

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Technologies
Département de Génie civil
Ref : D012118009D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع: D012118009D

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de

Doctorat en génie civil

Option : Géo-matériaux

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA COMPREHENSION DES
PHENOMENES ET MECANISMES D'ACTION DES EFFETS DES
ADDITIONS SUR LE COMPORTEMENT DES MATRICES
CIMENTAIRES.**

Présentée par :

BENCHIHEUB Djihen

2018/2019

Devant le jury composé de :

Mr. BELACHIA Moulou..... Professeur.....Rapporteur.....Université 20 Aout 1955, Skikda
Mr. HOUARI Hacène.....Professeur.....Rapporteur....Université Mentouri, Constantine
Mr. MESSASSET Salah.....Professeur..... Président...Université 20 Aout 1955, Skikda
Mr. MERZOUUD Mouloud.....Professeur..... Examinat...Université Badji Mokhtar, Annaba
Mr. BENOUIS Abdelhalim.....Professeur.....Examinat....Université 8 Mai 1945, Guelma
Mme. HEBHOUB HouriaDocteur..... ..Examinatric...Université 20 Aout 1955, Skikda

Dédicace

À l'homme à qui je dois tout... Mon Père

À ma mère... aucune dédicace ne saurait exprimer ce
que je te dois, pour ton Amour, ton Soutien et les
Sacrifices que tu as consentis pour mon instruction et
mon bien-être.

À mes deuxièmes parents Papa et Mama qui m'ont
soutenu tout au long de ma vie

À mon cher époux, mes chères sœurs et frères.

REMERCIEMENTS

*J'exprime ma profonde gratitude et reconnaissance au Professeur **HOUARI Hacène** qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Ils ont été et resteront des moteurs de mon travail de chercheuse*

*Mes vifs remerciements à mon Co-encadreur monsieur **belachia mouloud**, professeur au département de génie civil à l'université 20 aout 1955 de skikda, pour son accueil et le partage de ses connaissances, ses expériences et ses conseils*

*Je tiens également à remercier **Mlle BENSALÉM Sara**, Docteur et enseignante au Département de Génie Civil à l'université Mentouri Constantine, pour le partage de ses connaissances, ses expériences et ses nombreux conseils avisés, elle était, et est, la personne sur qui j'ai pu toujours compter. Elle était, et est, vraiment une véritable sœur pour moi.*

*Mention spéciale au Dr AMOURI Chahinez, qui m'a supporté et m'a permis de me lever motivée, le cœur léger et l'esprit tranquille depuis le début de la thèse. Très humblement, je voudrais te dire **MERCI** non seulement, pour ton soutien pendant mes périodes de doutes et pour tes multiples encouragements répétés.*

Mais aussi, Merci, d'avoir été l'épaule réconfortant, l'oreille attentive, la main tendue, la confidente, bref, la complice de mes plus moments difficiles.

Je suis très honorée à remercier de la présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier

*Monsieur **MESSASSET Salah**, Professeur à l'université 20 Aout 1955 - Skikda*

*Je remercie infiniment Monsieur **MERZOU** Professeur à l'université badji mokhtar, Annaba*

*Je tiens à remercier Monsieur **BENOUIS Abdelhalim**, Professeur à l'université 8 Mai 1945 - Guelma*

*Je remercie cordialement, Madame **HEBHOUB Houria**, Docteur de l'université 20 Aout 1955 Skikda*

*Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **Guenoun mohamed L'EX** directeur du laboratoire **Granitex**, aux membres de l'entreprise **BENHAMIDA**, pour leurs conseils et leurs soutiens tout au long de mon travail sur site.*

*Une thèse c'est aussi un laboratoire ou on passe de nombreuses heures, Alors un grand merci à tous les membres des laboratoires **LTPEst et LNHC**, pour l'ambiance scientifique et amicale qui règne sur leurs laboratoires*

*Je remercie mes collègues de **Lafarge Holcim**, travailler avec vous est un Véritable plaisir.*

*A titre plus personnel, Je remercie chaleureusement mes parents. Ainsi que mon mari, **Delilache zakaria**, sans son soutien je n'aurais sans doute pas eu la persévérance de mener ce travail à terme.*

*Merci tout spécialement à mes sœurs **insaf, riheb et kaoutar**. Ainsi qu'à toute **ma famille Sebihi**.*

*Mes plus vifs remerciements vont également, à mes amis **Raouf belkadi** et **nassima baaziz** que j'ai partagé avec eux des moments inoubliables pendant mes études*

RESUME

La combinaison entre les différents ajouts, additions et fibres conduit aujourd'hui à plusieurs types de mortiers avec plusieurs paramètres, chaque mortier est destiné selon ses paramètres à un cas précis, les mortiers de réparations sont des mortiers qui ont des exigences différentes qui dépendent non seulement des composants des mortiers mais aussi de l'état des constructions à réparer

Notre travail a consisté à élaborer un mortier à base d'additions minérales et de fibres, destiné à la réparation des ouvrages (ragréage des façades, remplissage de joints, élimination des fissures. Etc.)

Quatre additions minérales ont été choisies: la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les laitiers de haut Fournaux et les fillers calcaires, elles ont été soumises à des essais de caractérisation à l'état Frais (maniabilité, masse volumique), puis à l'état durci (résistances mécaniques). Seules deux résultats ont été concluants il s'agit de deux additions, la fumée de silice et la pouzzolane. A ces deux additions il a été incorporé les fibres de carbone, des essais à l'état frais et à l'état durcis sont ainsi effectués sur les mortiers fibrés.

Le couplage de l'addition de pouzzolane naturelle avec la fibre de carbone a donné les meilleurs résultats en ce qui concerne les résistances mécanique, pour l'état frais des mortiers les taux de substitution de 10% ont montré les meilleurs résultats.

A base de ces investigations expérimentales. Un bâtiment a été choisi comme cas d'étude avec pour objectif, réhabiliter les façades, réparer la dislocation du mortier de jointage.

L'étude de diagnostic et l'analyse chimique effectuée sur le mortier de support ancien ont mis en évidence que ces derniers sont à base de chaux. Cette nouvelle donnée nous a mené à effectuer Trois formulations différentes :

- La première M1 à base de chaux (CH) et de sable (S).
- La deuxième M2 à base de Chaux (CH), de pouzzolane(PZ) et de sable (S).
- la troisième M3 à base de chaux(CH), de pouzzolane(PZ), de fibres polypropylènes (FP) et de sable (S).

Par ailleurs Afin de préserver le confort thermique offert par le vieux bâti on a étudié la conductivité thermique des trois mortiers ci-dessus. On a également mesuré l'adhérence de chaque'un de ces mortier sur plusieurs types de support (béton, parpaing, brique, pierre naturelle), on a étudié leur caractéristiques mécaniques à travers l'essai de DRX. et mesuré les variations pondérales des mortiers ainsi élaborés.

Nous avons appliqué les trois mortiers étudiés sur la façade du bâtiment choisi comme cas d'études.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout des fibres de carbone et des fibres polypropylènes est bénéfique à l'état durcis surtout en flexion et que la pouzzolane naturelle a augmenté les résistances mécaniques, l'ajout des fibres polypropylènes au mortier de chaux a amélioré l'isolation thermique du mortier. Quand à l'adhérence les mortiers étudiés ont donné des résultats satisfaisants pour les différents travaux de rénovation.

Mots clés : additions, fibres de carbone, chaux, mortiers de réparation, pouzzolane, fibres polypropylènes, performances mécaniques, adhérence, conductibilité thermique

ABSTRACT

The combination between the various additions, additions and fibers now conducted to several types of mortars with several parameters, each mortar is intended according to its parameters to a specific case, repair mortars are mortars that have different requirements that depend not only on mortar components but also on the condition of the constructions to be repaired. Our work consisted in elaborating a mortar based on mineral additions and fibers, intended for the repair of the works (smoothing of the facades, filling of joints, elimination of cracks..ect). Four mineral additions were chosen: natural pozzolana, silica fume, high furnace slags and calcareous fillers, they were subjected to characterization tests in the fresh state (workability, density), then to hardened state (mechanical resistances). Only two results were conclusive: two additions, silica fume and pozzolana. To these two additions the carbon fibers were incorporated. Fresh and cured tests are thus carried out on the fiber-reinforced mortars. The coupling of the addition of natural pozzolan with carbon fiber gave the best results with regard to the mechanical strengths, for the fresh state of the mortars the substitution rates of 10% showed the best results based on these experimental investigations. A building was chosen as a case study with the aim of rehabilitating the facades and repairing the dislocation of the jointing mortar.

The diagnostic study and the chemical analysis carried out on the old support mortar revealed that these are lime-based. This new data has led us to perform three different formulations:

- The first M1 based on lime (L) and sand (S)
- The second M2 based on lime (L), pozzolan (PZ) and sand (S)
- the third M3 based on lime (L), pozzolan (PZ), polypropylene fibers (PF) and sand (S)

Moreover, in order to preserve the thermal comfort offered by the old building, the thermal conductivity of the three mortars above has been studied. The adhesion of each of these mortars was also measured on several types of support (concrete, breeze block, brick, natural stone), their mechanical characteristics were studied through the XRD test, and the weight variations of the mortars thus elaborated.

We applied these three mortars studied on the facade of the building chosen as case study. The results obtained show that the addition of carbon fibers and polypropylene fibers is beneficial in the cured state, especially in flexion, and that the natural pozzolana has increased the mechanical strengths, the addition of polypropylene fibers to the lime mortar has

improved the thermal insulation of the mortar. The adhesion of mortars studied gave satisfactory results for renovation work

Keywords: addition, carbon fiber, lime, repair mortars, pozzolana, polypropylene fibers, mechanical performance, adhesion, thermal conductivity.

ملخص

إن الإضافات و الألياف تهدف إلى تحسين أداء الملاط و الخرسانة مثل السيولة و المتانة و المقاومة... إلخ. هذه الإضافات تؤثر بشكل كبير على المواد الإسمنتية في الحالة السائلة التي ترتبط مباشرة مع تطور الخصائص في الحالة الصلبة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة آثار الإضافات على الخرسانة و الملاط المقوى بالألياف، حيث أن إضافة الألياف هو العنصر الذي يقوي الملاط و الخرسانة في الحالة الصلبة، و لكن يحتاج اليوم مجال البناء هذا النوع من الخرسانة ليس فقط للإنشاءات الجديدة و لكن خاصة لإعادة تأهيل الهياكل،

و يستند البرنامج التجريبي على دراسة عدة صيغ من مكونات الملاط الذي يحتوي على الإسمنت و ألياف الكربون و على الهاون بدون إسمنت و تتكون من البوزلان الطبيعي، الجير و الياف البوليبروبيلين. تم اختيار هذه المكونات أساسا على فائدة هذا الملاط في مجال البناء.

يتميز ذا النهج التجريبي بأنه فعال. أولا، قمنا بدراسة الخصائص في الحالة السائلة و الحالة الصلبة، علما أن إضافة الإسمنت تتناسب مع إصلاح الأعمال الخرسانية، و الجزائر هي بلد غني بالتراث القديم المبني بالحجر و المواد التقليدية فمن الضروري دراسة خصائص الملاط المصنوع من الجير، و قد أجريت عدة اختبارات في الحالة السائلة (السيولة و الكثافة) و في الحالة الصلبة (المقاومة الميكانيكية، الالتصاق و العزل الحراري، فقدان الوزن). و من أجل التأكد من كل هذه النتائج، أجري اختبار في موقع على واجهة مبنى تم اختياره للدراسة.

تظهر النتائج أن إضافة ألياف الكربون و ألياف البوليبروبيلين هو مقوي لخصائص الملاط و البوزلان الطبيعية تزيد من القوة الميكانيكية، تحسن إضافة ألياف البوليبروبيلين من عزل الملاط. أما بالنسبة لخاصية التصاق الملاط ، فإن جميع الخلطات المدروسة قدمت نتائج مرضية لكل أنواع أعمال الترميم.

الكلمات الرئيسية: الإضافات، ألياف الكربون، ألياف البوليبروبيلين، العزل الحراري، الأداء الميكانيكي، البوزلان، الجير.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
RESUME	v
ABSTRACT	vii
ملخص	ix
TABLE DES MATIERES	x
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
LISTE DES PHOTOS.....	xviii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : Etat des connaissances.....	3
Action des additions dans les matériaux cimentaires.....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Le ciment portland	3
1.2.1. Les constituants du ciment portland	4
1.2.1.1. Silicate tricalcique (C_3S)	6
1.2.1.2. Silicate bicalcique (C_2S)	6
1.2.1.3. Aluminate tricalcique (C_3A)	6
1.2.1.4. Aliminoferrite tétracalcique (C_4AF)	7
1.2.1.5. Les composés mineurs	7
1.2.2. Hydratation du ciment Portland	7
1.2.2.1. Hydratation du silicate tricalcique	9
1.2.2.2. Hydratation du silicate bicalcique (βC_2S).....	11
1.2.2.3. Hydratation de l'aluminate tricalcique.....	11
1.2.2.4. Hydratation de l'aluminoferrite de calcium (C_4AF).....	13
1.2.2.5. Le rôle crucial du sulfate de calcium.....	13

1.2.3.	Composition du ciment	14
1.2.3.1.	<i>Evolution de l'hydratation</i>	16
1.2.3.2.	<i>Hydratation du ciment portland</i>	17
1.3.	Définition des ajouts minéraux	18
1.3.1.	Classification des additions	19
1.3.1.1.	<i>Les fumées de silice</i>	19
1.3.1.2.	<i>Les cendres volantes</i>	22
1.3.1.3.	<i>Les laitiers de haut fourneau</i>	24
1.3.1.4.	<i>Les fillers calcaires</i>	25
1.3.2.	Importance des additions dans l'industrie cimentière	27
1.3.3.	Fonction des additions	27
1.3.3.1.	<i>Additions mélangées avec le clinker en cimenterie</i>	28
1.3.3.2.	<i>Additions introduites directement dans les bétons</i>	28
1.3.4.	Notion de liant équivalent	29
1.3.5.	Caractérisation de l'activité d'une addition minérale	30
1.3.5.1.	<i>Indice d'activité</i>	30
1.4.	Les fibres	35
1.4.1.	Introduction	35
1.4.2.	Nature des fibres	36
1.4.2.1.	<i>Les fibres d'amiante</i>	37
1.4.2.2.	<i>Les fibres de verre</i>	37
1.4.2.3.	<i>Les fibres polypropylène</i>	38
1.4.2.4.	<i>Les fibres métalliques</i>	39
1.4.2.6.	<i>Les fibres de carbone</i>	40
1.4.3.	Formulation des bétons de fibres	42
1.4.4.	Utilisation des Fibres dans la Construction	44
1.4.5.	Avantages et inconvénients des B.R.F	45
1.4.6.	Le rôle des fibres	45
1.4.7.	Influence du dosage en fibres	46

1.4.7.1.	<i>Optimisation rhéologique</i>	46
1.4.7.2.	<i>Optimisation mécanique</i>	46
1.5.	Conclusion	47
CHAPITRE 2 : Pathologie et mortiers de réparation		49
2.1.	Introduction.....	49
2.2.	Pathologies des constructions	50
2.2.1.	Généralités	50
2.2.2.	Causes de dégradation des ouvrages.....	50
2.2.2.1.	<i>Dégradations mécaniques</i>	51
2.2.2.2.	<i>Dégradations Chimiques</i>	51
□	Corrosion des armatures	51
□	Détérioration par le gel-dégel	52
□	Attaques chimiques	53
□	Les acides	53
□	Sels et alcalis	53
□	Attaques sulfatiques	54
□	Réactivité alcali-agrégat	54
□	Abrasion / Érosion	54
□	Changement de volume	55
□	Dégradations Physiques	55
2.2.3.	Méthodes de réparation	56
2.3.	Mortiers d'enduit, de réparation	56
2.3.1.	Généralité.....	56
2.3.2.	Fonctions du mortier d'enduit	57
2.3.3.	Différent types des mortiers	57
2.3.3.1.	<i>Les mortiers de ciment</i>	57
2.3.3.2.	<i>Les mortiers de chaux</i>	57
2.3.3.3.	<i>Les mortiers bâtards</i>	57
2.3.3.4.	<i>Mortier réfractaire</i>	58

2.3.3.5.	<i>Mortier rapide</i>	58
2.3.3.6.	<i>Mortier industriel</i>	58
2.3.4.	Classification des mortiers	58
2.3.4.1.	<i>Selon leur domaine d'utilisation</i>	58
2.3.4.2.	<i>Selon la nature du liant</i>	59
2.3.5.	Propriétés essentielles des mortiers	60
2.3.5.2.	<i>Teneur en air</i>	61
2.3.5.3.	<i>La résistance à la compression</i>	62
2.3.5.4.	<i>Temps de prise</i>	63
2.3.5.5.	<i>Retraits et gonflements</i>	63
2.3.5.6.	<i>Masse volumique apparente</i>	64
2.3.5.7.	<i>Masse volumique absolue</i>	64
2.3.5.8.	<i>Absorption capillaire</i>	64
2.3.5.9.	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau</i>	65
2.3.5.10.	<i>Conductivité thermique</i>	65
2.3.5.11.	<i>Résistance au feu et combustibilité</i>	65
2.3.6.	Durabilité des mortiers d'enduit	66
2.3.7.	Pathologies des mortiers	67
2.3.7.1.	<i>La fissuration</i>	67
2.3.7.2.	<i>La perte d'adhérence</i>	68
2.3.7.3.	<i>Faïençage</i>	69
2.3.7.4.	<i>Efflorescences au séchage</i>	69
2.3.7.5.	<i>Carbonatation différentielle à long terme</i>	69
2.3.7.6.	<i>Pénétration d'eau et décollement</i>	70
2.3.7.7.	<i>Brûlage ou grillage de l'enduit</i>	70
2.3.8.	Causes de désordre des mortiers	70
2.3.8.1.	<i>Formulations inadéquates</i>	70
2.3.8.2.	<i>Mauvaise application sur le site</i>	70
2.3.8.3.	<i>Anomalies de support ou autres éléments en contact</i>	71

