une muraille avec du mortier ou du plâtre et qu'on laisse raboteux (relief picot) au lieu de le rendre uni.

Les enduits sont traditionnellement des enduits minéraux : des mortiers de ciment des mortiers de chaux et des plâtres.



Figure I.12. Les enduits.

I.4.3 Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface (figure I.13). 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). Une chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique .



Figure I.13. Les chapes.

I.4.4. Les scellements et les calages

La norme NF EN 1504-6 définit les mortiers de scellements. Grâce à une résistance très élevée, un mortier classé par cette norme permet de placer des ancrages (fixation de barres métalliques) fortement sollicités. Ils sont utilisés pour tout type de configuration. La norme NF P 18-821 définit les mortiers de calage. Ce type de mortier permet de définir un support résistant pour le calage de machines : centrifugeuses, turbines, etc. Ce mortier est également indispensable pour le calage de platines d'ancrage. Les opérations de scellement et de calage (figure I.14) s'effectuent à l'aide de mortiers utilisant des liants hydrauliques. Après un gâchage à l'eau, le mortier obtenu est de consistance très fluide. Il peut être utilisé pour tout type de scellement et de calage. Il existe plusieurs types de scellements de type et de calage :

- Calage d'équipements industriels divers.
- Calage de dalles et calage de rails.
- Calage de charpente, étanchéité et calage de tuyauterie.
- Calage de pompe et calage sous eau.
- Scellement de poutres poteaux et scellement d'ancrages.
- Scellement et calage de murs antibruit.
- Scellement en second œuvre et calage de joints de chaussée.
- Calage de massifs d'appareils d'appuis notamment et assemblage d'éléments bétons.



Figure I.14. Les scellements et les calages

I.5. Qualités d'un bon mortier

La qualité d'un bon mortier doit être assurée avant et après la mise en œuvre.

I.5.1. Homogénéité

Le sable et le liant doivent former une pâte compacte et bien homogène sans trace de ségrégation.

I.5.2. Ouvrabilité

Le mortier doit pouvoir se mettre en œuvre facilement. Cette qualité est liée à la précédente.

I.5.3. Prise assez lente

Le mortier doit pouvoir être utilisé pendant un temps assez long. La prise du liant ne peut commencer qu'au moins une heure après le gâchage. L'emploi d'un mortier bâtard donne lieu à des temps de prise plus longs que ceux qui correspondent au ciment considéré seul.

I.5.4. Adhérence

Le mortier doit bien adhérer aux éléments à enlier. Dans de nombreux cas il est intéressant voire nécessaire de mouiller les briques ou blocs de manière qu'ils n'aspirent pas l'eau du mortier. Un mortier trop sec n'accroche pas bien. Les blocs de béton cellulaire peuvent poser de sérieux problèmes à cet égard.

I.5.5. Faible retrait hydraulique

Le retrait est lié à la quantité d'eau de ciment employé au rapport E/C et aux conditions dans lesquelles s'effectuent la prise et le durcissement. Un important retrait hydraulique est source de fissuration et nuit fort à l'imperméabilité du matériau dans tous les cas éviter tout départ prématuré de l'eau.

I.5.6 Imperméabilité

Les mortiers ne sont pas parfaitement imperméables mais s'ils ont été dosés et mis en œuvre de manière à ce que l'homogénéité soit bonne et le retrait hydraulique faible (cette perméabilité peut être réduite).

I.5.7. Résistance à la compression

Sous cet angle il n'y a généralement pas de gros problème car dans la pratique les mortiers sont très rarement soumis à d'importantes sollicitations.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que le mortier est l'un des matériaux de construction de grande importance et d'utilisation dans la construction grâce à leur diversité. Une description détaillée de sa composition, de ses composés, de leurs utilisations ainsi que les exigences normatifs sont bien décrites dans ce chapitre. L'utilisation de quelques ajouts comme le filler calcaire dans le mortier à pour but tout simplement de savoir l'apport de ces derniers aux mortiers vis-à-vis la résistance ainsi que les coûts de production.

Chapitre II :

Les fibres et les bétons de fibre

II.1. Introduction

L'utilisation d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (béton, béton de sable ou mortier). Sans toutefois ignorer leur coût qui reste relativement élevé par rapport aux autres matériaux de construction traditionnels.

La variété dans la nature et la forme des fibres, fait que ces derniers présentent des caractéristiques différentes les unes des autres, selon les objectifs recherchés on peut faire a distinction suivante : les fibres organiques, les fibres métalliques et les fibres minérales [19]. Ces fibres présentent aussi des caractéristiques géométriques et mécaniques différentes, portent une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton traduite par des applications adaptées et spécifiques.

II.2. Les fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se distinguent par leur nature, leurs dimensions (diamètres, longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface (lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les fibres sont définies suivant quelles soient naturelles ou artificielles et leur choix dépend de l'usage recherché. Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m³ de béton.



Figure II.1. Exemples de fibres : organique, métallique et céramique.

II.2.1 Nature des fibres

Selon la nature et les objectifs recherchés on peut faire la distinction suivante : les fibres organiques, les fibres métalliques et les fibres minérales (Tableau II.1) [19].

Tableau II.1 Les familles de fibres [18].

Familles de fibres	Matériaux	Caractéristiques
Fibres organiques	Acrylique, Aramide, Carbone, Kevlar, Polyamide Polypropylène/Polyéthylène, Polypropylène	Réduction de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques). Fibres souples, ce qui améliore leur ouvrabilité. Peu résistantes aux températures élevées (140-170°C maximum).
Fibres métalliques	Acier, Fonte, Inox	Bonne résistance à la flexion, à la traction et à la rupture. Réduction de la dimension des fissures.
Fibres minérales	Basalte, Mica, Verre, Wollastonite	Excellente tenue au feu (800°C maximum). Bonne isolation thermique. Permet la fabrication de parois très minces.

II.2.1.1. Fibres organiques

On peut citer particulièrement les fibres suivantes :

Organiques et métalliques qui seront utilisées dans notre travail. Ainsi, les deux types fibres organiques qui sont actuellement utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes:

- **Résines Thermo Durcissables (TD)**

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

➤ *Les polyesters insaturés* : ce sont les résines les plus utilisées dans les applications grandes diffusion GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide et polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles

présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

➤ *Les vinylesters* : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.

➤ *Les résines époxy (ou époxydes)* : constituent la résine type des composites hautes performances HP.

➤ *Les résines phénoliques* : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en oeuvre ;

➤ *Les polyuréthanes* : ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule.

On donne dans le tableau II.2 quelques caractéristiques relatives à quelques polymères thermodurcissables :

Tableau II.2 Caractéristiques des polymères thermodurcissables [18].

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction Gpa	Module de flexion Gpa	Tenue à la chaleur continue
Polyester(UP)	1.2	-	3	120
Vinyl-ester	1.15	-	3.5	140
Phénolique	1.2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1.1-1.4	50-90	3	120-200
Polyuréthane(pu)	1.1-1.5	20-50	1	100-120
Poly-imide	1.3-1.4	30-40	4	250-300

• **Résines Thermo-Plastiques (TP)**

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Sont classées généralement en trois catégories :

➤ *Les polymères dits de “grande diffusion”*, dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais bénéficient d'un coût compatible avec une production en grande série.

➤ *Les polymères dits “d’utilisation technique”*, dont les propriétés mécaniques sont supérieures aux polymères de grande diffusion et qui sont utilisés pour des objets industriels courants comme les pièces de structures.

➤ *Les polymères dits de “hautes performances”*, présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important.

Le tableau 2.3 donne quelques caractéristiques de quelques fibres Thermoplastiques (TP).

Tableau. II.3 Caractéristiques des polymères thermoplastiques ^[18].

