

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie civil et Travaux public



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie civil
Spécialité : Structure
Thème

**Effet des hautes températures sur le comportement physique et mécanique
des mortiers à base de la fumée de silice et fibre polypropylène.**

Présenté Par :

- 1) Mr. Ababou Abd illah
- 2) Melle. Medjahed Takwa

Devant le jury composé de :

Dr. Marouf Hafida	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Pr.Houmadi Youcef	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Kamech Zine El-Abidine	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENT

Après avoir rendu grâce à Dieu les tous puissant et le miséricordieux nous tenons absolument à remercier tous ceux qui nous ont soutenu, contribuer et participer à la rédaction de ce document ainsi qu'à la réalisation et le bon fonctionnement de notre application. Il s'agit plus particulièrement de :

Notre encadreur Monsieur Kamech Zine El-Abidine qui on exprime notre profonde reconnaissance pour son disponibilité, Son rigueur scientifique et son sens d'écoute et d'échange.

Je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements aux professeurs Marouf Hafida et Houmadi Youcef pour avoir acceptés de présider les jurys de cette thèse et pour leur bienveillante attention.

Nous vifs remerciements s'adressent également à tous nos enseignants d'université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent pour la formation qu'ils ont eu le soin de nous apporter le long de notre cursus universitaire.

Nos remerciements vont également aux ingénieurs Keddou Adel, Kawter et nadjet les ingénieurs du laboratoire de génie civil de l'université d'Ain Temouchent.

TAKWA ET ABD ILLAH

DÈDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

Mon cher frère Boubaker, mes chères sœurs Yousfia, Nabila et Imene, mes nièces Anfel choucha et Allaa schmetterling, mon beau frère Mokhtar, pour leurs soutien tout au long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Mes chers parents Mohammed et Zahia, et tout mes frères et sœurs.

Nos collègues, avec lesquels on a partagé nos moments de joie et de bonheur.

La famille MEDJAHED, BAKRETI et KORIDET.

La famille ABABOU et SLIMANI.

TAKWA et ABD ILLA

Table des matières

REMERCIEMENT	i
DÈDICACES	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Liste d'abréviation	x
Résumé	xii
I. Chapitre I : Synthèse bibliographique	2
<i>I.1 Généralité</i>	2
<i>I.2 Le matériau "Ciment"</i>	3
I.2.1 Introduction.....	3
I.2.2 Définition du ciment	3
I.2.3 Propriétés du ciment	4
.....	6
I.2.4 L'hydratation du ciment.....	7
I.2.5 L'eau dans la microstructure de la pâte de ciment	8
<i>I.3 Les ajouts minéraux</i>	10
I.3.1 Introduction.....	10
I.3.2 Rôle de l'ajout cimentaire	11
I.3.3 Les ajouts minéraux	12
I.3.4 L'intérêt de l'utilisation des ajouts	15
I.3.5 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....	16
I.3.6 Les fibres	16
<i>I.4 Influence des hautes températures sur les propriétés physique, thermique et mécanique des matériaux cimentaires</i>	19
I.4.1 Introduction.....	19
I.4.2 Evolution des propriétés physiques	20
<i>I.5 Conclusion</i>	23
II. Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales	25
<i>II.1 Introduction</i>	25
<i>II.2 Caractérisation des matériaux utilisés</i>	26
II.2.1 Le Ciment.....	26
II.2.2 Le Sable	30
II.2.3 La fumée de silice	33
II.2.4 La fibre polypropylène	38
II.2.5 Eau de gâchage	40
<i>II.3 Formulations des mortiers et méthode de chauffage</i>	40

II.3.1	Confection des mortiers.....	40
II.3.2	Conservation des éprouvettes	42
II.3.3	Méthode de chauffage.....	43
II.4	<i>Les essais effectués sur le mortier.....</i>	<i>44</i>
II.4.1	Essais à l'état frais.....	44
II.4.2	Essais à l'état durci.....	47
II.5	<i>Conclusion.....</i>	<i>57</i>
III.	Chapitre III : Analyses et discussion des résultats	58
III.1	<i>Introduction</i>	<i>58</i>
III.2	<i>Influence des hautes températures sur le comportement mécanique des mortiers étudiés</i>	<i>59</i>
III.2.1	Influence des hautes températures sur la résistance à la flexion	59
III.2.2	Influence des hautes températures sur la résistance à la compression	64
III.2.3	Résistance en compression.....	65
III.3	<i>Influence des hautes températures sur le comportement physique des mortiers étudiés</i>	<i>70</i>
III.3.1	Influence des hautes températures sur la perte en masse du mortier	70
III.3.2	Influence des hautes températures sur la porosité du mortier	71
III.4	<i>L'absorption capillaire</i>	<i>73</i>
III.4.1	Mesure de la sportivité capillaire.....	73
III.4.2	Mesure de coefficient de sportivité capillaire	75
III.5	<i>Conclusion.....</i>	<i>78</i>
IV.	Conclusion Générale et perspectives	80
	Références bibliographiques	83

Liste des figures

<i>Figure I-1: Poudre de ciment</i>	3
<i>Figure I-2 : Hydratation d'un ciment sans et avec l'ajout cimentaire.</i>	11
<i>Figure I-3 : Fibres polypropylènes de 6, 12 et de 19 mm [40].</i>	18
<i>Figure I-4: Perte de masse au cours de chauffage et la vitesse de perte de masse en fonction de la température du béton [47].</i>	21
<i>Figure I-5: Influence de la vitesse de la montée en température.</i>	21
<i>Figure I-6 : Dilatation thermique longitudinale de différents types de roches en fonction de la température : (1) siliceux; (2) grés; (3) calcaire; (4) basaltes; (5) argiles expansées; (6) pâte de ciment.</i>	23
<i>Figure II-1: Ciment CEM II/A 42.5.</i>	26
<i>Figure II-2 : Perméabilimètre de Blaine.</i>	27
<i>Figure II-3: Pycnomètre utilisé pour la mesure de la masse volumique absolue.</i>	28
<i>Figure II-4 : Essai de l'analyse granulométrique.</i>	31
<i>Figure II-5: Courbe granulométrique du sable utilisé.</i>	32
<i>Figure II-6: Essai de l'équivalent de sable.</i>	32
<i>Figure II-7 : Influence de la fumée de silice sur la résistance des mortiers.</i>	35
<i>Figure II-8: L'effet de la fumée de silice sur l'amélioration de la résistance des mortiers de différent âge.</i>	35
<i>Figure II-9: La fumée de silice utilisée.</i>	36
<i>Figure II-10 : Surface spécifique Blaine des différents liants étudiés.</i>	38
<i>Figure II-11 : Fibres polypropylènes.</i>	39
<i>Figure II-12 : Malaxeur automatique.</i>	42
<i>Figure II-13: Table à choc.</i>	42
<i>Figure II-14: Conservation des éprouvettes dans l'eau.</i>	43
<i>Figure II-15: Séchage des éprouvettes à l'air libre pendant 24 h avant l'essai.</i>	43
<i>Figure II-16: Le four à moufle utilisé pour le chauffage des éprouvettes [laboratoire de G. Civil - Univ Aïn-Témouchent].</i>	43

<i>Figure II-17: Schéma indiquant le protocole choisi pour le chauffage du mortier.</i>	44
<i>Figure II-18: Principe de fonctionnement du maniabilimètre.</i>	45
<i>Figure II-19: Évolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.</i>	45
<i>Figure II-20: Essai de l'air occlus.</i>	46
<i>Figure II-21: Evolution de l'air occlus dans les différents mortiers étudiés.</i>	46
<i>Figure II-22: Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette (4 x 4 x 16) cm³.</i>	47
<i>Figure II-23: Essai de flexion simple effectué sur une éprouvette du mortier.</i>	48
<i>Figure II-24 : Essai de compression simple d'un échantillon du mortier.</i>	50
<i>Figure II-25 : Dispositif de mesure de l'absorption capillaire.</i>	52
<i>Figure II-26 : Essais de la porosité accessible à l'eau (Epreuves du mortier dans le Dessiccateur)</i>	55
<i>Figure III-1 : Évolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers étudiés.</i>	60
<i>Figure III-2: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier témoin à l'âge de 45 jours)</i>	61
<i>Figure III-3: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier témoin fibré à l'âge de 45 jours)</i>	62
<i>Figure III-4: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	63
<i>Figure III-5: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 8 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	64
<i>Figure III-6: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 12 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	64
<i>Figure III-7: Évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge des différents mortiers étudiés.</i>	65
<i>Figure III-8: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier témoin à l'âge de 45 jours)</i>	66
<i>Figure III-9: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier témoin fibré à l'âge de 45 jours)</i>	67
<i>Figure III-10: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	67

<i>Figure III-11: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 8 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	<i>68</i>
<i>Figure III-12: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)</i>	<i>68</i>
<i>Figure III-13: Évolution de la perte en masse des différents mortiers étudiés exposés à des hautes températures.</i>	<i>70</i>
<i>Figure III-14: Évolution de la porosité des différents mortiers étudiés en fonction de la température.</i>	<i>71</i>
<i>Figure III-15: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffé à 150° C.</i>	<i>73</i>
<i>Figure III-16: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffé à 300° C.</i>	<i>74</i>
<i>Figure III-17: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffé à 450° C.</i>	<i>74</i>
<i>Figure III-18: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffé à 600° C.</i>	<i>75</i>
<i>Figure III-19: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 150° C.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure III-20: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 300° C.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure III-21: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 450° C.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure III-22: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 600° C.....</i>	<i>77</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1 : Caractéristique chimique du ciment courant [10].</i>	6
<i>Tableau I-2: Caractéristiques mécaniques des ciments courants [11].</i>	6
<i>Tableau I-3: Résistances garanties des ciments courants [12].</i>	7
<i>Tableau I-4: Les anhydres et les hydrates dans une pâte du ciment [13].</i>	7
<i>Tableau I-5 : Classification des ajouts selon leur réactivité.</i>	12
<i>Tableau I-6: Composition chimiques de la fumée de silice.</i>	14
<i>Tableau I-7 : Coefficient de dilatation thermique selon la nature des granulats [55].</i>	22
<i>Tableau II-1 : Analyse chimique du ciment utilisé (CEM II/A 42,5).</i>	26
<i>Tableau II-2: Composition minéralogique du ciment utilisé (CEM II/A 42,5).</i>	26
<i>Tableau II-3 : Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.</i>	29
<i>Tableau II-4: Analyse chimique du sable concassé [LTPO].</i>	30
<i>Tableau II-5: Pourcentage des tamisats.</i>	31
<i>Tableau II-6 : Caractéristiques physiques du sable utilisé.</i>	33
<i>Tableau II-7 : Caractéristique chimique de la fumée de silice utilisé.</i>	36
<i>Tableau II-8: Caractéristique physiques de la fumée de silice utilisé.</i>	37
<i>Tableau II-9: Caractéristique physiques des fibres polypropylènes utilisées.</i>	39
<i>Tableau II-10 : Composition chimique de l'eau utilisée.</i>	40
<i>Tableau II-11: Compositions des mortiers étudiés.</i>	41
<i>Tableau II-12 : Résistance à la flexion simple du mortier à 20° C en fonction de l'âge des éprouvettes (7, 14 et 28 jours)</i>	48
<i>Tableau II-13: Résistances à la flexion simple des mortiers à l'âge de 45 jours exposés à des différentes températures (20, 150, 300, 450 et 600° C).</i>	49
<i>Tableau II-14 : Résistance à la compression simple en fonction de l'âge du mortier à 20° C (à 7, 14 et à 28 jours)</i>	50
<i>Tableau II-15: Résistances à la compression simple des mortiers à l'âge de 45 jours exposées à des différentes températures (20, 150, 300, 450 et 600° C).</i>	51
<i>Tableau II-16 : Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 150° C.</i>	52

<i>Tableau II-17: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 300° C.</i>	<i>53</i>
<i>Tableau II-18: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 450° C.</i>	<i>53</i>
<i>Tableau II-19: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 600° C.</i>	<i>54</i>
<i>Tableau II-20: Porosité ouverte des différents mortiers exposés à des hautes températures.</i>	<i>56</i>
<i>Tableau II-21: Perte en masse des différents mortiers exposés à des hautes températures témoin.</i>	<i>57</i>

Liste d'abréviation

E : Eau.

C : Ciment.

C₃S : Silicate tricalcique.

C₂S : Silicate bicalcique.

C₃A : Aluminate tricalcique.

C₄AF : Aluminoferrite tétracalcique.

C₂AH₈ : Aluminate dicalcique.

C – S – H : Silicate de calcium hydratés.

S_iO₂ : La silice.

Al₂O₃ : L'alumine.

C_aO : La chaux.

Fe₂O₃ : L'oxyde de fer.

MgO : La marmesie.

CO₂ : L'Anhydrique carbonique.

L : Longueur de la fibre.

D : Diamètre de la fibre.

T_f : Température de fusion.

LTPO : Laboratoire des travaux publics Ouest.

SSB : Surface spécifique Blaine.

M_{abs} : Masse volumique absolue.

M_{app} : Masse volumique apparente.

FS : Fumée de silice.

M_f : Module de finesse.

Cu : Le coefficient d'uniformité.

Cc : Le coefficient de courbure.

ESV : Equivalent de sable visuel.

FPP : Fibre polypropylène.

Rf : *La résistance à la traction par flexion.*

Rc : *La résistance à la compression.*

Résumé

Le mortier est un matériau cimentaire qui est souvent utilisé dans des situations où il peut être exposé à des hautes températures (cas d'un incendie par exemple). Alors, la présente étude expérimentale est pour but d'étudier les comportements physiques et mécaniques d'un mortier ordinaire exposé à des températures élevées allant jusqu'à 600° C. Dans cette étude, l'intérêt majeur est donné à l'influence de la fumée de silice, ajoutée avec différents dosages aux mortiers testés par substitution d'une quantité du ciment, sur le comportement du mortier à des hautes températures. Un grand intérêt est aussi donné dans ce travail de recherche à l'incorporation des fibres polypropylènes dans le mortier. Pour cela, cinq formulations de mortiers ont été testés avec le même rapport Eau/Liant et une quantité des fibres polypropylènes fixée, mais à base de différents dosage en fumée de silice (0, 5, 8, et 12 %). Les mortiers étudiés ont été soumis à des cycles de chauffage-refroidissement à des températures maximales de 150, 300, 450 et 600° C. Des essais ont été donc effectués sur les différents échantillons du mortier afin de déterminer l'évolution de la résistance mécanique (à la traction et à la compression), la porosité accessible à l'eau et la sorptivité du matériau en fonction de la température. Les résultats montrent les effets des hautes températures sur les comportements physique et mécaniques des mortiers étudiés ainsi que l'influence significative de la fumée de silice et des fibres polypropylènes sur ces comportements du matériau face à des températures élevées.

Mots clés : *Mortier, Hautes Températures, Fibres Polypropylènes, Fumée de Silice, Comportement physico-mécanique.*

Abstract

Mortar is a cementitious material that is often used in situations where it can be exposed to high temperatures (eg. case of fire). So, the present experimental study aims to study the physical and mechanical behaviors of an ordinary mortar exposed to high temperatures up to 600 ° C. In this study, the major interest is given to the influence of silica fume, added with different dosages to the mortars tested by substituting a quantity of cement, on the behavior of the mortar at high temperatures. Great interest is also given in this research work to the incorporation of polypropylene fibers in the mortar. For this, five formulations of mortars were tested with the same water / binder ratio and a fixed amount of polypropylene fibers, but based on different dosages of silica fume (0, 5, 8, and 12%). The mortars studied were subjected to heating-cooling cycles at maximum temperatures of 150, 300, 450 and 600 ° C. Tests were therefore carried out on the various samples of the mortar in order to determine the evolution of the mechanical resistance. (in traction and in compression), the porosity accessible to water and the sorptivity of the material as a function of the temperature. The results show the effects of high temperatures on the physical and mechanical behaviors of the mortars studied as well as the significant influence of silica fume and polypropylene fibers on these behaviors of the material in the face of high temperatures.

Keywords: *Mortar, High Temperatures, Polypropylene Fibers, Silica Fume, Physico-mechanical behavior.*

الملخص

الملاط هو مادة اسمنتية تستخدم غالبًا في المواقع التي يمكن أن تتعرض فيها لدرجات حرارة عالية (مثل الحريق). لذلك، تهدف الدراسة التجريبية الحالية إلى دراسة السلوكيات الفيزيائية والميكانيكية لملاط عادي يتعرض لدرجات حرارة عالية تصل إلى 600 درجة مئوية، في هذه الدراسة، يتم إعطاء الاهتمام الرئيسي لتأثير غبار السيليكا، مضافاً بجرعات مختلفة حيث تم اختبار الملاط باستبدال كمية من الأسمنت على سلوك الملاط عند درجات حرارة عالية. كما يتم إعطاء اهتمام كبير في هذا العمل البحثي لدمج ألياف البولي بروبيلين في الملاط. لهذا الغرض، تم اختبار خمس تركيبات من الملاط بنفس نسبة الماء / المادة الرابطة وكمية ثابتة من ألياف البولي بروبيلين، ولكن بناءً على جرعات مختلفة من غبار السيليكا (0، 5، 8، 12٪). خضعت الملاط المدروسة لدورات تبريد بالتسخين عند درجات حرارة قصوى تبلغ 150 و 300 و 450 و 600 درجة مئوية. لذلك أجريت اختبارات على عينات مختلفة من الملاط من أجل تحديد تطور المقاومة الميكانيكية. (في الجر. وفي الضغط) ، المسامية التي يمكن الوصول إليها للماء وامتصاص المادة كدالة لدرجة الحرارة. أظهرت النتائج تأثير درجات الحرارة المرتفعة على السلوكيات الفيزيائية والميكانيكية المرتفعة للملاط المدروس وكذلك التأثير غبار السيليكا وألياف البولي بروبيلين على سلوكيات المادة في مواجهة درجات الحرارة

الكلمات الرئيسية: الملاط، حرارة عالية، ألياف البولي بروبيلين، غبار السيليكا، السلوك الفيزيوميكانيكي.

Introduction générale

Depuis le début de construction moderne basée essentiellement sur le matériau ciment, la demande de ce matériau augmente de plus en plus, ce qui conduit à l'augmentation de la cadence de l'industrie cimentaire d'une façon importante.

En effet l'industrie cimentaire consomme une grande énergie et produit une quantité importante de gaz carbonique. Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. La production du ciment est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète ce qui affecte négativement sur l'impact environnementale.

Ces gaz carbonatés résultent de la combustion des hydrocarbures et de la décarbonatation du CaCO₃, contenu dans la matière première, lors des cuissons du mélange cru pour fabriquer du Clinker. Une des solutions pour réduire les effets négatifs de la production du ciment est de substituer partiellement le Clinker par des ajouts qui demandent moins d'énergie et causent moins d'émission de gaz carbonate.

Parmi ces ajouts, on trouve la fumée de silice qui est de matériau naturel ou artificiel, composé des même principaux oxydes contenus dans le ciment Portland mais de proportions et compositions minéralogiques différents, elle est caractérisée par une réaction dite « pouzzolanique » cela signifie qu'elle peut réagir fortement ou faiblement en présence d'eau avec l'oxyde de calcium en le transformant en silicate de calcium et aluminat de calcium hydraté.

Les objectifs de la présente recherche concernant l'étude de l'influence de la température sur le comportement physique et mécanique d'un mortier à base du différent dosage (5%, 8% et 12%) de la fumée de silice et les fibres polypropylènes.

Les températures très élevées provoquent des endommagements très importants des structures (cas d'incendie des tunnels) et aussi provoquent des déformations très importantes, mais les températures peuvent être utilisé aussi positivement comme un traitement thermique pour améliorer les caractéristiques mécaniques des mortiers en augmentant leur résistance à la compression et en diminuant leur déformation.

Cette étude s'articule sur une analyse bibliographique a pour rôle de répertorier et de synthétiser les documents existant qui touchaient de près ou de loin à notre thème de recherche.

Dans le première chapitre, une synthèse bibliographique sur les matériaux cimentaires et les ajouts minéraux et sur leurs paramètres microstructuraux, qu'à leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques ainsi que l'évolution de ces propriétés des mortiers soumis à hautes températures.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à une description dont les détails et une caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers objet de cette étude. Nous allons aussi présenter dans cette partie les procédures relatives à la préparation et la confection des mortiers testés, ainsi qu'une description des méthodes expérimentales préconisées.

Cinq formulations de mortiers ordinaires a été préparé avec des matériaux locaux avec une même composition du sable mais avec des différents dosages (pourcentage) en fumée de silice

(5%, 8% et 12%), pour la substitution partielle du ciment et quantité des FPP reste constante (environ 0.6 g).

Après une caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation des mortiers étudiés, le début des investigations a été sur mortier à l'état frais par des essais de mesure de maniabilité et de l'air occlus et des essais de la résistance à la flexion et à la compression et la perte en masse, la porosité ainsi que l'absorption capillaire sont élaborés pour caractériser notre mortiers à l'état durci. En suite chaque partie de programme est décrite : leur conditionnement, cycle de chauffage et température.

Dans la troisième partie de ce document, les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers étudiés à l'état durci et à l'état frais.

Une analyse et des discussions des résultats obtenus, seront également présentées dans ce chapitre. L'influence de la montée en température sur des éprouvettes du mortier de différents âges sont aussi présentées en fonction de la résistance mécanique du matériau.

Finalement, les conclusions générales clôturent ce mémoire, en synthétisant les principaux résultats sur le comportement physique et mécanique du mortier avec la fumée de silice comme un ajout additionné par substitution partielle du ciment dans différents mortiers ordinaires.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Généralité

Le mortier est un matériau très utilisé dans le domaine de génie civil ; est un matériau composite. Il se compose d'un mélange de ciment, sable et d'eau. Il est caractérisé par ses comportements physiques et mécaniques. Il est influencé par sa composition à savoir : le rapport E/C le type du ciment, la dimension et la forme de sable.

Depuis plusieurs années, plusieurs travaux et projets de recherche, menées au niveau mondiale, résultent une meilleure connaissance de ce matériau comme les caractéristiques intrinsèques et les performances très satisfaisantes de ce nouveau matériau. Malgré ses bonnes performances à température ambiante ; le mortier peut présenter un comportement critique à des températures élevées (cas d'un incendie par exemple). L'analyse des effets des hautes températures sur sa microstructure est une étape nécessaire pour comprendre des phénomènes macroscopiques complexes, car le mortier subit des modifications et changements physicochimiques qui influencent fortement son comportement physique et mécanique.

Avant d'entamer à l'étude bibliographique il est important de trouver les éléments de réponse à la question suivante : Lors d'un incendie, quelles sont les changements qui se produisent sur le comportement physique et mécanique d'un matériau cimentaire (béton et/ou mortier) à l'échelle macroscopique et microscopique ?

I.2 Le matériau "Ciment"

I.2.1 Introduction

L'écosais Mr. ASPDIN prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "Ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment fabriqué dans le monde, père d'une longue lignée [1].

Ainsi, le XX^{ème} siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués à l'aide du ciment et en utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux et en d'abandon [2].

I.2.2 Définition du ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450°C (température de fusion 1550 C°).

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant : les calcaires et les argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker [3].

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence de l'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau [4].

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.



Figure I-1: Poudre de ciment

I.2.3 Propriétés du ciment

I.2.3.1 Caractéristiques physiques

I.2.3.1.1 Comportement physico-chimique de la pâte du ciment

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C_3S
- Silicate bicalcique : C_2S
- Aluminate tricalcique : C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique : C_4AF

Une fois la poudre du ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles, plus ou moins, enchevêtrées produisant la prise [5].

Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

I.2.3.1.2 La prise du ciment

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte du ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.

La norme **NE EN 197-1** spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5R.
- 1h pour les ciments des classes 42,5 - 42,5R - 52,5 et 52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments. Ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20°C [6].

I.2.3.1.3 Le durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître [7].

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevé et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire "Rapide". Il est également

possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours il peut atteindre la quasi-totalité de sa résistance [8].