2.3.8.4.	<i>Causes exceptionnelles</i>	71
2.3.8.5.	<i>Vieillessement naturel dû à l'âge ou à l'exposition aux conditions particulièrement agressif</i> 71	
2.4.	Remèdes et solutions	71
2.5.	Travaux antérieurs	72
2.6.	Conclusion	73
CHAPITRE 3 :		74
Etude de l'influence des additions minérales et des fibres sur les mortiers		74
3.1.	Introduction	74
3.2.	Justification du choix des matériaux de base	75
3.2.1.	Ciment	75
3.2.2	Additions	75
□	<i>Les Fumés de silice (FS)</i>	76
□	<i>Les fillers calcaires (FCL)</i>	76
□	<i>Les Laitiers de hauts fourneaux (L)</i>	77
□	<i>Les Pouzzolanes naturelles (PZ)</i>	77
3.2.3	Les fibres de carbone (FC)	77
3.2.4	Le Superplastifiant	78
3.2.5	Sable	78
3.2.6	Eau	80
3.3	Essais et procédures des mortiers élaborés	80
3.3.1	Maniabilité	80
3.3.2	Masse volumique à l'état frais	81
3.3.3	Résistance à la compression	82
3.3.4	Résistance à la traction par flexion	83
3.4	Normes	84
3.5	Programme expérimental	85
a.	Influence de la nature des additions	85
b.	Influence du pourcentage des additions substitué au ciment (en poids)	86

c.	Influence de la combinaison addition/fibre	86
3.6	Formulation des mélanges.....	86
3.7	Confection des éprouvettes.....	87
3.7.1	Gâchage.....	87
3.7.2	Procédure de malaxage.....	87
3.7.3	Prélèvement et cure des échantillons.....	88
3.8	Résultats et discussions	88
3.8.1	Effets des additions sur les performances des mortiers - A l'état frais.....	88
3.8.1.1	<i>Masse volumique.....</i>	<i>88</i>
3.8.1.2	<i>Maniabilité.....</i>	<i>91</i>
3.8.2.	Effets des additions sur les performances des mortiers - À l'état durci.....	94
3.8.2.1.	Résistance en compression.....	94
3.8.2.2.	<i>Résistance à la traction par flexion flexion</i>	<i>98</i>
3.8.3.	Effets des fibres de carbone sur les performances des mortiers - A l'état frais	101
3.8.3.1.	<i>Maniabilité</i>	<i>102</i>
3.8.3.2.	la masse volumique	103
3.8.4.	Effets des fibres de carbone sur les performances des mortiers - A l'état durci.....	103
3.8.4.1.	<i>Résistance à la compression</i>	<i>103</i>
3.8.4.2.	<i>Résistance à la flexion.....</i>	<i>104</i>
3.9.	Conclusion	105
Chapitre 4 : CAS D'ETUDE.....		108
Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis.....		108
4.1.	Introduction.....	108
4.2.	Identification du cas d'étude : Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis	109
4.2.1.	Expertise	109
a.	Description.....	110
b.	Structure porteuse	110
c.	Diagnostic.....	110
d.	Recommandations à suivre.....	111

e.	Pathologies recensées	111
f.	Illustrations photographiques	111
4.2.2.	Identification des mortiers existants	113
4.2.2.1.	<i>Analyse chimique</i>	113
4.3.	Élaboration des mortiers de réparation au Laboratoire	115
4.3.1.	Choix des matériaux de base	115
4.3.2.	Caractérisation et choix des matériaux utilisés	116
4.3.2.1.	<i>La chaux</i>	116
4.3.2.2.	<i>La pouzzolane</i>	117
4.3.2.3.	<i>Le sable</i>	118
4.3.2.4.	<i>L'épaississant</i>	120
4.3.2.5.	<i>Les fibres polypropylènes</i>	120
4.4.	Formulations élaborées	121
4.5.	Résultats et discussions	122
4.5.1.	Essais d'adhérence	122
4.5.1.1.	<i>Arrachement selon les normes EN 1015-12 et EN 998-1</i>	122
4.5.1.2.	<i>Essai d'Arrachement sur une pierre naturelle</i>	124
4.5.2.	Essai de conductivité thermique	125
4.5.3.	Résistances mécaniques	126
4.5.3.1.	<i>Résistance à la compression</i>	126
4.5.3.2.	<i>Résistance à la traction</i>	129
4.5.3.3.	<i>Variation pondérale</i>	130
4.6.	Application sur chantier	131
4.6.1.	Préparation des surfaces	131
4.7.	Conclusion	133
	CONCLUSION GENERALE	135
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	138

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : Etat des connaissances

Action des additions dans les matériaux cimentaires

<i>Figure 1. 1 : principe de fabrication du ciment Portland [Humboldt, Wedag 1986]</i>	4
<i>Figure 1. 2 : Principe de fabrication du ciment Portland [Vernet 1986]</i>	5
<i>Figure 1. 3 : Représentation schématiquement les constituants anhydres du clinker et des produits d'hydratation [Double 1983]</i>	8
<i>Figure 1. 4 : Cinétique d'hydratation du C3S [Pliskin 1993]</i>	9
<i>Figure 1. 5 : Cinétique d'hydratation du C3A [Pliskin 1993]</i>	12
<i>Figure 1. 6 : dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps [Neville 2000]</i>	16

CHAPITRE 2 : Pathologie et mortiers de réparation

<i>Figure 2. 1 : Fissuration causée par la corrosion des armatures</i>	52
<i>Figure 2. 2 : Table à secousses.</i>	61
<i>Figure 2. 3 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.</i>	61

CHAPITRE 3 : Etude de l'influence des additions minérales et des fibres sur les mortiers

<i>Figure 3. 1: Courbe granulométrique du sable</i>	80
<i>Figure 3. 2 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.</i>	81
<i>Figure 3. 3 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en fumée de silice.</i>	89
<i>Figure 3. 4 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en pouzzolanes.</i>	89
<i>Figure 3. 5 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en fillers calcaires.</i>	90
<i>Figure 3. 6 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage de laitier</i>	91
<i>Figure 3. 7 : Variation de l'écoulement en fonction du dosage en fumée de silice</i>	92
<i>Figure 3. 8: Variation de l'écoulement en fonction du dosage en pouzzolanes</i>	93
<i>Figure 3. 9 : L'évolution des résistances à la compression des mortiers de fumée de silice</i> ...94	
<i>Figure 3. 10 : L'évolution des résistances à la compression des mortiers de pouzzolane</i>	95
<i>Figure 3. 11 : L'évolution des résistances à la compression du mortier des fillers calcaires.</i> 97	
<i>Figure 3. 12 : L'évolution des résistances à la compression du mortier de laitier</i>	98
<i>Figure 3. 13 : L'évolution des résistances à traction des mortiers de fumée de silice</i>	99
<i>Figure 3. 14 : L'évolution des résistances à la traction des mortiers de pouzzolane.</i>	100
<i>Figure 3. 15: L'évolution des résistances à la traction du mortier de fillers calcaires</i>	100
<i>Figure 3. 16 : L'évolution des résistances à la traction par flexion du mortier de laitier</i>	101
<i>Figure 3. 17 : Les résultats de l'écoulement des mortiers fibrés</i>	102
<i>Figure 3. 18 : Les résultats de la masse volumique des mortiers fibrés</i>	103
<i>Figure 3. 19 : Les résultats des résistances à la compression des mortiers fibrés.</i>	104

Figure 3. 20 : Les résultats des résistances à la traction des mortiers fibrés.	105
--	-----

Chapitre 4 : CAS D'ETUDE - Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis

<i>Figure 4. 1 : Comparaison entre le sable utilisé et le sable normalisé.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 4. 2 : Analyse de DRX sur le sable.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 4. 3 : Contrainte d'arrachement des différents mortiers étudiés.....</i>	<i>123</i>
<i>Figure 4. 4 : essai d'arrachement sur la pierre.</i>	<i>124</i>
<i>Figure 4. 5 : la pierre choisie pour effectuer l'essai.....</i>	<i>124</i>
<i>Figure 4. 6 : La conductivité thermique des différents mortiers étudiés.....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 4. 7 : Résistance à la compression des différents mélanges.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure 4. 8 : Diffraction des rayons X du mortier M2 (pouzzolane+chaux).....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 4. 9 : Diffraction des rayons X du mortier M3 (pouzzolane + chaux + fibres polypropylènes)</i>	<i>129</i>
<i>Figure 4. 10 : Résistance à la traction par flexion des différents mélanges</i>	<i>130</i>
<i>Figure 4. 11 : Variation pondérale des différents mélanges</i>	<i>131</i>

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : Etat des connaissances

Action des additions dans les matériaux cimentaires

<i>Tableau 1. 1 : Principaux minéraux du ciment Portland et leurs caractéristiques [Mehta 1986].....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 1. 2 : Les différents types de ciments [Neville A 2000]</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 1. 3 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées. [MINART J. HOANG L.H. & TACHE G.]</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 1. 4 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'amianté [AIT AMEUR 1998]</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 1. 5 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [AIT AMEUR 1998].</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 1. 6 : Propriétés mécaniques des fibres de polypropylène.</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 1. 7 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone [AIT AMEUR 1998].</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 1. 8 : Définition de la formulation</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 1. 9 : Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment [[KRIKER, 2005] [LACROIX & all 1982]].</i>	<i>44</i>

CHAPITRE 2 : Pathologie et mortiers de réparation

<i>Tableau 2. 1 : Les catégories des mortiers selon leurs résistances à la compression selon la norme 998-2.</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 2. 2 : pathologies et solutions des vieux enduits [Weber 2008].</i>	<i>71</i>

CHAPITRE 3 : Etude de l'influence des additions minérales et des fibres sur les mortiers

<i>Tableau 3. 1: Composition et exigences selon la norme SN EN 197-1</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 3. 2: Composition chimique et minéralogique du ciment CEMI 42.5 N</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 3. 3 : Caractéristiques de la fumée de silice.</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 3. 12 : Composition des mortiers.....</i>	<i>87</i>

Chapitre 4 : CAS D'ETUDE - Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis

<i>Tableau 4. 1 : Description de l'immeuble</i>	<i>110</i>
---	------------

<i>Tableau 4. 2 : Structure porteuse de l'immeuble</i>	110
<i>Tableau 4. 3 : Diagnostic</i>	110
<i>Tableau 4. 4 : Recommandations à suivre</i>	111
<i>Tableau 4. 5 : Analyse chimique des trois types d'échantillons de mortier (Résultats exprimés en % et en poids)</i>	113
<i>Tableau 4. 6 : Caractéristiques physiques de la chaux</i>	116
<i>Tableau 4. 7 : Caractéristiques chimiques de la chaux</i>	117
<i>Tableau 4. 8 : Composition chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane</i>	118
<i>Tableau 4. 9 : Caractéristiques physiques du sable</i>	118
<i>Tableau 4. 10 : Granulométrie du sable utilisé</i>	118
<i>Tableau 4. 11 : Caractéristiques du Penta EC 18</i>	120
<i>Tableau 4. 12 : Caractéristiques des fibres polypropylènes</i>	121
<i>Tableau 4. 13 : Détails de formulations effectuées, et le temps de prise</i>	121

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE 2 : Pathologie et mortiers de réparation

<i>Photo 2. 1 : Détérioration de la surface du béton par Les cycles de gel dégel</i>	52
<i>Photo 2. 2 : Dégradations causées par les attaques chimiques</i>	53
<i>Photo 2. 3 : Dégradations causées par les attaques sulfatiques</i>	54
<i>Photo 2. 4 : Aéromètre à mortier</i>	62
<i>Photo 2. 5 : Faïençage de surface (à gauche) et fissuration de surface (à droite)</i>	67

CHAPITRE 3 : Etude de l'influence des additions minérales et des fibres sur les mortiers

<i>Photo 3. 1 : Les fibres de carbone utilisées</i>	78
<i>Photo 3. 2 : Appareil du Maniabilimètre LCL</i>	81

Chapitre 4 : CAS D'ETUDE - Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis

<i>Photo 4. 1 : Façade principale de l'immeuble</i>	111
<i>Photo 4. 2 : Dégradation des enduits</i>	112
<i>Photo 4. 3 : Dislocation du mortier de jointage</i>	112
<i>Photo 4. 4 : Sablage des surfaces</i>	132
<i>Photo 4. 5 : Façade principale avant intervention.</i>	132
<i>Photo 4. 6 : Façade principale pendant l'intervention.</i>	133
<i>Photo 4. 7 : Façade principale après l'intervention.</i>	133

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les débuts de la construction, les principes fondamentaux n'ont pas vraiment changé, l'homme de l'art a aujourd'hui comme jadis, le devoir de construire avec les matériaux de son lieu et de son temps, en respectant les conditions de sécurité et d'économie qui sont les contraintes d'optimisation imposées, à l'art du concepteur.

Le développement au cours des dernières décennies, de nouveaux mortiers dont les caractéristiques et les performances diffèrent notablement de celles des mortiers courants utilisés jusqu'alors, leur utilisation de plus en plus fréquente et de plus en plus diversifiée

Le développement de ces nouveaux mortiers a pour origine certains besoins exprimés par les professionnels du bâtiment et des travaux publics comme produits de réparation des ouvrages et dans certaines applications routières.

Le domaine de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages (en béton armé, maçonnerie de briques ou de pierres) est en pleine évolution. En effet, la plupart des ouvrages, ont plus de 60 ans et beaucoup d'entre eux nécessitent des travaux de maintenance et de réparation vu leur état de dégradation. Le coût de ces réparations représente de grands enjeux économiques pour les maîtres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes optimisées de réparation.

Ainsi, en plus du fait que la crise de l'habitat s'amplifie et s'aggrave chaque jour encore plus, l'Algérie est en train de perdre son plus précieux héritage architectural et urbanistique. Ce qui est à notre sens, irrationnel et illogique, l'Algérie pourrait aisément résoudre ses problèmes.

Il est en fait grand temps que ce véritable problème soit traité avec une sérieuse objectivité. Car c'est à juste titre, la responsabilité morale de chaque responsable: architectes, urbanistes, historien de l'art, sociologues, juristes, économistes, artistes, décideurs... ainsi que toute autre personne concernée par l'environnement historique algérien, de prendre des initiatives appropriées.

Le mortier est un enduit qui protège la construction, il assure la durabilité des bâtiments et il les protège de pas mal de dégradations. La formulation des mortiers a évolué avec le temps, on utilise aujourd'hui des aditions minérales, des fibres, et des ajouts chimiques pour améliorer les performances des mortiers, car un mortier de réparation ou un mortier d'enduit

demande beaucoup plus d'exigence qu'un mortier ordinaire, beaucoup d'autres paramètres entre en jeu tel que la nature du support, les conditions d'expositions climatiques l'esthétique des façades ..etc

L'objectif de cette thèse est d'apporter une contribution à la compréhension des principaux mécanismes d'action mis en jeu de ces nouveaux mortiers, et de proposer un meilleur choix quant à l'utilisation de ces matériaux (se familiariser avec ce type de matériaux et d'estimer les paramètres de formulation les plus influents, car la durabilité de ces mortiers est intimement liée aux propriétés de ses composants).

Le mémoire est réparti en trois chapitres comme suit :

Une **Introduction Générale** présentant un état de l'art sur la problématique, objectifs du travail, motifs et méthodologie adoptée pendant ce travail de recherche.

Dans le **premier chapitre** de ce mémoire, les différents composants des matériaux cimentaires ont été passés en revue. Le rôle et les effets des additions, et des fibres, ont été explicités.

Dans Le **deuxième chapitre**, il est rappelé le rôle des mortiers de réparations dans la restauration des ouvrages, les différentes causes de dégradations de constructions ont été abordées.

Dans le **troisième chapitre**, L'influence des quatre additions minérales (les fillers calcaires, Fumés de silice, laitiers et les pouzzolanes) a été étudiée et analysée à partir de nombreux essais sur mortiers. A l'état frais et à l'état durci, Seules deux résultats ont été concluants il s'agit de deux additions, la fumée de silice et la pouzzolane naturelle.

A ces deux additions il a été incorporé les fibres de carbone, des essais à l'état frais et à l'état durcis sont ainsi effectués sur ces mortiers fibrés.

Le **quatrième chapitre** présente une étude d'un cas réel après avoir effectué une étude de diagnostic détaillée. Cette étude a expliqué la nécessité de l'utilisation d'un mortier de chaux au lieu d'un mortier de ciment qui est reconnu ne pas être adaptées pour ce genre de construction à base de pierre.

Le mémoire se termine par une **Conclusion Générale** comportant l'ensemble des conclusions élémentaires, des conclusions de synthèses, des recommandations pratiques et des perspectives de l'étude.

Ainsi qu'une liste de **références bibliographiques** et des **annexes** complètent le document.

CHAPITRE 1 : Etat des connaissances

Action des additions dans les matériaux cimentaires

1.1. Introduction

L'objectif de cette revue de littérature est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions dans les matériaux cimentaire afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment et comment cette contribution liante est prise en compte dans les méthodes de formulation des mortiers ou des bétons avec additions.

Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine ainsi que sur la normalisation française et européenne dont la lecture critique a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche méthodologique pour la formulation des mortiers de ciment.