Polymère	Masse spécifique(kg/dm)	Resistance a la traction Gpa	Module de la flexion Gpa	Tenue a la chaleur continue C°
Polypropylène (pp)	1.1-1.2	20-30	1-1.6	85-115
Polypropylène butyénique(PBT)	1.5	45-55	2.5-2.6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1.6	55-75	2-2.2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO)	1.3	55-65	2.4-2.6	80-105
Polyoxyméthylène(POM)	1.6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1.3-1.4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1.3-1.4	195	4.9	275
Polyéther-imide (PEI)	1.5	105	3	170
Polyéther-sulfone(PES)	1.6	85	2.6	180
Polyéther-éther- cétone(PEEK)	1.5	100	3.7	>240

II.2.1.2. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques combinent la souplesse d'une fibre textile traditionnelle à la résistance aux hautes températures de l'acier. Elles sont également utilisées pour leur conductivité thermique et électrique ainsi que leur résistance à la corrosion. Ils sont divisés en trois grandes catégories :

- Fibre d'acier ;
 - Fibre d'inox ;
 - Fibre d'alliage amorphe.
-
- **Fibre d'inox**

La fibre d'inox est une fibre textile appartenant aux fibres techniques. Elle peut être utilisée dans de très nombreux domaines tels que le transport, l'industrie, la filtration. Ces fibres sont obtenues par tréfilages successifs, elles peuvent être frisées ou non à l'issue de cette opération. L'alliage que nous utilisons majoritairement est l'**AISI 316L**.



Figure II.2 Fibre d'inox

- **Fibre d'aluminium**

L'aluminium est en règle générale, trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel: on le trouve sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents. Son minerai principal est la bauxite : il y est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite ^[18].

Tableau II.4 caractéristiques de l'aluminium

Symbole :	Al
Numéro atomique :	13
Masse atomique :	27 g/mole
Réseau cristallin :	structure cubique à faces centrées
Température de fusion :	660°C
Température d'ébullition :	2056° C
Masse volumique à 20°C :	2,7 g/cm ³
Conductibilité thermique à 20 °C :	240 W /m °C
Pouvoir réflecteur (aluminium poli) :	85 à 90 % dans le spectre visible, 90 à 98% dans l'infrarouge
Module d'élasticité	67 000 MPa

L'aluminium présente les avantages suivants :

- **Légereté** : L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96 g/cm³).
- **Résistance mécanique** : L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise. A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.
- **Résistance à la corrosion** : L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).
- **Conductivité thermique** : L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules). A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.
- **Ductilité, malléabilité** : L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.
- **Imperméabilité, effet barrière** : Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De

plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

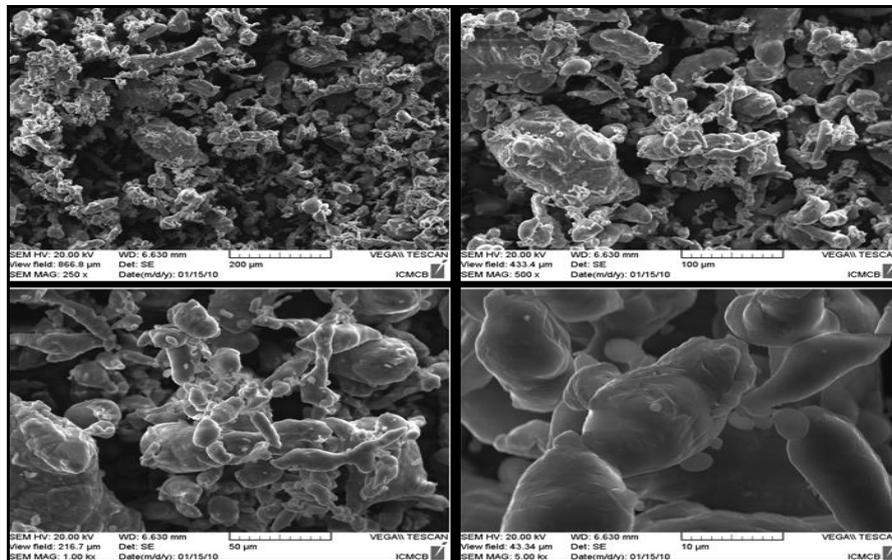


Figure II.3 Micrographies de la poudre d'aluminium F3731.

II.2.2 Utilisation des fibres dans la construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau II.5 résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires. L'utilisation des fibres de carbone dans le renforcement des ciments est relativement ancienne, utilisées dans des éléments ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, planché d'échafaudage...etc.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polypropylène, d'acier, de Verre, végétales et d'Amiante sont de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines représentés respectivement dans le tableau II.5.

Tableau II.5 Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base ciment .

Type de fibre	Applications
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
polymère	dallages et aménagements urbains ; produits préfabriqués (parements) ; mortiers projetés ; enduits ; sculptures, Voussoirs de tunnels.
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, plancher d'échafaudage
Végétale	Dalles, tuiles.

II.2.3 Le rôle des fibres

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- la cohésion du béton frais.
- la déformabilité avant rupture.
- la résistance à la traction par flexion.
- la ductilité et la résistance post fissuration.
- la résistance aux chocs.
- la résistance à la fatigue.
- la résistance à l'usure.
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
- la tenue au feu.
- la résistance à l'abrasion.

II.3. Le béton fibré

Le béton de fibre ou fibré est un béton de composition ordinaire dont on ajoute des fibres. Lors de la formulation, des fibres sont ajoutées et doivent être bien réparties d'une manière homogène. Ces fibres, de composition diverse, permettent d'obtenir un béton amélioré qui peut convenir à de nombreux usages. Comme déjà indiqué ci-dessus, . Il est composé d'un renfort qui a pour rôle d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques . L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure, ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes d'où le terme « matériaux innovants ».

Cette structure composite à aussi d'autres objectifs :

- *Pour le béton fibré métalliquement* : l'objectif est de remplacer complètement ou partiellement les armatures traditionnelles, ce qui facilite l'application du béton. Pas de découpe ni de manipulation de ferraille à prévoir. De plus, elles ont aussi la capacité d'offrir au béton certaines propriétés telles qu'une résistance au feu augmentée ou une diminution des risques de fissuration.
- *Pour les fibres organiques* : quant à elles, améliorent le comportement du béton au jeune âge. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités.

Mais il est bon de savoir que ces fibres lui confèrent également d'autres caractéristiques qu'on ne retrouve pas chez les autres bétons. Parmi ces caractéristiques on peut citer :

- *Résistance à la flexion et ductilité* : les fibres améliorent la ductilité du béton. Autrement dit, elles permettent au béton fibré de se déformer sans se rompre.
- *Résistance à la fatigue* : les fibres rendent également le béton plus résistant sur le long terme en limitant la fissuration du matériau.
- *Résistance à l'abrasion* : l'abrasion est un phénomène d'usure provoqué par des frottements répétés, pouvant provoquer la fissuration du matériau. Le fait d'incorporer des fibres au béton permet donc d'améliorer la résistance à l'abrasion et par conséquent de limiter la fissuration.
- *Possibilité de construction* : Les différentes propriétés de ces fibres rendent possible la construction d'ouvrages confrontés à des contraintes plus élevées.



Figure II.4. béton fibres

II.3.1 Composition du béton fibré

La composition du béton fibré est très proche de celle du béton ordinaire. Lors de la formulation de béton fibré, la quantité de fibre varie selon l'application et le type de fibre. De plus, avant d'ajouter des fibres, on doit assurer la compatibilité des fibres avec les autres matériaux du mélange. Pour obtenir une maniabilité correcte, les bétons fibrés ont souvent besoin d'adjuvants tels que les super-plastifiants. Ces derniers permettent d'obtenir un béton ouvrable, même en présence de fibres. Le béton fibré peut se faire livrer de la même manière que le béton ordinaire. On peut l'appliquer sur le chantier à partir de la goulotte d'un camion-toupie, d'un camion-tapis voire même d'un malaxeur-pompe.