1.2.3.1.4 La chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en Aluminate tricalcique (C_3A) que l'on a intérêt à des temps chauds. Selon les différents types de ciments, à 12 heures après le début de l'hydratation, cette chaleur est comprise, approximativement, entre 65 j/g pour certains Ciment des Hauts Fourneaux (CHF-CEM III/B par exemple) et 300 j/g pour certains Ciments Portlands (sans ajouts pouzzolaniques) CPA-CEM I [9].

1.2.3.1.5 Le retrait du ciment

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent, c'est ce qu'on appelle "le retrait".

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie (humidité relative) de 50% [8].

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portland CPA-CEM I et CPJ-CEMII de classe 32,5R.

1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identique mais de classes 32,5R - 42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment,
- La finesse de mouture,
- Le dosage en ciment dans le mélange,
- Le dosage en eau,
- La propreté et nature des granulats.

1.2.3.1.6 Le gonflement

Si l'élément en mortier se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent. Donc un gonflement peut être remarqué, ce qui peut entraîner l'apparition des tensions internes dans le mortier.

1.2.3.2 Caractéristiques chimique du ciment

❖ Ciments courants

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau I.1. Ci-après, quant à leur composition chimique.

Tableau I-1 : Caractéristique chimique du ciment courant [10].

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences
Perte au feu	CEM I CEM II	Toutes classes	< 5.0 %
Résidu insoluble	CEM I CEM III	Toutes classes	< 5.0 %
Sulfate (SO ₃)	CEM I CEM II	32.5 N / 32.5 R / 42.5 N	< 3.5 %
	CEM V	42.5 R / 52.5 N / 52.5 R	< 4.0 %
	CEM III	Toutes classes	
Chlorure	Tous types	Toutes classes	< 0.10 %

I.2.3.3 Caractéristiques mécaniques des ciments courants

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Tableau I-2: Caractéristiques mécaniques des ciments courants [11].

Classe de Ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32,5	-	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5	≥ 32,5	≤ 52,5
42,5	≥ 12,5	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	≥ 42,5	≤ 62,5
52,5	≥ 20	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30	≥ 52,5	-

Un ciment de la Classe «R» (Prise rapide) présente aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et son intérêt se trouve particulièrement dans certaines circonstances, telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication,...etc.

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment par la norme **NE EN 197-1** (tableau I.2), la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90 % pour les résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % et qui sont indiquées dans le tableau I.3. Ci-dessous :

Tableau I-3: Résistances garanties des ciments courants [12].

Classe des Ciments	Résistances garanties à 2 jours (MPa)	Résistances garanties à 7 jours (MPa)	Résistances garanties à 28 jours (MPa)
32,5	-	17,5	30
32,5 R	12	-	30
42,5	10	-	40
42,5 R	18	-	40
52,5	18	-	50
52,5 R	28	-	50

I.2.4 L'hydratation du ciment

I.2.4.1 Introduction

L'hydratation du ciment fait intervenir les réactions de ses constituants avec l'eau de gâchage. Les anhydres du ciment vont réagir avec l'eau du gâchage pour former des hydrates. Ces anhydres sont les principaux minéraux du clinker purs cités auparavant. Les anhydres et les hydrates qui peuvent être trouvés dans une pâte de ciment sont résumés dans le tableau I.4. Ci-dessous :

Tableau I-4: Les anhydres et les hydrates dans une pâte de ciment [13].

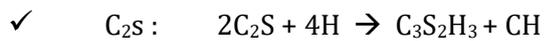
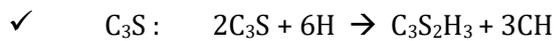
Notation Abrégée	Formule Chimique en oxyde	Dénomination
C₃S	3 (CaO) -SiO ₂	Silicate tricalcique
C₂S	2 (CaO) -SiO ₂	Silicate bicalcique
C₃A	3 (CaO) -Al ₂ O ₃	Aluminate tricalcique
C₄AF	4 (CaO) -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	Aluminoferrite tétracalcique
CH	Ca(OH) ₂	Portlandite
C-S-H	(CaO) _x -SiO ₂ -(H ₂ O) _y	Silicate de calcium hydraté
C₃A.3 (C₃S).H₃₂	3CaO.Al ₂ O ₃ . 3 Ca SO ₄ .32H ₂ O	Ettringite ou "Aft"
C₃A.(C₃S) .H₁₂	6(CaO)-Al ₂ O ₃ -(SO ₃)- 12(H ₂ O)	Monosulfoaluminate de calcium hydrate ou "Afm"

C_2AH_8	$2(CaO)-Al_2O_3-8(H_2O)$	Aluminate dicalcique hydraté
C_3AH_6	$3(CaO)-Al_2O_3-6(H_2O)$	Aluminate tricalcique Hydraté
C_4AH_{13}	$4(CaO)-Al_2O_3-13(H_2O)$	Aluminate tétracalcique Hydraté

I.2.4.2 Hydratation des composants du ciment portland

I.2.4.2.1 Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+} , OH^- et $H_2SiO_4^{2-}$. Qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [14]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

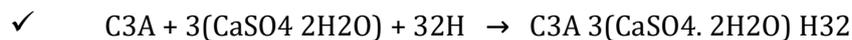


I.2.4.2.2 Hydratation des aluminates

L'Aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [14], ou autrement dit, pour contrôler le temps de prise du ciment.

I.2.4.2.3 Hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A)

La réaction est donnée par :



I.2.4.2.4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

I.2.5 L'eau dans la microstructure de la pâte de ciment

Dans un béton durci, l'eau peut se présenter sous formes d'eau libre, capillaire, adsorbée, chimiquement liée et absorbée par les granulats. L'eau remplit, plus ou moins, tous les vides de la matrice cimentaire et son mouvement est responsable de l'apparition de plusieurs phénomènes comme : le retrait de dessiccation, le gonflement, la fissuration, ...etc. L'eau va donc

jouer un rôle essentiel dans le comportement de matériau durci, non seulement du point de vue de son comportement mécanique, mais aussi de la durabilité.

Dans une gâchée d'une matrice cimentaire, presque 50% de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40 % se trouvent dans les pores des hydrates et 10 % se logent dans les vides présents dans la matrice. L'état hydrique dépend essentiellement de l'humidité relative, du degré d'hydratation et de la taille des pores (la structure poreuse du matériau).

I.2.5.1 L'eau libre et capillaire

L'eau libre réside dans les fissures et les gros pores et n'est pas dans le champ d'influence des forces superficielles. L'eau capillaire est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux et séparée de la phase gazeuse par des ménisques. L'évaporation de l'eau libre et capillaire s'effectue entre 30 et 120 °C.

I.2.5.2 L'eau adsorbée et l'eau chimiquement liée

L'eau consommée durant les réactions d'hydratation du ciment est combinée avec d'autres composants tels que le calcium ou la silice. En considérant le modèle lamellaire du gel de C-S-H. L'eau dans les C-S-H peut apparaître sous trois formes : interfeuille, interlamellaire et hydroxylique [15].

L'eau hydroxylique: Les hydroxyles *OH* liés aux atomes *Si* et *Ca* se trouvent sur les faces internes et externes des feuillets. Il y a deux *OH* par feuillet (l'eau hydroxylique est donc une eau chimiquement liée). **L'eau interlamellaire :** C'est l'eau des micropores, adsorbée à la surface externe des particules (lamelles). L'eau interlamellaire est une eau structurée, soit fixée sur un hydroxyle isolé, soit liée à d'autres molécules d'eau. Les épaisseurs des espaces entre les feuillets du gel sont inférieures à 20 Å. En sachant que l'épaisseur moyenne d'une couche de H₂O est de 2,6 Å, nous pouvons alors observer que 6 couches d'eau qui peuvent être adsorbées à la surface des lamelles [16]. **L'eau interfeuille :** C'est une eau moléculaire, de très faible degré de liberté. Les quatre molécules H₂O interfolières seraient chacune triplement liée par des ponts hydrogènes comme dans la structure de la glace. L'eau interfeuille intervient dans la cohésion intrinsèque de la lamelle. Il semblerait que seul un puissant séchage puisse extraire ces molécules d'eau qui seraient alors enlevées de manière irréversible [17].

L'eau interfeuille s'évapore entre 30 et 120° C, alors que l'eau absorbée à l'intérieur ou à l'extérieur des feuillets du gel C-S-H, qui est fortement liée au matériau s'évacue à des températures beaucoup plus élevées d'environ 120° C - 300° C. L'augmentation de la température provoque la libération de l'eau chimiquement liée qui se traduit par la déshydratation de la pâte de ciment. Tous les processus d'évacuation de l'eau libre, liée et

adsorbée, sont difficiles à dissocier, ce qui ne facilite pas les observations scientifiques expérimentales.

I.2.5.3 L'interface pâte de ciment-granulat

Dans le mortier durci, autour des granulats (grains du sable), une zone de pâte de ciment hydraté particulière, appelée «auréole de transition», peut être présente en fonction de la forme et de la composition chimique des granulats [18]. La liaison pâte-granulat est trouvée meilleure d'un point de vue mécanique avec des granulats concassés qu'avec des granulats roulés [19].

Par ailleurs, dans le cas de granulats peu poreux (par exemple : granulats siliceux), cette liaison qui s'établit au cours de l'hydratation, est fortement poreuse et ainsi moins résistante que la pâte elle-même. De ce fait, elle constitue le point faible des mortiers principalement quand le sable est grossier : la fissuration se produit préférentiellement à ce niveau. Cependant, avec les granulats très poreux (granulats calcaires par exemple), suite à la formation d'hydrates de carbo-aluminates de calcium à l'interface pâte-granulat [20], l'auréole de transition est faiblement poreuse et sa résistance mécanique est élevée.

I.3 Les ajouts minéraux

I.3.1 Introduction

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agents agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin, gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux [21].

Il a été approuvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produit d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (figure (I.2.)) [14].

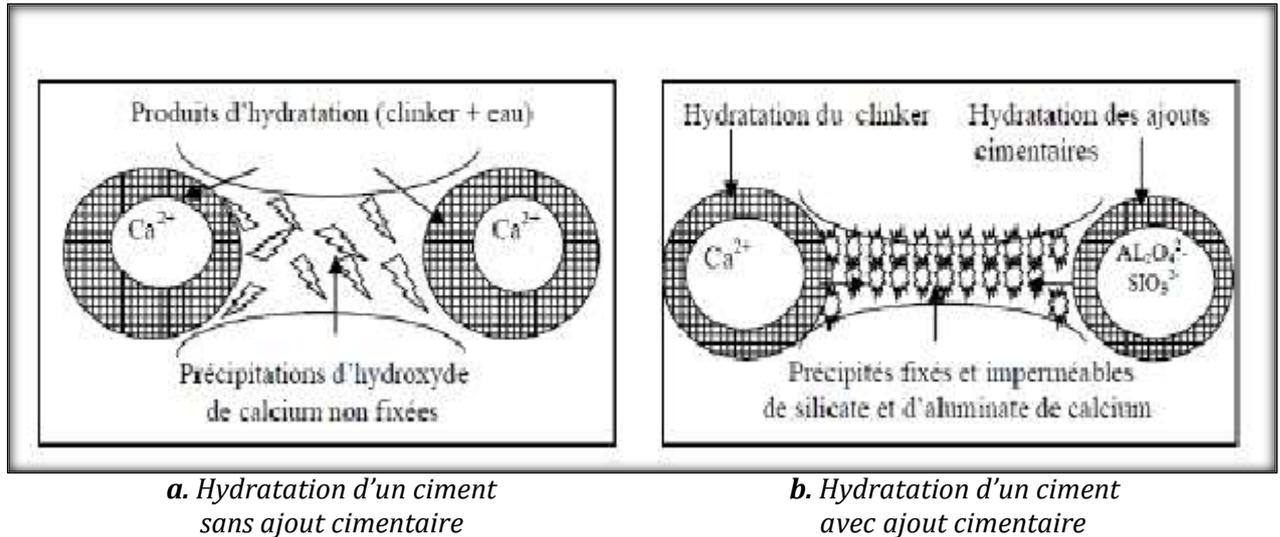


Figure I-2 : Hydratation d'un ciment sans et avec l'ajout cimentaire.

I.3.2 Rôle de l'ajout cimentaire

I.3.2.1 Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux suite à la réaction de l'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable d'un problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau. Ce lessivage augmente alors la porosité dans le matériau cimentaire (béton ou mortier) ce qui conduit à une augmentation de la perméabilité de lessivage [22].

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des liaisons C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [23].

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :

- $SiO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow C-S-H$
- $Al_2O_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow C-A-H$

I.3.2.2 Classification des ajouts minéraux

Les ajouts minéraux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme **NF EN 197-1** en ajouts minéraux inertes et actifs [24]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau I.5. Ci-dessous.

Tableau I-5 : Classification des ajouts selon leur réactivité.

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique,, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

I.3.3 Les ajouts minéraux

La section suivante traitera de l'incorporation de certains ajouts minéraux et chimiques dans les bétons, on fera le point sur les mécanismes d'action de ces sous-produits ainsi que sur leurs effets sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons.

Dans nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est entrain de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

Les ajouts utilisés sont, en général, des pouzzolanes, c'est-à-dire des matériaux à grande surface spécifique qui présentent des structures amorphes. Avec la chaux et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique à condition que le niveau d'énergie libre au départ soit suffisamment élevé pour aboutir à un système plus stable ayant des propriétés hydraulique [25].

- **classification des ajouts minéraux**

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme **NF EN 197-1** en ajouts minéraux inertes et actifs [26].

- **principaux ajouts minéraux inertes**

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les schistes calcinés.

- **Les fillers calcaires**

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique.

Ils ont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir les résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium CaCO_3 mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous format $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit de calcaires dolomitiques.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite et vaterite) [25].

I.3.3.1 La pouzzolane

La pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques essentiellement composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

La norme **ASTM C 618-3** la décrit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune valeur liante mais qui sous forme calcium à des températures ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes [27].

- **Types de pouzzolane**

- A. Pouzzolane naturelle**

La pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique (verre volcanique, pierre ponce, zéolite...) ou sédimentaire (terre à diatomées, trasse...), composé essentiellement de silice, alumine et fer. Elle est formée d'une phase mal cristallisée, amorphe et de grande surface spécifique, qui réagit rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux cristaux de silice et l'aluminate de calcium hydraté qui participent au développement des résistances mécaniques et chimiques.

Le ciment à la pouzzolane naturelle fut employé en Italie en 1910, seulement sa fabrication n'a pas été développée à cause de la baisse considérable de ses résistances mécaniques, après des progrès conséquents dans la maîtrise de son activité, le ciment à la pouzzolane devient normalisé dans le code italien en 1929.

- B. Pouzzolane artificielle**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Elles sont des déchets des différentes industries, on distingue, soit des résidus de fabrication industrielle, soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures à des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de métakoalinite [28].

I.3.3.2 La cendre volante

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages de gaze des chaudières des centrales thermique. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimique et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brule dans la centrale thermique.

I.3.3.3 Les laitiers des hauts fourneaux

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- 1- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
- 2- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.

I.3.3.4 La fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (la taille moyenne des graines est d'environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

Tableau I-6: Composition chimiques de la fumée de silice.

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	FS Blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1

Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2

I.3.4 L'intérêt de l'utilisation des ajouts

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

I.3.4.1 Intérêt du point de vue technique

L'incorporation de particules très fines dans un mélange cimentaire (béton ou mortier) permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice) [29]. Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [30].

I.3.4.2 Intérêt du point de vue économique

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production des mélanges cimentaires, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessitent relativement moins d'énergie et sont moins coûteux que le ciment Portland [31].

I.3.4.3 Intérêt du point environnemental

Le béton utilisé comme matériau de construction pose des problèmes en termes de respect de l'environnement. Le gros de la consommation d'énergie due au béton provient d'activités consommatrices d'énergie qui entraînent une émission plus ou moins forte de (CO₂) [32] :

- l'acheminement (transport en camion du béton ou des matières premières)
- la confection (mazout ou autre combustible pour cuire la roche en ciment)
- la consommation électrique pour brasser mécaniquement de grandes quantités de bétons.

On s'intéresse essentiellement à la conception et l'utilisation. La fabrication du ciment se fait à partir du calcaire, composé du fameux carbonate de calcium et nécessite un chauffage à très haute température (1450 °C) qui engendre d'importantes émissions de (CO₂), dont la réaction chimique est la suivante [33] :

Carbonate de calcium (CaCO₃) → chaux (CaO) + dioxyde de carbone (CO₂)

La fabrication du ciment représente environ 7 à 8 % des émissions totales de CO₂ à l'échelle du globe terrestre. Chaque tonne de ciment produite requiert l'équivalent de 60 à 130 kg de fuel (ou son équivalent) et une moyenne de 210 kWh.

Le ciment Portland représente 930 kg de (CO₂) émis par tonne de ciment produite. D'après une étude menée par le world business Council for sustainable développement, l'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre liée à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment ces émissions sont principalement de deux sortes émissions énergétiques et émissions de procédé :

- Les émissions énergétiques sont liées à la production de l'énergie thermique nécessaire à la fabrication du clinker.
- Les émissions de procédé sont dues au fait que le (CO₂) fait partie des produits de la réaction chimique qui transforme le carbonate de calcium en clinker (Décarbonatation du carbonate de calcium).

I.3.5 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux

Les inconvénients de l'utilisation des ajouts minéraux peuvent être les suivants :

- Un retard de prise
- Une résistance à la compression au jeune âge plus faible
- Un murissement plus long
- Une résistance à l'écaillage controversée
- Un coup élevé à cause du broyage et du transport cher

I.3.6 Les fibres

Il est très difficile de fournir une définition stricte de la fibre, les fibres sont disponibles en différentes tailles et formes. L'Américaine Concrete Institut (Committee, 1973) considère que le rapport d'aspect d'une fibre (L/d., Longueur divisée par le diamètre de fibre équivalent) est le paramètre le plus approprié par lequel une fibre peut être décrite. Cependant, dans la production de bétons fibreux, la gamme de diamètres et de longueurs de diverses fibres utilisées est très étendue et certaines des fibres (par ex. fibre de verre) sont utilisées sous forme de faisceaux. Il n'est pas possible de classer les fibres par leur rapport d'aspect seul. Le choix d'une fibre doit être basé sur le fait que la fibre utilisée doit être, avant tout mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice, elle doit conserver ses propriétés dans le temps [34].

I.3.6.1 Les différents types de fibres :

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leurs origines (naturelles, artificielles et synthétiques), leurs formes (lisse, droite, ondulée, à crochet, munie de cônes aux extrémités, etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, module d'élasticité, etc.) Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation de structure, projection, renforcement d'une pâte, etc.), il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice et le mode de performance du composite [35].

Parmi les fibres les plus utilisées dans le domaine du béton, nous citons (Yagoub, 2009):

- Fibres naturelles végétales : cellulose, lin, sisal.
- Fibres naturelles minérales : amiante.
- Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, d'acier.
- Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, Nylon [36].

I.3.6.2 Les fibres naturelles végétales :

La principale fibre naturelle végétale utilisée est la cellulose, ces fibres sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme additif au ciment d'amiante. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces utilisées dans l'isolation phonique et thermique des murs [37].

I.3.6.3 Les fibres naturelles minérales

La fibre d'amiante est la fibre naturelle minérale peu coûteuse disponible à l'état naturel, elles sont produites de la roche des silicates magnésiens ayant des propriétés réfractaires. Elles sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes [37].

I.3.6.4 Les fibres synthétiques d'origine minérale

- **Les fibres de verre :**

Les fibres de verre sont très efficaces grâce à leurs qualités mécaniques, elles sont produites en atténuant le verre fondu par diverses techniques. Mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment ; Certaines fibres de verre présentent des propriétés « alcali-résistantes » [38].

- **Les fibres de carbone :**

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre, et elle est composée principalement d'atomes de carbone. Les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes. Leur utilisation, pour le

renforcement de structures vise à compléter la structure d'un ouvrage là où ses parties tendues sont insuffisamment dimensionnées [39].

- **Les fibres d'acier :**

Les fibres métalliques notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables par leur forme, leur longueur et leur état de surface (ronde, carrée, rectangulaire, etc.), de mieux s'ancrer dans le béton. Elles peuvent être comme fibres ondulées, droites, rubans, de fonte, à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, ...etc. [39]

I.3.6.5 Les Fibres synthétiques organique :

Les fibres polypropylènes

La fibre du polypropylène est le matériau idéal dans les mélanges en béton pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et augmenter les propriétés de la surface du béton. Ces fibres ne remplacent pas le renforcement structurel en acier mais elles peuvent remplacer les armatures qui sont utilisés uniquement pour empêcher les fissures de retrait plastique, et qui représentent un risque de corrosion [36].



Figure I-3 : Fibres polypropylènes de 6, 12 et de 19 mm [40].

I.3.6.6 Rôle des fibres

L'efficacité des fibres polypropylènes dans la tenue au feu des bétons . Park à montré que cette efficacité est liées à la température de fusion relativement basse des fibres . Ce faisant , un volume vide est créé et le transfère de l'eau sous forme de vapeur ou de liquide au sein du matériau est facilité . Pour que l'efficacité des fibres vis-à-vis de la tenue au feu soit suffisante , il faut un volume suffisant de fibres , qui augmente lorsque le rapport E/C diminue . Ainsi pour Park il faut un volume de fibres de l'ordre de 0.1% pour un rapport E/C de 0.3 et un volume de fibres de l'ordre de 0.2% pour un rapport E/C de 0.25 .

Cependant , comme il à été dit , l'efficacité est bien meilleur pour les fibres des polypropylènes que pour les fibres d'une autre nature [41].

I.3.6.7 Référencement et caractéristiques des fibres

Les fibres polypropylènes sont déjà utilisées dans certains constructions en béton . Notamment pour réduire la fissuration au jeune age des grands éléments surfaciques comme les dalles , ou bien pour renforcer du béton projeté dans les tunnels , les fibres polypropylènes ou de polyvinyl alcool ,entre autres , peuvent être employées [42].

I.3.6.8 Les caractéristiques et les propriétés des fibres :

Certaines caractéristiques des fibres polypropylènes importante pour la résistance au feu :

Température de fusion (T_f) : c'est la température à laquelle la fibre passe de l'état solide à l'état liquide. Il ne faut pas la confondre avec la température de vaporisation (T_v), pour laquelle la fibre passe à l'état gazeux. (T_f) joue un rôle sur le niveau de température ou apparait le volume libérer. A priori, plus elle est basse, plus elle sera efficace.

Longueur de la fibre (L) : elle joue un rôle par rapport à la taille des granulats et au nombre de fibres présentes dans le béton.

Diamètre de la fibre (D) : il entre en jeu dans le rapport L/D . Plus ce rapport est élevé, plus la fibre est élancée et meilleure serait la connectivité du réseau.

Densité (ρ) : elle est importante car, pour un dosage donné, elle permet d'estimer le nombre des fibres ajoutées dans la composition, en utilisant la longueur et le diamètre [43].

I.4 Influence des hautes températures sur les propriétés physique, thermique et mécanique des matériaux cimentaires

I.4.1 Introduction

La compréhension des propriétés des matériaux cimentaires (béton et/ou mortier) sous haute température est essentielle pour améliorer la résistance au feu principalement des structures en béton armé et fournir des informations exactes pour la conception « résistance au feu » des structures.

Des études expérimentales antérieures sur le comportement des matériaux cimentaires exposés à des températures élevées se sont principalement concentrées sur la réduction de la résistance du matériau, même si la perte de durabilité du béton ou du mortier peut gravement réduire la durée de vie résiduelle de la structure.

Lors d'un incendie, le chauffage très rapide du matériau cimentaire peut causer des grands changements de volume dû à la dilatation thermique, de retrait dû à la migration d'humidité et d'éventuel effritement et écaillage dû à de fortes contraintes thermiques et à la pression interstitielle qui se développe dans la masse du matériau cimentaire (béton et/ou mortier). Le

changement important de volume se traduit par microfissuration et de grandes fractures qui engendrent une insuffisance structurelle [44]. L'ampleur des variations des propriétés d'un matériau cimentaire, d'un béton ou d'un mortier, causées par des températures élevées dépend de nombreux paramètres internes et externes, tels que la composition du matériau principalement le rapport E/C, les propriétés des constituants (la nature du sable par exemple (calcaire ou siliceux), le taux de chauffage, le taux de refroidissement, la température maximale atteinte, ...etc.