Ce chapitre porte sur les constituants du ciment, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation ; on présente ensuite les caractéristiques générales des additions minérales, leurs rôles et leurs mécanismes d'action dans les matrices cimentaires. Et Les fibres, les différents mécanismes d'action de ces ajouts seront présentés de façon à mieux comprendre le comportement du béton vis-à-vis de la présence de ces ajouts.

Le ciment portland

Cette partie porte sur les constituants du ciment portland, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation.

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction [Aitcin 1995]. On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux renfermant de la chaux, de la silice, de l'alumine et du

fer. Quel que soit son lieu de fabrication, le ciment portland possède toujours à quelques exceptions près, la même composition.

Cependant, cette simplicité apparente cache une série de réactions chimiques très complexe que l'on ne sait pas toujours expliquer de façon précise. On peut donc dire que les produits à base de ciment portland sont le fruit d'une technologie simple et d'une science complexe.

1.1.1. Les constituants du ciment portland

Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium [Lea 1970, Gosh 1983]. Le clinker est obtenu à la suite de réactions chimiques qui se produisent à haute température (environ 1450° c) et qui transforment la matière première constituée essentiellement de calcaire (80%), d'argile (20%) et de fer en silicates et en aluminates de calcium. Les silicates et les aluminates de calcium proviennent de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Le calcaire (CaCO₃) apporte essentiellement le CaO et l'argile comble le manque en oxydes SiO₂, Al₂O₃ tandis que le fer Fe₂O₃ manquant est apporté par le fer. Les différentes phases de la réaction de transformation de la matière première en clinker sont présentées à la figure 1.1 [Humboldt, Wedag 1986].

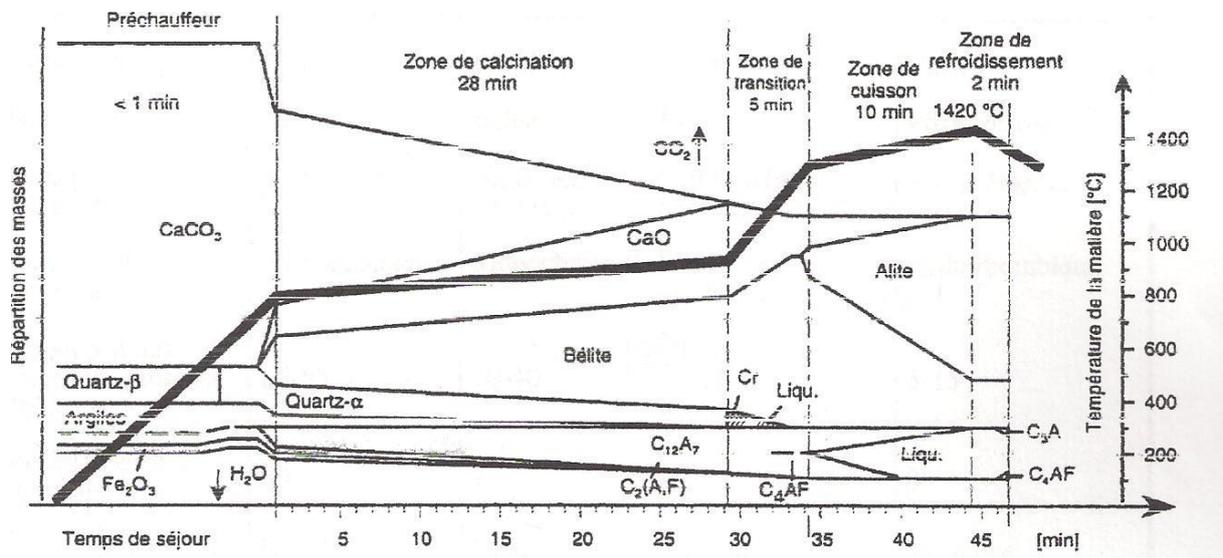


Figure 1. 1 : principe de fabrication du ciment Portland [Humboldt, Wedag 1986]

Puisque les matières premières utilisées pour fabriquer le clinker ne sont généralement pas pures et ne subissent aucun traitement visant à améliorer leur qualité, elles contiennent invariablement des impuretés (autres que les quatre oxydes de base) telles que du périclase,

les alcalis, des sulfates, des chlorures alcalins et de la chaux vive dont l'influence se manifeste sur le fonctionnement de l'usine ou sur la qualité du ciment et de béton que l'on produit avec ce ciment.

On peut dire que le clinker est un produit minéral constitué de quatre phases principales (C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF) et quelques composés mineurs (Figure 1.2).

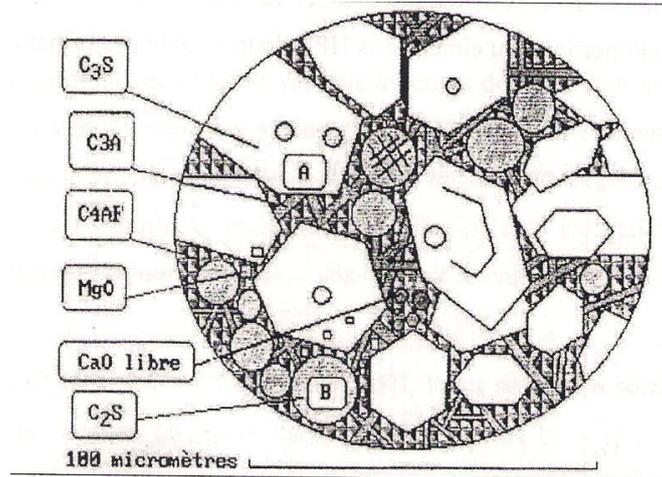


Figure 1. 2 : Principe de fabrication du ciment Portland [Vernet 1986]

Les caractéristiques des principaux composants du ciment Portland sont présentées dans le tableau 1.1. [Mehta 1986]

Tableau 1. 1 : Principaux minéraux du ciment Portland et leurs caractéristiques [Mehta 1986]

Composition approximative	3CaOSiO ₂	β-2CaOSiO ₂	3CaOAl ₂ O ₃	4CaOAl ₂ O ₄ Fe ₂ O ₃
Formule abrégée	C ₃ S	βC ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Nom	Alite	Bélite		Phase ferrite
Principales impuretés	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ ...	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ ...	SiO ₂ , MgO, Alcalis...	SiO ₂ , MgO...
Forme cristalline	Monoclinique	Monoclinique	Cubique Orthorhombique	Orthorhombique
Proportion des composés présents (%)	35-65	10-40	0-15	5-15
Moyenne dans le ciment normal	50	25	8	8
Réactivité avec l'eau	Rapide	Lente	Rapide	Moyenne
Contribution à la résistance :				
*Base âge	Bonne	Faible	Bonne	Bonne
*Long terme	Bonne	Excellente	Moyenne	Moyenne
Chaleur d'hydratation typique (kJ/kg)	Moyenne 120	Basse 60	Elevée 320	Moyenne 100

Lors du broyage du clinker, une petite quantité de sulfate de calcium est ajoutée sous forme de gypse, d'hémihydrate ou d'anhydrite afin de contrôler (réguler) la prise du ciment.

Les minéraux des clinkers industriels admettent des éléments étrangers dans leur réseau cristallin (Cr, Ti, Sr,...) ce qui modifie leur composition, leur structure ainsi que leur réactivité. Les variétés impures du silicate tricalcique et du bicalcique sont appelées respectivement « alite » et « belite ». A la sortie du four, le clinker se présente sous forme de boules d'un diamètre de l'ordre du centimètre.

1.1.1.1. Silicate tricalcique (C_3S)

Cette phase constitue le composé principal du ciment (50 à 70%). Les cimentiers la désignent par le mot alite qui est une forme impure de C_3S . En effet, le C_3S contient soit en substitution des ions Ca ou Si, soit en insertion dans le réseau cristallin des traces de Mg, Al et Fe. Ces impuretés améliorent généralement la réactivité du ciment. La teneur en impureté du C_3S dépend, entre autres, de la nature des matières premières, de la température de cuisson et de mode de refroidissement du clinker. Il est bon souligner que l'alite confère essentiellement sa résistance au ciment, en particulier à court terme.

1.1.1.2. Silicate bicalcique (C_2S)

Le C_2S constitue entre 15 et 30% du ciment Portland. Les cimentiers le désignent par bélite qui est une forme impure de C_2S . Dans le C_2S , on retrouve, en plus du potassium, les mêmes ions étrangers que le C_3S . Mais ils y sont en plus grande quantité. La bélite fournit au ciment sa résistance à long terme.

Il existe au moins quatre variétés polymorphiques de C_2S (α , α' , β , γ) et leur domaine de stabilité est différent selon le chauffage et le refroidissement. La forme β est celle que l'on rencontre le plus souvent dans les clinkers industriels. Lors d'un refroidissement lent, la forme β peut se transformer en γ qui n'a aucune propriété hydraulique. Contrairement au C_3S , les propriétés hydrauliques du C_2S varient considérablement selon la variété polymorphique.

1.1.1.3. Aluminate tricalcique (C_3A)

Le C_3A , qui représente de 5 à 10% de la composition du ciment Portland, est la phase du clinker dont la vitesse de réaction initiale est la plus importante. Dans les clinkers, la présence

d'alcalis (surtout le sodium) modifie la symétrie cristalline du C_3A . Ainsi, selon la quantité totale d'alcalis dissous dans le réseau cristallin, le C_3A peut être cubique, orthorhombique ou monoclinique. Généralement dans le ciment, le C_3A est toutefois un mélange des formes cubique et orthorhombique, mais rarement monoclinique. Le C_3A orthorhombique stabilisé par la présence de sodium est moins réactif que le C_3A cubique.

1.1.1.4. Aluminoferrite tétracalcique (C_4AF)

Le C_4AF représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Les formes C_6A_2F et C_4AF sont les plus couramment rencontrées dans le ciment. La réactivité de l'aluminoferrite tétracalcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec le teneur en alumine.

Les phases C_3A et C_4AF sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C_3S et C_2S .

1.1.1.5. Les composés mineurs

Comme il a été dit précédemment, aucune des phases principales du clinker ne se retrouve à l'état pur. La présence d'impuretés dans le clinker (MgO , sulfates alcalins, CaO_2) joue un rôle important sur les propriétés hydraulique du ciment. Ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

1.1.2. Hydratation du ciment Portland

Lorsque l'on ajoute de l'eau à du ciment, on obtient une fluide qui se transforme assez rapidement en une masse durcie. Cette transformation est obtenue grâce à l'hydratation du ciment. Ainsi, l'hydratation est un ensemble de réactions chimiques qui interviennent dès le début de gâchage et qui se poursuivent dans le temps, pendant plusieurs mois. Les deux premières théories de l'hydratation du ciment datent de la fin du siècle dernier [**Regourd 1982**]. D'après la théorie cristalloïdale de Le Chatelier ou théorie de la dissolution-cristallisation, le ciment mis en présence d'eau donne naissance à une solution sursaturée. Les composés anhydres se dissolvent puis les hydrates formés, peu soluble, précipitent sous forme de microcristaux, ce qui permet une nouvelle dissolution d'éléments anhydres. Les réactions

se poursuivent jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement est alors dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

D'abord un phénomène de dissolution provoquant un gonflement des grains et l'apparition d'une solution très concentrées en chaux. Cette solution agit sur les silicates pour donner un gel de silice et de chaux qui augmente peu à peu de volume en absorbant continuellement l'eau et la chaux. Le gel durcit, devient imperméable et l'hydratation se poursuit à l'intérieur des grains de ciment protégés par cette enveloppe.

On voit que les deux théories s'accordent sur la dissolution des aluminates et sur le rôle prépondérant du silicate tricalcique. Elles diffèrent essentiellement sur l'appréciation du rôle joué par la silice.

Comme le clinker est un mélange de différents constituants anhydres. Il est nécessaire, dans un premier temps, de considérer séparément les processus d'hydratation de chacun des composants du clinker. L'accent sera mis sur les processus d'hydratation du C_3S et du C_3A qui sont les phases les plus réactives, donc les plus susceptibles d'influencer la rhéologie des pâtes de ciment et du béton. La figure 1.3 présente schématiquement des constituants anhydres du clinker du ciment Portland et leurs produits d'hydratation, l'aire des cases donne le volume approximatif des phases [Double 1983].

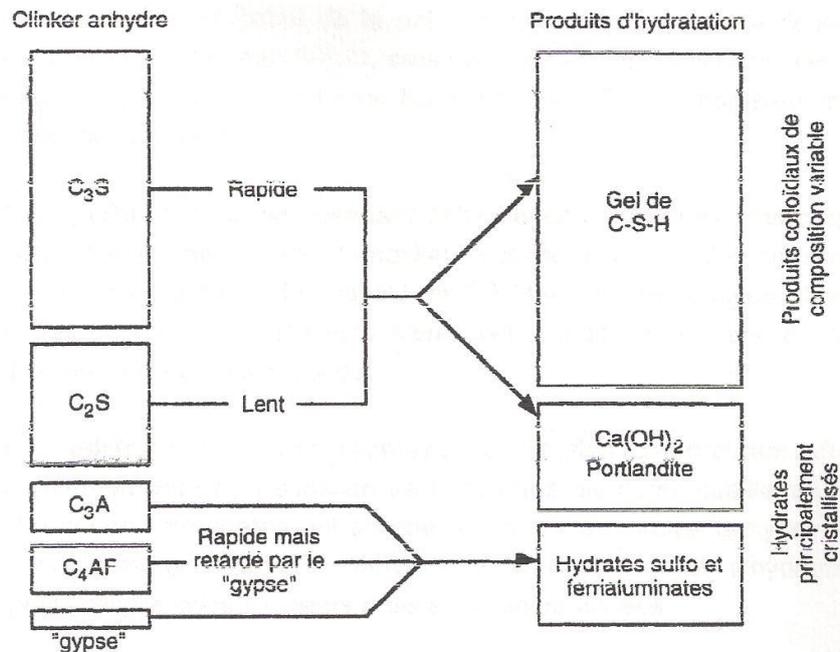


Figure 1. 3 : Représentation schématiquement les constituants anhydres du clinker et des produits d'hydratation [Double 1983]

1.1.2.1. Hydratation du silicate tricalcique

Au contact de l'eau, le silicate tricalcique se dissout superficiellement en libérant des ions silicates $\text{H}_2\text{SiO}_4^{-1}$, des ions hydroxydes OH^- et des ions calcium Ca^{2+} dans la solution [Pliskin 1993]. Selon Regourd [Regourd 1982], l'hydratation du C_3S conduit à la formation de trois produits distincts :

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) suivant la réaction :



C'est la phase principale de la pâte de ciment hydraté. Elle forme avec l'eau un gel peu ou pas cristallin. Sa composition chimique est variable et le rapport CaO/SiO_2 peut s'écarter de la composition stoechiométrique en fonction de la composition de la solution mère qui beigne l'hydrate [Maggion 1989].

- L'hydrate de chaux : la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Un silicate calcique hydraté : la tobermorite

Le processus d'hydratation du C_3S passe par quatre phases successives qui sont illustrées à la figure 1.4 [Pliskin 1993] :

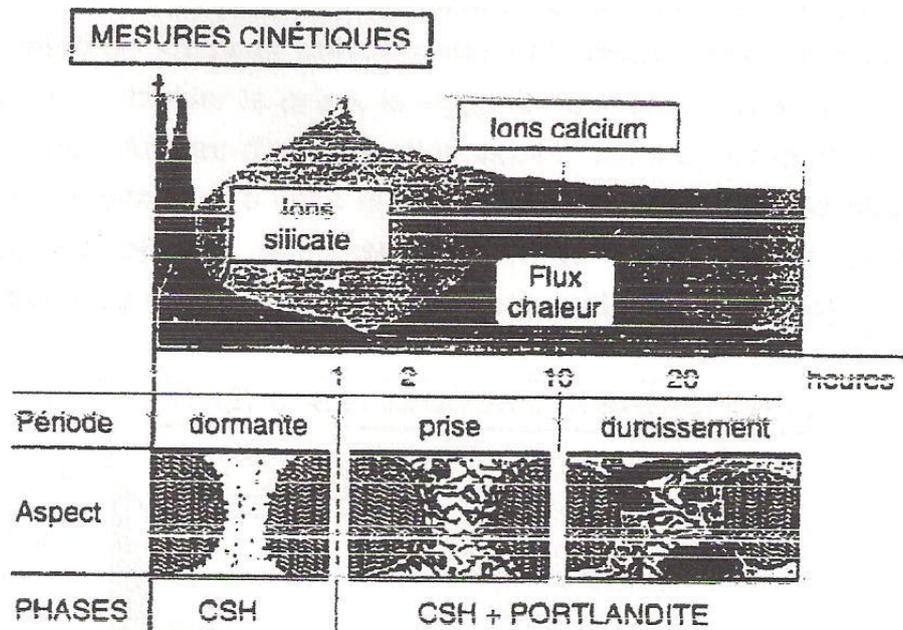


Figure 1. 4 : Cinétique d'hydratation du C_3S [Pliskin 1993]

I. Période pré-dormante :

Réaction instantanée et exothermique du C_3S avec l'eau. En quelques secondes, la solution est sursaturée par rapport aux C-S-H et la teneur en ions silicate atteint son maximum. On assiste à une compétition entre les germinations des C-S-H et du $Ca(OH)_2$. Tant que la teneur en ions silicate de la solution dépasse une certaine valeur limite, la germination des C-S-H l'emporte

II. Période dormante :

Les réactions précédentes se poursuivent pendant quelques heures à vitesse décroissante par suite du PH élevé et de la forte concentration en calcium. La quantité des C-S-H formés est très faible de même que la consommation en eau. Lorsque la solution est saturée en portlandite, celle-ci précipite et il se produit alors un effet de « pompe à calcium » à la surface des grains qui accélère leur dissolution. Le « gâchage chimique » selon les termes de Christian Vernet, que constitue le début de la précipitation de la portlandite des ions Ca^{2+} et OH^- ainsi que par l'augmentation de flux thermique. Ces phénomènes marquent la fin de la période dormante.