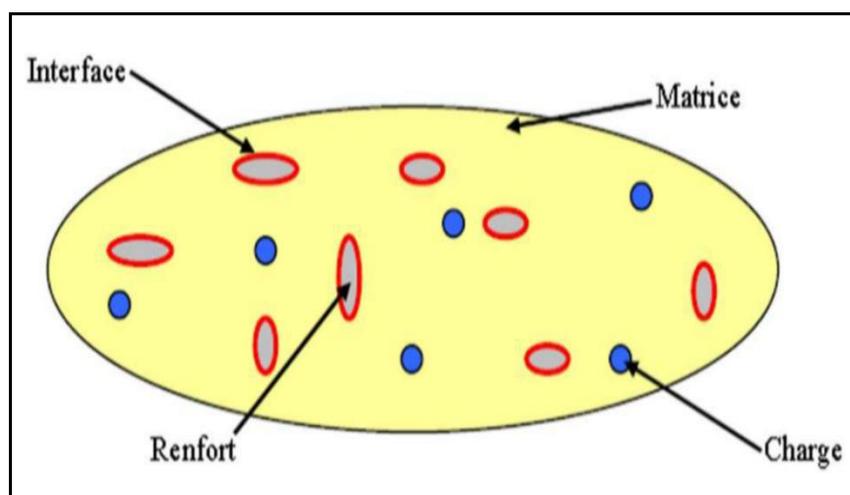


Figure II.5. Représentation schématique d'un matériau composite.

II.4. Conclusion

Ce deuxième chapitre est essentiellement consacré à la description de l'organisation interne des matériaux composites (fibres et matrice). Nous avons vu qu'il existe plusieurs type de fibres qui peuvent être utilisé comme renfort dans le béton. Les fibres sont structurées à plusieurs échelles. De point de vue expérimental, il est nécessaire de trouver des techniques d'investigation qui permettent de les caractérisées. On peut dire que l'incorporation d'une grande quantité d'ajout de fibre au ciment ne modifie pas grandement les performances mécaniques de base du ciment.

Chapitre III :

Caractérisation et identifications des matériaux

III.1 Introduction

Le choix et la sélection des matériaux est une étape très importante dans la fabrication d'un nouveau matériau pour répondre à des exigences de qualité, indiquées par une ou plusieurs normes. Dans ce chapitre on s'intéresse à la présentation des matériaux utilisés (ciment, sables, fumée de silice et les fibres de polymère,) par la réalisation de différents essais expérimentaux (physiques, chimiques et mécaniques) effectués au sein du laboratoire de matériaux de construction et laboratoire de projet de fin d'étude au niveau de notre ----- département de Génie Civil.

III.2 Caractéristiques des matériaux

La détermination des dosages optimaux ainsi que l'illustration des certains interprétation ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien choisi, bien caractérisés et analysés en fonction des essais normalisés.

III.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé pour les différentes compositions est un ciment portland de classe CEM II/A-L 42,5N de la cimenterie de Lafarge. C'est un ciment certifié conforme à la norme Algérien (NA442) et la norme européenne (EN197-1) [20]. Il est livré dans des sacs de 50 kg.

Leurs propriétés chimiques et physiques sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau III.1. Propriétés chimique du ciment.

Perte au feu(%) (NA5042)	Teneur en sulfate(SO ₃)%	Teneur en oxyde de magnésium MgO%	Teneur en chlorures(NA5042)%
13.0 ± 2	2.5 ± 0.5	1.7 ± 0.5	0.02-0.04

Le tableau III.2 représenté la composition minéralogique du clinker.

Tableau III.2 Compositions minéralogique du clinker

C3S(%)	C3A(%)
60 ± 3	7.5 ± 1

Tableau III.3 Propriétés physiques du ciment.

Consistance normale (%)	27 ± 2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4300 à 5500
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤ 3

Prise du ciment

La durée de prise d'un ciment (norme NF P15-414) est généralement caractérisée par :

- Le temps de début de prise.
- Le temps de fin de prise.

Tableau III.4 Temps de début et de fin de prise du ciment utilisé.

Début de prise (min)	150 ± 30
Fin de prise (min)	250 ± 50

Le tableau III.5. représenté les propriétés mécaniques du ciment.

Tableau III.5 Propriétés mécaniques du ciment.

2 jours (MPa)	≥ 10
28 jours (MPa)	≥ 43

Le ciment Chamil (figure III.1) est utilisé pour des constructions de masse. Il est utilisé pour tous les travaux courants qui ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton, qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol et qui n'exigent pas des hautes résistances mécaniques [20].



Figure III.1. Le sac de ciment Chamil

Les principales applications de ce ciment sont :

- Ouvrages en béton armé ou non.
- Bétons autoplaçants.
- Dallages, sols industriels, chapes.
- Fondations ou travaux souterrains.
- Voirie et chaussée en béton.

III.2.2. Le sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable naturel, provenant de la carrière de Guelta Laghouat, 291 Km de la wilaya de TIARET.

Les essais d'identification ont été réalisés selon les normes algériennes et les normes européennes.



Figure III.2. Le sable utilisé.

III.2.2.1. Masses volumiques

On appelle masse volumique, la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (pores et vides compris), caractérisée par le rapport entre la masse au repos et son volume naturel [12].

a. Masse volumique absolue

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de la matière par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (rhô) [12]. La masse volumique est un indice pour savoir et faire le choix d'un matériau par rapport à un autre.

La Méthode de mesure est celle de l'éprouvette graduée (norme NA 255), elle est très simple et très rapide. Il consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau, Peser un échantillon sec M de sable (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le liquide monte dans l'éprouvette soit V_2 [21]. La différence de volume ($V_2 - V_1$) représente le volume réel du matériau (figure III.3).

Tableau III.6. masses volumiques apparents et absolues des sables étudiés.

La masse volumique apparente g/cm^3	la masse volumique absolue g/cm^3
1.26	2.35



Figure III.3. La masse volumique absolue (éprouvette graduée)

b. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules [21]. Il suffit de remplir un volume de 1dm^3 , et en déterminer sa masse. (Figure. III.4)



Figure III.4. Essai de la masse volumique apparente.

III.2.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage c'est l'ensemble des opérations qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (NA 456 équivalente à EN 933-8). Le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis. L'équipement nécessaire pour l'analyse granulométrique est des tamis qui sont constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisés. La colonne de tamis est placée dans une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire [12], [21]. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille qui est la grandeur de l'ouverture carrée. Figure (III.5).



Figure III.5. Équipements d'analyse granulométrique

Tableau III.7. représentant respectivement les résultats de l'analyse granulométrique de sable par tamisage.

Ouvert tamis {mm}	Masse des refus cumulés (ri) (gr)	%refus cumulés Ri/Ms*100	%tamisât cumulés (100*(Ri/Ms)-100
5		00%	00%
4	7	1	99
2	17	3	97
1	35	7	93
0.500	114	23	77
0.400	177	35	65
0.315	305	61	39
0.200	461	92	08
0.100	487	97	03
0.080	495	99	01

III.2.2.3. L'équivalent de sable (la norme NF P 18 -598) :

C'est un indicateur caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains [12]. Ce qui correspond à un sable propre ou non. L'essai et selon la norme (NA 456 équivalente à EN 933-8) consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable (figure III.6). Après 20 min, les hauteurs (du sable propre et total (sable propre et flocculat) sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport entre ces deux hauteurs, exprimé en pourcentage [21].



Figure III.6. Essai d'équivalent de sable

On a conclu après tous les essais d'identification fait au niveau de laboratoire que ce sable est un sable de granulométrie à majorité de grains fins, avec une classe granulaire ($d/D = 0/3\text{mm}$) figure 2.7, de module de finesse égale à 1.9 et un pourcentage de fine égale à 0.6%.