I.4.2 Evolution des propriétés physiques

I.4.2.1 Evolution de la porosité

Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, Fischer [45] a montré que celle-ci augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû, en partie, à la rupture interne de la structure du gel de C-S-H lors du processus de déshydratation.

Les travaux menés par Noumowé A. [46] montrent que la porosité du matériau cimentaire augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

I.4.2.2 Perte de masse

Pendant le chauffage, le matériau cimentaire perd du poids en raison du départ de l'eau libre (capillaire) et par la suite de l'eau chimiquement liée qui est contenue dans les hydrates. Sa masse est aussi soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel C-S-H. Khoury [47] ont montré l'évolution de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse (voir la **figure I.4**). Kali et al. 2001 [48] ont observé également, à des températures inférieures à 600° C, la même évolution de la perte de masse des bétons. Hager G. (2004) [49] observe, elle aussi, que la perte de masse commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Par la suite et progressivement, les gaz et fluides présents dans le matériau sont mis en mouvement ce qui conduit aussi à une perte de masse importante.

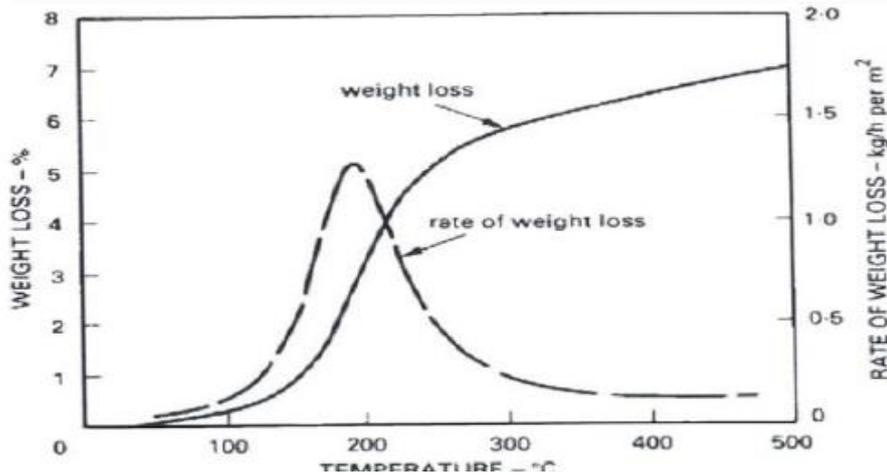


Figure I-4: Perte de masse au cours de chauffage et la vitesse de perte de masse en fonction de la température du béton [47].

Mais, à partir de 150° C, elle subit un retrait important. Ce mouvement provient de la diminution de la tension capillaire de l'eau absorbée dans la pâte au cours de l'échauffement [50].

La température à laquelle on observe le changement de signe du coefficient de dilatation thermique dépend de la vitesse d'échauffement. Lorsque la vitesse de montée en température est égale ou inférieure à 10° C/min, cette température se situe autour de 150-200° C. En augmentant la vitesse d'échauffement, la température de changement augmente également. Pour une pâte de ciment chauffée à 35° C/min, elle se situe à environ de 300° C [51].

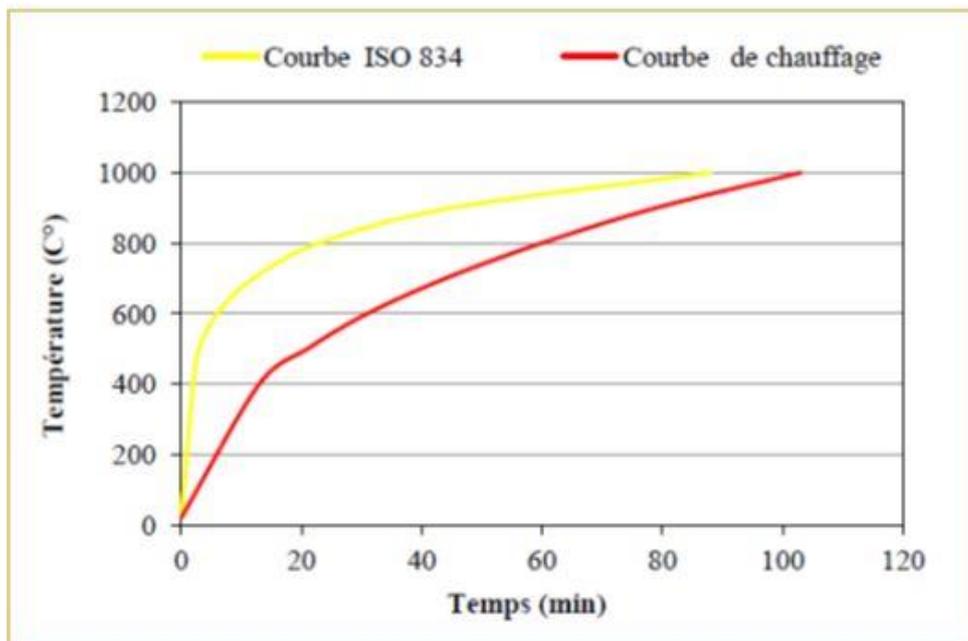


Figure I-5: Influence de la vitesse de la montée en température.

Les déformations thermiques des pâtes de ciments chauffées avec une vitesse de montée en température de 2° C/min, ont été déterminées aussi par Diederichs [52]. Dans les travaux de Sliwinski et al. [53], il a été montré que l'ajout de la fumée de silice en quantité de 10 % dans la pâte de ciment, augmente au cours de l'échauffement le retrait de celle-ci. Dans ces travaux, les auteurs ont également observé deux phases dans la déformation thermique des pâtes. Dans la première, les pâtes se dilatent jusqu'à environ 250° C ou 300° C pour atteindre une déformation de 3‰. Ensuite les déformations changent de direction, le matériau commence à se rétracter. Le retrait peut atteindre à 700° C environ 35 ‰ pour la pâte avec 10 % de la fumée de silice et 27 ‰ pour la pâte sans fumée de silice [53].

❖ Déformation thermique des granulats

La dilatation thermique des bétons et des mortiers est principalement liée à la dilatation des granulats. Le phénomène est plus remarquable dans le cas d'un béton où les granulats sont plus grossiers. On peut limiter la déformation du béton aux hautes températures en jouant sur la nature des granulats.

❖ Déformation thermique du béton

La dilatation thermique des bétons dépend fortement de la nature de leurs granulats [49], on peut constater que :

Les déformations thermiques du béton sont non linéairement dépendantes de la température, Le facteur prépondérant de la dilatation thermique est la nature des granulats, La pâte de ciment se rétracte aux températures supérieures à 150°C.

✓ Aux températures dépassant 600 à 800° C, on observe la réduction ou l'arrêt de la dilatation thermique [54].

Tableau I-7 : Coefficient de dilatation thermique selon la nature des granulats [55].

Température	Coefficient de dilatation thermique (αT) [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]		
	Grés	Calcaire	Granit
20 - 100° C	10.0	3.0	4.0
100 - 300° C	15.0	9.0	13.5
300 - 500° C	21.5	17.0	26.0
500 - 700° C	25.0	33.0	47.5

La figure I.5. Regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. Il est à noter que le coefficient de dilatation thermique est plus faible pour les granulats calcaires que pour ceux de nature siliceuse [47].

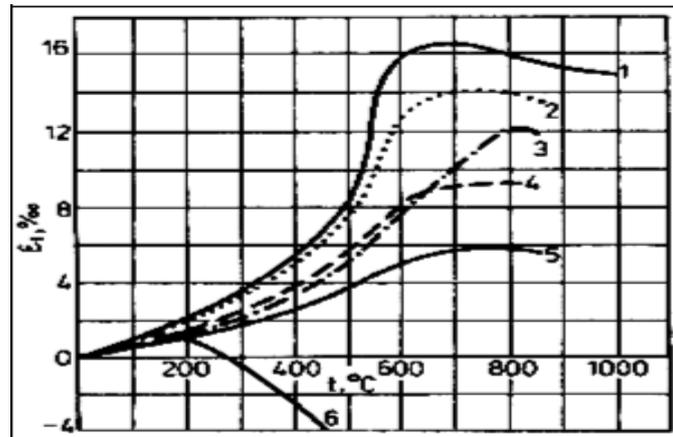


Figure I-6 : Dilatation thermique longitudinale de différents types de roches en fonction de la température : (1) siliceux; (2) grés; (3) calcaire; (4) basaltes; (5) argiles expansées; (6) pâte de ciment[47].

I.5 Conclusion

Nous avons présenté une synthèse bibliographique organisée en trois parties de recherche distincte, premièrement on s'intéresse à présenter quelques notions et définitions générales sur le matériau "ciment" et les ajouts minéraux avec ses caractéristiques principales ainsi que leur comportement en terme d'hydratation et de leurs participations dans le développement des propriétés du ciment durci. Certaines informations ont été aussi données, dans la première partie de ce chapitre, sur des différentes fibres qui peuvent améliorer le comportement du matériau cimentaire. Ensuite, les études réalisées sur le comportement sous hautes températures des matériaux cimentaires, principalement les béton, a démontré que l'évolution des propriétés mécaniques est fortement conditionnée par l'évolution de la microstructure de la pâte de ciment, due au départ de l'eau présente dans la matrice cimentaire sous forme d'eau libre, d'eau capillaire, d'eau adsorbée et d'eau chimiquement liées aux hydrates de ciment. L'échappement de l'eau est donc l'un des paramètres les plus significativement influençant le comportement des matériaux cimentaire exposé aux hautes températures.

Dans notre étude expérimentale, nous allons étudier le comportement de différents mortiers à base d'un ajout minéral qui est la fumée de silice. Cette dernière qui sera rajouté au matériau "mortier" par substitution d'une quantité du ciment. Des mortiers avec différents dosages en fumée de silice sont testés dans cette étude.

Par ailleurs, et afin de réduire les risques d'instabilité thermique dans les mortiers exposé à des hautes températures, le recourt à l'utilisation des fibres de polypropylène dans les mortiers semble être une solution technologique adéquate. Dans cette étude, un grand intérêt est donné

aussi à l'étude de l'influence de ce type de fibre (polypropylènes) sur le comportement de nos mortiers exposés à des températures élevées.

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.

II.1 Introduction

Le mortier se compose de plusieurs différents matériaux (constituants) qui influent, de manière directe, sur ses propriétés physique, chimique et mécanique. Alors, les propriétés d'un mortier sont forcément liées avec les caractéristiques de ses constituants.

Ce chapitre se divise en deux parties : une première est consacrée pour la caractérisation des différents matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers étudiés dans ce travail de recherche (tels que le ciment et les sables), à savoir : la composition chimique et minéralogique des différents constituants ainsi que leurs propriétés physiques tels que les masses volumiques et les surfaces spécifiques des fines utilisés.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, des méthodes expérimentales et même certains modes opératoires sont présentés.

Dans cette étude expérimentale, cinq mortiers sont testés. Pour la préparation de ces mortiers, les mêmes matériaux (ciment, sable, ajout et fibre) sont utilisés, mais l'ajout et donc le ciment sont de quantités différentes.

L'ajout pouzzolanique étudié dans cette campagne expérimentale est la fumée de silice qui est ajoutée au mortier (par substitution d'une quantité du ciment) avec des différents dosages (5 %, 8 % et 12 %).

Il est important de noter que certains résultats des essais de caractérisation des matériaux utilisés, ou même des mesures effectuées, principalement sur les mortiers à l'état frais tel que des mesures de maniabilité et de l'air occlus, sont donnés aussi dans ce chapitre.

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

II.2.1 Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est de type CEM II/A 42.5 provenant de la société des ciments de Béni-Saf dans la wilaya d'Aïn-Temouchent. Ce ciment est composé de 83 % de clinker, 5 % de gypse, 10 % de la pouzzolane naturelle et de 2 % de calcaire sableux.



Figure II-1: Ciment CEM II/A 42.5.

II.2.1.1 Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique indiqués dans le tableau II.1 ci-dessous.

Les tableaux II.1 et II.2 présentent respectivement les analyses chimiques et les compositions minéralogiques du ciment utilisé. Ces analyses ont été réalisées au sein de laboratoire des travaux publics d'Oran (LTPO).

Tableau II-1 : Analyse chimique du ciment utilisé (CEM II/A 42,5).

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO libre	Perte au feu
Quantité (%)	24.82	5.62	3.07	61	0.74	2.45	0.94	1.36

Tableau II-2: Composition minéralogique du ciment utilisé (CEM II/A 42,5).

Composants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse
Quantité (%)	55.51	20.18	9.71	9.33	5,27

Les résultats montrent que le ciment utilisé (CEM II/A 42.5) se caractérise par une plus faible teneur en Al_2O_3 et par conséquent à une faible teneur en C_3A , ce qui peut conduire à un temps de prise (début et fin de prise) de la pâte du ciment relativement retardé.

II.2.1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé

Pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé dans cette étude, nous avons réalisé plusieurs essais au sein de notre laboratoire de génie civil à l'université d'Aïn-Temouchent. Nous présentons ci-dessous certains modes opératoires, principalement pour la détermination de la surface spécifique Blaine du ciment et de sa masse volumique absolue.

➤ **Mesure de la finesse de mouture (surface spécifique Blaine) du ciment selon la norme NF P 15-442**

La méthode de perméabilimètre de Blaine a été utilisée pour déterminer la surface spécifique Blaine du ciment. Le mode opératoire de l'essai est comme suit:

- On prend une cellule de perméabilimètre et on le remplit avec du ciment (2.56 g), après avoir mis une rondelle de papier filtre adapté au diamètre de la cellule, puis on met un autre papier filtre au-dessus de la couche de ciment de façon à laisser passer l'air à travers le ciment puis on ferme la cellule avec le piston.
- Après avoir bien tassé le ciment, on enlève le piston lentement en effectuant de légères rotations lentes et alternatives puis on le place dans l'appareil de Blaine.
- On fait monter le liquide du manomètre vers un point supérieur à l'aide de la poire aspirant, et alors on ferme le robinet et on commence à chronométrer le temps de passage du liquide vers le trait le plus bas sur le tube de perméabilimètre.
- Pour avoir une bonne étanchéité de l'ensemble on a étalé de la vaseline sur les parois de la cellule.
- On refait le chronométrage trois fois pour chaque échantillon de fine (ici du ciment) testé.

$$S_{SB} = 3.73145 \text{ m}^2/\text{g}$$



Figure II-2 : Perméabilimètre de Blaine.

➤ **Mesure de la masse volumique apparente de ciment selon la norme NF P 18-558**

Nous avons mesuré la masse volumique apparente de ciment étudiés par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure d'un litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. Trois essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1 gramme, les valeurs moyennes obtenues sont représentées sur le tableau II.3.

➤ **Mesure de la masse volumique absolue de ciment selon la norme NF P 18-558**

Cet essai est réalisé à l'aide d'un pycnomètre en utilisant de Toluène. Le mode opératoire de cet essai est comme suit :

- On pèse d'abord le pycnomètre vide et on le remplit par la suite de toluène jusqu'au trait repère, soit une masse (M_1),
- On pèse une quantité du ciment, soit une masse (M_2),
- On introduit la quantité M_2 du ciment dans le Toluène après avoir vidé le pycnomètre à moitié,
- On élimine l'air et on remplit le pycnomètre de toluène au trait repère et on le pèse soit la masse (M_3)

Donc, la masse volumique absolue est égale à :

$$M_{V(abs)} = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$



Figure II-3: Pycnomètre utilisé pour la mesure de la masse volumique absolue.

➤ **Mesure de la consistance de la pâte du ciment**

L'essai de consistance est effectué à l'aide de l'appareil de Vicat et d'une sonde conformément à la norme **NF EN 196-3**. Cet essai consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée de la pâte du ciment.

Le résultat obtenu de la consistance du ciment étudié est présenté ci-dessous dans le tableau II.3.

➤ **Temps de prise du ciment selon la norme NF EN 196-3**

À l'aide de l'appareil de Vicat et une aiguille, et suivant la norme **NF EN 196-3** on a pu déterminer le temps de prise du ciment utilisé et notamment son moment de prise. Les deux étapes essentielles sont les suivantes :

- Le temps de début de prise : c'est le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plage soit de 5 mm.
- Le temps de fin de prise : c'est le temps mesuré depuis l'instant zéro au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois que de 0.5 mm dans l'éprouvette.

Les résultats obtenus du temps de prise sont présentés dans le tableau II.3 ci-dessous.

La masse volumique absolue de ciment utilisé est incluse dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme algérienne, 1992) [N.A. 92], compris entre 2.900 – 2.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

La consistance obtenue est conforme à la norme NF EN 196-3 ou les valeurs sont généralement compris entre 26 et 33%. Avec un temps de prise minimal de 60 minutes conformément à la norme NF P 15-301

Les résistances à la compression et à la flexion du ciment utilisé, à l'âge de 7 jours et de 28 jours. Sont déterminer dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé.

Caractéristique du ciment CEM II/A 42,5		
Masse volumique apparente lâche (g/cm ³)		1.047
Masse volumique apparente compacte (g/cm ³)		1.761
Masse volumique absolue (g/cm ³)		3.015
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)		3531.45
Consistance (%)		29
Début de prise (heure)		2 h 45 min
Fin de prise (heure)		6 h 00
Résistance à la compression (MPa)	à 7 jours	40.10
	à 28 jours	48.53
Résistance à la flexion simple (MPa)	à 7 jours	3.84
	à 28 jours	5.96

Les résultats obtenus montrent que les masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, déterminées selon la norme **NF P 18-558**, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992), compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

Les résultats de la résistance mécanique obtenues à 7 jours et à 28 jours pour le ciment CEM II/A 42.5, indique que ce type de ciment donne des résistances mécaniques relativement élevées, dont la valeur de la résistance à la compression à 28 jours est largement supérieure à 42.5 MPa qui est la résistance limite du ciment choisi pour cette étude.

II.2.2 Le Sable

II.2.2.1 Caractéristiques chimiques du sable utilisé

Le sable utilisé dans cette étude est un sable concassé (0-5 mm) de nature calcaire, issu de concassage d'un calcaire dur, dont la carrière se situe de Sidi-Ali Benyoub dans la wilaya de sidi Bel-Abbès. Tous les essais de laboratoire effectués dans cette partie du programme expérimental ont été conduits selon les normes internationales.

L'analyse chimique de ce sable concassée est donnée ci-dessous dans le tableau (II.4).

Tableau II-4: Analyse chimique du sable concassé [LTPO].

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perte au feu
Quantité (%)	4.51	1.09	0.54	50.68	1.01	traces	41.04

Les résultats de l'analyse chimique du sable utilisé montrent qu'il est de nature calcaire avec une forte teneur en carbonates de calcium CaCO₃ de 79.46 %

II.2.2.2 Caractéristiques physique du sable utilisé

Pour la caractérisation physique du sable, plusieurs essais ont été effectués au laboratoire de l'université d'Aïn-Témouchent selon les normes internationales.

➤ **Analyse granulométrique de sable selon la norme NF P 18 560**

Cet essai consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant le sable, dont les dimensions sont comprises entre 0.080 et 5 mm.

Dans cette analyse granulométrique nous avons défini : les pourcentages de tamisât (%), le coefficient d'uniformité (Cu), le coefficient de courbure (Cc), ainsi que le module de finesse (Mf) du sable utilisé pour la fabrication des mortiers objet de cette étude.



Figure II-4 : Essai de l'analyse granulométrique.

Tableau II-5: Pourcentage des tamisâts.

Tamis (mm)	Tamisâts cumulés (%)
5	99.8
4	93.1
2.5	80.23
1.25	54.44
0.63	36.13
0.315	25.14
0.16	18.2
0.08	12.2

Les résultats obtenus de l'analyse granulométrique du sable concassé (0-5 mm) utilisé sont illustrés sur la figure II.5.

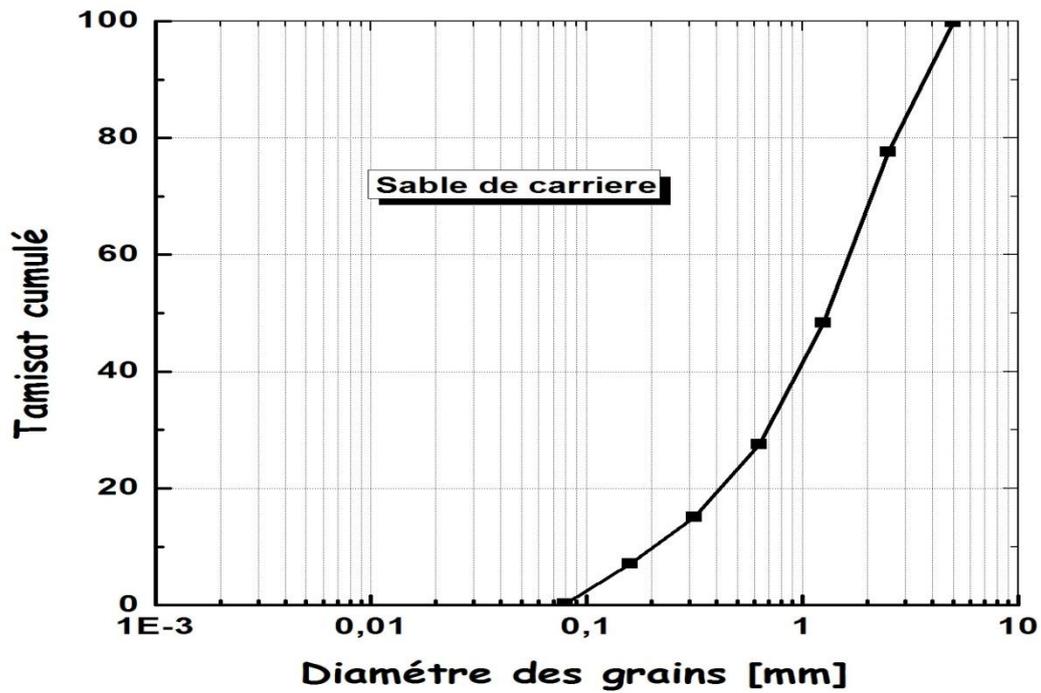


Figure II-5: Courbe granulométrique du sable utilisé.

➤ **Mesure de l'équivalent de sable selon la norme NF P 18 598**

Le but de cet essai est de mesurer la propreté du sable utilisé pour la fabrication du matériau cimentaire envisagé, selon les textes normatifs, les sables qui ont un équivalent de sable visuel (ESV) compris entre 75 et 85 est parfaitement pour la fabrication des béton et des mortiers.



Figure II-6: Essai de l'équivalent de sable.

Les masses volumiques "apparente et absolue" du sable ont été aussi mesurées selon la norme **NF P 18-558**. Les résultats obtenus dans cette campagne de caractérisation physique de ce sable concassé (0-5 mm) sont récapitulés dans le tableau **II.6**.

Tableau II-6 : Caractéristiques physiques du sable utilisé.

	Sable concassé (0-5 mm)
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1477
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2585
Equivalent de sable visuel (%)	74
Module de finesse	2.86
Coefficient d'uniformité (Cu)	6.72
Coefficient de courbure (Cc)	1.53

Les résultats obtenus de l'équivalent de sable et de module de finesse indiquent que le sable utilisé est propre et grossier, de module de finesse égale à 2.86 est un peu plus par rapport à l'intervalle donnée pour un bon module de finesse (l'intervalle qui contient un sable préférentiel). D'une part, les valeurs des coefficients de courbure et d'uniformité qui sont déterminé à partir de l'analyse granulométrique, nous permet de dire que le sable concassé est avec une granulométrie non uniforme. D'autre part, les résultats des masses volumiques apparentes et absolues ont aussi donnée les valeurs de 1477 et 2585 (kg /m³) respectivement.

II.2.3 La fumée de silice

II.2.3.1 Définitions

Les études sur le lien entre la granulométrie d'un mortier et sa résistance mécanique ont conduit à proposer l'introduction d'une petite fraction d'éléments de taille plus réduite que celle des particules du ciment afin d'augmenter la résistance [29].