III. Période de prise :

Pendant cette période, l'essentiel des propriétés du ciment durci (stabilité de volume, durabilité) sa forme. L'atteinte de ces propriétés est due à la formation d'une grande quantité de C-S-H en un réseau rigide. Les fibres de C-S-H et les cristaux de portlandite s'enchevêtrent et remplissent les pores. Le matériau se densifie et devient solide.

IV. Période de durcissement

La réaction d'hydratation du C_3S se poursuit lentement tant qu'il subsiste de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie. La couche d'hydrates qui enrobe les grains de silicate anhydre atteint une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau. L'hydratation totale de C_3S peut prendre entre plusieurs mois et plusieurs années.

Il faut souligner que la réaction du C_3S est grandement influencée par son histoire thermique, la taille des cristaux et leur distribution, le polymorphisme et les défauts de réseaux.

En créant les C-S-H, l'hydratation du C_3S est responsable des performances mécaniques des pâtes de ciment aux échéances courtes et moyennes.

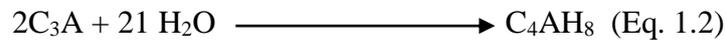
1.1.2.2. Hydratation du silicate bicalcique ($\beta\text{C}_2\text{S}$)

Le silicate bicalcique se comporte comme le silicate tricalcique en donnant des C-S-H semblables avec une certaine différence dans la microstructure. Cependant, les principales différences résident dans l'absence d'une sursaturation marquée en portlandite et dans un flux de libération de chaleur plus faible. Si le degré de sursaturation est en relation avec la germination de la portlandite, la faible sursaturation autour des grains de $\beta\text{C}_2\text{S}$ peut expliquer sa réactivité moins importante par rapport à celle du C_3S au jeune âge.

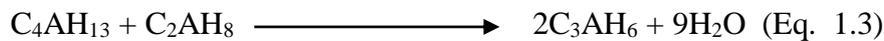
1.1.2.3. Hydratation de l'aluminate tricalcique

Les études portant sur l'hydratation du C_3A montrent clairement l'influence de cette réaction sur le comportement rhéologique initial du ciment. Contrairement aux phases silicatées, le sulfate de calcium joue un rôle crucial sur l'hydratation du C_3A et les hydrates formés sont différents (morphologie, structure, composition) selon que le processus d'hydratation a lieu en absence ou en présence de « gypse ».

En absence de « gypse », une réaction accélérée se produit et conduit à la formation d'aluminate hydratés hexagonaux suivant la réaction :



Ces hydrates hexagonaux ne sont pas stables et se transforment au cours du temps sous l'action de la chaleur d'hydratation du C_3A en hydrate cubique C_3AH_6 , plus stable, suivant la réaction :



Ces réactions sont la cause principale de la prise rapide des ciments Portland lorsque la quantité de « gypse » présente dans le ciment est insuffisante. Pour prévenir ce phénomène et contrôler la prise, le « gypse » est broyé avec le clinker pour donner le ciment Portland. Au lieu d'une réaction accélérée, il se produit une réaction lente à cinétique variable, similaire à celle du C_3S , mais avec une durée plus longue. Pliskin [Pliskin 1993] distingue les phases suivantes durant le déroulement de l'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de sulfate de calcium (figure 1.5).

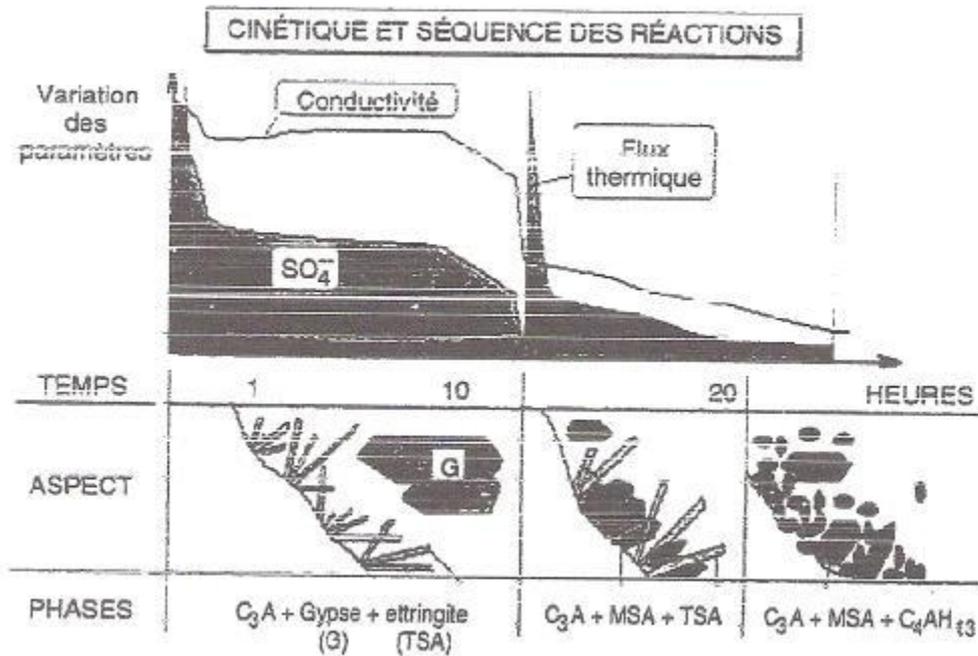


Figure 1. 5 : Cinétique d'hydratation du C3A [Pliskin 1993]

I. Phase initiale :

Le C₃A et le gypse se dissolvent rapidement et cette réaction fortement exothermique rend la solution sursaturée en ions (Ca²⁺, AlO₂⁻, SO₄²⁻, OH⁻) qui se combinent quasi instantanément en formant des cristaux d'ettringite (TSA) suivant la réaction :



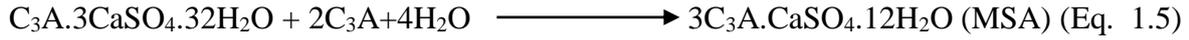
L'ettringite forme une barrière efficace contre toute hydratation rapide. Ce composé apparaît généralement sous la forme de longues aiguilles hexagonales enchevêtrées disposées en « oursins » dont la morphologie aciculaire ou fibreuse permet aisément son identification.

II. Phase dormante :

Comme le C₃S, le C₃A présente une phase dormante au cours de laquelle l'ettringite continue à se former à faible vitesse. Dans les ciments riches en C₃A, l'enchevêtrement des aiguilles d'ettringite de prise constaté avec le C₃A.

III. Equipement du gypse :

Lorsque le « gypse » est totalement consommé, généralement 10 à 24 heures après le gâchage, l'ettringite se dissout et devient une nouvelle source d'ion sulfate pour fermer avec les aluminates excédentaires du monosulfoaluminate de calcium hydraté (MSA) :



Ce dernier cristallise sous forme de cristaux en tablettes hexagonales, comme les hydrates hexagonaux C_4AH_8

IV. Phase finale :

Cette phase dépend des proportions initiales d'aluminate et de « gypse ». Après quelques semaines, l'ettringite est totalement transformée en monosulfoaluminate et le produit final de l'hydratation du C_3A est une solution solide de MSA- C_4AH_{13} .

1.1.2.4. Hydratation de l'aluminoferrite de calcium (C_4AF)

L'hydratation du C_4AF est similaire à celle du C_3A . Cependant, le C_4AF réagit moins vite que le C_3A . Son hydratation n'est toujours pas totalement élucidée et est souvent ignorée dans les publications portant sur l'hydratation des ciments. Les réactions mises en jeu lors de l'hydratation sont les suivantes :

- Sans gypse : $C_4AF + H_2O \longrightarrow C_4(AF)H_{13}$ (Eq. 1.6)
- Avec gypse : $C_4AF + \text{gypse} + H_2O \longrightarrow C_4(AF)SH_{12}$ (Eq. 1.7)

Après l'équipement du « gypse », un composé dérivé du MSA se forme dans lequel un atome de fer s'est substitué un atome d'aluminium.

1.1.2.5. Le rôle crucial du sulfate de calcium

Comme on l'a déjà mentionné, le sulfate de calcium permet de contrôler la prise du clinker broyé. En effet, en présence d'eau et de sulfate de calcium, le C_3A se recouvre d'une fine couche plus ou moins perméable d'ettringite empêchant ainsi la poursuite de l'hydratation du C_3A qui, autrement, conduirait à la prise éclair en formant des hydrates hexagonaux. D'un point de vue pratique, cette réaction permet de bénéficier d'une pause, la période dormante, pour transporter et mettre en place le béton.

Cependant, le calcul de la quantité d'ions SO_4^{2-} nécessaire pour former l'ettringite n'est pas aussi facile que l'on pourrait le croire. Une partie des sulfates nécessaire aux réactions initiales est souvent dans le clinker sous forme de sulfates alcalins (l'arcanite : K_2SO_4 , l'aphtitalite : $3K_2SO_4 \cdot Na_2SO_4$, et la langbeinite de calcium : $2CaSO_4 \cdot K_2SO_4$ [**Bouraoui**

1997]. L'autre partie est apportée par le sulfate de calcium qui peut provenir des origines suivantes [Aitcin 1996] :

- Du gypse $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$
- De l'hémihydrate $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$
- De l'anhydrite soluble CaSO_4
- De l'anhydrite naturelle (ou insoluble) CaSO_4

La solubilité de tous les sulfates présents dans le clinker ou dans le ciment varie beaucoup. On peut cependant dire qu'en règle générale les sulfates alcalins se solubilisent plus rapidement que certaines formes de sulfate de calcium [Baalbaki 1998]. Parmi les sulfates de calcium, l'hémihydrate est celui qui se solubilise le plus rapidement, alors que l'anhydrite naturelle se solubilise le moins rapidement.

Les travaux de [Locher et al 1980] expliquent les différentes possibilités de réaction du système C_3A / sulfate et leurs conséquences sur le comportement rhéologique du béton en tenant compte de la réactivité du C_3A et de la disponibilité des ions sulfate. Ces travaux montrent aussi que la quantité de C_3A qui réagit dès les premiers instants, en absence ou en présence d'ions sulfate, reste constante pendant la période dormante. Odler et Wonneman [Older, Wonneman 1980] confirment ces résultats et précisent que seul le temps de prise change. D'ailleurs, Regourd [Regourd 1982] constate que le taux d'hydratation mesuré par diffraction des rayons X du C_3A qui réagit avant la prise est faible. Ainsi, le sulfate n'agit donc pas seulement comme retardateur de l'hydratation du C_3A , comme on peut le penser, mais aussi comme modificateur du type d'hydrate formé. Cette constatation prend une dimension importante dans le cadre de cette étude, car la présence d'un adjuvant dispersant peut changer à la fois la cinétique d'hydratation du système C_3A /Sulfate et le type des produits hydratés, ce qui pourra entraîner une conséquence pratique importante sur le comportement du béton frais.

1.1.3. Composition du ciment

Le tableau 1.2 regroupe les différentes classes de ciment normalisé ainsi que leurs compositions.

Tableau 1. 2 : Les différents types de ciments [Neville 2000]

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) ^{a)}										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D ^{b)}	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire			
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V				Calcique W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
CEM II/B-LL		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5	
Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←————— 6-20 —————→									0-5		
	CEM II/B-M	65-79	←————— 21-35 —————→									0-5		
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	←————— 11-35 —————→				—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	←————— 36-55 —————→				—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	←————— 18-30 —————→		—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	←————— 31-50 —————→		—	—	—	—	—	0-5	

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.

c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

Les ciments sont des poudres fines obtenues par le broyage d'un mélange de clinker et d'environ 4 à 8 % de gypse dont le rôle est de régulariser la prise (retardateur de prise).

Théoriquement, un ciment portland ne comporte que du clinker et du sulfate de calcium. Cependant en pratique et pour des raisons d'économie d'énergie, une partie de clinker peut être remplacée par des additions minérales telles que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes, les filler.

1.1.3.1. Evolution de l'hydratation

Le dégagement de chaleur qui accompagne les réactions d'hydratation peut être mesuré par calorimétrie. La chaleur dégagée donne une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. La courbe du flux de chaleur d'hydratation présente généralement trois pics qui correspondent à trois maxima comme l'indique la figure I.6.

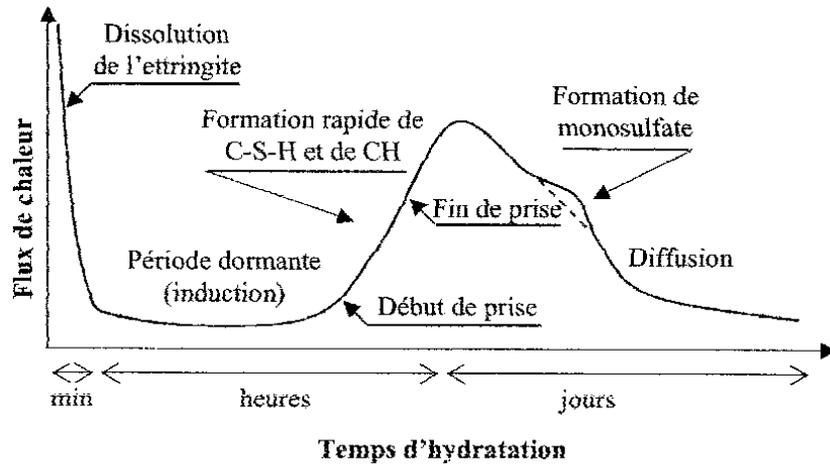


Figure 1. 6 : dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment en fonction du temps [Neville 2000]

Premier pic : Il s'agit de plus haut, mais il est de courte durée. Au cours de cette période (≈ 10 mm), le C3S et le C3A réagissent immédiatement avec l'eau, formant des C-S-H et de l'ettringite. Ce pic est suivi d'une « période dormante » au cours de laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul). Durant cette période des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible.

Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte [Neville 2000]. Les phénomènes physico-chimiques régissant cette phase (période dormante) sont, d'un point de vue pratique, très importants car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton. Par exemple, pour un rapport $E/C = 0.5$, on devra couler le béton dans la structure au plus tard au milieu de la « période dormante ».

Deuxième pic : La « période dormante » prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20°C) entre 9 heures et 10 heures. Cette phase d'accélération débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il

s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallines (ettringite, portlandite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide rigide.

Troisième pic : tous les ciments ne présentent pas de troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre.

Pour comprendre les réactions qui se déroulent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances, il faut s'intéresser à :

- L'effet de l'hydratation de chaque phase du ciment sur la chaleur d'hydratation.
- Les raisons des variations considérables du dégagement de chaleur dans le temps
- Le processus d'agglomération des produits d'hydratation pour remplir l'espace poreux
- La nature des liens entre les produits d'hydratation dans la pâte durcie.

1.1.3.2. Hydratation du ciment portland

Pour bien comprendre l'hydratation du ciment, il ne faut pas se baser uniquement sur l'hydratation des phases pures. En effet, dans le ciment, ces phases interagissent entre elles.

L'hydratation du C₃S est accélérée par la présence de sulfates alcalins tandis que la chaux produite accélère l'hydratation du C₃A et C₄AF. L'hydratation du C₃S contribue majoritairement à la formation du deuxième pic de la courbe calorimétrique 1.6.

L'hydratation du C₃A, pour former de l'ettringite, participe également à la formation du deuxième pic. Si un troisième pic apparaît, il y a alors un excès de C₃A. En raison de sa faible chaleur d'hydratation, le C₄AF ne contribue que très peu à la formation du deuxième pic.

Les réactions qui se déroulent lors de la formation du premier pic sont plus complexes, car au départ, toutes les phases réagissent rapidement avec l'eau avant que la concentration de la solution en ions sulfates soit assez importante pour influencer l'hydratation du C₃S et C₄AF. Par ailleurs, la chaux libre, la magnésie libre et l'hémihydrate réagissent aussi de façon exothermique avec l'eau. Si la quantité d'ions SO₄⁻² en solution n'est pas suffisante, le C₃A va

alors s'hydrater et donner lieu à la prise, tandis que si la concentration en ions SO_4^{2-} est trop élevée, le gypse précipite et donne lieu à la fausse prise. La « période dormante » prend fin avec une augmentation brusque de la quantité d'eau liée dans le C-S-H et dans l'ettringite. L'enchevêtrement des produits d'hydratation entre les grains de ciment augmente les résistances mécaniques de la pâte et donne naissance à la prise.

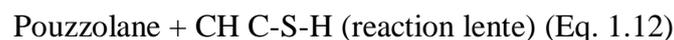
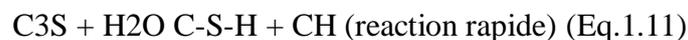
1.2. Définition des ajouts minéraux

La section suivante traitera de l'incorporation de certains ajouts minéraux 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.

De 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 [Manai 1995]. 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 hydrauliques.

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes se déroulent somme suit :



On assiste alors à une transformation de la portlandite (CH) (composant peu stable chimiquement et physiquement) en silicates de chaux hydratés relativement stables (C-S-H).

Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau.

Les fillers utilisés sont très souvent d'origine minérale. Leur principal intérêt est de diminuer le coût global du matériau. Le taux de substitution au ciment peut atteindre 30% [Husson 1991].