Sa masse volumique apparente de l'ordre de 1370 Kg/m^3 et la masse volumique absolue est d'ordre 2500 Kg/m^3 . Les valeurs optimales de foisonnement (Masse volumique optimale $M_v = 925 \text{ kg/m}^3$, teneur en eau optimale $w = 5\%$), figure (III.8).

Ce sable présente un équivalent de sable ($ES = 65\%$) qui indique que c'est un sable grossier selon la spécification, utilisable pour un béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.

Comme conclusion sur ce matériau, le sable choisi de Guelta est un sable utilisable pour fabriquer les bétons et les mortiers pour des constructions de Génie civil.

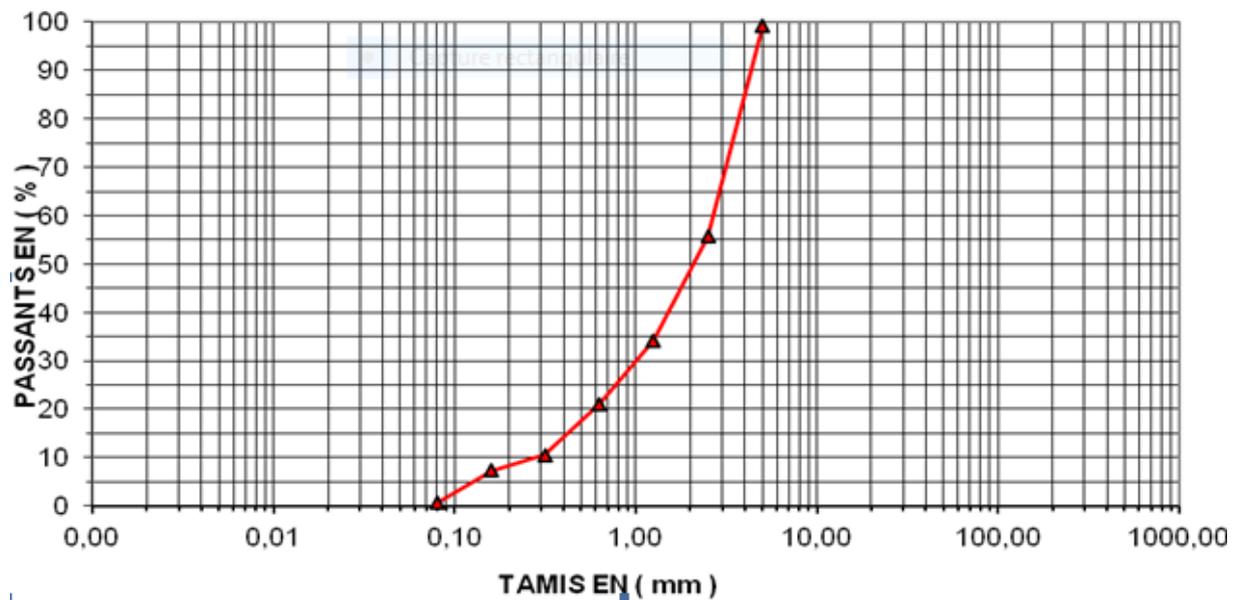
Granulométrie des agrégats.

Figure III.7. Courbes granulométriques de sable (Guelta).

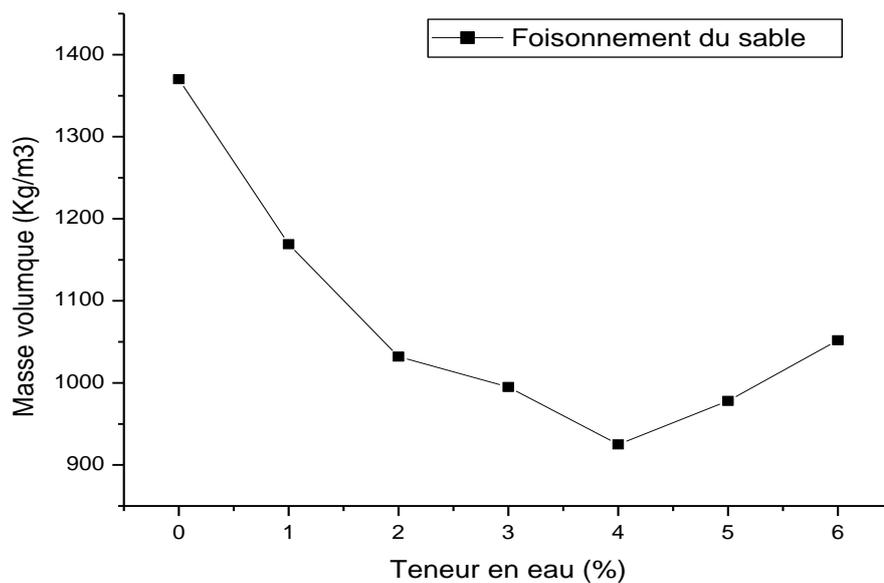


Figure III.8. Courbe de foisonnement du sable

III.2.3. La fumée de silice

C'est un produit en poudre, constitué par une excellente silice active micronisée, communément appelée « fumée de silice ». La fumée de silice utilisée est de type SILTEK POWDER caractérisée par sa haute composition en silice et micro silicates actifs et par sa

grande surface spécifique. Elle est considérée, aujourd’hui, comme l’un des meilleurs produits à haute activité pouzzolanique.

La fumée de silice utilisée provienne de l’usine TEKNACHEM zone industrielle de sidi Bel Abbès.

Tableau III.8. Les données techniques de la fumée de silice [22].

Etat physique	Poudre
Couleur	Argent
Granulométrie	De 0, 05 à 0, 15um
Densité [g/cm ³ à20°C]	Environ 0, 3
Solubilité dans l’eau	Insoluble

Tableau III.9.analyse chimique de fumée de silice [22].

Composant	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Ai ₂ O ₃
Teneur [%]	95%	<0,5%	<1%	<1%	<0 ,5%

La marge de dosage moyenne est de 3 à 5 % du poids du ciment en fonction du mélange et des caractéristiques voulue. D’autres dosages peuvent être utilisés, après des essais préliminaires.

III.2.3.1. Caractéristique de la fumée de silice :

SILTEK POWDER est constitué de 93 à 98% de particules sphériques de SiO₂ amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c’est ainsi que sa surface spécifique s’élève à environ 220.000 cm²/g (Blaine).cette caractéristique lui permet de capter et de fixer l’hydrate de calcium [Ca(OH)] et de le transformer en un premier temps, en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et irréversible.

Cette particularité permet de modifier le comportement des bétons à l’état humide, comme à l’état durci.

III.2.3.2. Action de SILTEK POWDER

Pour obtenir une bonne maniabilité des bétons, il faut utiliser une quantité d'eau toujours supérieure à celle nécessaire pour hydratation du ciment. Ce qui amène, à la pâte durcie, la formation de capillaires et cavités. Ces dernières sont d'autant nombreuses que la quantité d'eau élevée. En outre, durant la dilatation, il se forme une certaine quantité de chaux libre qui se dépose dans les cavités disponibles. Ce comportement rend vulnérable, par effet d'agents externes, le conglomerat durci, en réduisant la durée de vie.

SILTEK POWDER, ajout au mélange, en raison de 2 à 5% du poids du ciment, capte et réagit avec la chaux libre, et remplit ainsi les vides présents dans la pâte cimentaires, ce qui rend plus compact, plus imperméable et plus résistant le conglomerat et par conséquent plus durable et avec un meilleur aspect.

III.2.3.3 Mode d'utilisation

S'il tek Powder est principalement utilisé dans tous les bétons et les mortiers de hautes performances. Elle est utilisée dans la préparation de [22]:

- Coulis de protection.
- Coulis pour injection de consolidation.
- Coulis expansifs.
- Bétons et mortiers à haute résistance mécanique.
- Bétons et mortiers à haute imperméabilité.
- Bétons pré comprimés résistants à l'action chimique.
- Bétons et mortiers pour utilisation sous –marine, spécialement en milieu agressif.
- Mortiers thixotrope pour réfection et réparation.