Parmi les matériaux pouvant constituer ces éléments fins, la fumée de silice qui présente un intérêt particulier car elle réagit chimiquement dans les mortiers en améliorant certaines propriétés telle que la maniabilité, la perméabilité et la résistance mécanique.

➤ **Influence de la fumée de silice sur la maniabilité du béton**

La fumée de silice utilisée pour les mortiers à trois fonctions principales : Remplissage des vides entre les particules de classe supérieure (ciment).

Amélioration de la rhéologie par effet de lubrification due à la parfaite sphéricité des particules élémentaires.

Production d'hydrates secondaires par réaction pouzzolanique avec la chaux produite par hydratation primaire.

'M. Cheyreze et P. Richard' rapportent que les meilleurs résultats sont obtenus avec la fumée de Silice provenant de l'industrie du Zircane qui est sans impuretés et totalement désagrégée. Sa finesse est faible par rapport à celle des Fumées de Silice traditionnelles (14 m²/g au lieu de 18 m²/g).

Pour une Fumée de Silice sans impuretés et de finesse élevée 22 m²/g les résultats sont médiocres du fait de l'agrégation des particules les plus fines. Le dosage en Fumée de Silice correspondant à l'optimum de remplissage est de 0.25 qui correspondent à la consommation de la chaux produite par l'hydratation totale du ciment. Or l'hydratation est incomplète, par conséquent, la Fumée de Silice est en quantité surabondante [56].

➤ ***Influence de la fumée de silice sur la perméabilité du mortier***

Les ajouts minéraux sont très intéressants du fait de leur finesse et leur géométrie. La fumée de silice, par exemple, en remplaçant le ciment avec un taux variant souvent entre 5 et 10%, permet un effet de remplissage ainsi qu'un effet de roulement à billes.

Cet ajout minéral permet d'obtenir un matériau plus dense, avec une porosité moins importante qu'un béton ordinaire au niveau des interfaces pâte /granulats ainsi que dans la pâte hydratée en général. Cet effet de remplissage est aussi retrouvé avec la plupart des autres ajouts minéraux et contribue à rendre le béton plus imperméable, en plus de fournir des résistances mécaniques accrues.

Différentes études se sont intéressées à l'influence des ajouts minéraux sur la perméabilité du béton. Cette influence est différente selon le type d'ajout et sa quantité, c'est-à-dire le taux de remplacement du ciment. Il a été observé (Khan, 2003) que l'ajout de fumée de silice diminue la perméabilité à l'oxygène du béton à tout âge, qu'il y ait présence ou non de cendres volantes. La perméabilité minimale est associée à un taux de remplacement du ciment d'environ 10 % (entre 8 et 12 %). Pour un taux de remplacement supérieur, la réduction de perméabilité n'est plus significative. Ceci est associé au fait qu'une inclusion entre 8 et 12 % de fumée de silice permet l'obtention d'une porosité optimale alors qu'au-dessus de 12 %, la diminution de la porosité est mineure (Khan, 2003) [57].

➤ ***Influence de la fumée de silice sur la résistance mécanique du mortier***

Les études menées par S. Staquet ont aboutis aux mêmes résultats trouvés par 'M. Cheyreze et P. Richard'. Ses résultats sont illustrés dans la figure II.7

Les essais ont été réalisés sur deux Fumées de Silice différentes par leurs couleurs (due à la teneur du carbone), leurs surfaces spécifiques BET et leurs compositions chimiques. SF1 provient de l'industrie du Zircon et SF3 est issue de l'industrie du Silicium. ces deux Fumées de Silice sont choisies pour leur teneur élevée en SiO₂ (> 90%).

La figure II.7 montre qu'avec la SF3 la résistance à la compression à 28 jours est d'environ 10% plus élevée qu'avec SF1.

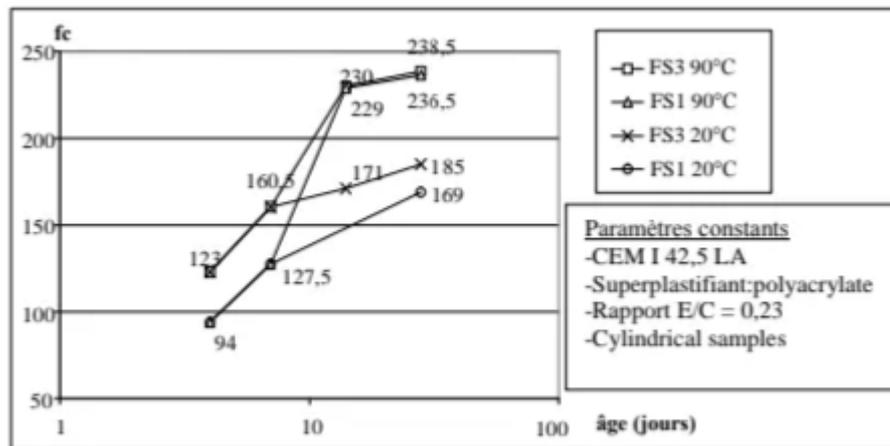


Figure II-7 : Influence de la fumée de silice sur la résistance des mortiers.

Après traitement thermique la résistance à la compression n'est plus influencée par le type de Fumée de Silice, cela peut se traduire par le fait que le traitement thermique élimine l'eau en excès dont la quantité dépend de la Fumée de Silice utilisée [58].

La figure II.8. Montre l'effet des ajouts cimentaires et en cas particulier la fumée de silice sur l'amélioration de la résistance des bétons à moyen et à long terme [59].

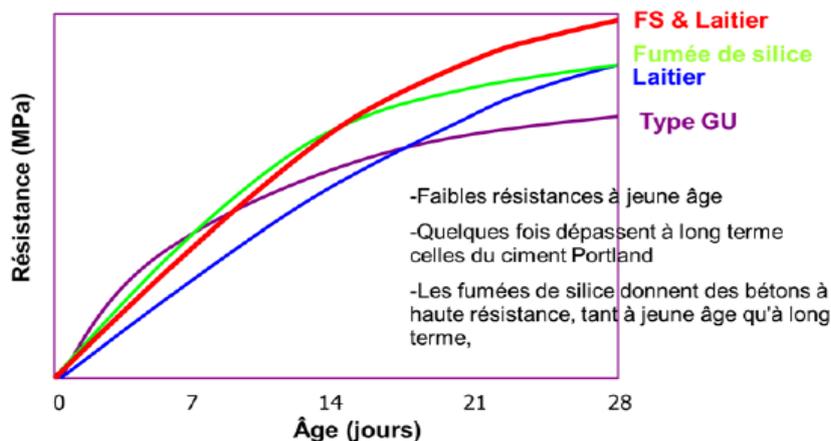


Figure II-8: L'effet de la fumée de silice sur l'amélioration de la résistance des mortiers de différent âge.

II.2.3.2 Caractéristiques chimique de la fumée de silice utilisée

La fumée de silice utilisé dans ce travail de recherche est de couleur Grise, obtenue de l'entreprise « Sika » Les analyses chimiques de cette fumée de silice ont été réalisées au laboratoire des travaux publics de la région ouest à Oran [LTPO]. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau II.7.



Figure II-9: La fumée de silice utilisée.

Tableau II-7 : Caractéristique chimique de la fumée de silice utilisé.

Composition	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PF	Cl ⁻
Teneurs (%)	95.14	1.58	0.2	0.6	0.90	0.45	0.17	0.96	-	-

Caractéristiques	Symboles	Teneurs
LA SILICE	SiO ₂	95.57%
L'ALUMINE	Al ₂ O ₃	0.16%
L'OXYDE DE FER	Fe ₂ O ₃	0.38%
LES SULFATES	SO ₃ (mg/kg)	NUL
LES CARBONATES	CaCO ₃	1.86%
L'ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO ₂	0.82%

II.2.3.3 Caractéristiques physique de la fumée de silice utilisée

➤ Mesure de la finesse de mouture (surface spécifique Blaine) de la fumée de silice selon la norme NF P 15-442

Tel que pour le ciment, la méthode de perméabilimètre de Blaine a été utilisée aussi pour déterminer la finesse de mouture de la fumée de silice utilisée dans ce travail de recherche (voir le mode opératoire cité plus haut).

Dans cette étude, la fumée de silice a été ajoutée avec des différents dosages (par substitution du ciment) pour la fabrication de différents mortiers. Il est donc important de noter que les surfaces spécifiques Blaine des différents liants (Ciment + Fumée de Silice) ont été aussi mesurées afin de vérifier son évolution.

Les résultats de la finesse de mouture de ces nouveaux liants (avec 5, 8 et 12 % de la fumée de silice), ainsi que d'autre résultats des masses volumiques, apparente et absolue, sont récapitulés dans le tableau **II.8** ci-dessous.

Tableau II-8: Caractéristique physiques de la fumée de silice utilisé.

Caractéristiques de la fumée de silice	
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.65
Masse volumique absolue (g/cm ³)	1.78
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	19171.31
Surface spécifique Blaine (ciment + 5 % de FS) (cm ² /g)	4032.73
Surface spécifique Blaine (ciment + 8 % de FS) (cm ² /g)	4642.96
Surface spécifique Blaine (ciment + 12 % de FS) (cm ² /g)	4963.17

Les résultats obtenus des surfaces spécifiques des différents liants sont illustrés par des histogrammes dans la figure **II.10**.

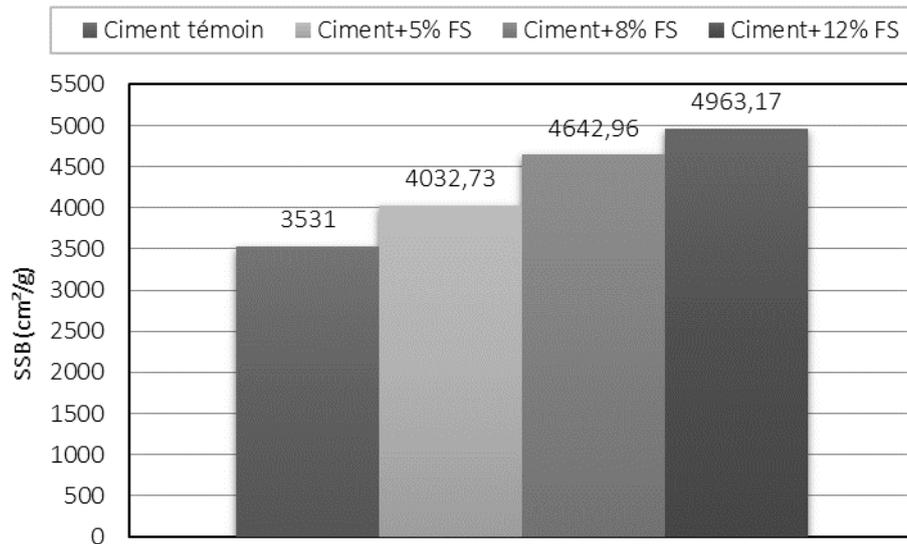


Figure II-10 : Surface spécifique Blaine des différents liants étudiés.

La figure **II.10**. Présente l'effet de la fumée de silice sur la surface spécifique des liants testés.

Les résultats montrent que les formulations de poudres qui contiennent 5, 8 et 12 % de la fumée de silice ont des surfaces spécifiques Blaine plus élevée que celle obtenue dans le cas du ciment seul (poudre témoin). Plus le dosage en fumée de silice est grand plus la valeur de SBB est élevée. Ceci est certainement à cause de la grande finesse de la fumée de silice ($SBB_{FS} = 19171 \text{ cm}^2/\text{g}$).

II.2.4 La fibre polypropylène

Les Fibres polypropylènes sont des fibres synthétiques fibrillées (voir la figure **II.12**) se présentant en sachets pré-dosés pour la fabrication des matériaux cimentaires (ajoutés aux bétons et aux mortiers). La masse volumique de ces fibres peut être d'environ $0.91 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Les fibres polypropylènes destinée à renforcer les ouvrages en béton, mortier ... et Améliore l'homogénéité des matériaux, maîtrise les retraits. FPP utilisent pour augmenter la résistance, la durabilité et pour éviter les fissures des bétons et des mortiers. Grace à sa structure multi – filaments sa dispersion est homogène et tridimensionnelle, ce qui lui permet d'avoir un regroupement maximal, en assurant le renfort du béton et en évitant l'apparition de micro fissure.

Un dosage de 1 kg de fibres par m^3 de béton [60].

➤ **Caractéristiques des fibres polypropylènes**

- Densité

Cette fibre est de faible densité pour un volume donnée, elle sera plus légère que ses équivalents en polyéthylène ou en nylon. Cela en fait une candidate parfaite pour des absorbants, en

particulier ceux destinés à traiter des surfaces importantes tout en restant hautement manipulables.

- Température

Sa conductivité thermique est la plus petite parmi les fibres naturelles ou synthétiques. Cela lui confère un bon comportement face à la chaleur. Avec un traitement anti-feu, les fibres polypropylènes ne présente plus de risque d'incendie. Elles possèdent en outre une bonne capacité isolante. Sa température de fusion est de 171 °C.

A noter tout de même que comme pour la plupart des polymères, une exposition prolongée à de hautes températures peut endommager la fibre [61].

Dans cette étude, les FPP utilisées sont de type BM12 de la société SIKA, fabriqués à l'entreprise de « Isomat building Quality » Leurs caractéristiques sont consignées ci-dessous dans le tableau II.9.

Tableau II-9: Caractéristique physiques des fibres polypropylènes utilisées.

Couleur	Grise
Longueur	12 mm
Diamètre	29 à 45.5 μm
Densité	0.91 g/cm ³
Résistance à la traction	340 à 500 MPa
Résistance au milieu chimique	Bonne
Point de fusion	170° C
Module d'élasticité	8.5 à 12.5 GPa



Figure II-11 : Fibres polypropylènes.

II.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour les mélanges de mortiers étudiés est une eau potable, exempte d'impuretés maintenue à une température constante, issue du robinet de laboratoire du département de génie civil à l'université d'Aïn-Témouchent

L'analyse chimique a été effectuée au LTPO d'Oran et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau II.10 ci-dessous

Tableau II-10 : Composition chimique de l'eau utilisée.

Composant	Quantité (mg/L)
Minéralisation	504.1
Turbidité	0.34
PH	7.1
Calcium	29.75
Magnésium	21.51
Bicarbonate	122
Chlorure	177.3
Sulfate	24.04
Nitrate	3.34
Fer	0.00
Ammonium	0.01

II.3 Formulations des mortiers et méthode de chauffage

II.3.1 Confection des mortiers

La préparation des mortiers et la confection des éprouvettes sont effectuées selon la norme NF EN 196-1. Cette norme régit la préparation des masses de matériaux confectionnées dans un malaxeur planétaire de 5 litres de capacité avec 2 temps de gâchage à des vitesses différentes.

Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable et d'une demi partie de l'eau ($E/C = 0.5$).

Chaque gâchée effectuée avec un rapport $E/C = 0.5$, pour confectionner trois éprouvettes d'essai ($4 \times 4 \times 16$) cm³ doit contenir 450 ± 2 g de Liant (ciment + FS), 1350 ± 5 g de sable et 225 ± 1 g d'eau. Notons qu'une légère modification dans la quantité d'eau a été appliquée afin d'éviter

l'utilisation d'un adjuvant et dans le but de garder la même classe de maniabilité des mortiers préparés (à leurs états frais).

Pour la fabrication des différents mortiers, le dosage en fumée de silice est varié (FS = 5 %, 8 % et 12 %), les mélanges des liants sont obtenus par substitutions d'une quantité du ciment. La quantité du sable reste inchangée pour la préparation des mortiers qui sont finalement d'une même classe de maniabilité avec un rapport E/C entre 0.5 et 0.56.

Tous les mélanges sont confectionnés selon les recommandations actuelles de la Norme **NF EN 196-1**. Pour l'ensemble des séries d'éprouvettes préparées, le même protocole a été utilisé pour la confection et la conservation dans une température ambiante de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ \text{C}$).

Les différentes formulations de mortiers étudiés sont présentées dans le tableau **II.11**.

Tableau II-11: Compositions des mortiers étudiés.

Compositions	E/L	Ciment (g)	Fumée de silice (g)	Sable (g)	Fibres polypropylènes (g)
M1 (tem)	0.50	450	0	1350	0
M2 (tem+ FPP)	0.50	450	0	1350	0.6
M3 (tem+FPP+5% FS)	0.52	427.5	22.5	1350	0.6
M4 (tem+FPP+8% FS)	0.54	414	36	1350	0.6
M5 (tem+ FPP+12% FS)	0.56	396	54	1350	0.6

La même procédure de gâchage (selon la norme **NF EN 196-1**) a été utilisée pour les cinq formulations de mortiers étudiés par cette campagne expérimentales (M1, M2, M3, M4 et M5). Les mortiers testés ont été élaborés conformément aux compositions données dans le tableau précédent (tableau **II.11**).

Après avoir pesé les quantités, les composants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant :

- ☞ On met la quantité d'eau + ciment dans le récipient et on malaxe ces deux quantités pendant 30 sec avec une vitesse lente.
- ☞ On introduit régulièrement la quantité de sable pendant les 30 secs suivants. Lorsque le sable est introduit dans le mélange, on donne par la suite une vitesse rapide au malaxeur

pendant 30 sec.

- ☞ On fait racler les parois pendant 15 sec, pour but d'homogénéiser le mortier.
- ☞ Le malaxe est arrêté pendant 1 min et 30 sec.
- ☞ On reprend finalement le malaxage à grande vitesse pendant 60 sec

Nous avons utilisé des moules métalliques normalisés permettant de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée (4 x 4 x 16) cm³. Après la mise en place des moules, nous avons lubrifié avec de l'huile les parois des moules.

Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des trois couches de mortiers en le faisant chuter d'une hauteur constante à chaque fois pendant 60 secondes. La fréquence de la table à choc est donc d'une chute par seconde (figures II.12 et II.13)

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée. Les moules remplis avec le mortier frais sont ensuite recouverts par un film plastique jusqu'à le démoulage.

II.3.2 Conservation des éprouvettes

Le démoulage est effectué après 24 heures de remplissage des moules. Une fois les éprouvettes sont démoulées, nous les avons conservés dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ (figures II.14 et II.15).



Figure II-12 : Malaxeur automatique.



Figure II-13: Table à choc.



Figure II-14: Conservation des éprouvettes dans l'eau.



Figure II-15: Séchage des éprouvettes à l'air libre pendant 24 h avant l'essai.

Les différentes séries d'éprouvettes ont été conservées pendant des différentes durées, elles sont donc de différents âges : de 7 jours, 14 jours, 28 jours et de 45 jours.

II.3.3 Méthode de chauffage

Dans ce travail de recherche la plupart des éprouvettes ont été exposées à des températures élevées afin d'étudier leurs différents comportements aux hautes températures. Alors, les températures d'exposition choisies sont : 20° C, 150° C, 300° C, 450° C et 600° C. Dans cette étude, la vitesse de la montée en température dans le four était de 10° C/min



Figure II-16: Le four à moufle utilisé pour le chauffage des éprouvettes [laboratoire de G. Civil - Univ Aïn-Témouchent].

Il est important de noter aussi que le maintien en température envisagée était d'une heure dans le cas de toutes les températures choisies (pour toutes les séries des échantillons de mortiers).

La méthode de séchage choisie peut être donc illustrée par le schéma suivant :

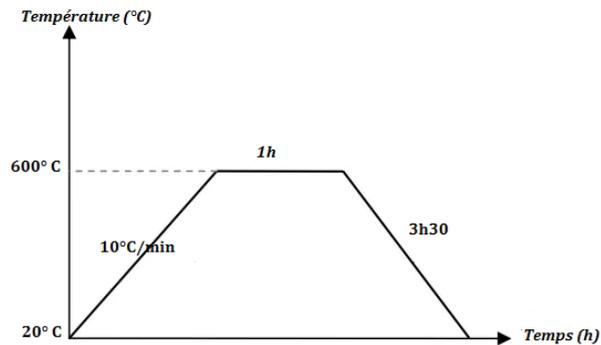


Figure II-17: Schéma indiquant le protocole choisi pour le chauffage du mortier.

II.4 Les essais effectués sur le mortier

II.4.1 Essais à l'état frais

Les premiers essais sur mortiers frais que nous présentons sont des essais classiques qui s'effectuent traditionnellement sur des mortiers. Aucune modification n'a été effectuée pour les appliquer aux mortiers. Les essais réalisés sur mortier sont :

II.4.1.1 Mesure de la maniabilité

L'essai de maniabilité, défini par la norme **NF P 18 452** est une mesure qui est utile pour apprécier la fluidité (la consistance) d'un mortier et donc sa mise en œuvre. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier la consistance du matériau.

Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

L'appareil utilisé est appelé "maniabilimètre". Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60 x 30 x 30) cm³, posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 4 couches. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps (t) mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide (ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil).

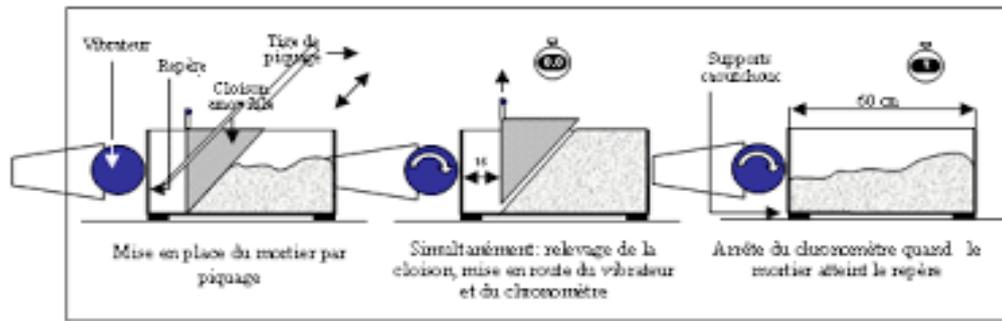


Figure II-18: Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

Les résultats de maniabilité mesurée dans le cas des différents mortiers, à base de différent dosage en fumée de silice, sont illustrés par des histogrammes sur la figure **II.19**.

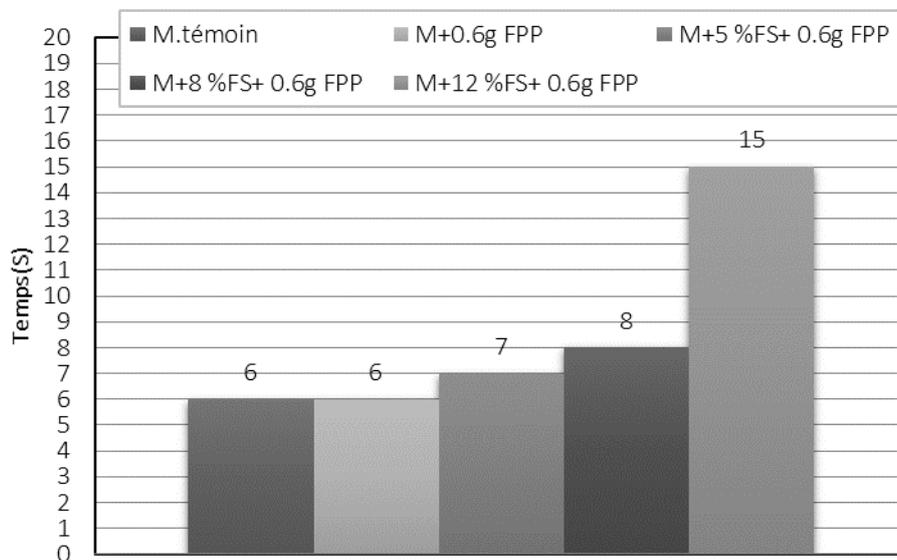


Figure II-19: Évolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.

D'après les résultats de maniabilité, on peut constater que plus le dosage (pourcentage) en fumée de silice n'est important, plus la vitesse d'écoulement du matériau dans le maniabilimètre n'est lente. La figure **II.19** montre que le temps d'écoulement d'un mortier avec 15 % de la fumée de silice peut être plus de deux fois le temps d'écoulement d'un mortier ordinaire (sans de la fumée de silice). Cela est expliquée par la forte absorption de l'eau par de la fumée de silice, ce qui conduit à l'obtention d'un mortier moins fluide quand le dosage en FS est plus important. Les résultats obtenus montrent aussi que le dosage utilisé en fibres polypropylènes (0,6 g (0.030 %) n'a aucune influence sur la maniabilité des mortiers testés.