Dans certains cas, ils peuvent modifier la rhéologie du béton frais, tout en exerçant un rôle de comblement de la porosité. Ils interviennent alors en tant qu'ajout par rapport au liant dans la composition du béton. Cette utilisation nécessite la présence d'un adjuvant organique dont la fonction principale est d'éviter le surdosage en eau tout en conservant la maniabilité du béton.

1.2.1. Classification des additions

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les ajouts minéraux suivants :

- Les cendres volantes,
- Les laitiers de haut fourneau,
- Les fillers calcaires,
- Les fumées de silice.

1.2.1.1. Les fumées de silice

Se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 μm . La surface spécifique varie de 20 à 25 m^2/g . Les fumées de silice se caractérisent par une structure vitreuse (produit très réactif) avec une haute teneur en silice (de 75 à 95%).

Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons : action physique, physicochimique et pouzzolanique.

En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/L de 0,15 à 0,20. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui

rend le béton à la fumée de silice tout à fait imperméable. L'action pouzzolanique permet en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation de produire un CSH très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours [Manai 1995].

a. Influence sur les propriétés du béton frais

Les particules fines de fumée de silice agissent par leur effet filler en remplissant les microspores, ce qui conduit à une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. Ceci libère l'eau qui a été emprisonnée dans les pores et permet une réduction de la demande en eau pour une consistance fixe. D'autre part, compte tenu de leur surface spécifique élevée, il peut y avoir une adsorption d'eau et par contre une augmentation de la demande en eau dépendant du rapport E/L, de la présence de superplastifiant, de la teneur en ciment et de la concentration en fumée de silice.

Certains chercheurs ont montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m³, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2, 4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Ceci est attribué à l'amélioration du dosage supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines. Le béton devient très riche, très collant et très cohésif.

En général, les fumées de silice réduisent considérablement les phénomènes de ressuage et de ségrégation, ce qui accélère la finition des surfaces. Toutefois pour les zones à taux d'évaporation élevés, le risque de formation de fissures de retrait plastique devient plus grand et l'application de produit de mûrissement sur la surface est alors nécessaire.

Avec l'utilisation des fumées de silice, le dosage en agent entraîneur d'air nécessaire pour obtenir un volume d'air désiré est plus élevé, surtout pour les faibles rapports E/C. Les chercheurs expliquent ce phénomène par la surface élevée des particules, par l'augmentation de la viscosité du béton et par la présence de carbone sur les microsphères de fumée de silice. Le temps de prise est prolongé en présence de la fumée de silice à cause de la réduction de l'énergie libérée durant les premières heures qui suivent la confection du béton.

b. Influence sur les propriétés du béton durci

Les fumées de silice contribuent significativement au développement des résistances à la compression entre 7 et 28 jours avec un pouvoir liant de 3 à 4 fois supérieur à celui du ciment

[**Manai 1995**]. Ceci est relié à une utilisation adéquate, c'est-à-dire en se servant de réducteurs d'eau et de superplastifiants pour compenser la demande en eau qui augmente pour une fluidité constante du béton.

Les fumées de silice améliorent aussi l'adhérence entre le béton et les armatures d'acier (ASTM C 234) par diminution du ressuage interne au niveau de l'interface béton-armature. Il y a formation d'une zone de transition dense. L'amélioration de l'adhérence est significative pour des additions de fumée de silice supérieures à 20%.

(Aitcin, 1983 cité par [**Manai 1995**]) rapporte qu'il peut y avoir une diminution du module d'élasticité pour un rapport E/L donné avec l'utilisation de la fumée de silice. Il trouve qu'une addition de plus de 7% de fumée de silice réduit les déformations par fluage durant les 4 premiers mois de l'âge du béton.

Le retrait par séchage des bétons avec fumée de silice varie suivant la teneur de l'ajout. (Johansen, 1983 cité par [**Manai 1995**]) trouve qu'il n'y a pas de différences significatives pour les bétons avec ou sans ajout de fumée de silice pour des additions de 5 à 10% et un rapport E/L inférieur à 0,6. Il prétend qu'un remplacement du ciment de 13% en masse peut réduire la perte de masse et le retrait par séchage des bétons de rapport E/L de 0,33, mûris dans l'eau pendant 28 jours puis dans l'air à 50% d'humidité relative. Ils rapportent que pour des quantités égales d'eau évaporable, les déformations par retrait peuvent être plus élevées dans le cas des bétons avec fumée de silice, à cause du raffinement des pores.

Presque tous les auteurs sont d'accord sur le rôle de la fumée de silice qui consiste à réduire la perméabilité du béton à l'eau et aux sels et augmenter la résistivité électrique. Ceci contribue à réduire le risque de corrosion des armatures. Les fumées de silice peuvent aussi neutraliser les réactions alcalis-granulats en augmentant le degré de polymérisation des CSH, ce qui réduit la mobilité des alcalis et des hydroxydes dans les solutions des pores.

L'introduction de la fumée de silice a peu d'effets sur le risque de carbonatation. L'effet est également minime dans le cas de la résistance aux cycles de gel-dégel avec des bétons de rapport E/L de 0,4 et des additions de fumée de silice de 15% ou moins [**Manai 1995**]. La résistance diminue pour des additions de 20 à 30% de fumée de silice et des rapports E/L variant de 0,35 à 0,55.

1.2.1.2. Les cendres volantes

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200 μm et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30 μm . Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments).

La norme ASTM C-618-80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- La classe F riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silicoalumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique.
- La classe C riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé.

a. Influence sur les caractéristiques des mortiers et des bétons frais

Selon Venuat [Venuat 1976], les cendres volantes agissent par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique améliorent l'ouvrabilité des mortiers et des bétons.

Ceci est d'autant plus marqué que les cendres volante permet de diminuer la quantité d'eau pour une même ouvrabilité, d'augmenter l'homogénéité et la compacité du béton et d'améliorer sa mise en place.

(Dhir 1986, cité par [Manai 1995] attribue l'amélioration de l'ouvrabilité aux surfaces lisses des cendres volantes. La nature vitreuse des particules empêche l'adsorption d'eau sur leurs surfaces, et ainsi l'eau retenue entre les particules sert à la lubrification. (Helmuth 1986, cité par [Manai 1995] prétend que la forme des particules de cendre volante n'a pas d'effet sur l'ouvrabilité.

[Venuat 1976] mentionne qu'un remplacement de 20 à 30% de cendre modifie de peu le temps de prise à la température ordinaire. Dans le cas d'une assez forte addition, le temps de

prise peut être augmenté. De même, la chaleur d'hydratation dégagée lors de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre ajouté. Ceci est intéressant dans le cas de bétonnage d'ouvrages en grande masse ou par temps chaud.

b. Influence sur les caractéristiques des mortiers et des bétons durcis

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence des cendres volantes sur le développement des résistances mécaniques des bétons. (Gebler et al. 1986, cité par [Manai 1995]), mentionnent qu'à des températures normales, des cendres volantes de classe F provoquent une baisse des résistances des bétons au jeune âge (3 jours), mais avec des résistances supérieures à long terme. Pour un remplacement de 25% en masse du ciment par une cendre volante de classe F, (Popovics 1986, cité par [Manai 1995]) constate une augmentation relative des résistances mécaniques du béton à partir de l'âge de 7 jours. Il rapporte que l'effet des cendres est plus significatif pour les bas rapports E/L.

Les chercheurs ont étudiés l'effet d'une cendre volante de classe F sur la perméabilité du béton. Ils trouvent que les perméabilités à l'eau et à l'air augmentent surtout si le béton est mûri à l'air au jeune âge. [Nagataki 1995] a testé des bétons de rapport E/L de 0,40 avec des remplacements par la cendre volante variant de 0 à 50%. Ils trouvent que pour un béton mûri pendant 91 jours dans l'eau, la perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation de la teneur en cendre jusqu'à un remplacement de 20%, puis elle devient pratiquement stable, trouvent aussi que la cendre volante réduit la perméabilité aux ions chlore.

L'utilisation de la cendre volante n'a pas d'effet sur la carbonatation dans le béton. (Uchikawa 1994, cité par [Manai 1995]) relève qu'avec un remplacement du ciment par la cendre volante, il y a plus de carbonatation du béton à cause de la faible réactivité pouzzolanique des cendres ce qui retarde le remplissage des pores dans les bétons ordinaires (E/L = 0,55).

Venuat [Venuat 1976] explique que la résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. Cette diminution est assez limitée pour 20% de cendre et en opérant à ouvrabilité égale. La cendre volante absorbe une partie de l'agent entraîneurs d'air lors de l'addition de ce dernier au béton, c'est pourquoi les ciments aux cendres nécessitent une quantité d'adjuvant un peu plus élevée pour obtenir la même teneur en air. Certains chercheurs ont étudié la résistance au gel (ASTM C 666-A) de béton composés de 40 à 60% de cendre volante de classe F. Tous les bétons ont présenté des facteurs de durabilité

supérieurs à 87% après 300 cycles de gel-dégel. Ils concluent que les bétons avec cendres volantes procurent de bonnes résistances au gel même pour des taux de remplacement élevés.

Venuat [Venuat 1976] mentionne que le retrait hydraulique après prise n'est jamais augmenté par l'addition de cendres volantes. Parfois et selon les ciments, il est plus ou moins diminué. Il explique ce phénomène par l'absorption des alcalis solubles (source de retrait) par les cendres pour former des silico-aluminates stables et insolubles.

1.2.1.3. Les laitiers de haut fourneau

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 :

- 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,
- 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.

a. Influence sur les caractéristiques des bétons frais

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [Manai 1995] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Venuat [Venuat 1976] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Ainsi les chercheurs trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type du laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton.

b. Influence sur les caractéristiques des bétons durcis

Selon Venuat [**Venuat 1976**], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Venuat rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète.

Les mortiers aux laitiers sont de 10 à 100 fois moins perméable à l'eau que les mortiers de ciment portland. Un remplacement de 10% du ciment par le laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition. Les chercheurs rapportent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat.

Les réactions alcalis-silice décroissent avec l'augmentation de la teneur en laitier due à la fixation par ce dernier des ions sodium. Quant à la résistance aux cycles de gel-dégel, presque tous les auteurs sont d'accord que les bétons avec et sans laitier se comportent de la même façon.

1.2.1.4. 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 [**Manai 1995**].

Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des 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 forme $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit de calcaires dolomitique.

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, vaterite).

Dans la suite de ce travail, on s'intéressera uniquement aux fillers calcaires pouvant être produits en Algérie.

a. Influence sur les caractéristiques des bétons frais

La rhéologie des pâtes, des mortiers et des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, surtout pour des rapports E/C < 0,40. Il est important de signaler que la présence de fines d'argile dans le filler peut augmenter la demande en eau.

(Alexander, 1972 cité par [Manai 1995]) rapporte que l'ouvrabilité du béton augmente avec la finesse du filler calcaire jusqu'à 500 m²/kg. Au-delà de cette limite, il peut y avoir des problèmes de maniabilité.

Il est à noter que la présence du filler calcaire peut augmenter le retrait plastique du béton frais et permet de densifier la matrice du mortier.

Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle du temps de prise par la formation de carboaluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).

b. Influence sur les caractéristiques des bétons durcis

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de monocarboaluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO₃ accélère l'hydratation du C₃S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

Les auteurs rapportent qu'avec le filler calcaire, il y a une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge due à l'effet accélérateur et à l'effet filler du calcaire. On note que pour une finesse de 300 à 350 m²/kg, il y a seulement l'effet filler.

La contribution aux gains de résistances apportés par le filler calcaire est due principalement à la réduction de la demande en eau et une meilleure utilisation du potentiel hydraulique du clinker. À jeune âge on assiste à une diminution de la porosité initiale. A partir de 28 jours, les chercheurs trouvent des résistances comparables aux bétons témoins.

La présence du filler calcaire augmente le retrait durant les 24 premières heures. Le retrait augmente aussi avec la finesse du filler, sauf dans le cas d'une granulométrie optimisée. Pour une période supérieure à 24 heures, il n'y a pas de différence pour le retrait par séchage.

Les auteurs prétendent que l'addition de filler calcaire ne change pas le taux de carbonatation dans le béton. Au contraire, certains trouvent que pour des résistances mécaniques équivalentes, la profondeur de carbonatation augmente avec l'ajout du filler calcaire.

L'addition du filler calcaire diminue la résistance à l'eau de mer puisque le monocarboaluminate n'est pas stable chimiquement. La résistance aux cycles de gel-dégel n'est généralement pas affectée, sauf pour des taux de remplacement supérieurs à 15%.

Toutefois, les caractéristiques du réseau des bulles d'air restent les principaux facteurs qui déterminent l'efficacité face aux cycles de gel-dégel.

1.2.2. Importance des additions dans l'industrie cimentière

Dans le domaine des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout ne dépend plus à lui seul à toutes les exigences (mécaniques, durabilité, coût, ...). De plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a tendance à ne plus fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II).

Si l'on se fie aux recueils de normes produits, d'après [Von Euw 1986], de nombreux pays autorisent ce type d'addition : 35 pays prévoient l'utilisation des ciments au laitier, 14 pays celle des ciments aux cendres, 31 pays celle des ciments à la pouzzolane et 15 pays celle des ciments aux fillers calcaires.

Alors qu'en France l'utilisation de filler dans le ciment n'a débuté qu'en 1979, date à laquelle la normalisation française a autorisé leur fabrication et leur commercialisation [NF P15-300 et NF P15-301], en Algérie, le développement de ciment utilisant des fillers calcaires n'a commencé qu'à partir de 1990.

1.2.3. Fonction des additions

Pour présenter les différentes fonctions des additions, il convient de distinguer leurs différents modes d'incorporation.

1.2.3.1. Additions mélangées avec le clinker en cimenterie

L'addition a pour but de proposer à la clientèle plusieurs types de ciments à partir d'un même clinker qui appartiennent soit à une classe de résistance mécanique inférieure ou égale, soit à une classe de résistance aux agressions chimiques élevées permettant ainsi de réduire le coût énergétique et environnemental (moins de clinker = moins d'énergie et de CO₂).

Les ciments ainsi produits sont :

- Les ciments de haut fourneau, notés CEM III A ou B.
- Les ciments aux laitiers et aux cendres, notés CEM V.
- Les ciments au laitier, notés CEM III/C dont la chaleur d'hydratation est faible et dont les ajouts ont des propriétés pouzzolaniques qui confèrent au matériau final une durabilité intéressante. Ils sont utilisés dans les milieux agressifs comme les constructions en bord de mer ou en milieu sulfaté.
- Les ciments composés, notés CEM II, est le seul que nous étudierons dans cette recherche à titre de comparaison. Ce dernier type de ciment est avant tout d'intérêt économique et écologique ; il permet l'utilisation de cendres volantes et de laitiers, qui sont des sous-produits industriels, mais peut contenir aussi des fillers naturels (calcaires, pouzzolanes). Ce ciment est obtenu dans les cimenteries soit par mélange du clinker, du gypse et de l'addition après broyage du clinker soit par co-broyage. Les fillers calcaires entrent couramment dans la composition des CEM II avec des teneurs de substitution qui n'excèdent pas 30% en poids même si la teneur maximale autorisée est de 35%. Ainsi, à partir d'un CEM I 52.5, on réalise un CEM II/A 52.5 par substitution de 10% environ de ciment par du filler et un CEM II/B 32.5 par substitution de 27 à 30% de ciment par du filler.

1.2.3.2. Additions introduites directement dans les bétons

Dans le cas où seule la résistance à 28 jours est recherchée « bétons de marque », et dans les bétons où d'autres caractéristiques sont exigées « bétons à la norme » (dosage minimum en liant, rapport E/C maximum, ...), les additions remplacent une partie du ciment. Alors que dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons autoplaçant, ...), les additions sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou rhéologiques, sans changer le dosage en ciment. Dans le cas de bétons spéciaux, De Larrard [De Larrard 1987] a montré que certaines additions sont indispensables pour la confection de ces bétons. En effet, ces

additions contribuent à la diminution de la porosité du matériau durcie et donc à l'amélioration de ses résistances et de sa durabilité. D'autre part, l'ensemble de ces additions (laitiers, cendres, fumée de silice, pouzzolanes, calcaires) participent aux réactions d'hydratation. Elles agissent comme correcteur granulaires et améliorent la cohésion inter granulaire.

Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durcie et donc améliorent ses résistances et sa durabilité.

a. Correction granulaire

Les fumées de silice et les fines calcaires sont ajoutées à la composition du béton pour rendre l'empilement granulaire le plus compact dans les bétons à hautes performances.

b. Amélioration de la cohésion inter granulaire

Les fillers calcaires et les fumées de silice améliorent la cohésion des bétons autoplaçants. Comme de plus ces bétons sont souvent adjuvantés, le couple addition-adjuvant organique modifie la rhéologie du béton frais dans le sens d'une amélioration de sa maniabilité.

Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses résistances et sa durabilité.

1.2.4. Notion de liant équivalent

Pour chacune des additions minérales, un coefficient de prise en compte k (valeur fonction de l'activité de l'addition) doit être défini. C'est ainsi que la notion de « liant équivalent » est apparue. Le liant équivalent, constitué de ciment CEM I et d'une addition normalisée, est défini par :

$$L = C + k.A \quad (\text{Eq.1.13})$$

Avec :

C : quantité de ciment CEM I (en kg/m^3) ;

A : quantité d'addition prise en compte (en kg/m^3) ;

K : coefficient de prise en compte.

Cette nouvelle approche est assez régulièrement adoptée pour les bétons conformes à la norme (dans ce cas, le producteur de béton applique le coefficient forfaitaire et limite sa substitution conformément à la norme) et pour les bétons de marque (le producteur optimise sa substitution en fonction du coût et de la seule résistance mécanique à 28 jours).