Et dans toutes les configurations ou il est demandé aux mortiers ou bétons des caractéristiques supérieures, telles que :

- Résistances mécaniques.
- Résistances chimique.
- Résistances à l'usure et à l'abrasion.

- Imperméabilité.
- Stabilité et cohésion.
- Durabilité.

Il est aussi utilisé pour réduire le ressuage des bétons.

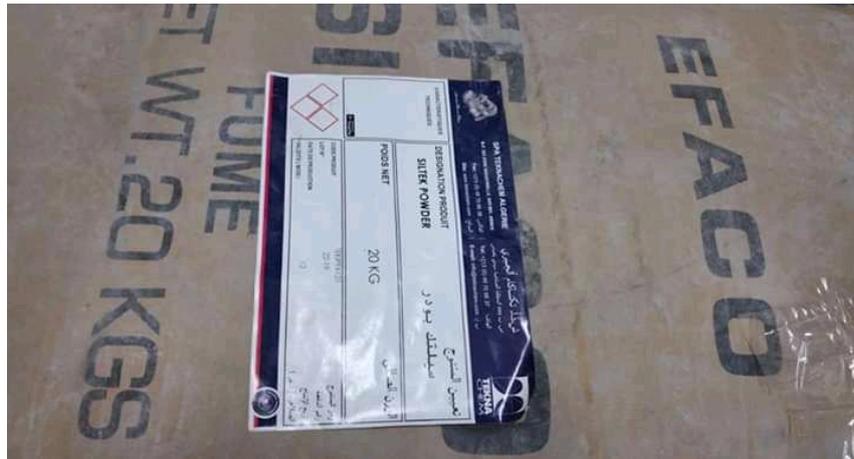


Figure III.9. le sac de siltek Powder.

Elle doit être stockée dans un endroit sec et dans les sacs d'emballage d'origine, parfaitement fermés, le SILTEK POWDER à une validité de 12 mois. Il est disponible en Big-bangs de 500kg et sacs de 6 kg.

III.2.4. Master Fibre

Les masters fibre sont des fibres polypropylènes monofilament agglomérées en flocons avec un apprêt hydrosoluble (figure III.10), conçues pour une utilisation dans un milieu cimentaire.

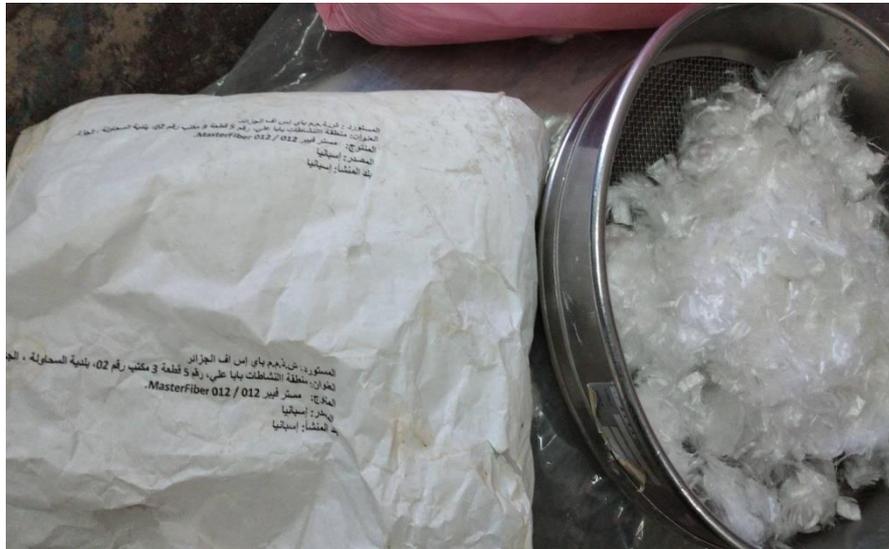


Figure III.10.de fibre polymère

Les applications des masters fibre sont très nombreuses [23] :

- Dallages.
- Ouvrages hydrauliques tels que réservoirs, bassins et canaux.
- Eléments préfabriqués.
- Béton projetés.
- Mortiers de réparations.
- pistes.

Tableau III.11 Caractéristique de master fibre [23].

Longueurs	Densité	Conductivité électrique
18 et 12mm	0,91	nulle

III.2.5. Eau de gâchage

Dans cette étude l'eau utilisée pour les différents mélanges de mortier est issu directement de robinet, distribuée par le réseau du service public de la ville de Tiaret (Algérie). Les résultats de l'analyse chimique de cette eau ont été représentés dans le tableau 2.8. Elle répond aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211, 2003).

Tableau III.12. Composition de l'eau de gâchage (mg/l).

Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PH	Zn ⁺²	SO ₃ ⁻²
75	0	7	0	0

III.2.5.1. Importance du rapport eau/ciment

Les dosages de l'eau et du ciment sont deux facteurs importants. En effet, l'ouvrabilité et la résistance sont grandement affectées par ces deux paramètres. Plus le rapport eau/ciment est grand, plus l'ouvrabilité sera grande. En effet, plus il y a d'eau, plus le béton aura tendance à remplir aisément les formes. Le rapport des masses E/C « moyen » est normalement fixé à 0,55. C'est ce rapport qui est le plus souvent utilisé, car le béton obtenu dispose d'une assez bonne ouvrabilité, tout en ayant une bonne résistance.

Le phénomène de ressuage est dû à un rapport eau sur ciment trop élevé. Il se manifeste par l'apparition d'une flaque au-dessus du béton frais. Au niveau des granulats, on observe la présence d'eau à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. La résistance en est réduite, car l'eau s'évapore et il y a des vides entre le granulat et la pâte.

III.3. Méthodes d'élaboration

III.3.1. Formulation des mortiers

Vu la période exceptionnelle de la pandémie covid-19 (fermeture de laboratoire de projet de fin d'étude durant une période de 7 mois) sept types de mortier seulement ont été formulés qui sont les suivants :

- mortier témoin, Noté M 1 ;
- mortier avec fibre polymère 0.2% Noté M2 ;
- mortier avec fibre polymère 0.26% Noté M3 ;
- mortier avec fumé de silice 3.5%, noté M4

- mortier avec fumé de silice 5%, noté M5 ;
- mortier avec min poly=0.20% avec max FS.5%, noté M6;
- mortier avec max poly.=0.26% avec min FS 0.2%, noté M7 ;

III.3.2. Composition des mortiers

Le tableau III.12.représente la composition des sept types de mortier formulés

Tableau III.12 Composition des cinq types de mortier formulés.

Mortier	Notation	Ciment (g)	Sable (g)	Eau ml	Polymère (g)	F. Silice (g)
Mortier témoin	M1	675	1350	338	00	00
Mortier avec minimum fibre polymère (0.2 %)	M2	675	1350	338	1.2	0
Mortier avec maximum fibre polymère (0.26%)	M3	675	1350	338	1.5	0
Mortier avec fumé de silice (3.5%)	M4	675	1350	338	00	24
Mortier avec fumé de silice (5%)	M5	675	1350	338	00	34
minimum polymère (0.20%) Avec maximum FS (5%)	M6	675	1350	338	1.2	34
Maximum polymère (0.26%). avec minimum FS (3.5%à)	M7	675	1350	338	1.5	14

III.3.3. Malaxage des mortiers

Préparation du mortier :

On mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes selon les prescriptions décrites ci- dessous et conformément à la norme :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ;y verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

- Après 30s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivants.
- Puis mettre 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 60s.