II.4.1.2 Mesure de l'air occlus

Puisque la présence de l'air occlus dans le mortier frais participe à l'augmentation de la porosité ouverte du matériau à l'état durci, ce qui peut conduire, par conséquent, à l'obtention d'un matériau moins compacte et avec une résistance mécanique plus faible, il est donc indispensable de mesurer la quantité de l'air occlus dans les mortiers à l'état frais. Alors dans cette étude, à l'aide d'un aéromètre pour mortier (voir la figure II.20), des mesures de l'air occlus ont été effectuées, selon la norme **NF P18-353**, lors de la confection de tous les mortiers objet de cette étude.



Figure II-20: Essai de l'air occlus.

Les histogrammes illustrés ci-dessous sur la figure II.21 montrent l'évolution de la teneur en air occlus dans le cas des cinq mortiers étudiés. Notons que ces mesures de l'air occlus ont été effectuées pendant la préparation de chaque série d'échantillon (lors de toutes les confections). Les résultats montrés par les histogrammes ci-dessous (figure II.21) représentent une moyenne des résultats de toutes les mesures effectuées.

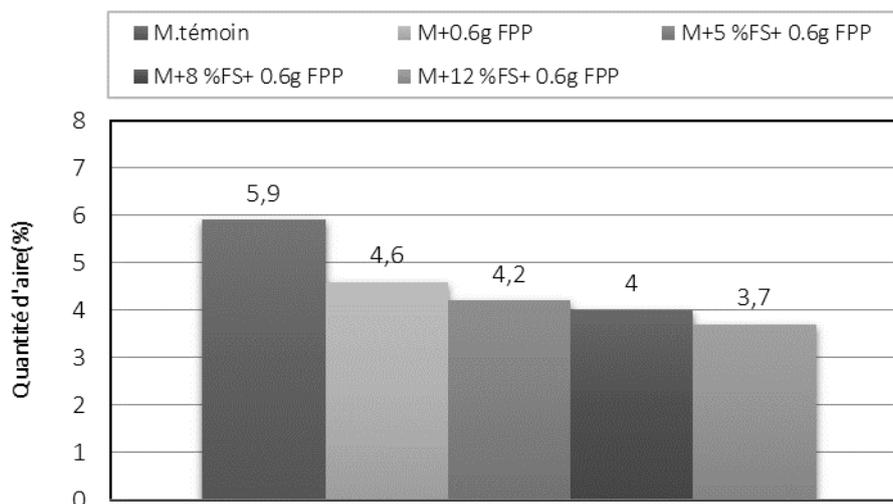


Figure II-21: Evolution de l'air occlus dans les différents mortiers étudiés.

D'après les historgammes obtenus (figure II.21), on peut constater que les particules fines de la fumée de silice et les fibres polypropylènes remplissant les vides disponible entre les particules du mortier, peuvent réduire la quantité d'air enprisonné dans ces vides.

Nous rappelons que la finesse de mouture de la fumée de silice utilisée était largement plus grande que la finesse du ciment. Alors, plus le dosage en FS est important, plus le pourcentage en air occlus dans le mortier à l'état frais diminué, et par conséquent, plus la porosité accessible à l'eau du matériau durci devient plus faible.

II.4.2 Essais à l'état durci

Les essais réalisés à l'état durci dans cette campagne expérimentale ont été tous effectués dans le laboratoire de Génie Civil à l'université d'Aïn-Témouchent selon les normes internationales. Une répétabilité des essais a été effectuée pour chaque série d'éprouvettes exposées à des températures différentes et à des différents âges, dont des valeurs moyennes de trois mesures effectuées sur trois échantillons du même matériau (mortier) sont indiquées dans les tableaux ci-dessous dans ce chapitre et sur les figures ci-après dans le troisième Chapitre.

II.4.2.1 Mesure de la résistance à la flexion simple du mortier

Pour la détermination de la résistance à la flexion simple, la méthode de la charge concentrée à mi-portée au moyen du dispositif de flexion normalisé a été utilisée selon la norme **ASTM D790**. Un schéma indiquant le principe de cet essai effectué sur mortier est donné ci-dessous (figure II.21). Il est important de noter que les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion simple ont été testés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de (40x 40) mm² tel qu'il est détaillé plu-tard.

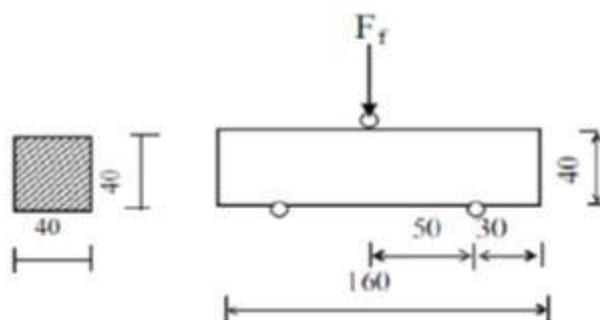


Figure II-22: Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette (4 x 4 x 16) cm³.



Figure II-23: Essai de flexion simple effectué sur une éprouvette du mortier.

Les tableaux suivants montrent les valeurs de la résistance à la flexion simple des échantillons de différents mortiers étudiés en fonction de l'âge des éprouvettes et dans le cas des différentes températures de chauffage.

Nous rappelons que les valeurs mentionnées dans les tableaux ci-dessous (tableau II.12 et II.13) sont des moyennes arithmétiques de trois mesures effectuées sur trois éprouvettes de chaque mortier.

Tableau II-12 : Résistance à la flexion simple du mortier à 20° C en fonction de l'âge des éprouvettes (7, 14 et 28 jours)

Âge du mortier	Résistance à la flexion R_f (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
M1 (Tém)	2.05	2.4	2.95
M2 (avec FPP)	2.1	2.6	3.45
M3 (avec FPP + 5 % FS)	2.15	2.9	3.95
M4 (avec FPP + 8 % FS)	2.35	3.1	4.05
M5 (avec FPP + 12 % FS)	2.35	3.4	4.3

Tableau II-13: Resistances à la flexion simple des mortiers à l'âge de 45 jours exposés à des différentes températures (20, 150, 300, 450 et 600° C).

Températures d'exposition (° C)	Résistance à la flexion R_f (MPa)				
	20	150	300	450	600
M1 (Tém)	2.8	3.8	3.5	2.4	1.7
M2 (avec FPP)	2.3	2.55	3.85	3.15	2
M3 (avec FPP + 5 % FS)	2.86	3.95	4.05	3.35	1.95
M4 (avec FPP + 8 % FS)	2.41	2.75	4.5	2.3	1.63
M5 (avec FPP + 12 % FS)	2.98	3.35	4.4	3	2.01

Des courbes et des analyses correspondant aux résultats de la résistance à la flexion simple des mortiers testés sont présentées dans le Chapitre 3.

II.4.2.2 Mesure de la résistance à la compression du mortier

L'essai consiste à centrer chaque demi-prisme (obtenus de l'essai de la flexion simple) latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près (figure II.24) et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm selon la norme **NF P 18-406** et d'augmenter par la suite la charge de pression (charge hydraulique) avec une vitesse constante durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).



Figure II-24 : Essai de compression simple d'un échantillon du mortier.

Nous rappelons encore que les valeurs des résistances indiquées dans les tableaux ci-dessous sont des moyennes arithmétiques de six mesures effectuées sur six échantillons pour chaque série d'éprouvettes de mortiers exposées à des différentes températures et à différents âges.

Pour les différents mortiers étudiés (avec différents dosages en fumée de silice et en fonction de l'âge du matériau) les résultats de leurs résistances à la compression sont récapitulés dans le tableau II.14 ci-dessous.

Tableau II-14 : Résistance à la compression simple en fonction de l'âge du mortier à 20° C (à 7, 14 et à 28 jours) .

Âge du mortier	Résistance à la compression Rc (MPa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
M1 (Tém)	59.4	59.7	60.6
M2 (avec FPP)	52.8	53.4	54.2
M3 (avec FPP + 5 % FS)	57.8	59.9	61.7
M4 (avec FPP + 8 % FS)	58.1	59.2	60.9
M5 (avec FPP + 12 % FS)	53.2	55.1	57.3

Dans le tableau **II.15** ci-dessous, pour différentes températures de séchage, les résistances à la compression simple sont récapitulées pour les différentes séries d'échantillons (avec différents dosage en fumée de silice).

Tableau II-15: Résistances à la compression simple des mortiers à l'âge de 45 jours exposées à des différentes températures (20, 150, 300, 450 et 600° C).

Température d'exposition (° C)	Résistance à la compression R_c (MPa)				
	20	150	300	450	600
M1 (Tém)	43.06	63.15	62.05	56.17	27.68
M2 (avec FPP)	41.98	62.3	61.1	51.42	29.58
M3 (avec FPP + 5 % FS)	40.77	56.61	80.8	68.32	24.35
M4 (avec FPP + 8 % FS)	39.32	54.35	84.5	63.92	23.78
M5 (avec FPP + 12 % FS)	46.65	71.1	73.4	63.85	32.65

Les analyses de ces résultats des résistances mécaniques (à la flexion et à la compression) sont présentées dans le troisième chapitre de ce document. Alors, des figures sont tracées et plus de détails sont discuté dans le prochain Chapitre.

II.4.2.3 Mesure de l'absorption capillaire

Cet essai a été réalisé dans le but d'étudier l'influence de la fibre polypropylène et de la fumée de silice (ajoutée par substitution d'une quantité du ciment) sur le coefficient d'absorption capillaire du mortier exposé à des températures élevées. Il est donc important de quantifier la masse d'eau absorbée par les cinq mortiers étudiés (avec une quantité de FPP fixée et un pourcentage de FS variable : 5, 8 et 12 %).

Selon la norme **AF PC 1997** les éprouvettes testées sont prélevées et séchées pendant 24h dans une étuve à une température de 80° C. Après, les avoir laisser refroidir naturellement dans un dessiccateur pendant 24h pour avoir une stabilité thermique des éprouvettes du mortier, les faces latérales de chacune des éprouvettes sont recouvertes avec deux couches de la résine époxy, afin d'éviter toute évaporation de l'eau à partir du matériau ou de contact avec l'air ambiante du laboratoire. Une seule face carrée de (4 x 4) cm² et donc laissée non recouverte avec de la résine et qui doit être finalement en contact direct avec de l'eau distillée sur le banc d'essai (éprouvettes verticalement supportées sur un bac en verre rempli d'eau distillée dont la surface non recouverte des éprouvettes sont partiellement immergées dans l'eau sur une hauteur de 5mm (voir la figure **II.25**)).

Il est important de noter qu'après avoir sécher et recouvrir l'éprouvette (4 x 4 x 4) cm³ du mortier avec de la résine époxy, l'éprouvette est pesée, soit une masse M_0 en (g). L'évolution de la masse est suivie par des pesées (M_i) après 5, 10, 15, 30 et 60 min de l'immersion dans l'eau. Les résultats obtenus de cet essai sont présentés dans les tableaux ci-dessous pour chaque mortier testé.



Figure II-25 : Dispositif de mesure de l'absorption capillaire.

Notons que les valeurs indiquées dans les tableaux ci-dessous sont des valeurs moyennes de mesures effectuées sur trois éprouvettes testées pour chaque mortier étudié.

Tableau II-16 : Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 150° C.

Le temps d'immersion (min)	Masse des éprouvettes (g)				
	M1 (Mortier témoin)	M2 (M avec FPP)	M3 (M avec 5 % FS + FPP)	M4 (M avec 8 % FS + FPP)	M5 (M avec 12 % FS + FPP)
0	597.2	583.1	593.2	579.9	585
5	597.4	583.2	593.3	580	585.1
10	597.6	583.3	593.5	580.1	585.2
15	597.7	583.4	593.6	580.3	585.3
30	597.9	583.6	593.7	580.4	585.4
60	598.2	583.7	594.9	581.9	585.6

Tableau II-17: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 300° C.

Le temps d'immersion (min)	Masse des éprouvettes (g)				
	M1 (Mortier témoin)	M2 (M avec FPP)	M3 (M avec 5 % FS + FPP)	M4 (M avec 8 % FS + FPP)	M5 (M avec 12 % FS + FPP)
0	578.2	584.1	565.4	561.3	576.4
5	578.3	584.5	565.5	561.4	576.5
10	578.6	584.8	565.6	561.6	576.6
15	578.7	585.2	565.9	561.7	576.7
30	578.9	585.7	566	561.9	576.8
60	579.6	586.1	566.9	562.5	577.3

Tableau II-18: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 450° C.

Le temps d'immersion (min)	Masse des éprouvettes (g)				
	M1 (Mortier témoin)	M2 (M avec FPP)	M3 (M avec 5 % FS + FPP)	M4 (M avec 8 % FS + FPP)	M5 (M avec 12 % FS + FPP)
0	597.2	573.2	560.9	559.1	566.1
5	597.5	573.6	561.1	559.4	566.7
10	597.8	573.9	561.4	559.9	567.2
15	598	574.1	561.8	560.3	567.5
30	598.8	574.6	562.6	560.9	567.9
60	599.8	575.4	563.4	561.9	568.9

Tableau II-19: Variation de la masse des éprouvettes chauffées à 600° C.

Le temps d'immersion (min)	Masse des éprouvettes (g)				
	M1 (Mortier témoin)	M2 (M avec FPP)	M3 (M avec 5 % FS + FPP)	M4 (M avec 8 % FS + FPP)	M5 (M avec 12 % FS + FPP)
0	560.7	572.9	543.9	556.6	545.2
5	561.1	573.5	544.3	557.2	545.9
10	562	574.5	545.2	558.3	546.7
15	562.9	575.5	546	558.8	547.9
30	564	576.8	547.7	560.3	549.1
60	566	579	550.4	562.7	551.5

II.4.2.4 Mesure de la porosité ouverte du mortier

Dans ce travail de recherche, l'essai de la porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) a été réalisé selon la norme AFREM-AFPC [63].

La porosité (ε) est définie comme le rapport du volume total des pores ouverts dans un solide poreux à son volume apparent, elle est exprimée en pourcentage du volume apparent en utilisant l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat, immergé}} \cdot 100$$

Alors, l'essai a été déterminé par pesées des trois masses suivantes :

M_{sec} : la masse de l'échantillon sec du mortier,

M_{sat} : la masse de l'échantillon saturé),

$M_{sat, immergé}$: la masse de l'échantillon saturé immergé dans l'eau mesurée à l'aide d'une balance hydrostatique.

Dans cette étude, les différentes séries d'éprouvettes étudiées (les différentes formulations du mortier) sont chauffées à l'aide d'un four à des températures élevées (à 150, 300, 450 et à 600° C).

Pour la mesure de la porosité accessible à l'eau des différents mortiers, pour chaque température envisagée, deux éprouvettes de chaque mortier sont testées en porosité. En prenant en compte les deux éprouvettes testées à une température ambiante (à 20° C), on peut

donc dire que la porosité de dix éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm³ sont mesurées de chaque mortier (chaque formulation).

Une fois les éprouvettes (de chaque formulation) sont traitées thermiquement (chauffées et refroidies pendant 24h pour une stabilisation thermique), elles sont introduites dans un dessiccateur (voir la figure II.25) et une saturation sous vide est appliquée sur les éprouvettes pendant 24h à l'aide d'une pompe à vide (reliée au dessiccateur), puis une saturation à mi-hauteur des deux éprouvettes est appliqué avec de l'eau distillée pendant 24 heures (le deuxième jour). Après ces deux jours de saturation (sous vide et à mi-hauteur), et selon la norme AFREM-AFPC, une saturation complète des deux éprouvettes est appliquée dans le dessiccateur avec une immersion totale des éprouvettes sous l'eau (2 cm de l'eau au-dessus des éprouvettes) La saturation du mortier, qui dure trois jours à l'aide d'un dessiccateur et une pompe à vide, est déroulée dans le laboratoire à une température de 20 ± 2 ° C selon la norme AFREM-AFPC.

Une fois la saturation est réalisée, les pesées de chaque échantillon, à l'air libre et dans l'eau (à l'aide d'une balance hydrostatique), peuvent être effectuées.

Dans le tableau II.20 ci-dessous, résultats obtenus de la porosité accessible à l'eau des différents mortiers sont données pour les différentes températures d'exposition.

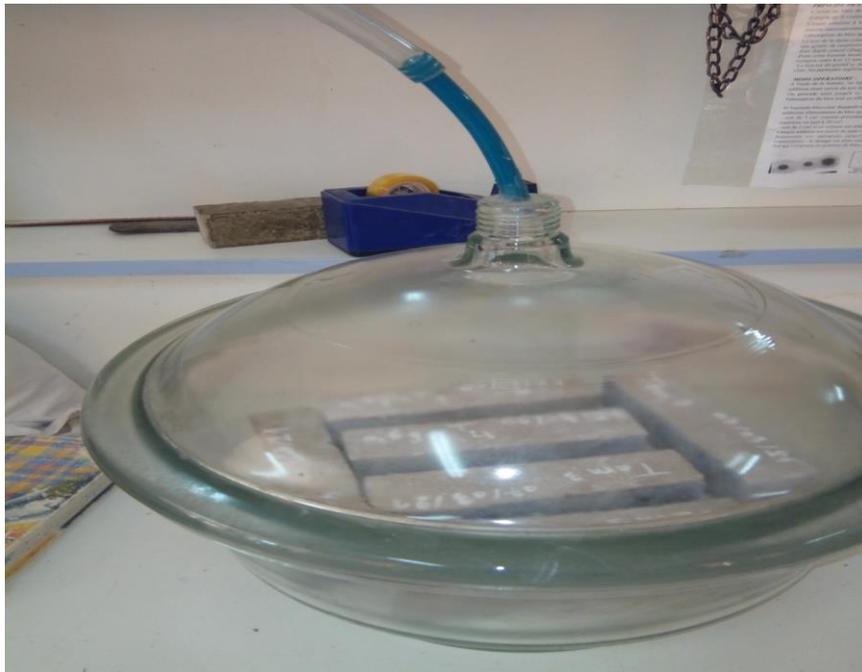


Figure II-26 : Essais de la porosité accessible à l'eau (Eprouvettes du mortier dans le Dessiccateur)

Nous rappelons que les valeurs indiquées sur le tableau II.20 sont des moyennes arithmétiques de deux valeurs de porosités mesurées sur deux échantillons de chaque mortier testé dans cette étude.

Tableau II-20: Porosité ouverte des différents mortiers exposés à des hautes températures.

Températures [° C]	Porosité (ϵ) [%]				
	20	150	300	450	600
M1 (témoin)	9.57	11.05	13.81	14.56	15.98
M2 (avec FPP)	10.45	12.14	17.29	19.03	20.31
M3 (avec 5 % FS + FPP)	8.77	10.89	15.64	17.12	18.98
M4 (avec 8 % FS + FPP)	8.15	10.38	16.12	17.96	19.06
M5 (avec 12 % FS+ FPP)	7.23	9.65	15.26	17.65	18.64

Ces résultats obtenus de la porosité sont traduits à l'aide des histogrammes et sont analysés dans le chapitre suivant (Chapitre III).

II.4.2.5 Mesure de la perte en masse du mortier

Au cours du cycle de chauffage-refroidissement, la perte de masse des éprouvettes des mortiers étudiés permet, d'une part, de savoir la quantité de l'eau libre du mortier (l'eau introduite lors du gâchage) qui peut être éliminée à moins de 150° C, et d'autre part, de quantifier la déshydratation du mortier selon les températures de chauffage appliquées.

Alors, les éprouvettes sont pesées avant et après le chauffage, puis la perte en masse est calculée en pourcentage à l'aide de la formule suivante :

$$M_i = \frac{M_x - M_{x \text{ chauffée}}}{M_x}$$

M_i : désignant la perte en masse (%), $M_{x \text{ chauffée}}$: la masse de l'éprouvette chauffée (g),

M_x : la masse de l'éprouvette non chauffée (à une température ambiante) (g).

Les valeurs des pertes en masses obtenues sont indiquées dans le tableau **II.21** ci-dessous. Notons que ces valeurs sont moyennes arithmétiques de trois valeurs mesurées sur trois éprouvettes de chaque mortiers testés et à chaque températures d'exposition.

Tableau II-21: Perte en masse des différents mortiers exposés à des hautes températures témoin.

Températures [° C]	La perte en masse (M_i) [%]				
	20	150	300	450	600
M1 (témoin)	1.46	2.68	6.88	6.12	9.45
M2 (avec FPP)	1.67	3.28	7.34	6.67	7.63
M3 (avec 5 % FS + FPP)	2.13	2.23	8.21	9.66	12.55
M4 (avec 8 % FS + FPP)	2.98	1.14	8.52	9.80	11.89
M5 (avec 12 % FS+ FPP)	3.77	3.88	8.26	11.48	9.03

II.5 Conclusion

Ce chapitre était pour objet de caractériser les matériaux de base utilisé ainsi que de caractériser les mortiers étudiés à l'état frais et à l'état durci.

Afin de reproduire les essais pour atteindre notre objectif, une campagne expérimentale approfondi a été donc effectuée telles que des analyses chimiques et physiques de chaque matériau utilisé. Des essais et certains modes opératoires ont été détaillés dans ce deuxième chapitre.

Pour cette étude, cinq formulations de mortiers ont été réalisées pour les tester à cinq températures différentes, alors, une quantité importante du mortier a été préparée et donc un nombre importants d'éprouvettes a été confectionné (environ 425 éprouvettes au total) pour réaliser des essais, selon les normes internationales, à l'état durci et avec une répétabilité des essais (trois éprouvettes pour chaque essai), tels que les essais de la résistance mécanique, de la porosité accessible à l'eau et de l'absorption capillaire du mortier.

Chapitre III : Analyses et discussion des résultats

III.1 Introduction

L'objectif dans ce chapitre, est de présenter les différents résultats expérimentaux, relatifs à l'influence des hautes températures sur les comportements physiques et mécaniques, obtenus par des différentes mesures expérimentales effectuées sur les mortiers fibrés étudiés (qui sont à base de la fumée de silice), principalement à l'état durci du matériau, tels que les mesures de la résistance à la traction par flexion, de la résistance à la compression, de l'absorption capillaire et de la porosité ouverte du mortier. Alors, des discussions sur les résultats obtenus sont présentées dans ce chapitre ainsi que des relations sont données entre des résultats obtenus à l'état frais et d'autres à l'état durci du matériau.

III.2 Influence des hautes températures sur le comportement mécanique des mortiers étudiés

III.2.1 Influence des hautes températures sur la résistance à la flexion

Puisque le mortier est un matériau cimentaire souvent utilisé pour le revêtement dans les structures de génie civil, il est donc exposé dans les structures à des forces de flexion plus qu'à des forces de compression. C'est la raison pour laquelle l'étude de la résistance par traction sur des éprouvettes de mortier est primordiale.

Nous rappelons que les différents mortiers étudiés dans ce travail de recherche sont à base de différents pourcentages en fumée de silice (5, 8 et 12 %) et avec un dosage constant des fibres polypropylènes (0.030%).

Il est important de noter aussi que la résistance à la flexion simple des différents mortiers a été mesurée sur des éprouvettes de différents âges (7, 14 et 28 jours), afin de donner une idée sur l'évolution de la résistance mécanique du matériau, non exposé à des températures élevées (non chauffé), et qui est à base de la fumée de silice, en fonction de son âge.

Par ailleurs, chaque série d'éprouvettes de chaque mortier étudié a été exposée à des différentes températures élevées (150, 300, 450 et 600° C) tel qu'il est indiqué dans le deuxième chapitre de ce document. Mais, il est important de noter que tous les résultats de la résistance mécanique indiqués ci-dessous, obtenus sur des éprouvettes chauffées, correspondent à des mesures prises sur des éprouvettes du mortier à l'âge de 45 jours. Les résultats présentés dans les figures ci-dessous, correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs de résistance, obtenues sur trois éprouvettes selon les normes **ISO178, ASTM D790 et NF P 18-406** correspondant, respectivement, aux essais de la résistance à la flexion par traction et à la compression du mortier.