1.2.5. Caractérisation de l'activité d'une addition minérale

1.2.5.1. Indice d'activité

Le mortier témoin ou normalisé, confectionné selon la norme NF EN 196-1, est constitué, en masse, d'une partie de ciment, de 3 parties de sable et d'une demi partie d'eau.

Les mortiers avec additions sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique ρ (taux de substitution) de ciment par l'addition minérale, les quantités de sable et d'eau restant inchangées. Les paramètres de compositions satisfont l'équation (Eq. 1.14)

$$\frac{E}{C} = \frac{E}{2C+A} = 0.5 \quad (\text{Eq. 1.14})$$

C_0 et $C = (1-\rho) C_0$ sont respectivement les masses de ciment dans le mortier témoin et dans le mortier avec addition, $A = \rho C_0$ la masse d'addition, E la masse d'eau et ρ taux de substitution.

La notion d'indice a été introduite pour quantifier l'influence de l'incorporation d'une addition minérale en remplacement d'une partie ρ de ciment sur la résistance des mortiers.

Les normes NF P18-508 « additions calcaires » et NF EN 450 « cendres volantes pour béton » définissent une valeur conventionnelle de l'indice d'activité lorsque le taux de substitution est fixé à 25%.

L'indice d'activité, noté « i », est défini comme le rapport des résistances mécaniques en compression d'éprouvettes normalisées (norme NF EN 196-1) de mortier de même âge, préparées les unes avec le ciment de référence, les autres en remplaçant une fraction ρ du ciment par une même masse de l'addition considérée.

Dans le cas général d'une addition quelconque, nous écrivons :

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_o(t)} \quad (\text{Eq. 1.15})$$

Où $f_p(t)$ et $f_0(t)$ sont respectivement la résistance du mortier contenant une fraction ρ d'addition et la résistance du mortier témoin à l'âge t .

Ainsi, pour satisfaire à la norme NF P18-508, les fillers calcaires doivent avoir un indice d'activité à 28 jours supérieur ou égal à 0.71. De même, les cendres volantes doivent présenter notamment un indice d'activité normalisé supérieur ou égal à 0.75 à 28 jours et 0.85 à 90 jours pour satisfaire à la norme NF EN 450.

a. Origines de l'activité

De part leur réactivité en présence de ciment et leur finesse les additions minérales provoquent des modifications significatives dans les propriétés des matériaux cimentaires. Les mécanismes à l'origine de ces modifications sont particulièrement complexes cependant plusieurs études récentes dans ce domaine [**Barron, ollivier 1997, Lawrence et al 2005**] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaires :

- Un effet granulaire agissant sur les propriétés rhéologiques et la compacité de la structure granulaire des matériaux cimentaires à l'état frais et durci.
- Un effet physico-chimique et microstructurale agissant sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment au cours de la prise et le durcissement
- Un effet chimique du à l'activité chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire. Cet effet agit également au cours de l'hydratation du ciment et interagissent fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

Il est important de souligner que ces différents effets peuvent intervenir simultanément voire une superposition de ces effets influençant les propriétés à l'état frais et durci du matériau cimentaire. Ce qui complique l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires.

➤ L'effet filler

L'effet « filler » appelé aussi effet « granulaire » est par définition l'incorporation d'addition minérale dans un matériau cimentaire en mesure de modifier le squelette granulaire du mélange. L'incorporation d'une addition minérale peut avoir des conséquences favorables et

compenser un déficit en particules fines dans la mesure où les particules parviennent à remplir d'une partie du volume des vides du squelette granulaire et libérer l'eau contenue dans les pores. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance mécanique d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance mécanique peut s'améliorer. Cet accroissement de la résistance est appelé « effet filler ».

La réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en incorporant les additions a été démontrée par (Lewandowski 1983 cité par [Benachour 2009]), en remplaçant une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton. Ces études révèlent l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par incorporation d'addition minérales selon la finesse, la morphologie, la nature et la quantité choisies. Il a été démontré que l'effet de la finesse est bénéfique pour les surfaces spécifiques en dessous de $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ [Lawrence et al 2005]. L'influence de la morphologie des additions selon qu'ils sont de forme irrégulières, angulaires ou arrondies. Il a été prouvé que l'effet était significatif.

Malgré une multitude de résultats expérimentaux disponibles relatifs à l'effet granulaires des additions dans les mélanges cimentaires, nous ne disposons pas actuellement d'une approche suffisamment construite et approfondie, capable de prévoir si une addition donnée peut ou non produire un effet granulaire favorable dans une formulation. A fortiori nous ignorons sur quel critère nous devons appuyer le choix des additions, notamment les additions à faible activité de type II (additions calcaires et siliceuses) capables d'améliorer les propriétés mécaniques en optimisant le mélange granulaire.

➤ L'effet physico-chimique et microstructural

L'effet physico-chimique et microstructural appelé aussi effet physique de surface [Lawrence et al 2005] concerne les modifications entre les particules d'additions minérales et le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. Il n'est plus à démontrer que les additions jouent le rôle de site de nucléation hétérogène au cours des réactions d'hydratation du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés. D'après Baron [Barron, Ollivier 1997] l'introduction des additions calcaires à l'amélioration des performances de la matrice cimentaire. Pour les additions calcaires la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) favorise l'hydratation du C_3S dès le premier instant, d'autant plus que la quantité de CaCO_3 est grande jusqu'à 20% en masse du ciment. Aussi la présence

des additions accentue les réactions d'hydratation. En étudiant l'action des additions et calcaires sur le processus d'hydratation de C_3S pur, ont pu montrer que la quantité de chaleur dégagée est modifiée par l'incorporation d'additions.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action des additions sur le processus d'hydratation du ciment certains auteurs [Barron, Ollivier 1997], considérant que l'hydratation du ciment est généralement pas totale, même pour les grandes échéances. Les hydrates nouvellement formés s'opposent à l'hydratation complète du ciment au cœur du flocculat est alors quasiment impossible.

Dans le mortier avec addition, une fraction du ciment est remplacée par une addition minérale de finesse variable. Le dosage du ciment dans la composition est alors réduit. Les grains d'addition, sous l'effet du malaxage, dispersent les grains de ciment et s'opposent à la formation de flocculat de ciment. La dispersion des grains de ciment est facilitée si l'addition minérale est finement divisée.

Quelle que soit l'origine de l'effet physico-chimique et microstructural les propriétés des matériaux durcis (et en premier lieu les résistances mécaniques) sont sensiblement favorisées aux jeunes âges par la présence d'additions, cependant cet effet favorable semble s'estomper avec le temps. Certains chercheurs ont montré qu'à long terme les additions utilisées dans certaines proportions pouvaient avoir un effet retardateur (cas des cendres volantes ou les fumées de silice) plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges.

➤ L'effet chimique

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment.

La normalisation européenne actuelle définit les additions chimiquement actives comme étant de type II en prenant en compte soit leur réactivité hydraulique latente (c'est le cas du laitier de haut fourneau), soit leur activité pouzzolanique (c'est le cas de la fumée de silice et des cendres volantes, parmi les additions disposant d'une normalisation spécifique). Cette activité chimique se traduit en premier lieu (comme nous l'avons signalé) par un gain de résistance mécanique.

D'autres additions qui ne sont toujours pas normalisées présentent également une activité pouzzolanique en raison de leur teneur en phase siliceuses actives dans leurs compositions qui réagissent avec la portlandite comme les schistes calcinés et les métras kaolins.

Par ailleurs plusieurs auteurs s'accordent à soutenir l'idée selon laquelle les additions calcaires présentent aussi une réactivité en présence des produits hydratés du ciment et forment des carboaluminates de calcium hydratés [Barron , Ollivier 1997]. L'activité chimique des additions calcaires est toutefois significativement plus faible que celle des additions siliceuses à caractère pouzzolanique. Ceci peut être appréhendé en particulier si on tient compte de ces effets à longue échéance, les chercheurs l'ont confirmé en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec deux cendres volantes et une addition calcaire.

Réaction pouzzolanique :

La réaction pouzzolanique concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (Classe F), les pouzzolanes naturelles ou les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit, en présence d'eau, avec ce que l'on appelle dans ces différentes additions réagit, en présence d'eau, avec ce que l'on appelle dans le monde de l'industrie cimentaire « portlandite » qui est produite par l'hydratation du ciment pour former les silicates de calcium hydratés C-H-S suivant la réaction chimique :



L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, [Appa 2001] par exemple a pu montrer que pour un rapport E/C=0,5 maintenu constant l'incorporation d'une fumée de silice jusqu'à 30% par substitution au ciment favorise une augmentation des résistances en compression avec la quantité de l'addition indépendamment de l'âge du mortier. Egalement Kwan [Kwan 2000] a montré que quelque soit le rapport eau/liant, la résistance en compression des mortiers augment avec la teneur en fumée de silice dans la limite de 15% de substitution du ciment par l'addition.

Même pour le quartz (considère à priori comme inerte en milieu cimentaire), les particules de quartz cristallisés et finement broyé dont le diamètre est inférieur à 5 µm peuvent également réagir avec la portlandite. Aussi le zircon pouvait apparaître chimiquement plus actif que les additions calcaires malgré sa totale inertie chimique en milieu basique.

Il ressort de cette étude que l'effet chimique lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés des matériaux cimentaires durcis se mesure par modification du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins leur forte synergie empêche toute distinction claire entre ces effets qui restent complexes [Barron , Ollivier 1997].

Formation des carbo-aluminates :

Plusieurs auteurs, se sont penchés sur l'hydratation du ciment en présence de filler calcaire. Ils ont été prouvé que les additions calcaires, la calcite réagit avec les aluminates du ciment (C_3A , C_4AH_{13}) en présence d'eau pour former un mono carbonate de calcium hydraté du type $C_3A \cdot Ca(OH)_2 \cdot 11H_2O$, cristallisant en fines plaquettes hexagonales.

L'utilisation des fillers calcaires est généralement favorable à l'amélioration de la maniabilité d'un mortier ou d'un béton. Il est alors possible de réduire la quantité d'eau du mélange, entraînant en répercussion une hausse de la résistance : c'est l'effet filler. Le besoin en eau dépend de la finesse et de la morphologie des additifs introduits et peut varier de 1 à 4.

Néanmoins, il n'est pas prouvé que la formation des carbo-aluminates conduise à un accroissement de la résistance par effet chimique dans les bétons ou les mortiers, même si cela a pu être mis en évidence sur des pâtes pures de C_3A .

1.3. Les fibres

1.3.1. Introduction

L'utilisation d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (béton, béton de sable ou mortier). Sans toutefois ignorer le facteur économique (coût), qui est très important dans la mesure où le prix des fibres sur le marché est relativement élevé par rapport aux armatures traditionnelles.

La variété dans la nature et la forme des fibres, fait que ces derniers présentent des caractéristiques différentes les unes des autres, selon les objectifs recherchés on peut faire la distinction entre les fibres possédant des résistances élevées (fibres de verres, métalliques, de carbone, d'amiante) et les fibres possédant des résistances faibles (fibres végétales, propylène...etc). [Belferrag 2006]

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

1.3.2. Nature des fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant quelles soient naturelles ou artificielles. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m³ de béton.

Le tableau 1.3 représente leurs principales caractéristiques.

Tableau 1. 3 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées.

Fibres	Diamètre (μm)	Long (mm)	Densité	R _t (Mpa)	E (10 ³ Mpa)	Coeff de dilatation (μ /m)	R _{feu} Temp Max °C
Acier	5-500	20-80	7.8	1000- 3000	200	11	1500
Fonte (ruban)	36x2600 de section	50-60	7.8	2500	140		1500
Verre	5-20	40-70	2.6	1500- 3000	80	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0.9	400- 750	5-10	90	150
Amiante	0.02-20	5	2.5-3.4	3000	8-15	1	1500
Carbone	5-9	Variable	1.7-2	2000- 3000	250-400		400-1500
Sisal	10-50	1.50	1.5		130		

1.3.2.1. Les fibres d'amiante

Les fibres d'amiante sont constituées de silicates de magnésium hydratés parfaitement compatibles avec la pâte de ciment, elles possèdent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Ce sont des fibres très commercialisées.

Les fibres d'amiante ne conviennent pas pour armer les mortiers ou les bétons car leur répartition est très difficile et elles nécessitent beaucoup d'eau de gâchage.

En plus, leur utilisation dans le renforcement des ciments sont de plus en plus délaissés et même interdite par le règlement dans beaucoup d'applications à cause du danger qu'elle représente pour la santé humaine.

Le tableau 1.4 présente les propriétés mécaniques des fibres d'amiante, reproduit par Aït Ameer [Aït Ameer 1998].

Tableau 1. 4 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante [Aït Ameer 1998]

Type de fibre	Amiante
Diametre D(mm)	0.0002-0.002
Longeur (mm)	5
Masse volumique (g /cm ³)	2.6-3
Résistance à la rupture S _{fu} (Mpa)	100-300
Module d'Young E(GPa)	80-150

1.3.2.2. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont très fragiles, elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines ou de fils coupés.

Les caractéristiques mécaniques des bétons de fibres de verre diminuent avec le temps à cause de l'action corrosive des alcalis contenus dans le ciment sur les fibres, qui provoquent des microfissurations.

Cependant, des recherches ont pu mettre en évidence une dernière génération de fibre de verre (type S) ayant une bonne résistance aux alcalis. Le tableau 1.5 donne quelques

caractéristiques des fibres de verre les plus utilisées, reproduit par [Ait Ameur 1998], à savoir le verre ordinaire (E), le verre résistant à la corrosion (R) et le verre résistant aux alcalis (S).

Tableau 1. 5 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [Ait Ameur 1998].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E(GPa)	73	86	87
Masse volumique en (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

1.3.2.3. Les fibres polypropylène

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques).

Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté). Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).

Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton [Ait Ameur 1998], [Bouhekouk 1992]. Le Tableau 1.6 résume les caractéristiques mécaniques des fibres de polypropylène.

Tableau 1. 6 : Propriétés mécaniques des fibres de polypropylène.

Type de fibre	Polypropylène
Masse volumique en (g/cm ³)	0.9
Diamètre moyen en (µm)	>4
Résistance à la traction en (N/mm ²)	500-750
Module d'Young E en (GPa)	5-10

1.3.2.4. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques, notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton.

Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton : (fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ; fils, rubans ; fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc).

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité très élevé [Debicki 1988].

Parmi les fibres d'acier les plus utilisées nous citons :

- Les Fibres Euro-Steel ;
- Les Fibres Bekaert de Chez Dramix ;
- Les Fibres Harex ;
- Les fibres Ruban en Fonte Amorphe de Pont-à-Mousson ;
- Les Fibres à Tête d'encrage en Acier Trfile ;
- Les Fibres de Beki –Shield ;

1.3.2.5. Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres naturelles destinées, comme les autres types de fibres, à améliorer les caractéristiques mécaniques du béton à la traction et à la déformation en s'opposant à sa fragilité.

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis l'année 1970), le premier composite liant avec les fibres végétales était le plâtre. De ce fait, plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales.

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales [Mokhtari 2006].

Parmi les fibres Végétales les plus utilisées nous classons :

- Les Fibres de Feuilles

- Les Fibres de Tiges
- Les Fibres de Bois
- Les Fibres de Surface

1.3.2.6. Les fibres de carbone

La fibre de carbone est sensiblement plus chère que les autres fibres types. Pour cette raison, son utilisation commerciale a été limitée.

Les fibres de carbone sont fabriquées par carbonisation organique appropriée des matériaux fibreux dans des formes à des températures élevées et ensuite l'alignement des cristallites de graphite obtenues par étirage à chaud.

Les fibres sont fabriquées: Type I (module élevé) ou Type II (à haute résistance), et dépendent de la source de matériau et l'étendue d'eau chaude qui s'étend de leurs propriétés physiques. Les fibres de carbone sont disponibles dans une variété de formes et avoir une fibrillaire structure similaire à celle de l'amiante.

La fibre de carbone à base de brai de pétrole et le charbon est moins chère que la fibre de carbone classique fabriqué à partir de matériaux fibreux. Le type I et II fibres carbone produit par la carbonisation des matières organiques appropriées autres que les matériaux à base de pétrole est de 20 à 40 fois plus fort et ont un module d'élasticité allant jusqu'à 100 fois supérieure à la fibre de carbone à base de brai.

La fibre de carbone est disponible sous forme de filaments continus ou en tant qu'individus fibres coupées. Brins continus sont normalement pré-placés et alignés pour fournir de l'orientation optimale des fibres lors fabrication. Les fibres coupées sont généralement incorporées au cours du processus de mélange et sont donc orientés aléatoirement dans le mélange. Un mélange satisfaisant de fibres de carbone hachées, ciment et d'eau est difficile à réaliser en raison de la grande surface de la fibre. La fibre de carbone a une résistance élevée à la traction et le module d'élasticité et une cassante caractéristique de contrainte-déformation.

Les propriétés caractéristiques du carbone sont liées à sa structure de type graphite : faible coefficient de frottement, bonne résistance à l'usure, faible coefficient de dilatation linéique, haute tenue en température en service continu, bonne conductivité électrique, très grande résistance aux produits chimiques et à la corrosion.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres de carbone dépendent elles-mêmes :

- de la nature chimique du précurseur ;
- des conditions physiques et chimiques de fabrication des fibres du précurseur ;

-des procédés et des conditions de traitement thermique du précurseur.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de carbone, spécialement celles des fibres dites « haut module » et « haute ténacité », sont utilisées dans les matériaux composites. Le choix des résines et la technologie utilisée modifient les caractéristiques des fibres de carbone. La fibre de carbone à hautes performances idéale serait une fibre qui présenterait les propriétés mécaniques théoriques du graphite monocristallin, soit une résistance à la rupture en traction et un module de traction.