III.3.4 : Préparation des éprouvettes :

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

- Enduire les faces latérales intérieures et le fond du moule d'une légère couche d'huile de décoffrage.
- Fixer le moule et la hausse sur la table à chocs.
- Remplir le moule (4x4x16), le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60s chocs à chaque fois.
- Araser la surface du moule avec la règle plate à araser.
- Etiqueter les moules (date/group....etc.) et couvrir la surface par une plaque de verre.
- Après 24heure ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C}\pm 1\text{C}$ jusqu'au moment de l'essai de rupture (noter les informations de l'étiquette sur les éprouvettes).
- Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2(ou 7 jours) et 28 jours.



Figure .III.11 Préparation et Huilage des moules.



Figure III.12. Remplissage et vibration des moules en mortier.



Figure III.13 moules remplis en mortier.



Figure III.14 : Malaxeur pour mortier.

III.4. Conclusion

Ce chapitre représente la partie la plus importante de notre travail de recherche qui présente en sa totalité un travail expérimental. Elle nous a permis de revoir une bonne partie des essais qu'on a vus durant notre graduation et de maîtriser encore mieux ces derniers : calcul et ajustement de la composition des mortiers, malaxage et confection des mortiers...etc. Le bon choix du programme expérimental reste la clé de réussite de ce travail.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter et discuter les résultats mécaniques de ces mortiers choix de la proportion de l'adjuvant et les essais mécaniques.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de travail pratique effectué au niveau du laboratoire de génie civil d'université Ibn Khaldoun Tiaret. Notre étude a pour objectif d'étudier les propriétés physico-mécaniques et la résistance des mortiers à base de la fumée de silice et de fibre polymère. Afin de voir l'influence de ces deux derniers sur les caractéristiques mécaniques des mortiers, les résultats ont été comparés avec ceux d'un mortier normal (témoin). L'ensemble des résultats qui représentent les moyennes calculées ont été mentionnées dans des tableaux et représentées sur des figures.

IV.2. Calcul et Résultats

IV.2.1. Calcul

IV.2.1.1. Résistance à la flexion (NF P 15-471)

La résistance à la traction des mortiers a été évaluée par des essais indirectes de flexion trois points effectués sur des éprouvettes prismatique de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$.

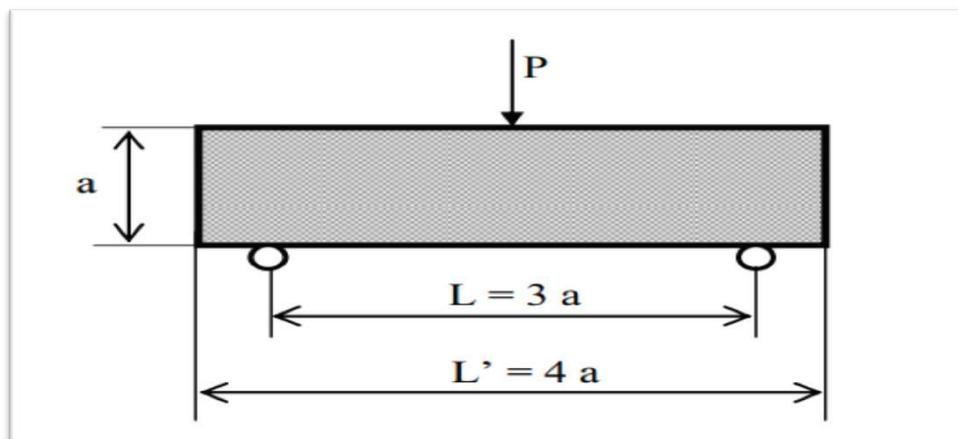


Figure IV.1 Essai de Traction.

Ainsi, si P est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $P L/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est:

$$Rf = \frac{1.5 \cdot P \cdot L}{b^3} \quad (\text{IV.1})$$

$L = 100 \text{ mm}$,

$P \text{ (N)}$,

$b^3 = 40*40*40$ (mm³) alors

$$R_f = 0.002 * P \quad (IV.2)$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion, elle est donnée en MPa (N/mm²)

R_f : est la résistance en flexion en Map ;

b : est le côté de la section carrée de prisme en millimètres (mm) ;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en newtons (N) ;

L : est la distance entre les appuis en millimètres (mm).



Figure IV.2 Machine de traction.

IV.2.1.2 La résistance à la compression (NF EN 196-1)

Les demi-prismes obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (IV.3)$$

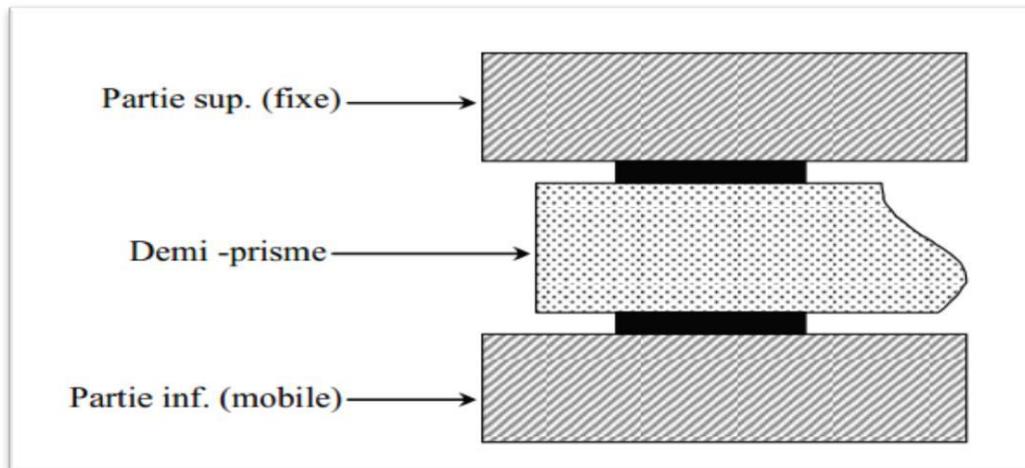


Figure IV.3 : Essai de compression.

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, elle est exprimé en MPa.

La moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.



Figure IV.4 machine de pression

IV.2.1.3 formules de calcul

Vu la période exceptionnelle de la pandémie Covid-19 (fermeture de laboratoire de projet de fin d'étude durant une période de 7 mois) comme déjà préciser précédemment, des essais mécaniques de traction et de compression ont été réalisés à l'âge de 14 jours à la place de 28 jours pour les mortiers (M2, M3, M4, M5) sauf le mortier témoin les essais ont été effectué à 28 jours et les résultats du jours « j » ont été calculé avec les relations suivantes :

- Résistance à la compression

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \text{ Pour } f_{cj28} < 40 \text{ MPa} \quad (\text{IV.4})$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1.4+0.95j} f_{c28} \text{ Pour } f_{cj28} > 40 \text{ MPa} \quad (\text{IV.5})$$

- Résistance à la traction

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \text{ si } f_{c28} < 60 \text{ MPa (pour } f_{t28}, j = 28 \text{ jours)} \quad (\text{IV.6})$$

IV.2.2 Résultats

IV.2.2.1 Mortier témoin

Les résultats des essais de flexion et de compression sur le mortier ordinaire témoin « mortier m1 » sont représentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Les Résultats du mortier ordinaire témoin (14 jours et à 28 jours).

Mortier	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	à 14 jours	à 28 jours	à 14 jours	à 28 jours
Témoin (M1)	1.54	1.82	25.55	30.06

IV.2.2.2 Mortier à basse de fibre de polymère

Les résultats des essais de flexion et de compression sur le mortier à basse de fibre polymère 1.2g « mortier m2 » sont représentés dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Les Résultats du mortier à basse de fibre polymère (14 jours et à 28 jours).

mortier	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	à 14 jours	à 28 jours	à 14 jours	à 28 jours
Polymère (0.2 %) (M2)	1.15	2.22	22 OU 23	27.05
Polymère (0.26 %) (M3)	1.62	2.5	27	31.76

IV.2.2.3 Mortier à basse de fumée de silice

Les résultats des essais de flexion et de compression sur le mortier à basse de fumée de silice 3.5% « mortier m3 » sont représentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Les Résultats du mortier à basse de fumée de silice 3.5%(14 jours et à28 jours).