Les résultats indiquant l'influence de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la flexion simple des mortiers fibrés non chauffés en fonction de l'âge du matériau, sont présentés sur la figure **III.1**.

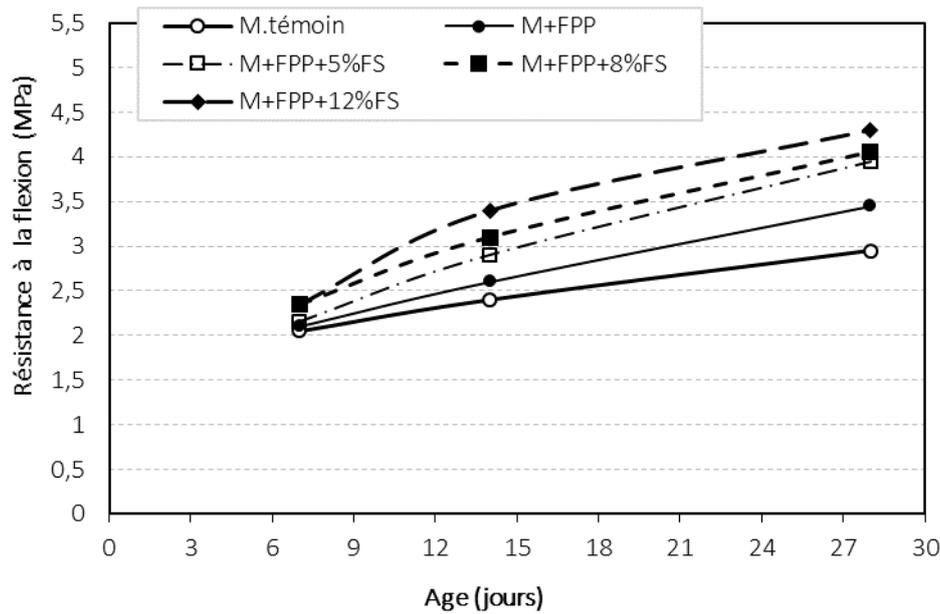


Figure III-1 : Évolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers étudiés.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la flexion des mortiers étudiés augmente en fonction de l'âge du matériau. La fumée de silice a une influence significative sur la résistance à la flexion du mortier. Cette dernière augmente avec le dosage en FS. Il est important de noter aussi que la variation entre les résistances obtenues ne peut être remarquée à 7 jours (au jeune âge). Ce n'est qu'à partir de 14 jours que cette variation est remarquable entre les différents mortiers étudiés. Notre étude a montré que la résistance à la flexion à 28 jours du mortier témoin est égale à 2,8 MPa pendant que la même formulation du mortier mais avec une substitution de 12 % du ciment par de la fumée de silice a donné une résistance à la flexion qui égale à 4,3 MPa. Il est remarquable aussi à partir de la même figure (**Figure III.1**) que les fibres polypropylènes participent aussi à l'augmentation de cette résistance. Les premiers résultats montrent que la résistance d'un mortier témoin fibré, à l'âge de 28 jours, est égale à 3,4 MPa. Soit une augmentation de 0,5 MPa et qui représente environ un sixième ($1/6$) de la résistance à la flexion du mortier témoin non fibré.

Les histogrammes sur la Figure **III.2** montrent l'influence des hautes températures sur la résistance à la flexion des mortiers étudiés. Nous rappelons que c'est une résistance résiduelle du mortier (mesurée après refroidissement des éprouvettes du mortier tel qu'il est mentionné dans le Chapitre II) et que chaque histogramme correspond à une valeur moyenne de trois valeurs de résistances obtenues sur trois éprouvettes de chaque mortier testé.

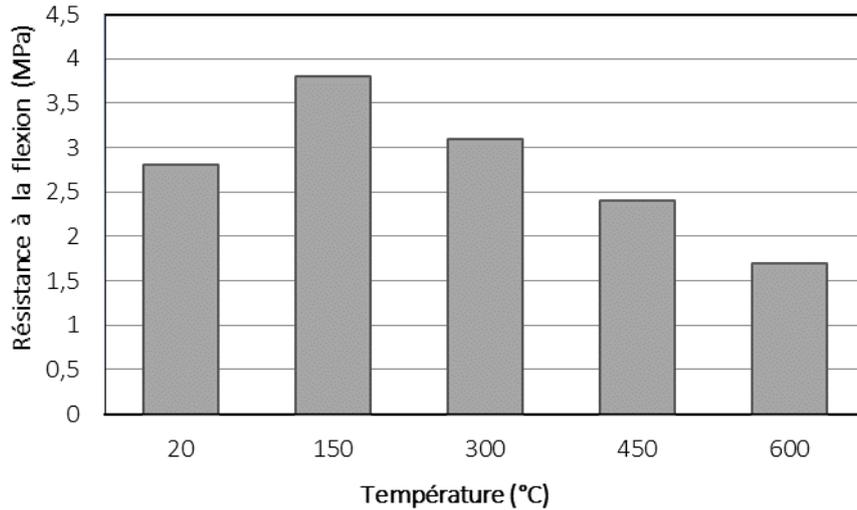


Figure III-2: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier témoin à l'âge de 45 jours)

Les résultats obtenus montrent que la température influe significativement sur le comportement mécanique du mortier. L'exposition des éprouvettes du mortier témoin à des hautes températures conduit à une diminution de la résistance à la flexion. La résistance du mortier chauffé pendant une heure à une température de 600° C égale à environ la moitié de sa résistance mesurée à la température ambiante (du mortier non chauffé).

D'après la Figure III.2, il est clairement remarquable que la résistance du mortier témoin, exposé à une température de 150° C, augmente d'environ 25 % par rapport à sa résistance initialement mesurée à une température ambiante (de 20° C). Cela ne peut être expliqué que par l'effet bouchon (une compression de la vapeur d'eau) qui pourra se produire à l'intérieur de réseau poreux du matériau à cette température de 150° C. En effet, quand la température dépasse les 100° C, l'eau commence à s'échapper des zones chaudes vers des zones plus froides dans l'éprouvette du mortier. Alors, certaine quantité de cette eau libre dans le matériau s'échappe vers le noyau de l'éprouvette qui se trouve toujours à une température moins de 100° C pendant le premier temps de chauffage. Alors, puisque le maintien en température (de 150° C) est d'une heure, et à cause de l'épaisseur de l'éprouvette testée qui est seulement 4 cm, la température de 150° C est rapidement atteinte au noyau de l'éprouvette, ce qui pousse l'eau (sous forme de vapeur) d'essayer de s'échapper à nouveau vers l'extérieur de l'éprouvette du mortier. Ce phénomène conduira à une augmentation en pression de la vapeur d'eau dans la structure poreuse du matériau (phénomène connu dans la littérature par un "effet bouchon" [60]) et il est plus remarquable quand la porosité accessible à l'eau du matériau est plus faible. C'est la raison pour laquelle l'éprouvette du mortier pourra avoir à son intérieur une contrainte de plus (une force de précontrainte), et par conséquent, la résistance mécanique du mortier augmente quand il est exposé à une température d'environ 150° C et allant peut être jusqu'à 300° C.

Les résultats obtenus (voir la **Figure III.2**) montrent aussi qu'au-delà de 300° C, la résistance à la flexion du mortier étudié diminue avec l'augmentation en température. Cela est dû principalement à plusieurs transformations physico-chimiques qui peuvent se produire à l'intérieur d'un mortier une fois exposé à des températures élevées. Certaines de ces transformations des matériaux cimentaires sont expliquées ci-après dans ce chapitre.

La figure ci-dessous (**Figure III.3**) présente l'influence des fibres polypropylènes sur cette évolution de la résistance à la flexion du même mortier témoin en fonction de la température.

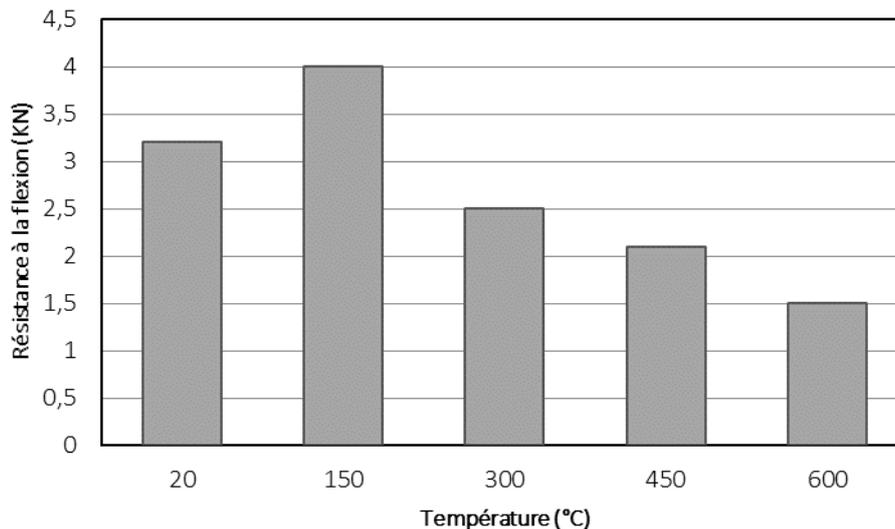


Figure III-3: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier témoin fibré à l'âge de 45 jours)

D'après les résultats obtenus (**Figure III.3**), la résistance à la flexion du mortier fibré mesurée à une température ambiante (à 20° C) est légèrement plus élevée par rapport à celle obtenue dans le cas d'un mortier non fibré. Un pic dans la résistance est toujours observé à 150° C tel que dans le cas du mortier témoin (non fibré). Mais, la résistance mesurée sur un mortier fibré chauffée à 300° C donne une valeur (2,5 MPa) plus faible que la résistance à la flexion obtenue dans le cas du mortier non fibré et chauffé à la même température (3,2 MPa). En effet, ce résultat est traduit par le phénomène de la fusion des fibres polypropylènes une fois exposés à des hautes températures. Le point de fusion de ces fibres est 171° C exactement [49]. Alors, quand le mortier est exposé à une température qui dépasse le point de fusion des fibres polypropylènes, ces derniers fondent. Ce qui conduit à une augmentation de la porosité du matériau cimentaire. Puisqu'il est très connu que la résistance mécanique est gouvernée par la porosité ouverte du matériau. Une fois cette dernière augmente dans le mortier chauffé à 300° C à cause de la fusion

des fibres, la résistance mécanique du mortier donne certainement une valeur plus faible que celle obtenue dans le cas du mortier non fibré.

D'après la **Figure III.3**, au-delà de 300° C, la résistance à la flexion diminue d'une façon progressive quand le matériau est chauffé à des températures plus élevées (à 450 et à 600° C).

Les figures ci-dessous (**Figures III.4, III.5 et III.6**) représentent l'influence de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance à la flexion du mortier fibré en fonction de la température. Nous rappelons que les différentes séries d'éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³ sont de même âge (45 jours) et ont subi le même traitement thermique afin de pouvoir comparer les résultats obtenus de la résistance à la flexion.

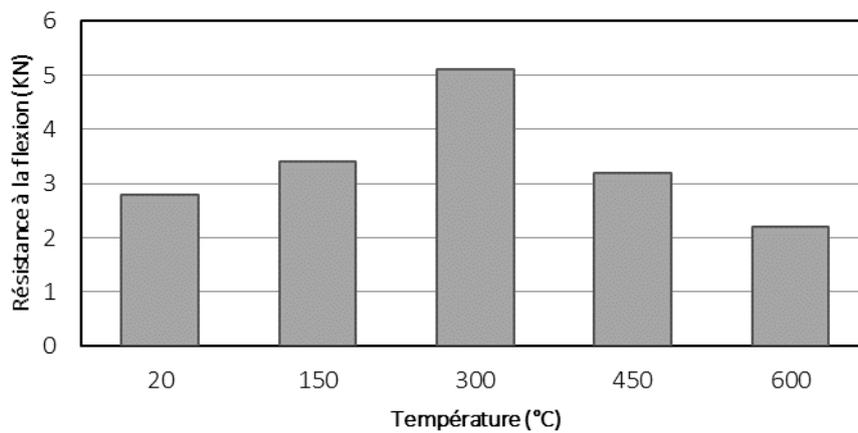


Figure III-4: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

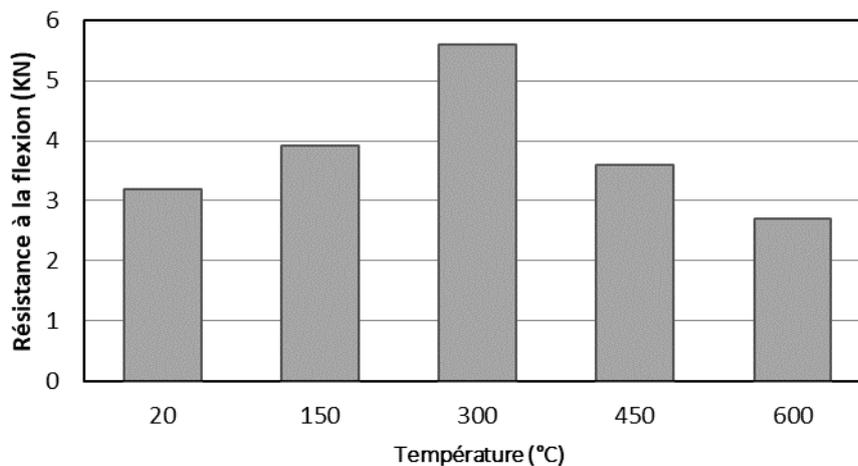


Figure III-5: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 8 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

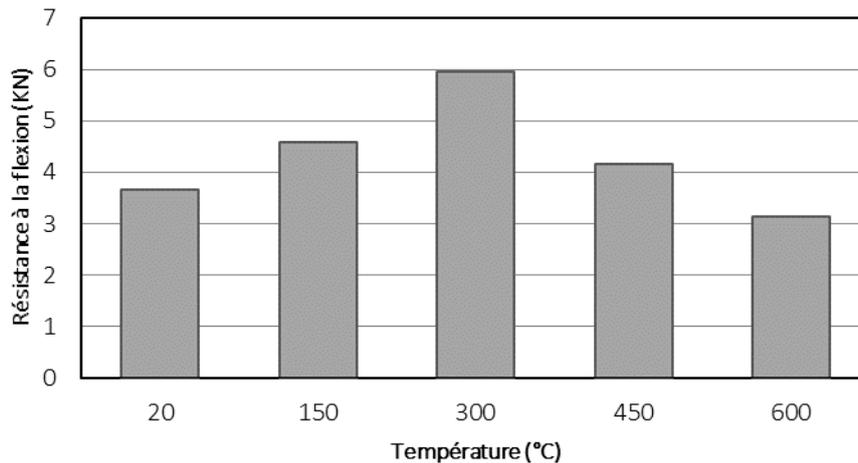


Figure III-6: Évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 12 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

À partir des résultats obtenus, illustrés en histogrammes dans les **Figures III.4, III.5 et III.6**, il est clairement remarquable que les mortiers à base de la fumée de silice ont des résistances mécaniques à la flexion plus élevées par rapport à celles obtenues à des différentes températures dans le cas du mortier témoin fibré.

En outre, on constate toujours que l'allure de cette évolution de la résistance en fonction de la température est toujours la même avec deux parties: une première indiquant une augmentation en résistance allant jusqu'à un pic qui pourra être entre 150 et 300° C et une deuxième partie dans cette évolution indiquant une diminution progressive dans la résistance entre 300 et 600° C.

Il est donc important de noter, à partir des résultats obtenus, que plus le dosage en FS n'est important, plus la résistance à la flexion du matériau n'augmente. En effet, la fumée de silice est un ajout minéral qui a une finesse de mouture (surface spécifique Blaine) très élevée par rapport à celle du ciment. Elle peut donc augmenter la finesse du liant une fois ajoutée dans la formulation du mortier, et par conséquent, sa porosité va être diminuée. Ce qui peut conduire à une compacité plus élevée du mortier et donc à une résistance mécanique à la flexion plus élevée aussi.

III.2.2 Influence des hautes températures sur la résistance à la compression

La résistance à la compression est une donnée importante pour la conception d'un matériau cimentaire. Les autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à l'effort tranchant, le module d'Young, la relation contrainte déformation, sont reliées diversement à la

résistance en compression. Les résultats sur la résistance à la compression sont également employés pour qualifier et quantifier l'efficacité des additions minérales ajoutés par substitution d'une quantité du ciment dans un système cimentaire.

III.2.3 Résistance en compression

La propriété mécanique (résistance en compression) des cinq séries de mortier avec un dosage de FS variable sont représentées dans ce qui suit. Les éprouvettes d'études ont été soumis au cycle de chauffage à des différentes températures (150 ,300 ,450 et 600 °C). Cette essai permette d'évaluer l'impact de l'utilisation de la fumée de silice sur le comportement mécanique (résistance à la compression) des mortiers fibrés non chauffés en fonction de l'âge du matériau, sont présentés sur la figure III.7.

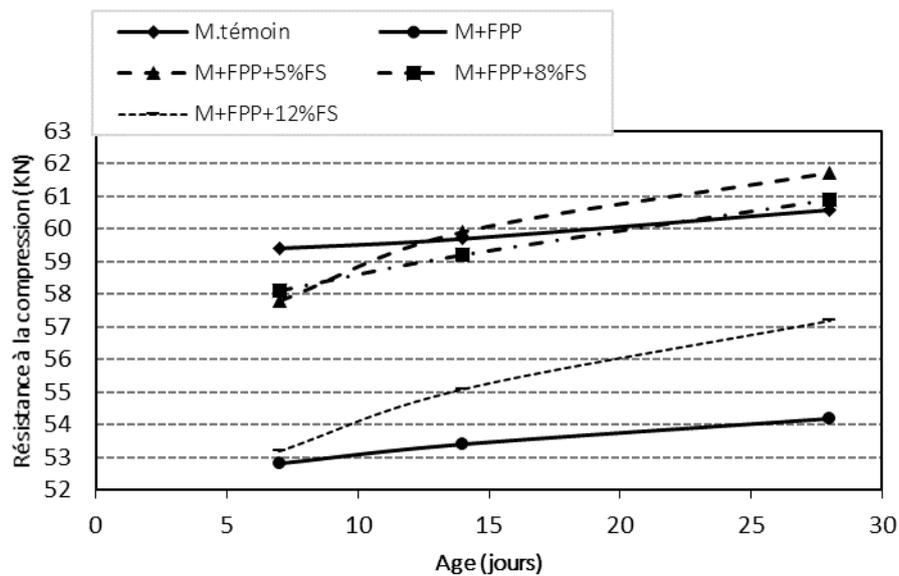


Figure III-7: Évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge des différents mortiers étudiés.

Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la compression du mortier étudié augmente avec l'âge du matériau. La fumée de silice a un effet significatif sur la résistance à la compression du mortier. À partir de 7 jours (jeune âge), nous avons remarqué des différences dans les résistances obtenues par les différents mortiers étudiés. Nos recherches montrent que la résistance à la compression du mortier témoin à 28 jours est égale à 59 MPa, est égale à la même formulation du mortier avec une substitution de 8% du ciment par la fumée de silice, il est remarquable aussi à partir de la même figure III.7 que la formulation du mortier avec un dosage de FS égale à 12% a donné une résistance faible égale à 57 MPa par rapport aux autres formulations.

L'histogramme de la figure III.8 montre l'effet de la température élevés sur la résistance à la compression du mortier étudiés .Rappelons que c'est la résistance résiduelle du mortier (mesurée après refroidissement des échantillons de mortier mentionnés au chapitre II), et chaque histogramme correspond aux trois résistances obtenues sur les trois échantillons de chaque mortier.

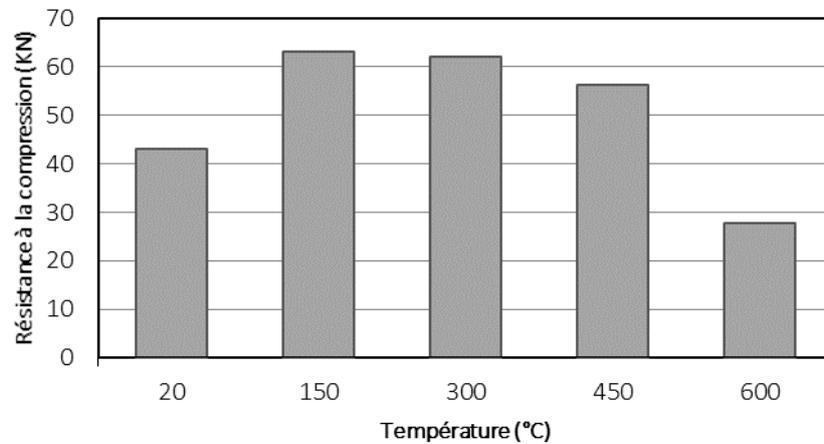


Figure III-8: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier témoin à l'âge de 45 jours)

Les résultats montrent la température affecte significativement le comportement mécanique du mortier .Lorsque la température augmente , la résistance à la compression des éprouvettes du mortier témoin diminue cela veut dire que la résistance des éprouvettes du mortier chauffé jusqu'à 600°C pendant une heure égale à environ la moitié de sa résistante mesurée à la température ambiante (du mortier non chauffé).D'après la figure III.8 nous observons une augmentation de la résistance du mortier témoin exposé à une température de 150°C par rapport à sa résistance à une température ambiante (de 20°C)

Les résultats de la figure III.8 présentent une diminution de la résistance à la compression du mortier étudié, à partir de la température de 300°C cela veut dire qu'il ya beaucoup des réactions chimiques et physiques qui se produire à l'intérieur d'un mortier lorsqu'il est soumis à haute température.

La figure III.9 montre l'effet des fibres polypropylènes sur la résistance à la compression du même mortier témoin en fonction de la température.

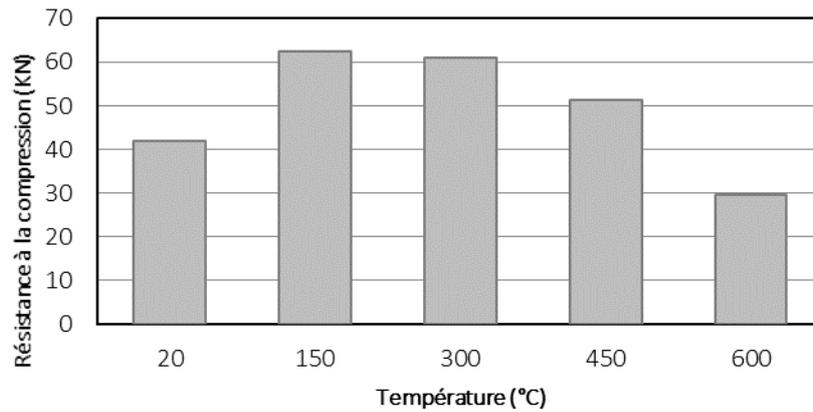


Figure III-9: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier témoin fibré à l'âge de 45 jours)

Les résultats de la figure III.9 montre que la résistance à la compression du mortier fibré à une température ambiante (20°C) est la même qu'un mortier non fibré. Avec la température égale à 150°C ,nous observons une augmentation de la résistance dans les deux cas du mortier témoin (fibré et non fibré) .La résistance mesurée sur un mortier fibré chauffé à 300°C nous donne presque même valeur qu'un mortier non fibré (environ 61 et 62 MPa).Mais la résistance obtenue pour un mortier fibré et non fibré chauffé(à 450°C et 600°C) est plus faible (une diminution de la résistance) , sa montre que l'augmentation de la température influence sur la résistance du mortier .

Les figures présentées ci-dessous (Figure III.10, III.11 et III.12) montrent l'effet de la fumée de silice sur l'évolution de la résistance en compression du mortier fibré en fonction de la température.