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone mais actuellement trois types de fibres sont commercialisés [Ait Ameur 1998, Houget 1992]

- Les fibres hautement résistant (H.R.)
- Les fibres à module intermédiaire (I.M.)
- Les fibres à hauts modules (H.M.)

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile [Ait Ameur 1998]. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection.

Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [Beaudoin 1982]. Le tableau 1.7 présente quelques propriétés des fibres de carbone.

Tableau 1. 7 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone [Ait Ameur 1998]

Type de carbone	H.R	H.M
Diamètre D (mm)	8	8
Masse volumique en (g/cm ³)	1.75	1.81
Résistance à la traction (MPa)	3000-5000	2800
Module d'Young E (GPa)	220	400

Les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, leur résistance élevée à la traction, leur souplesse, leur bonne conductivité électrique, leur tenue en température (à plus de 2500 ° C, dans un milieu inerte), leur faible coefficient de dilatation thermique, et leur inertie chimique (sauf à l'oxydation)

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres de carbone dépendent elles-mêmes de la nature chimique du précurseur, des conditions physiques et chimiques de la fabrication des fibres du précurseur, des procédés et des conditions de traitement thermique du précurseur.

1.3.3. Formulation des bétons de fibres

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué durant ces dernières années. Tout d'abord, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres, sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments. Ensuite on s'est intéressé à un nombre croissant de propriétés d'usage du matériau en relation avec la totalité de son cycle de vie (depuis son comportement rhéologique à l'état frais jusqu'à sa durabilité dans différentes ambiances). Enfin, la gamme des propriétés que l'on peut atteindre avec les moyens industriels modernes s'est singulièrement élargie, on rappellera que les deux aspects communément étudiés dans une formulation de béton, à savoir la maniabilité et la résistance en compression. On sait aujourd'hui formuler des bétons secs (d'affaissement nul) comme des bétons auto compactant ou auto nivelant. De même, toute une gamme de résistances a été explorée allant de 1 à 2 MPa, pour des matériaux réexcavables destinés au remplissage de tranchées, à des résistances très élevées qui peuvent être supérieures à 200 MPa pour des mortiers à ultra haute résistance destinés à la fabrication de conteneurs de déchets radio actifs, par exemple.

En résumé, le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables et de dimensions tout en tenant compte que l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste. L'approche scientifique du béton s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues :

- L'empilement sec dont on cherche à prévoir la compacité et la ségrégabilité
- L'empilement humide (béton frais) intéressant par ses propriétés rhéologiques
- L'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une matrice de pâte de ciment durcie [ROSSI et al 1989]. La formulation peut être définie comme indique le tableau 1.8.

Tableau 1. 8 : Définition de la formulation

Formulation classique d'un béton		
Maniabilité	Résistance à la compression	
Problème actuel de la formulation des bétons		
Davantage de variables	Espace de recherche beaucoup plus grand	Davantage de dimensions
Approche scientifique du béton		
Analyse de la structure granulaire		
Trois étapes parcourues		
L'empilement sec : compacité et ségréabilité	L'empilement humide (béton frais) : propriétés rhéologiques	L'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une pâte de ciment durci

La formulation de béton a tenu compte de l'application des trois hypothèses fondamentales de cette méthode (BARON – LESAGE) donne :

- E/C fixé au départ : le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire le plus compact.
- Les proportions optimales en granulats ne dépendent pas de la nature et du volume du liant
- L'introduction des fibres de carbone ne modifie pas les deux premières hypothèses.

On se doit d'établir au préalable :

- Le rapport eau –liant
- Le diamètre du plus gros granulat
- La géométrie et les dimensions de la fibre
- Le pourcentage des fibres
- La maniabilité souhaitée

- La variation du rapport massique $S / S+G$ avec la maniabilité correspondante : si la maniabilité voulue n'est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un super plastifiant.

1.3.4. Utilisation des Fibres dans la Construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau 7 résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

L'utilisation des fibres de carbone dans le renforcement des ciments est relativement ancienne. En effet, les fibres des carbonés beaucoup des applications sont de plus en plus utilisées dans Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, planché d'échafaudage.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polypropylène, d'acier, de Verre, végétales et d'Amiante sont de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines représentés respectivement dans le tableau 1.9.

Tableau 1. 9 : Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment [Kriker, 2005, Lacroix et al 1982].

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

1.3.5. Avantages et inconvénients des B.R.F

Les améliorations suivantes des propriétés des bétons de fibres sont considérées comme acquises.

- Résistance à l'impact plus élevée.
- Augmentation de l'énergie de rupture.
- Amélioration de la ductilité.
- Comportement différent à la fissuration.
- Entraînant un retard notable de la fissuration.

Mais il a été remarqué certains inconvénients dus à l'utilisation de fibres:

- Réduction de la maniabilité du fait de la présence des fibres quand le pourcentage de celles-ci est élevé.
- Introduction d'un certain type de fibres dans le béton avec les moyens traditionnels se révèle très difficile.
- Pendant la livraison, les fibres sont enchevêtrées, d'où la formation d'oursins lors du malaxage implique la difficulté de mise en place.
- Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du m³ de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

1.3.6. Le rôle des fibres

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

- la cohésion du béton frais.
- la déformabilité avant rupture.
- la résistance à la traction par flexion.
- la ductilité et la résistance post fissuration.
- la résistance aux chocs.
- la résistance à la fatigue.
- la résistance à l'usure.
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges.

- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
- la tenue au feu.
- la résistance à l'abrasion.

1.3.7. Influence du dosage en fibres

1.3.7.1. Optimisation rhéologique

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation préférentielle.

La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élancement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.

Lors de la mise en place dans les moules, il faut limiter l'écoulement qui est responsable de l'orientation préférentielle des fibres dont nous parlerons plus spécifiquement dans le paragraphe suivant. L'orientation peut aussi être due à la vibration qu'il est important de limiter voir de supprimer en travaillant avec des bétons autoplaçants et à l'effet de paroi, ce dernier étant plus difficile à contourner.

1.3.7.2. Optimisation mécanique

La quantité de fibres dans un béton est une caractéristique prépondérante vis-à-vis du comportement post fissuration.

Soit deux fibres, l'une perpendiculaire au plan d'une fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure. Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire étant plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles.

En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien (c'est-à-dire provoquer une étroitesse autour de cette fibre), cette dernière verra donc son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus

quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier de synergie positive.

Au contraire, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de pâte de ciment qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant (même si l'on augmente la quantité de pâte de ciment avec le pourcentage de fibres pour des raisons de maniabilité) pour assurer un fonctionnement correct de l'interface pâte-fibre. Les fibres travailleront moins efficacement que si elles avaient travaillé sans interactions. Le bilan est alors la somme de leurs actions individuelles moins un effet qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moins elles seront efficaces individuellement, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution.

Il est évident que le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer, par exemple une fibre métallique pour augmenter les capacités portantes, ou une fibre synthétique pour améliorer le comportement post fissuration ou la ductilité des bétons.

Ces seuils de synergie dépendent tous deux du type de fibre, de ses dimensions, du fait que la fibre fonctionne par ancrage réparti le long de la fibre ou concentré à ses extrémités ou encore par adhérence, du type de matrice (plus ou moins compacte) ou de l'orientation des fibres vis-à-vis des fissures. [Guillaume 2008]

1.4. Conclusion

L'étude bibliographique menée a un double intérêt :

- Elle montre la spécificité de l'incorporation des additions dans les matrices cimentaires de manière générale.
- Elle met en évidence la différence entre les bétons ordinaires et ceux qui vont faire l'étude de notre part.

Dans cette revue bibliographique, notre objectif était de définir les différents constituants du béton, les mécanismes d'action, sa caractérisation.

Elle permet de dégager une problématique importante concernant l'impact des additions sur les performances du béton. La formulation des matériaux durables, reste actuellement une des difficultés majeures à son développement et utilisation.

Les principales méthodes de formulations ont nécessité de longues années de recherche pour la mise en œuvre. Cependant le développement parallèle de nouveaux produits, nécessite des extensions et modifications.

Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine d'intérêt ainsi que sur la normalisation française et européenne récente dont la lecture critique a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche méthodologique pour la formulation des mortiers incorporant des additions minérales.

Les données bibliographiques spécifiques concernant le rôle des additions sur les propriétés physiques et ainsi sur les paramètres de durabilité, sont présentées et analysées.

Cette synthèse bibliographique a montré que de nombreux produits fins peuvent être utilisés dans le béton pour améliorer certaines de ces propriétés ou pour lui conférer des propriétés nouvelles. En effet, l'action des additions minérales peut être distinguée suivant trois effets principaux : un effet granulaire, un effet physico-chimique et microstructural, un effet chimique.

D'après notre revue de littérature, il n'est pas aisé de dégager des règles générales d'emplois de combinaison de ciments, additions dans les mortiers ou bétons ; cela vient de la disparité des objectifs des scientifiques, de ce que leur travail vise à caractériser, ou rechercher des propriétés particulières, de l'abondance des paramètres de composition, de matériaux locaux, de la mise en place et du mode d'essais.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche qui a pour objectif d'établir une base de données expérimentales d'utilisations de différents composants et des paramètres de composition pouvant être exploités et complétés visant certaines propriétés des matériaux élaborés.

Nous envisageons dans cette recherche de travailler sur l'adéquation des différents composants. Nous abordons le problème par analogie avec les très nombreuses études menées sur le même domaine d'étude

CHAPITRE 2 : Pathologie et mortiers de réparation

2.1.Introduction

Toute construction a une durée de vie ,mais elle doit également assurer un certain niveau de confort d'esthétique et également de résistances, la raison pour laquelle on s'intéresse aujourd'hui à la réhabilitation, et à la rénovation des ouvrage, ce chapitre explique les causes de dégradation des constructions que ce soit en béton armé ou en pierre naturelle, les mortiers diffères selon leur composants, leur formulation ainsi que le dosage des constituants .

Au cours des 40 dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes. Aujourd'hui, ils associent des liants hydrauliques et de multiples adjuvants. En Algérie, leur utilisation n'a fait qu'augmenter depuis 1980, Par ailleurs, du fait de cette complexité, la part des mortiers fabriqués sur chantier n'a fait que diminuer au profit des mélanges réalisés en usine. La fabrication en usine permet de doser, de façon précise et régulière, les dizaines de composants qui entrent dans la formulation des mortiers industriels et d'assurer un contrôle permanent de leurs caractéristiques.

Le mortier de réparation est un mortier qui sert à réparer les surfaces dégradées souvent appelé mortier d'enduit il présente des caractéristiques spéciales par rapport au mortier ordinaire tel que l'adhérence, l'ouvrabilité, et surtout la compatibilité avec le support, ce dernier est un paramètre essentiel dans les travaux de réparation des surfaces. La réparation des surfaces nécessite de connaître le support à réparer, les matériaux de réparation et l'environnement dans lequel ils sont mis en œuvre, et de comprendre les mécanismes à la base de l'adhésion.

Ce chapitre porte sur l'étude des causes et effets des dégradations affectant les ouvrages: fissuration, épaufrures et désintégrations étant les principaux types de défauts de surface, en lien avec la corrosion des armatures en acier sous-jacentes, ce qui provoque la dégradation des mortiers d'enduit, il présente également les différents types de mortier ainsi que leurs caractéristiques et exigences.

2.2. Pathologies des constructions

2.2.1. Généralités

La pathologie des constructions est un terme est depuis peu utilisé en bâtiment. L'étude des désordres et surtout l'étude statistique systématique et ordonnée des désordres et des sinistres sont en effet relativement récentes.

La signification de ce terme issu de la science médicale est la suivante: (science qui a pour objet l'étude et la connaissance des causes et symptômes des maladies) si l'on applique cette définition au bâtiment les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravent, donnent lieu à des sinistre ; ces derniers pouvant conduire à la ruine de l'ouvrage.

En d'autres termes, la pathologie c'est la: «Science qui traite de tous les désordres survenus soit dans la disposition des organes, soit dans les actes qu'ils remplissent».

Les pathologies peuvent être classées en plusieurs familles :

- les dégradations superficielles.
- les déformations.
- les fissurations;
- les dégradations d'ordre structurel.

Cependant, il est nécessaire de distinguer les pathologies existantes à l'origine, tels que le bullage et les nids de cailloux, et celles apparaissant dans le temps comme les fissures.

Une étude pathologique comprend:

- L'observation et l'analyse des symptômes et de leur processus de formation, ainsi que des conditions de mise en œuvre.
- L'établissement d'un diagnostic sur les causes probables et sur les risques d'évolution du désordre.
- La recherche de remèdes ou traitements curatifs à envisager.

2.2.2. Causes de dégradation des ouvrages

La structure d'un bâtiment peut subir divers désagréments et déformations. Des facteurs externes ou internes peuvent provoquer ces dégâts. La réglementation désigne plusieurs types de causes. La norme française en vigueur est la NF EN 1504. Elle détermine des principes et des méthodes de réparation selon la nature de la dégradation. Elle établie 11 principes qui

identifient les causes de détérioration des structures d'ouvrages. Il est important de les déterminer avant de choisir le mortier de réparation qui convient.

Il existe plusieurs causes de cette dégradation.

- des causes physiques : usure, gel, érosion, abrasion, dilation.
- des causes chimiques : bactéries, exposition et réaction chimique.
- des causes mécaniques : surcharge, tremblement de terre, vibration.

2.2.2.1. *Dégradations mécaniques*

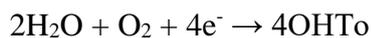
Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux. Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle [Benaddi 2008].

2.2.2.2. *Dégradations Chimiques [Cimbéton 2013]*

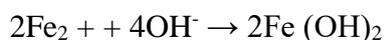
➤ **Corrosion des armatures**

La corrosion de l'acier d'armature et d'autres métaux incorporés est la principale cause de détérioration du béton. Lorsque l'acier se corrode, la rouille résultante occupe un plus grand volume que l'acier. Cette dilatation crée des contraintes de traction dans le béton, qui peuvent éventuellement causer des fissures, des délaminages et des écaillages (Figure 2.1). Ce processus est appelé une réaction d'oxydation, ou la réaction anodique, et est représenté par:

Les électrons se combinent avec l'eau et l'oxygène dans le béton :



Les ions ferreux migrent à travers l'eau interstitielle du béton où ils se combinent pour former des hydroxydes de fer, ou de la rouille:



Cet hydroxyde a tendance à réagir davantage avec l'oxygène pour former des oxydes supérieurs. Les augmentations de volume au fur et à mesure que les produits de réaction

réagissent davantage avec l'oxygène ce qui entraîne une contrainte interne dans le béton qui peut être suffisante pour provoquer la fissuration et l'effritement de la couverture de béton : le mortier d'enduit. La figure 2.1 montre la fissuration d'une paroi causée par la corrosion des armatures.

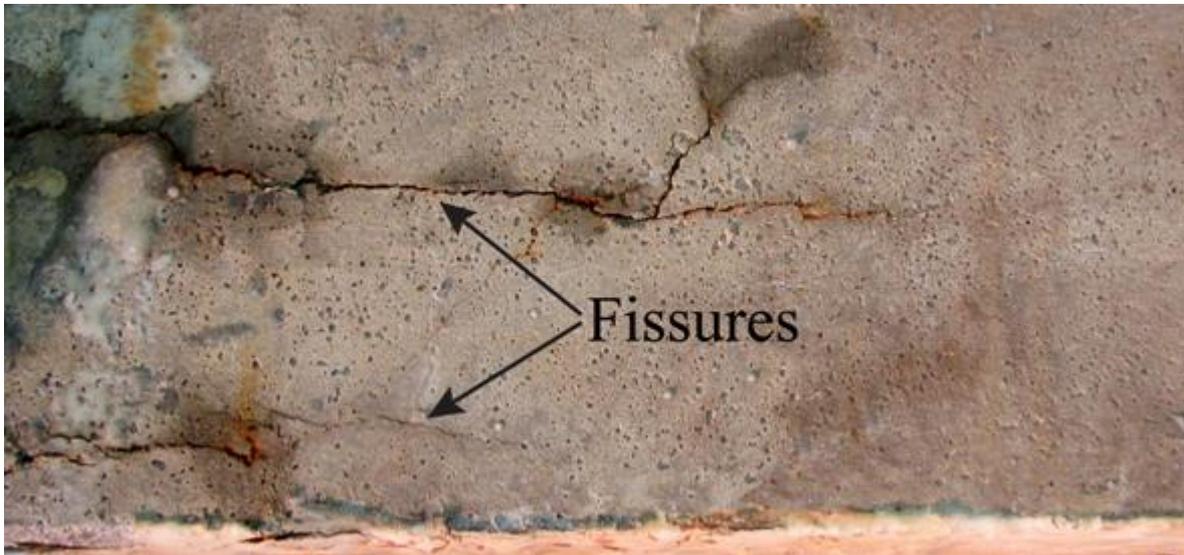


Figure 2. 1 : Fissuration causée par la corrosion des armatures

➤ **Détérioration par le gel-dégel**

Lorsque l'eau gèle, elle augmente d'environ 9%. Comme l'eau dans le béton humide gèle, elle produit une pression dans les capillaires et les pores du béton. Si la pression dépasse la résistance à la traction du béton, la cavité se dilatera et se rompra. L'effet cumulatif des cycles successifs de gel-dégel et de rupture de la pâte et des granulats peut éventuellement entraîner une dilatation et une fissuration importante, une desquamation et un effritement du béton (Photo 2.1).