Mortier	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	à 14 jours	à 28 jours	à 14 jours	à 28 jours
Fumée de silice 3.5% (M4)	1.55	3.88	52	54.73
Fumée de silice 5% (M5)	1.80	4.32	59	62.10

IV.2.2.4 Mortier min poly 0.2% avec max F-S 5%

Les résultats des essais de flexion et de compression sur le mortier min poly=1.2g avec max fumée de silice5% « mortier m4 » sont représentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Les Résultats du mortier min poly 0.2%avec max de fumée de silice 5%(14 jours et à28 jours).

Mortier	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	à 14 jours	à 28 jours	à 14 jours	à 28 jours
Min poly 0.2% max f-s 5% (M6)	1.52	4.02	54.25	57.10

IV.2.2.5 Mortier max poly 0.26% avec min F-S 3.5%:

Les résultats des essais de flexion et de compression sur le mortier max poly=1.5g avec min fumée de silice3.5% « mortier m5 » sont représentés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Les Résultats du mortier max poly 0.26% avec min de fumée de silice 2%(14 jours et à 28 jours).

Mortier	Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	à 14 jours	à 28 jours	à 14 jours	à 28 jours
Max poly 0.26% min f-s3.5 %M7	1.4	3.44	45	47.36

Pour mieux visualiser les résultats, ces derniers sont représentés dans des figures. Ainsi, les figures IV.3 représentent les résistances à la traction (à 14 jours et à 28 jours) de différents types de mortiers.

IV.2.2.6. Résistance à la traction

La figure IV.5 représente les résultats de résistances à la traction (à 14 jours et à 28 jours) de différents types de mortiers.

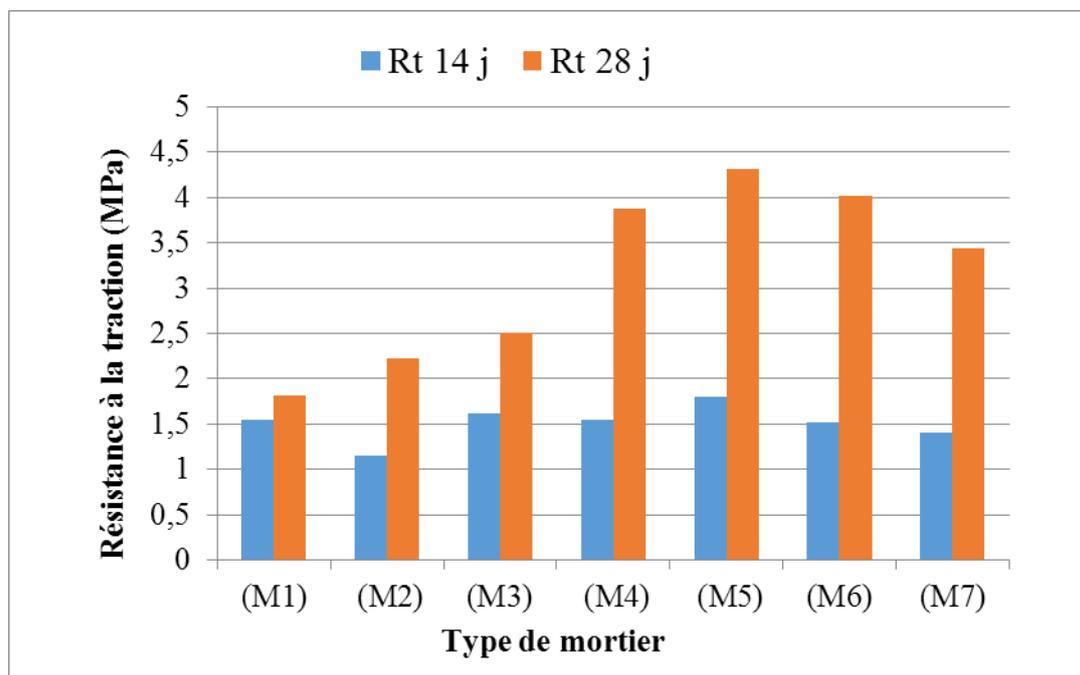


Figure IV. 5 résistances de traction déférente type de mortiers à 14 jours et à 28 jours (MPa).

À partir des tableaux et les figures nous constatons ce qui suit :

Tous d'abord, des valeurs moyennes à bonnes des résistances à la traction ont été obtenues à 14 jours et à 28 jours. Nous avons constaté un passage de la résistance à 28 jours de 1.82 MPa au 2.2 et 2.5 MPa, selon le pourcentage de fibre de polymère ajouté, ce qui a donné une amélioration de la résistance à la traction d'environ de 20 à 37 % de la résistance. Aussi, on peut voir que l'ajout d'une quantité minimale de fibre de polymère n'a pas donnée une amélioration à 14 jours par rapport au mortier témoin. La chute de résistance (diminution) peut être justifiée à une mauvaise manipulation de l'essai.

L'ajout de la fumée de silice a multiplié la résistance à 28 jours de 1.82 MPa au 3.88 et 4.32 MPa, selon le pourcentage de la fumée de silice ajouté, ce qui a donné une excellente amélioration de la résistance à la traction d'environ de 113 à 137 % de la résistance. Tandis que, la résistance à la traction à 14 jours a donné une faible augmentation d'environ de 16% avec un maximum de la fumée de silice, ce qui a peut-être lié à la réaction chimique de la fumée de silice à l'intérieur du mélange (fumée de silice en cours de réaction).

Il aussi remarqué que l'introduction des deux additifs (fumée de silice et fibre de polymère) à la fois ont donné des bonnes valeurs avec un maximum où la quantité de la fumée de silice est favorisée.

Donc on peut dire que l'ajout de fibre de polymère et de la fumée de silice améliore la résistance à la traction des mortiers à la traction selon les pourcentages utilisés. Un pourcentage maximal de la fumée de silice de 5% a donné la meilleure résistance et l'introduction des deux additifs à la fois reste un choix médian entre le coût et la qualité.

IV.2.2.7. Résistance à la compression

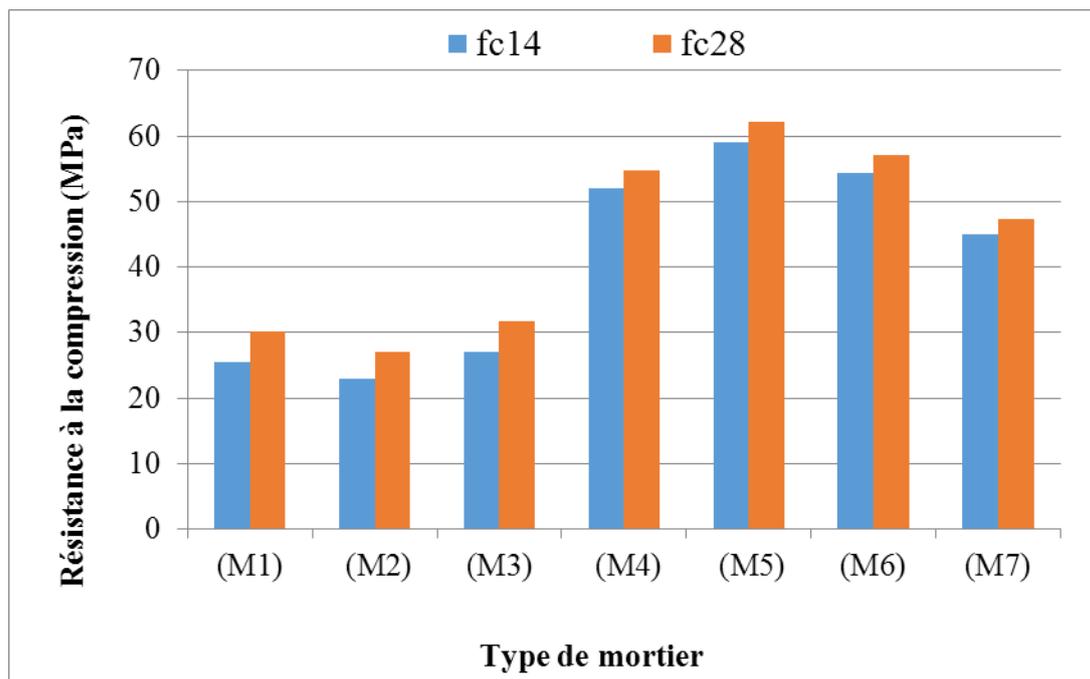


Figure IV. 6 résistances de compressions déferentes types de mortier à 14 jours et à 28 jours (Mpa).