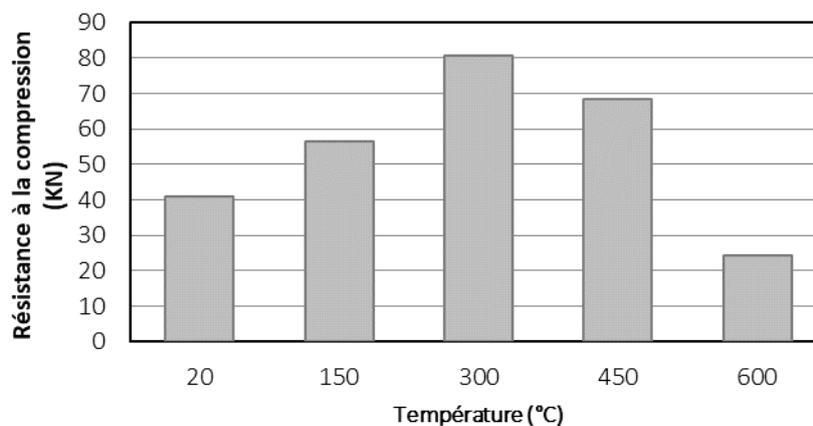


Figure III-10: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

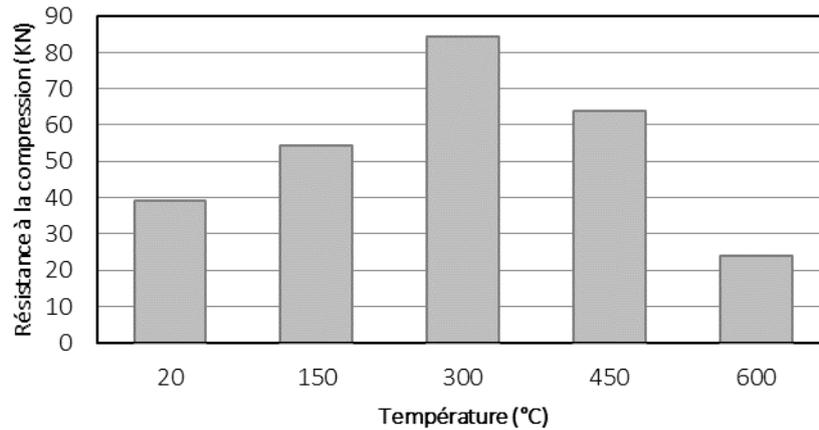


Figure III-11: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 8 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

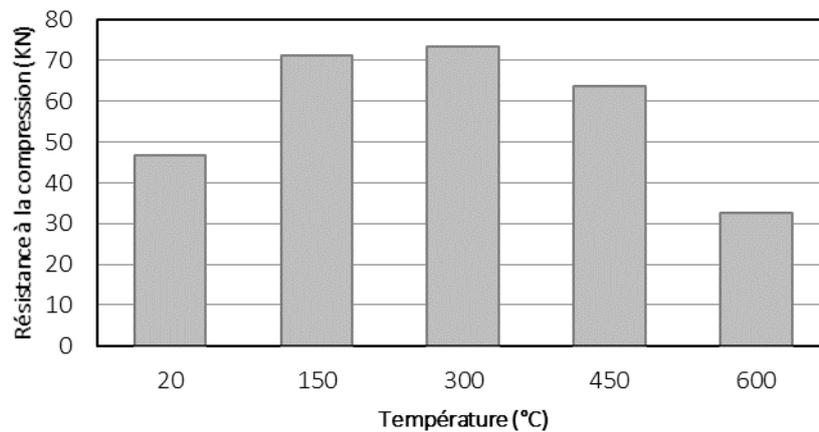


Figure III-12: Évolution de la résistance en compression en fonction de la température (Cas de mortier fibré à base de 5 % de la fumée de silice à l'âge de 45 jours)

Nous pouvons constater, à partir de ces résultats obtenus (Figure III.10, III.11 et III12) que la résistance à la compression des mortiers à base de la fumée de silice est aussi plus élevée par rapport à un mortier témoin fibré avec des différentes températures.

Selon les résultats indiqués en histogrammes, on constate toujours une augmentation en résistance entre 150°C et 300°C et une diminution progressive dans la résistance entre 300 et 600°C.

On résulte donc, que la résistance mécanique à la compression d'un mortier chauffé à 300°C, sont largement influencées par ce chauffage, alors qu'elles diminuent très significativement à partir de cette température pour devenir quasi négligeable après chauffage à 600°C.

La perte de résistance est attribuée en général aux endommagements (fissuration interne) causés par la déshydratation, la pression de vapeur et la destruction des produits d'hydratation surtout au niveau des interfaces granulat /pâte de ciment. Ces fissures sont apparentes à partir de 600°C (une destruction du matériau).

D'après les résultats obtenus, la fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression des mortiers à court et à long terme. Ce gain de résistance est dû à la forte activité pouzzolanique de la fumée de silice qui prend place très rapidement et vient consommer la portlandite produite par l'hydratation du ciment et à sa très grande surface spécifique d'où l'effet filler entre les grains du ciment, ce qui rend la pâte plus homogène et plus compacte.

Les dégradations et les variations dans la résistance mécanique, en compression et à la flexion, nous obligent à penser aux effets des hautes températures sur les formulations testées. Pour comprendre ce phénomène, on doit connaître les principales réactions physico-chimiques dans le mortier au cours de son échauffement. Dans le paragraphe suivant, certaines réactions qui peuvent se produire dans le matériau cimentaire et notamment dans un mortier sont présentées pour chaque intervalle de température.

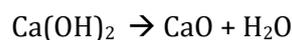
Entre 20 et 150° C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du mortier. L'eau non liée est complètement éliminée à 120° C.

Entre 150 et 170° C : une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Autour de 170°C et jusqu'à environ 300°C : on a la première étape de la déshydratation, il y a rupture du gel de ciment, la chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du mortier. **[64]**

À environ 300° C et 450° C : on peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques tels que le quartz.

Entre 450° C et 550° C : il y a décomposition de la portlandite en chaux libre.



Autour de 600° C : il y a une transformation de structure du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement **[65]**.

III.3 Influence des hautes températures sur le comportement physique des mortiers étudiés

III.3.1 Influence des hautes températures sur la perte en masse du mortier

La perte de masse au cours de chauffage des éprouvettes est liée essentiellement à des réactions physico-chimiques qui peuvent se produire à l'intérieur du matériau cimentaire dont certaines réactions principales sont mentionnées dans des paragraphes ci-dessus notamment l'évaporation de l'eau et la décomposition de la portlandite. L'évolution de la perte de masse des différents mortiers étudiés est présentée dans la figure ci-dessous (**Figure III.13**). Nous rappelons encore que les valeurs indiquées dans cette figure sont des moyennes arithmétiques de trois valeurs obtenues par la mesure de la perte en masse sur trois éprouvettes de chaque mortier exposé à des différentes hautes températures.

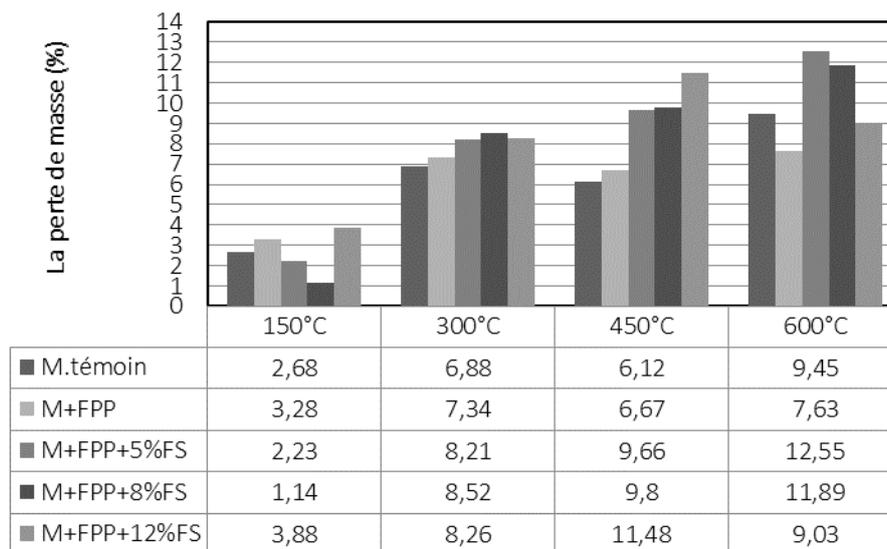


Figure III-13: Évolution de la perte en masse des différents mortiers étudiés exposés à des hautes températures.

La **Figure III.13** représente la variation de la perte en masse des mortiers étudiés après leurs expositions à des températures élevées. Les résultats obtenus montrent que la perte en masse est relativement faible quand le matériau est chauffé à 150° C. Dans ce domaine de température cette perte en masse correspond à un départ seulement de l'eau libre contenue dans les pores du mortier. Car à 150° C, l'eau chimiquement liée est toujours présente dans le matériau.

À 300° C, les pertes en masse, mesurées pour toutes les séries d'éprouvettes testées, sont plus importantes, Cela correspond au départ d'eau liée dans les hydrates (eau chimiquement liée) qui représente 65 à 80 % de la masse d'eau totale dans le mortier. À cette température de chauffage, chacun des mortiers étudiés perd entre 6 à 9 % de sa masse initiale.

Dans une gamme de température entre 450 et 600° C, la perte en masse devient encore plus significative pour toutes les formulations étudiées. Cette perte n'est due qu'à la décomposition de la Portlandite en chaux libre et en eau dans cet intervalle de température. C'est à cause de cette réaction chimique que les fissures deviennent plus remarquables (larges) à partir de 450° C.

En comparant les évolutions des résistances mécaniques (la résistance à la traction par flexion et à la compression) par rapport aux pertes en masse mesurées en fonction de la température, on peut déduire que les pertes en résistance mécanique deviennent plus significatives quand le matériau est exposé à une température supérieure de 300° C. Cela semble confirmer que le chauffage entre 150° C et 300° C provoque la décomposition des hydrates qui assuraient la résistance des mortiers.

III.3.2 Influence des hautes températures sur la porosité du mortier

Dans cette partie, la porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) de chaque séries d'éprouvettes (chaque mortier) a été testées séparément, à l'âge de 45 jours, suivant le mode opératoire de l'essai de porosité détaillé plu-haut dans le chapitre II. La **Figure III.14** montre l'influence des hautes températures sur la porosité des différents mortiers étudiés, dont les valeurs présentées sont des valeurs moyennes de trois mesures effectuées sur trois éprouvettes de chaque mortier et à chaque température envisagée.

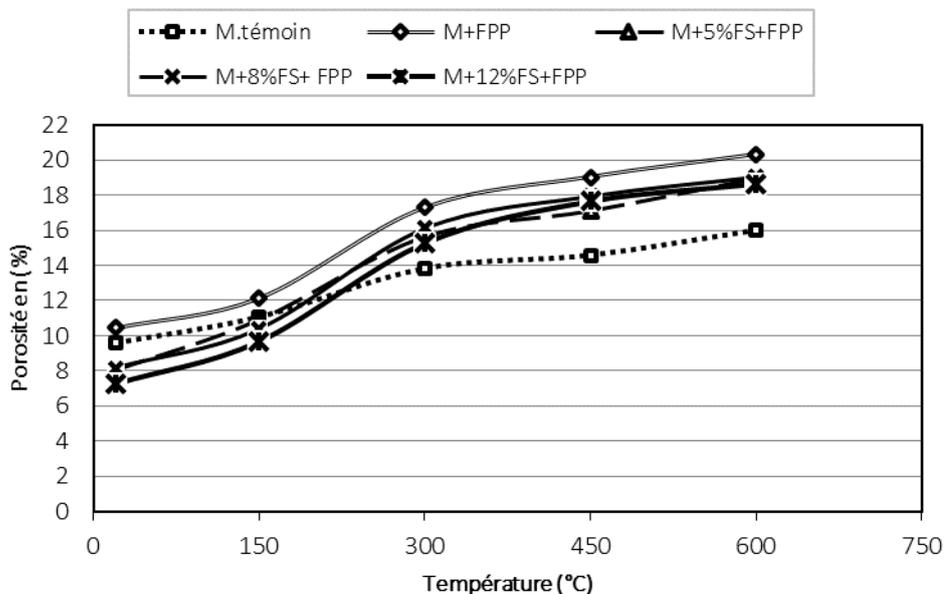


Figure III-14: Évolution de la porosité des différents mortiers étudiés en fonction de la température.

Les résultats obtenus (**Figure III.14**) montrent tout d'abord, une différence entre les porosités des mortiers testés. Alors, le mortier témoin non fibré, témoin fibré et les mortiers fibrés avec 5 %, 8 % et 12 % de la fumée de silice ont donné respectivement les valeurs de porosité suivantes : 9.57, 10.45, 8.77, 8.15, 7.23. Il est donc remarquable que plus le dosage en fumée de silice n'est élevé, plus la porosité du matériau n'augmente. La finesse très élevée de la fumée de silice a permis de combler et de remplir un pourcentage des vides (des pores) dans le mortier. Par ailleurs, les fibres polypropylènes ont permis de relier certaines pores fermés dans le matériau et ont donc facilité le passage de l'air et de l'eau pendant l'essai de porosité (pendant la saturation à l'aide d'un dessiccateur), ce qui a conduit à une légère augmentation d'environ 10 % en porosité du mortier témoin.

Les résultats obtenus montrent aussi que la porosité de tous les mortiers étudiés (les différentes compositions) augmente quand ils sont chauffés à une température de 150° C, dont cette augmentation en porosité est d'environ 3 % par rapport à la porosité mesurée à la température ambiante (à $20 \pm 2^\circ$ C). Cela est clairement due à l'évaporation de l'eau libre dans le matériau (l'eau adsorbée et non liée chimiquement aux hydrates).

À partir des résultats illustrés sur la **Figure III.14**, la porosité des différents mortiers fibrés testés augmente significativement à une température de 300° C, car les fibres polypropylènes fondent une fois exposés à une température de 171° C (selon plusieurs analyses et fiches techniques de ce type de fibres), ce qui permet de créer des vides dans l'éprouvette du mortier et donc d'augmenter la porosité du matériau par le milieu occupé initialement par ces fibres. En comparaison avec ces mortiers fibrés, une légère augmentation de la porosité du mortier témoin non fibré a été aussi enregistrée quand il est exposé à une température de 300° C. L'augmentation en porosité de ce mortier non fibré reste alors la plus faible par rapport aux autres mortiers fibrés.

Contrairement aux mortiers sans ajout, les mortiers à base de différents dosages en fumée de silice ont des porosités plus grandes quand le matériau est exposé à des températures élevées (de 450 et 600° C). La finesse de la fumée de silice qui est largement supérieure à celle du ciment a certainement contribué à l'augmentation de la compacité des mortiers et par conséquent à l'augmentation de sa porosité. Malgré les faibles dosages utilisés en fumée de silice, mais les résultats obtenus montrent que le mortier avec 12 % de FS a toujours la porosité la plus grande quel que soit la température de chauffage appliquée.

Il est important de noter aussi dans cette partie, que la forte incompatibilité entre le coefficient thermique de la pâte du ciment et celui du granulats (grains du sable grossier) conduit à

l'augmentation de la fissuration du matériau et par conséquent à une élévation en porosité du mortier lorsqu'il est exposé à des températures élevées à partir de 300° C.

III.4 L'absorption capillaire

L'absorption capillaire représente une caractéristique macroscopique intrinsèque du matériau poreux, utilisé dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction. Il traduit la capacité d'un mortier à absorber l'eau par capillarité en absence d'une pression hydraulique externe. Le comportement hydraulique a été étudié à travers la détermination expérimentale de l'absorption d'eau par capillarité à partir de l'état sec ou partiellement sec d'un mortier.

Cet essai a pour but d'étudier l'influence des différents pourcentages de la fumée de silice et la quantité fixée de la fibre polypropylène dans le mortier face aux hautes températures.

III.4.1 Mesure de la sportivité capillaire

Les **Figures III.15, III.16, III.17 et III.18** présentent l'évaluation de la masse d'eau absorbée par les différents mortiers étudiés, avec différents dosage de FS en fonction de la racine carré du temps. La quantité d'eau absorbée est mesurée régulièrement dans le temps par pesées effectuées à 5, 10, 15, 30 et 60 minutes.

Rappelons que les valeurs indiquées dans les figures ci-dessous sont les moyennes arithmétiques de trois valeurs obtenues à partir de mesures sur trois éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³ de chaque mortier étudié à 45 jours.

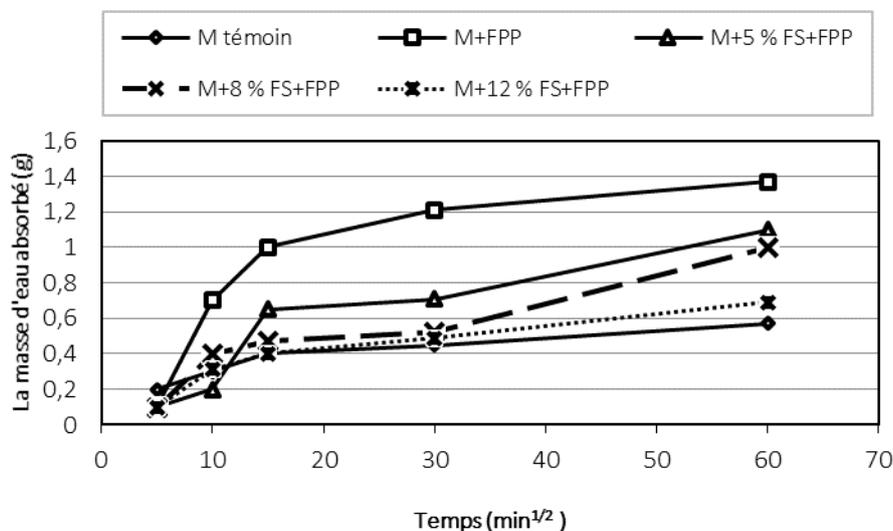


Figure III-15: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffés à 150° C.

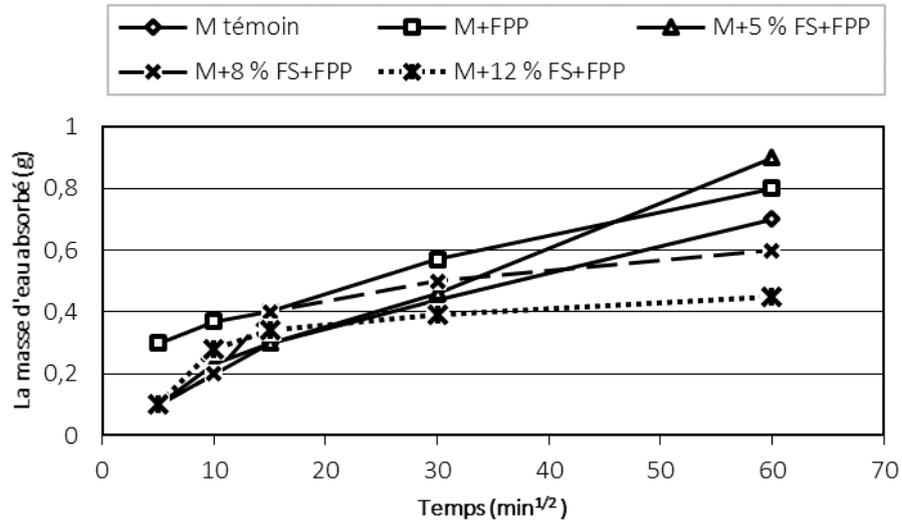


Figure III-16: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffés à 300° C.

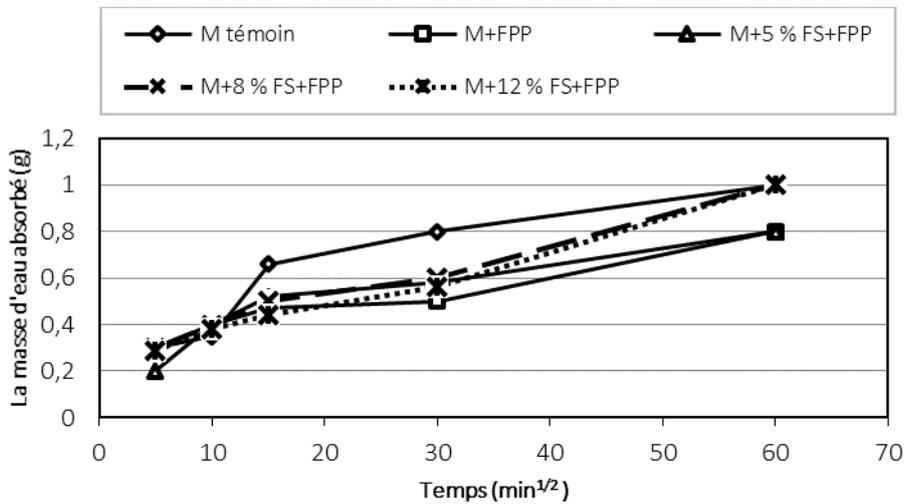


Figure III-17: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffés à 450° C.

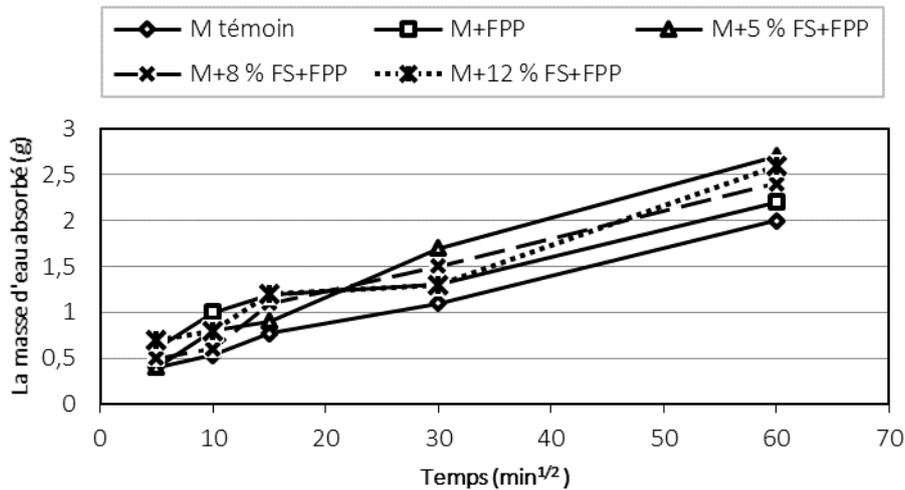


Figure III-18: Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers chauffés à 600°C.

Les premiers résultats montrent que la quantité d'eau absorbée par les échantillons du mortier chauffé (à 150, 300, 450 et 600°C) augmentent en fonction du temps.

On constate à partir de ces résultats, indiqués sur les **figures III.15, III.16, III.17 et III.18**, que le mortier témoin a une augmentation progressive et une diminution observé pour les formulations qui restent à la température égale (à 300°C). Au-delà 300°C, la quantité d'eau absorbée augmente quand le matériau est chauffé à des températures plus élevée (à 450°C et à 600°C), cette augmentation montre qu'il y a une dégradation microstructurale du mortier lors du chauffage. Nous a permis de conclure que la présence des fibres de polypropylène dans le mortier testé augmente la valeur de la quantité d'eau absorbé au-delà de 300°C ; cela est dû à la fusion de ces fibres à la température de 171°C.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que la fumée de silice a une influence significative sur la quantité d'eau absorbée. Cette dernière augmente avec le dosage en FS parce que le mortier avec un dosage de FS élevée a déjà une porosité ouverte élevée (accessible à l'eau). Cela conduit à une absorption absolument plus élevée. La masse d'eau absorbée des mortiers à la température (à 150, 300, 450 et 600°C) avec une substitution de 12% du ciment par la FS atteint après 60 min a donné les valeurs de 0.7, 0.45, 1 et 2.5 g d'eau respectivement.

III.4.2 Mesure de coefficient de sportivité capillaire

Les différents phénomènes qui se produisent lors de la montée en température du mortier entraînent un changement de ses propriétés microstructurales. La mesure du coefficient de

sorptivité capillaire permet de caractériser l'impact d'eau absorbé sur la capillarité du mortier, et sa variation en fonction de la température.

Les **figures III.19, III.20, III.21 et III.22** présentent la variation du coefficient d'absorption d'eau capillaire des différents mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage.

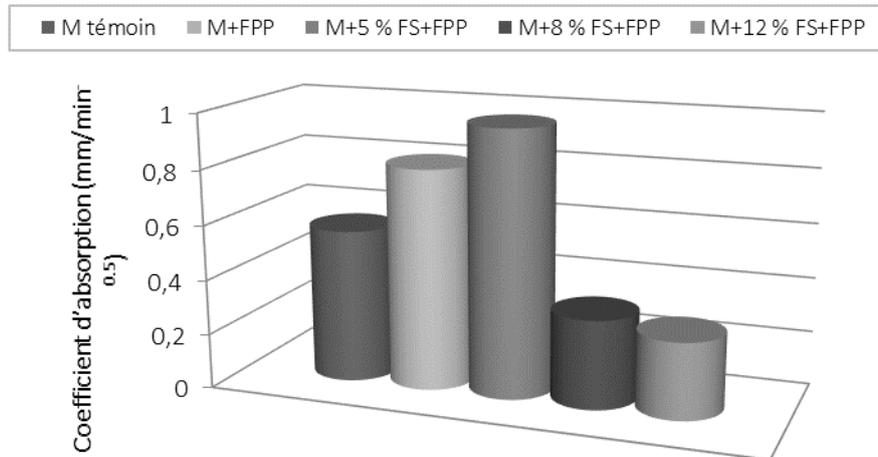


Figure III-19: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 150° C.

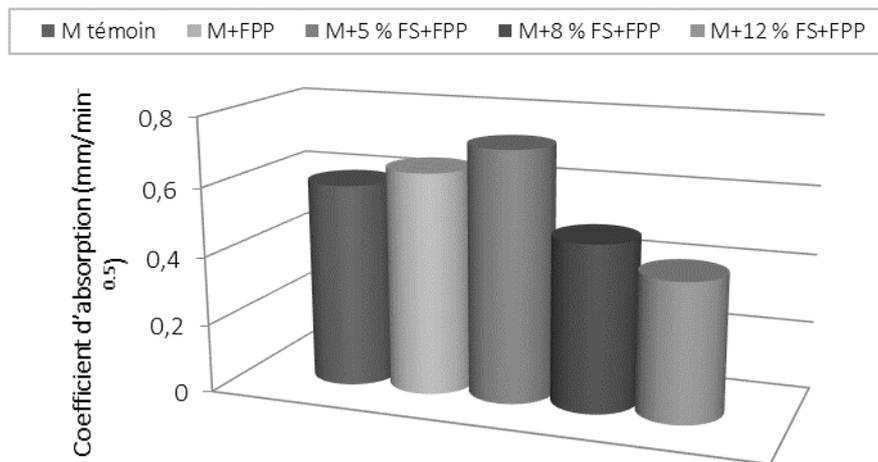


Figure III-20: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 300° C.

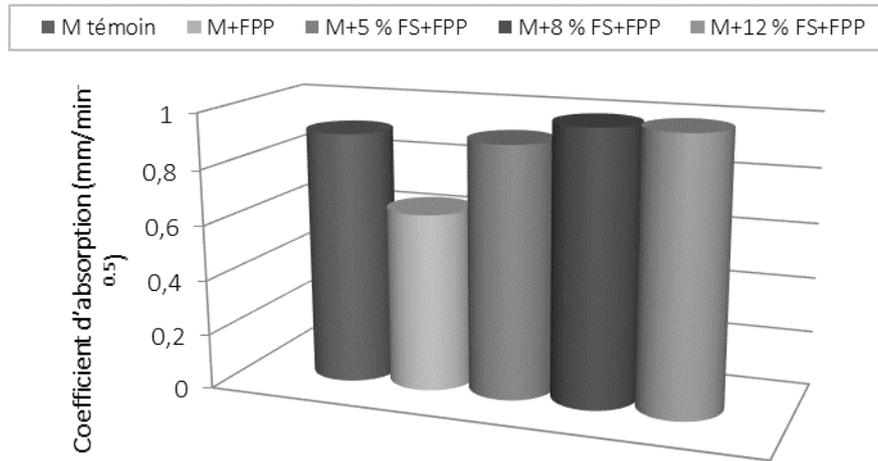


Figure III-21: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 450° C.

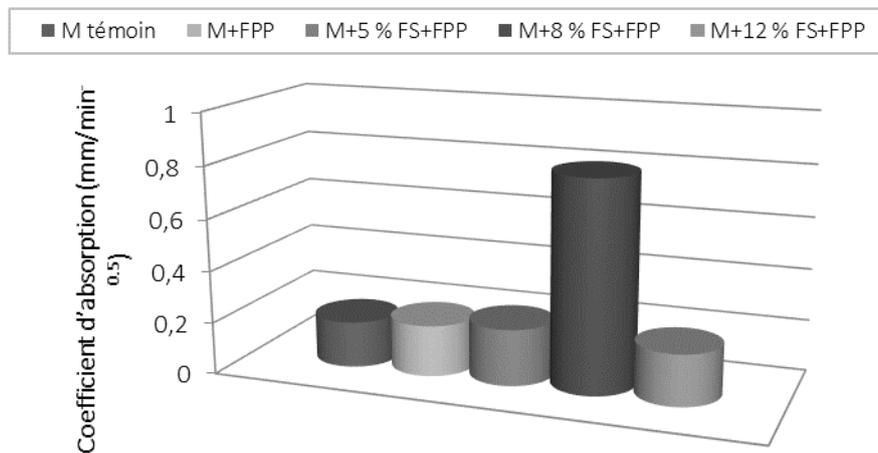


Figure III-22: Le coefficient de sorptivité des différents mortiers chauffés à 600° C.

Les résultats présentés sur les **Figure III.19, III.20, III.21 et III.22**, sont obtenus par l'application de l'équation :

$$i = \frac{Sw}{\sqrt{t}}$$

On distingue cinq histogrammes qui montrent l'évolution du coefficient d'absorption en hauteur sur la racine carrée du temps (à 60 minutes).

D'après les résultats obtenus, les cinq mortiers représentent une augmentation du coefficient d'absorption en fonction du temps avec l'augmentation progressive de la température (jusqu'à 450°C). Un pic dans le coefficient d'absorption est toujours observé à 150 et 300°C tel que dans le cas du mortier avec une substitution de 5% du ciment par la fumée de silice avec un dosage

constant des fibres polypropylènes. Au-delà 450°C les mortiers avec des substitutions de 8% et 12% du ciment par la fumée de silice représentent les coefficients d'absorptions plus élevés (environ $0.97 \text{ mm/min}^{-0.5}$), cette forte capacité d'absorption de la fumée de silice est intrinsèquement liée à la nature de ce matériau qui est par essence absorbant ainsi que la porosité supplémentaire essentiellement provoquée par la dégradation microstructurale du mortier lors du chauffage. Une forte accélération du coefficient d'absorption observé à 600°C tel que dans le cas du mortier avec une substitution de 8% du ciment par la fumée de silice avec même dosage des fibres polypropylènes.

III.5 Conclusion

L'objectif principal dans cette étude expérimentale réalisée est d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des mortiers par substitution partielle du ciment par l'ajout minérale soumis à haute température. Notre étude expérimentale est basée sur l'évaluation de l'effet de la fumée de silice avec les fibres polypropylènes sur la résistance mécanique et physique d'un mortier à haute température. Pour enrichir cette étude et bien comprendre le comportement mécanique et physique des mortiers nous avons fait plusieurs formulations avec différents rapports de E/L et différents taux de FS sont testés, pour cela plusieurs essais ont été aussi utilisés pour la caractérisation mécanique de ces mortiers. Ces derniers ont été exposés à un cycle de chauffage (150°C, 300°C, 450°C et 600°C).

À partir de cette étude expérimentale, plusieurs enseignements se dégagent :

Premièrement, avant la confection des éprouvettes, il est nécessaire de tester notre mortier selon deux paramètres à l'état frais (la maniabilité et l'air occlus). D'une part, la poudre de la fumée de silice influence les propriétés rhéologiques des mortiers principalement la maniabilité. Une substitution de 5% à 12% du ciment par la fumée de silice, la maniabilité obtenue est de classe 'plastique' par contre un mortier témoin sans FS est de classe 'fluide'. D'autre part, la finesse de la fumée de silice est élevée par rapport à celle du ciment ce qui nous permet de dire que la quantité d'air occlus diminue pour les mortiers qui contiennent de la fumée de silice.

D'après les résultats obtenus, la résistance à la flexion et à la compression des mortiers étudiés augmente en fonction de l'âge du matériau. La résistance à la flexion à 28 jours du mortier témoin est égale à 2.8 MPa pendant que la même formulation du mortier mais avec une substitution de 12% du ciment par la fumée de silice a donné une résistance égale à 4.3 MPa, cette augmentation de la résistance est influencée par le dosage en FS.

Cette étude met en évidence le rôle et l'influence du dosage en fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques des mortiers soumis à haute température, cela a été remarqué à l'âge de 45 jours, la résistance à la flexion d'un mortier fibré à une température ambiante (à

20°C) est légèrement plus élevée par rapport à celle obtenue dans le cas d'un mortier non fibré. Mais la résistance mesurée sur un mortier fibré chauffé à 300°C donne une valeur 2.55 MPa plus faible par rapport le cas d'un mortier non fibré chauffé à la même température 3.1 MPa, à partir de ces résultats, le phénomène de la fusion des fibres polypropylènes est basé sur le point de fusion une fois la température est exposée sur le mortier dépasse le point de fusion des fibres (supérieurs à 171°C), ces derniers fondent donc la porosité augmente cela veut dire que la résistance mécanique mesurée donne des valeurs faibles par rapport un mortier non fibré. Au-delà de 300°C, la résistance à la flexion et à la compression diminue, cette diminution nous permet de conclure que plus le matériau est chauffé à température élevée plus la résistance diminue (à 450 et 600°C). La résistance à la flexion et à la compression du mortier est influencée significativement par le dosage de FS, en plus on distingue deux phases de l'évolution de la résistance en fonction de la température une première avec une augmentation en résistance entre 150 et 300°C et une deuxième phase avec une diminution de la résistance entre 300 et 600°C.

Conclusion Générale et perspectives

L'objectif principal de cette étude expérimentale réalisée était, dès le début, d'étudier l'influence de la fumée de silice et des fibres polypropylènes sur le comportement physique et mécanique des mortiers ordinaires exposés à des hautes températures (allant jusqu'à 600° C). Dans cette étude, on s'est limité à un seul rapport Eau/Liant et un dosage constant en fibres polypropylène, mais des différents dosages en fumée de silice ont été testés dans le cas de chauffage à des différentes températures (20, 150, 300, 450 et 600° C). Dans ce but, plusieurs essais ont été effectués au laboratoire sur des échantillons des mortiers à l'état frais et durci.

Cette étude nous a permis d'observer le comportement déterminé après refroidissement des mortiers ordinaires, testés après le même cycle de chauffage-refroidissement. Ce qui n'est pas toujours le cas de la plupart des résultats issus de la littérature.

Parmi les résultats intéressants de cette étude nous pouvons citer le point suivant :

- Les mesures de la maniabilité, à l'état frais du mortier, ont montré que la fumée de silice influe sur les propriétés rhéologiques du mortier, principalement sur sa maniabilité. Une substitution de 5 % à 12 % du ciment par cet ajout minéral (la fumée de silice), peut conduire à l'obtention d'un mortier avec une classe de maniabilité "plastique", contrairement à un mortier témoin sans FS qui peut être dans une classe de maniabilité "fluide". De plus, l'air occlus dans le matériau, mesuré à l'état frais, diminue avec l'augmentation en pourcentage de la fumée de silice (ajouté par substitution d'une quantité du ciment) dans le mortier.
- La fumée de silice influe significativement sur la résistance mécanique du mortier et notamment à long terme (plus l'âge du matériau est important, plus cette variation par rapport au mortier témoins (sans ajout) est remarquable). Il est clairement remarquable, à partir des résultats obtenus, que plus le dosage en FS augmente, plus la résistance à la flexion et à la compression n'augmente aussi. Cette augmentation en résistance mécanique est expliquée par la grande finesse de la fumée de silice qui peut rendre le matériau plus compacte (moins poreux).
- La porosité accessible à l'eau est influencée clairement par l'ajout de la fumée de silice. La porosité du mortier diminue quand le pourcentage de la FS augmente. Par conséquent la sorptivité du matériau (absorption capillaire) diminue aussi avec l'augmentation de ce dosage en fumée de silice.
- L'exposition d'un mortier à des températures élevées influe sur ces propriétés mécaniques et physiques. Car au cours de l'élévation en température (à des différents paliers) plusieurs phénomènes physico-chimiques peuvent se produire à l'intérieur du

matériau cimentaire. Nous citons principalement l'évaporation de l'eau (libre et/ou chimiquement liée), ainsi que la décomposition de la portlandite (qui gouverne la résistance mécanique d'après la littérature) en chaux libre et en gaz carbonique qui s'évapore.

- Dans un mortier exposé à des températures élevées, l'influence de certains phénomènes chimiques ou physiques sur ces propriétés (son comportement), peut être minimisée par l'ajout de la fumée de silice qui rend le matériau cimentaire plus résistant et plus compacte.
- Cette étude met en évidence le rôle et l'influence du dosage en fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques des mortiers soumis à des hautes températures. Les résultats obtenus montrent que les fibres polypropylènes ont un rôle très bénéfique dans le mortier une fois exposé à des hautes températures. Car il est très possible d'éviter un phénomène d'éclatement du mortier ou d'écaillage des structures en matériau cimentaire très résistant (avec une faible porosité) à l'aide de l'utilisation de ces fibres. Puisque le point de fusion de ces Fibres polypropylènes est de 171° C, quand le mortier est chauffé au-delà de cette température, la porosité du matériau augmente, suite aux espaces libérés par les fibres fondées. Ceci permet donc d'éviter l'effet bouchon (expliqué plus haut dans ce chapitre), la première cause d'un éclatement.
- L'élévation en température conduit à une augmentation de la porosité accessible à l'eau du mortier, et par conséquent à une augmentation de son absorption capillaire.
- À 600°C, il est difficile de distinguer entre les résultats obtenus, principalement de la porosité et de l'absorption capillaire. Car à cette température (et à partir de 450° C) la portlandite Ca(OH)_2 est décomposé en chaux libre et en gaz carbonique ainsi qu'une grande quantité des liaisons du gel C-S-H sont déjà détruites à 600° C. Alors, ces transformations chimiques dans le matériau nous poussent souvent à une sous-évaluation des mesures à effectuer pendant les essais. Nous donnons l'exemple des l'immersion du mortier pendant l'essai de la porosité à l'eau (dans le dessiccateur) dont une partie du matériau chauffé à 600 (la chaux libre principalement) est dissolue dans l'eau pendant l'essai. Cela conduit certainement à des valeurs erronées.

PERSPECTIVES :

À partir de cette étude expérimentale réalisée, nous proposons ce qui suit :

- Pourtant que le mortier est souvent utilisé pour le revêtement des structures en béton, et en cas d'incendie il sera donc exposé en premier lieu au feu (exposé à des hautes

températures), mais il est très intéressant d'étudier l'influence de la fumée de silice et des fibres polypropylènes sur les comportements physiques et mécaniques des bétons ordinaires et BHP.

- L'utilisation des éprouvettes de petite dimension au laboratoire (4 x 4 x 16) cm³, ainsi que l'utilisation d'un four de laboratoire, restent encore insuffisantes pour compléter une telle étude. L'utilisation des échantillons de grandes tailles (in situ ou obtenus par carottage par exemple) ainsi que l'exposition du matériau à un feu réel, permettra certainement d'approfondir cette recherche dans ce domaine.
- L'utilisation d'un analyseur thermogravimétrique (ATD) est nécessaire, non seulement pour suivre toutes les transformations chimiques qui peuvent se produire dans un matériau cimentaire chauffé, mais aussi pour les quantifier, puisque la perte en masse est quantifiée à l'aide de l'ATG au cours de chauffage.
- Des essais (mesures) effectués à chaud (non pas après un refroidissement) seront de très grand intérêt pour ce genre d'étude. Il sera possible par exemple de comparer la résistance mécanique mesurée à chaud et la résistance résiduelle (mesurée après refroidissement).

Références bibliographiques

- [1] <https://ft.univ-tlemcen.dz>
- [2] <https://www.Febelcem.BI> (Historique du ciment)
- [3] <http://coursexosup.blogspot.com> (LE MONDE DE GENIE CIVIL)
- [4] <http://forum-btp.blogspot.com>
- [5] Mehta P. K. , *Concrete Structure, Properties, and Materials* , Prentice – Hall , 1986
- [6] <http://www.cours-génie-civil.com>
- [7] <http://www.Tout sur le béton.fr> (Prise et Durcissement du béton – Tout sur le béton)
- [8] G. Dreux "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, P 29-41
- [9] <http://forum-btp.blogspot.com>
- [10] G. Dreux 'Nouveau guide du béton ' Edition Eyrolles – Paris – 1998 , P 29 – 41 .
- [11] <https://www.over-view.fr>
- [12] williams PAUCHET 10 nov . 2019 'Caractéristiques des ciments' "technique-ingénieur ' "
- [13] A.TAGNIT et P-C NKINAMUBANZIB .Les ajouts cimentaires et le développement durable.Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
- [14] R. CHAID. *Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006*
- [15] Long T. Phan Nicholas J. Carino , Dat Duthink , and Edward Garboczi *International workshop on fire Performance of High – Strength concrete ,NIST, Gaithersburg, MD,February 13-14,1997 Proceedings*
- [16] [Sierra 74] Sierra R , *Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates Calciques hydrauliques , Rapport de recherche N39 , Laboratoire des Ponts et Chaussés , France , 1974*
- [17] A. K. Ramezaniapour, « *Engineering properties and morphology of pouzzolanic cementconcrete* », PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987

- [18] P.C. AITCIN. «les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fontethomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». *Revue des matériaux de construction*. Mai 1968
- [19] Bouglada Mohamed Salah, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier», *Mémoire de Magister, Université de M'sila, Année 2007 / 2008*
- [20] A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane(*Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran*)(*Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers*).
- [21] <https://www.e-Periodica.ch>
- [22] <http://dspace.univ-m'sila.dz>
- [23] R. CHAID, R. JAUBERTHIE et A. BOUKHALED. *Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010*
- [24] DJOBO YANKWA Jean Noël , *effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique.*
- [25] Mania K., *Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995*
- [26] DJOBO YANKWA Jean Noël , *effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique.*
- [27] [_ASTM C618-03, 2003. "Standard spécification for coal Fly ash and Ra or calcined Natural pazzolan for use in concrete ASTM international". West conshohochken,PA, www.astm.org](#)
- [28] A. MEBROUKI, (juin 2003). "Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers". *Thèse de Magister, Université de Mostaganem.*
- [29] <https://www.academia.edu> (CHAPITRE 3 : Les ajouts minéraux)
- [30] <http://www.irsst.qc.ca>
- [31] B.C. BENI-REMOUR « *Matériaux pouzzolanique :étude physico chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane mémoire de fin d'étude ingénieur . IGCM - ORAN - 1993*

- [32] B. Gourara, A. Korichi, (2017). " Effet de la pouzzolane naturelle sur la porosité d'un béton".
Mémoire de master, Université moulay Tahar-Saida.
- [33] E. Gartner, (2004). "Industrially interesting approaches to "low-CO2" cement". *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, pp.1489-1498.
- [34] COMMITTEE, A. C. I. 1973. *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*. A.C.I. Committee 544, *J. Amer. Conc. Inst.*, Vol. 70, pp. 729-744.
- [35] DJEBALI, S. 2013. *Caracterisation des elements de structures en beton de fibres metalliques*.
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algerie.
- [36] (Yagoub, 2009) *ABQ ' Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton*
AFROUGHSAKET, V. & OZBAKKALOGLU , T. 2005 . *Méchanical and durability proprrties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers . Construction and Building Matérials ,94 ,73-82 .*
- [37] MAKHLOUF, N. 2010. *Caracterisation en statique du comportement en traction directe du beton arme de fibres en copeaux*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algerie
- [38] MAJUMDAR, A. J. & NARAYAN SWAMY, R. 1977. *Fibre reinforced concrete materials*. Rilem technical committee 19-FRC
- [39] BELARIBI, H. 2007. *L'évaluation de la qualite du beton de fibres in situ par les essais non destructifs (methode combinee ultrason et sclerometre)*.Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra.
- [40] khalifa , P et Tsimbrovska , M . *Comportement des BHP à haute températures . Etat de la question et résultats expérimentaux . Cahier de CSTB n° 3078*
- [41] [https:// www.infociments .fr](https://www.infociments.fr) (Béton fibré) ALHOZAIMY , A. M. , SOROUSHIAN , P. & MIRZA , F. 1996. *Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials . Cement and Concrete Composites ,18 ,85-92 .*
- [42] [https:// www.researchgate. Net](https://www.researchgate.net)
- [43] Khoury , G . A .. GRAINGER ,B.N and SULLIVANE , G.P.E ' *Strain of concrete during first heating to 600°C under load ' . Magazine of concrete research , 1985 . Vol 37, PP 195 – 215*
- [44] Gaweska - Hager I . ; *Comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques , Thèse de Doctorat , Ecole Nationale des Ponts et chaussés / Ecole Polytechnique de Cracovie , France , 2004*

- [45] BAZANT Z. P & KAPLAN M. F. (1996), "Concrete at High temperatures, Material properties and mathematical models", Concrete Design & Construction Series, © Longman, Group Limited 1996.
- [46] Noumowé, N.A. Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du BHP. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1995.
- [47] Khoury 1995 (Khoury , G . A ' Strain components of nuclear – reactor – type concrete during first peat cycle ' Nuclear Engineering and Designe , 1995 . n° 156 ,PP, 313 – 321
- [48] (Caste . ; 2004) et (Alon et al. ; 2004)
- [49] Bazant . ZP. , Kaplan. MF., ' Concrete at high temperature : Material properties and mathematical models , Concrete Design & Construction Series', Longman Group Limited , (1996), 196 p
- [50] Bazant et Kaplan, 1996 and P . Laplante , C Boulay – Materials and structures , 1994 Springer
- [51] (Caste . ; 2004)
- [52] DIEDERICHS, U., JUMPPANEN, U. M. and PENTALLA, V., 1992. 'Behavior of high strength concrete at elevated temperatures'. Espoo 1989. Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, Report 92 p 72
- [53] SLIWINSKI J., EHRENFELD W.: Déformation thermiques des pâtes et des mortiers avec ajout de fumée de silice à haute température, Proc. of Int. Conf. « Concrete & Concrete Structures », University of Žilina, Slovakia, 1999, 83-88
- [54] Bazant . ZP. , Kaplan. MF., ' Concrete at high temperature : Material properties and mathematical models , Concrete Design & Construction Series', Longman Group Limited , (1996), 196 p
- [55] Bazant et Kaplan, 1996 and P . Laplante , C Boulay – Materials and structures , 1994 Springer
- [56] Marchand, J . ; Hornain, H. ; Diamond, S. ; Pigeon, M et Guiraud, H. (1996) . The microstructure of dry concrete products. Cement and concrete Research , volume 26, numéro 3 , p.427-438
- [57] Khan, M. I. (2003). Permeation of high performance concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 15(1), 84-92.
- [58] Sherbrook (Québec) Canada Février 2013 'Jean – Philippe FAUBERT' Valorisation de particules fines dans les bétons compactés au rouleau et les bétons Moulés sec.
- [59] S .Laldj cours – ETS 'Caractéristiques fondamentales du béton . Hiver – 2015.

[60] <https://www.batiproduits.com> (*caractéristiques des fibres polypropylènes*)

[61] <https://www.isomat.gr>

[62] Houria MEFTAH (2018) '*Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons de granulats recyclé, Renforcés de fibres polypropylène*'

[63] <https://tel.archives-ouvertes.fr>

[64] [Sch,1988] Schneider U. , '*Concrete at high temperature – a general review*' ,*Fire safety journal*,Vol 13 ,(1988) ;P55 – 68 .

[65] [Noum . ;1995] A .Noumowé , '*Effet des hautes températures (20 – 600°C) sur le béton : cas particulier du béton à hautes performances*' , *Thèse de Doctorat, INSA Lyon (1995)*, 232 P .