Il est aussi remarqué que les résistances à la compression est toujours mieux à celle de mortiers ordinaire (témoin) pour tout pourcentage ajouté de la fumée de silice et de fibre de polymère, exceptionnellement, le premier pourcentage avec un minimum de fibre de polymère, en effet les résultats de cet essais reste douteux. Par contre, pour le cas d'un maximum de fibre de polymère la résistance à la compression est correspondante à celle de mortier témoin. En effet, l'ajout de fibre de polymère a pour objectif d'améliorer la résistance à la traction que la compression.

L'ajout de la fumée de silice a vraiment amélioré la résistance à la compression à 14 jours et à 28 jours.

Une bonne résistance à 14 jours est avantageuse au niveau des chantiers pour exécuter la suite de travaux et respecter les délais des projets. L'augmentation a été estimée entre 79 et 106 % par un ajout entre 3.5 et 5% de la fumée de silice.

L'introduction des deux additifs (fumée de silice et fibre de polymère) à la fois ont donné des bonnes valeurs aussi avec un maximum où la quantité de la fumée de silice est favorisée.

Donc on peut dire que l'ajout de fibre de polymère n'a pas apporté une amélioration de la résistance à la compression, contrairement à la fumée de silice. Un pourcentage maximal de la fumée de silice de 5% a donné la meilleure résistance et l'introduction des deux additifs à la fois reste toujours un choix médian entre le coût et la qualité.

Aussi, on peut dire que les résistances obtenues durant ce travail sont satisfaisantes et répondre aux besoins de la construction en particulier en Algérie.

Le choix entre la fibre de polymère et la fumée de silice doit être encore lié à leurs coûts et à leurs consommations. Il est clair que les dosages ainsi que le coût de la fumée de silice sont trop élevée par rapport à la fibre de polymère, ce qui diminue la différence entre les avantages des deux matériaux

IV.3 Conclusion

D'après les différents résultats obtenus dans ce chapitre, on peut dire que :

- L'ajout d'un pourcentage du fumé de silice entre 3.5 et 5% augmente la résistance à la traction et la résistance à la compression.
- L'ajout d'un pourcentage de fibre de polymère entre 0.2 % et 0.26 % augmente la résistance à la traction sans influence sur la résistance à la compression.
- l'ajout d'un mélange de fumée de silice et de la fibre de polymère donne une résistance médiane, avec un avantage pour la fumée de silice.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis dans sa partie théorique d'apprendre beaucoup d'informations sur les différents matériaux tel que, le ciment, le sable, la fumée de silice et différents fibres ainsi que leurs utilisations pour fabriquer des mortiers.

Le travail expérimental nous a permis de savoir la résistance d'un mortier confectionné avec un mélange constitué de pourcentage différent de la fumée de silice et de la fibre polymère ; dont le but d'avoir un nouveau matériau de comportement répondant à certaines exigences et en même temps présent un coût acceptable.

À partir de ce programme nous avons retenu les résultats et les conclusions suivantes :

Une bonne identification des matériaux effectués au laboratoire permis d'avoir une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers et aide d'une façon significative à commenter et argumenter les résultats des essais expérimentaux.

La résistance des mortiers à base de fibre de polymère seule améliore la résistance à la traction et sans influence sur la résistance à la compression.

L'ajout de la fumée de silice de 3.5 % à 5 % augmente les résistances mécaniques des mortiers (traction et compression).

L'ajout de fibre polymère de 0.2 % et la fumée de silice 5 % donnent des bonnes résistances par rapport au mortier ordinaire mais restent inférieurs à celles des mortiers à base seulement de la fumée de silice.

Aussi il est conclu que l'ajout de la fumée de silice est favorable par rapport à la fibre de polymère vis-à-vis les résultats obtenus de la résistance mécanique et le choix entre la fibre de polymère et la fumée de silice doit être lié au coût et à la quantité consommée.

À la fin on peut dire que les mortiers à base d'un mélange de fibre polymère et de la fumée de silice peuvent être utilisés à la place des mortiers ordinaires à base de ciment comme matériaux de renforcement et de réparation.

En perspective ; il est recommandé de prolonger ce travail sur les différents types de béton.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <http://mdevmd.accesmad.org/mediatek/mod/page/view.php?id=2988&lang=en>
- **Disponible sur le site** :<http://www.infociments.fr/telecharger/ct-g11.pdf>
- [2] <http://www.ecocem.fr/ciment/>
- [3] <http://www.africmemoire.com/part.5-chapitre-2-cadre-monographique-la-cimenterie-de-katana-824.html>
- [4] https://uploads.gedimat.fr/cms/files/dossier-gedimat_les-ciment_n26.pdf
- [5] Nicolas.h, application de l'approche probabiliste a la durabilité des produits préfabriqués en béton, thèse de doctorat de l'université de Toulouse Paul Tabatière – Toulouse iii (2009), page 16-18
- [6] Cimbeton, guide de prescription des ciments pour des constructions durables, centre de d'information sur le ciment et ses applications, page11-13.
- [7] Georges.d ; jean.f, nouveau guide du béton et de ses constituants, huitième édition 1998, page 1- 418
- [8] Tara Pacific, sable blanc et sable volcanique, octobre 2016, page 1-8
- [9]<http://www.infociments.fr/betons/composition/consituants/eau>
- [10] <http://www.infociments.fr/telecharger/ct-b51.13-14.pdf>
- [11] BOUALI. K. Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires. Mémoire de master. Université de M'Hamed BOUGARA- BOUMERDE 2013/2014.
- [12] BELMAHI. S. Cours matériaux de construction. Licence 2& 3, Génie civil. Université de Tiaret. 2016.
- [13] solution béton La fumée de silice : l'addition incontournable pour des bétons durables dans la norme Béton NF EN 206-1 version Mars 2011.
- [14] Matmour.k ;Mebrouk.m , étude comparative des résistances des mortiers de ciment en utilisant différents adjuvants super plastifiant, mémoire de fin d'études en de master université de Tiaret, 2015/2016, page 1-108
- [15] <http://users.skynet.be/15102/mortiers.htm>
- [16] CIMBéton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques Tom 2, janvier 2013 page 1-137

- [17] Abed.h ; Ammi.o, étude du comportement des mortiers de ciment à base d'un mélange de la chamotte – filler calcaire, mémoire de fin d'études en de master université de Tiaret, 2016/2017, page1-65.
- [18] Grégory Lalet. Composites aluminium/fibres de carbone pour l'électronique de puissance. Matériaux. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2010.
- [19] valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes.
- [20]LAFARGE ALGÉRIE ciment portand au calcaire centre commerciale bab ezzouar tour n° 2 etage 05 et 06 bab ezzouar alger algérie.
- [21] BELMAHI. S. polycopie de travaux pratiques- matériaux de construction. License 2 & 3, Génie civil. Université de Tiaret. 2016.
- [22]TEKNACHEM ALGERIE SARL sidi bel Abbes fume de silice sélectionnée à haute pureté.
- [23]MASTER FIBRE fibre synthétiques pour mortiers et bétons BASF MAROC S A rue des orchidées 20250 Ain sebàa Casablanca.