Photo 2. 1 : Détérioration de la surface du béton par Les cycles de gel dégel

➤ **Attaques chimiques**

Le béton fonctionne bien lorsqu'il est exposé à diverses conditions atmosphériques, à l'eau, au sol et à de nombreuses autres expositions chimiques. Cependant, certains environnements chimiques peuvent détériorer même le béton de haute qualité.

Le béton est rarement, sinon jamais, attaqué par des produits chimiques solides et secs. Pour produire une attaque importante sur le béton, les produits chimiques agressifs doivent être en solution et au-dessus d'une concentration minimale. La figure 2.3 montre les dégradations causées par les attaques chimiques.



Photo 2. 2 : Dégradations causées par les attaques chimiques

➤ **Les acides**

En général, le béton de ciment Portland n'a pas une bonne résistance aux acides. En effet, aucun béton de ciment hydraulique, quelle que soit sa composition, ne résiste longtemps s'il est exposé à une solution ayant un pH de 3 ou moins. Cependant, certains acides faibles peuvent être tolérés, en particulier si l'exposition est occasionnelle. Les acides réagissent avec l'hydroxyde de calcium du ciment Portland hydraté. Dans la plupart des cas, la réaction chimique forme des composés de calcium hydrosolubles, qui sont ensuite lessivés par des solutions aqueuses.

➤ **Sels et alcalis**

Les chlorures et nitrates d'ammonium, de magnésium, d'aluminium et de fer provoquent tous une détérioration du béton, ceux d'ammonium étant les plus dommageables. La plupart des sels d'ammonium sont destructeurs car, dans l'environnement alcalin du béton, ils libèrent du gaz ammoniac et des ions hydrogène. Ceux-ci sont remplacés par la dissolution de

l'hydroxyde de calcium du béton. Le résultat est une action de lixiviation, un peu comme une attaque acide. Des alcalis forts (plus de 20%) peuvent également provoquer la désintégration du béton.

➤ **Attaques sulfatiques**

Des sulfates naturels de sodium, de potassium, de calcium ou de magnésium se retrouvent parfois dans le sol ou dissous dans les eaux souterraines. Les sulfates peuvent attaquer le béton en réagissant avec des composés hydratés dans le ciment durci. Ces réactions peuvent induire une pression suffisante pour perturber la pâte de ciment, entraînant une perte de cohésion et de résistance, ce qui provoque la détérioration des enduits. La figure 2.3 montre les dégradations causées par les attaques sulfatiques.



Photo 2. 3 : Dégradations causées par les attaques sulfatiques

➤ **Réactivité alcali-agrégat**

Dans la plupart des cas, les agrégats sont plus ou moins inertes chimiquement. Cependant, certains agrégats réagissent avec les hydroxydes alcalins du béton, provoquant l'expansion et la fissuration dans une période de plusieurs années.

➤ **Abrasion / Érosion**

Les dommages causés par l'abrasion se produisent lorsque la surface du béton est incapable de résister à l'usure causée par le frottement et la friction. Au fur et à mesure que la pâte extérieure du béton s'use, les agrégats fins et grossiers sont exposés et l'abrasion et l'impact entraîneront une dégradation supplémentaire liée à la force d'adhérence agrégé-à-coller et à la dureté de l'agrégat.

➤ **Changement de volume**

Le béton change légèrement de volume pour diverses raisons, les causes les plus courantes étant des fluctuations de la teneur en humidité et Température. Contrainte aux changements de volume, en particulier la contraction, peut causer des fissures si les contraintes de traction qui se développent dépassent résistance à la traction du béton.

➤ **Dégradations Physiques**

Ce sont les Mécanismes développés par le gel et les sels de déverglaçage. Les mécanismes de dégradation du béton sont liés à l'alternance de cycles répétés de phases de gel et de dégel. Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important. C'est le cas notamment des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux saturées en sel. Une formulation mal adaptée et une mise en œuvre incorrecte du béton peuvent amplifier les dégradations. Ce phénomène est aggravé, en surface, par l'application des sels de déverglaçage (ou fondants routiers), qui engendrent un accroissement des gradients de concentrations en sels, générant ainsi des pressions osmotiques plus élevées. Les dégradations occasionnées par le gel peuvent être de deux types :

- Une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne
- Un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage. Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages [Benaddi 2008].

Pour le cas de construction en maçonnerie

Une maçonnerie est un empilage de blocs (pierre, terre cuite, béton, etc.), bien liés entre eux par du mortier et souvent couverte d'un enduit. Ainsi, on marie des matériaux de natures différentes qui se comportent de manière différente et l'on souhaite en faire un assemblage homogène qui vieillira durablement. Cet art de construire, le plus ancien qui soit, approprié à la main d'œuvre artisanale a traversé plusieurs siècles grâce à l'utilisation de matériaux lourds et inertes. Il n'en n'est plus de même aujourd'hui :

- Les blocs creux sont légers mais de faible résistance.
- Les blocs de béton sont poreux et font du retrait.
- Les pierres sont mises en œuvre dès leur extraction, encore humides.
- Les briques creuses gonflent.
- Les joints ‘’grillent’’ au contact des blocs très absorbants.
- Les enduits font trop de retrait.

2.2.3. Méthodes de réparation

Il existe plusieurs familles de produits de réparation et chacune a une destination particulière. Le marché de la construction propose des mortiers de réparation aussi bien pour les surfaces (réparation structurale ou non structurale, collage et scellement) que pour la protection contre la corrosion des armatures [Ooreka 2018].

Pour chaque type de dégradation correspond une méthode de réparation :

- surcharges (tassement du béton): procéder au collage de plaque après projection du béton, ou remplacer le béton et les éléments abîmés par du mortier de réparation.
- fissures (mauvaise vibration du béton): injecter du mortier pour colmater les fissures.
- éclatements (en cas de choc ou d'accident): projeter un nouveau mortier en béton.
- effritement (gel ou dégel): revêtement d'un mortier de protection à base de ciment.
- action des chlorures sur les armatures : remplacer le béton et les armatures infectées par un nouveau mortier de réparation.
- corrosion sous l'action du CO₂ (carbonatation): ajouter des armatures en renfort et changer le béton infecté par un nouveau mortier.
- corrosion due à un courant électrique vagabond: remplacer les armatures à fort potentiel électrique.

2.3. Mortiers d'enduit, de réparation

2.3.1. Généralité

L'enduit est par définition un mélange pâteux avec lequel on recouvre une paroi de maçonnerie brute, appelée support, pour lui donner en général une surface uniforme et plane, et éventuellement d'autres caractéristiques ; à l'extérieur, pour la protéger des intempéries et souvent constituer un parement uniforme à caractère décoratif et, à l'intérieur pour servir

d'élément pour l'esthétique. Dans ce dernier cas, l'enduit est du domaine de confort plutôt que de la protection.

Les enduits sont constitués d'un liant (chaux, plâtre, ciment ou terre) et de charges minérales (agrégats, ou granulats, comme le sable ou la poussière de marbre). On peut ajouter aux enduits à base de terre des charges végétales ou animales (pailles de blé, de riz, solution de néré, bouse de vache, crins d'animaux divers, etc.). L'adjonction de pigments (charges colorantes) n'est pas indispensable, elle dépend de l'effet recherché [Kadjile 2010].

2.3.2. Fonctions du mortier d'enduit

Suivant leur nature, les enduits extérieurs assurent une ou plusieurs des trois fonctions suivantes [Kadjile 2010]:

- Le **dressage** : en rattrapant les irrégularités du gros oeuvre. Son aspect lisse favorise le ruissellement ;
- La **protection** : en assurant l'imperméabilisation de la paroi, tout en laissant « respirer » le support ;
- La **décoration** : en donnant l'aspect final de la façade (le parement). Cette fonction apporte sur la façade une esthétique importante par la composition, la coloration et le rapport qu'elle établit avec les autres éléments architecturaux du bâtiment.

2.3.3. Différent types des mortiers

Les mortiers se partagent en différents types [Bouali 2014].

2.3.3.1. *Les mortiers de ciment*

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1m³ de sable.

2.3.3.2. *Les mortiers de chaux*

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

2.3.3.3. *Les mortiers bâtards*

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée

2.3.3.4. Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues ...

2.3.3.5. Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

2.3.3.6. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, prêts à l'emploi, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment ...
- Mortier de réparation.

2.3.4. Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite [Sylver 2006] :

2.3.4.1. Selon leur domaine d'utilisation

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes:

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.

- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.

2.3.4.2. *Selon la nature du liant*

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

- **Mortier de ciment portland**

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

- **Mortier de chaux**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air; ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide.

- **Mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées.

- **Mortier à base de ciment de maçonnerie**

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment.

Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants.

2.3.5. Propriétés essentielles des mortiers

Les exigences d'un mortier de réparation nécessitent la prise en compte d'un certain nombre des paramètres:

- La nature et l'état du support.
- La nature et les conditions d'exposition.
- Les exigences fonctionnelles.
- Le type du mortier.
- Le type de finition / aspect (par exemple texture / lisse).

Un mortier d'enduit doit principalement adhérer au support sur lequel il est appliqué. Il doit ensuite assurer certains paramètres qui changent

2.3.5.1. *L'ouvrabilité*

Cette propriété est une mesure de fluidité du mortier, un mortier d'enduit très ferme est difficile en mise en œuvre, et un mortier très fluide risque de ne pas s'adhérer au support, l'ouvrabilité du mortier est un paramètre important pour les mortiers de réparation et les mortiers d'enduit, ce paramètre dépend principalement sur les composants du mortier et leur dosages. L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a/ Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue (voir figure 2.2). L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec: D_r : diamètre final

D_i : diamètre initial

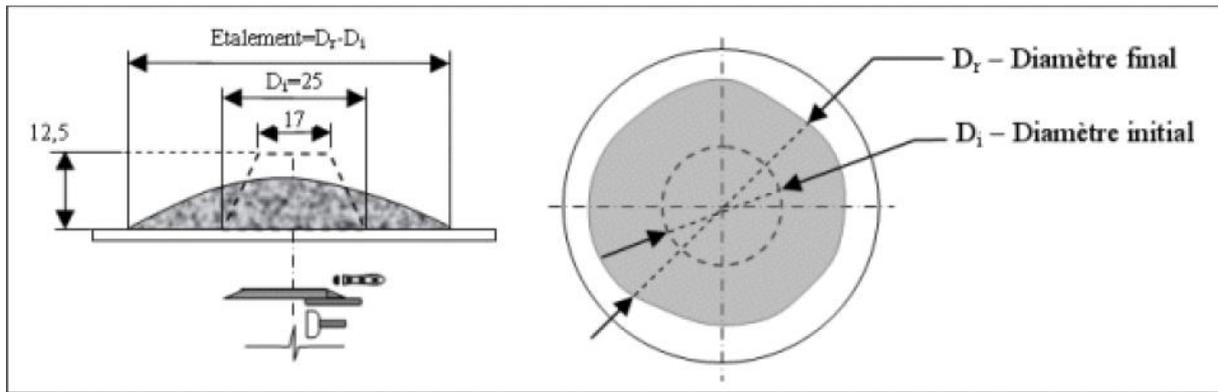


Figure 2. 2 : Table à secousses.

b/ Maniabilimètre du LCPC

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule (voir figure 2.3).

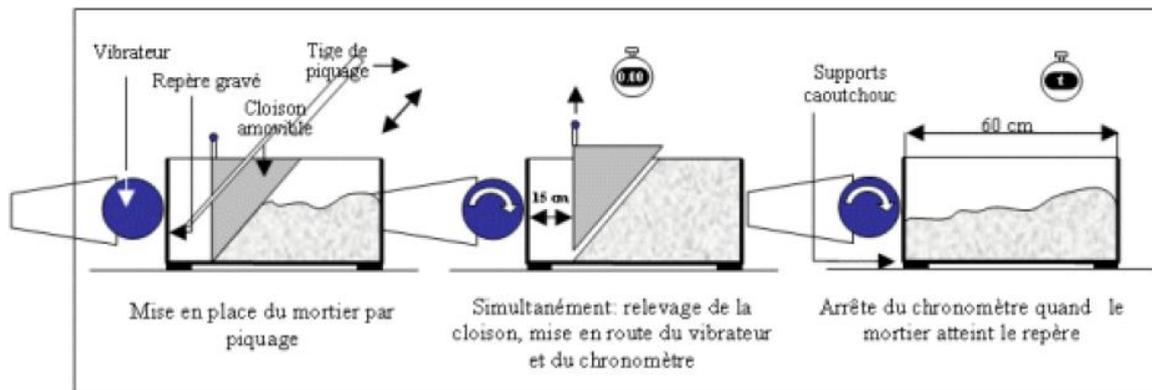


Figure 2. 3 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

c/ Le cône

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

2.3.5.2. Teneur en air

Tous les mortiers fabriqués en usine ou sur place sont entraînés par l'air. L'utilisation des entraîneurs d'air produit des mortiers avec des propriétés améliorées, en plus d'être beaucoup plus durables et résistants aux effets du gel et dégel. En effet, il n'est pas recommandé d'utiliser des mortiers d'enduit qui ne sont pas entraînés par l'air. Cette situation se reflète dans la normalisation britannique et européenne actuelle.

Appareil de mesure

Avec un appareillage spécifique, l'aéromètre (voir photo 2.4), on peut déterminer la teneur en air des mortiers selon la norme NF P18-353. Le principe est de remplir un volume déterminé de mortier. On met en pression le récipient hermétiquement. On met en contact les deux récipients et on accède directement à la valeur de la teneur en air occlus. La mesure de la teneur en air occlus s'effectuait juste après la fin du malaxage.



Photo 2. 4 : Aéromètre à mortier

2.3.5.3. La résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme BS EN 1015-11. Un mortier d'enduit très résistant est :

- imperméable.
- susceptible de se fissurer.
- son retrait de séchage est important.

Les mortiers d'enduits ayant une résistance inférieure sont moins susceptibles de se fissurer et de se craqueler

Le tableau 2.1 présente les catégories des mortiers selon leurs résistances à la compression selon la norme 998-2.

Tableau 2. 1 : Les catégories des mortiers selon leurs résistances à la compression selon la norme 998-2.

Catégorie	M1	M 2.5	M5	M10	M15	M20	Md
Résistance à la compression N/mm ²	1	2.5	5	10	15	20	d
D est une résistance à la compression supérieure à 25 N/mm ²							

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en oeuvre.
- Protection des premiers jours. [Bouali 2014]

2.3.5.4. Temps de prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur [Bouali 2014].

2.3.5.5. Retraits et gonflements

a/ Le Retrait

Les retraits se mesurent sur des prismes 4x4x16cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

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

b/ **Le gonflement**

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10mm).

2.3.5.6. Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou t/m³).

2.3.5.7. Masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou t/m³).

L'adhérence

2.3.5.8. Absorption capillaire

L'une des principales raisons de l'utilisation du mortier d'enduit est de limiter la pénétration de la pluie dans le tissu du bâtiment. La pénétration d'eau peut être un problème sérieux, car si l'eau gèle, la perte d'adhérence au substrat peut se développer. Le gel-dégel n'est pas l'unique problème du mortier, en effet, le gonflement ou le retrait, qui sont également reliés à la porosité capillaire, peuvent être à l'origine de fissures pouvant altérer la résistance du mortier, Dans des conditions d'exposition abritées et modérées, un enduit conforme aux exigences de la norme BS EN 998-1 avec une absorption d'eau capillaire de classe W / 1 ou W / 0 doit être utilisé. En présence de conditions d'exposition sévères, il convient d'utiliser un enduit conforme aux exigences de la norme BS EN 998-1 avec une absorption capillaire d'eau de classe W / 2.

L'absorption capillaire est mesurée selon la norme **NF EN 480-5**, Les échantillons présentant le plus grand nombre de pores sont ceux qui absorbent le plus d'eau. La vitesse d'ascension du front de capillarité varie selon la nature du mortier, car la vitesse de diffusion dépend de la

taille du nombre de pores, de leur connectivité, et de leur tortuosité. En effet, plus les pores sont tortueux, connectés, petits et nombreux et plus la diffusion est rapide rappelons que :

$$F_{\text{capillarité}} = 2\sigma \cos \alpha / r$$

Durant ce test, il est important de tenir compte de la section de l'échantillon en contact avec l'eau, car certains avaient une section de forme relativement complexe et il était donc difficile de déterminer avec certitude l'aire de la section. Pourtant, la quantité d'eau absorbée est inversement proportionnelle à la taille de la section [Bouali 2014]. En effet, l'absorption relative d'eau en fonction de la masse à sec M_0 et de la section S est donnée par la formule suivante :

$$\text{Absorption relative: } \delta = \frac{\Delta P}{S \cdot M_0}$$

2.3.5.9. Perméabilité à la vapeur d'eau

La norme BS EN 998-1 spécifie que la perméabilité à la vapeur d'eau doit être déterminée pour le mortier utilisé dans des situations externes. L'essai est effectué conformément aux exigences de la norme BS EN 1015-19 et détermine le passage de la vapeur d'eau à travers un échantillon dans des conditions standard.

2.3.5.10. Conductivité thermique

La majorité des mortiers de rendu ont peu d'effet direct sur la transmission thermique d'une paroi externe. Cela est dû au fait que seule une fine couche de matériau est appliquée et que la conductivité du mortier de rendu est relativement élevée.

Cependant, il est possible d'obtenir des mortiers d'isolation thermique qui ont des propriétés améliorées. BS EN 998-1 a créé une catégorie de mortier conçu intitulé mortier d'isolation thermique; ce matériau est en outre classé en deux classes T / 1 et T / 2 en fonction de leur conductivité thermique. L'enduit isolant thermique peut être appliqué dans des couches plus épaisses que les enduits normaux.

2.3.5.11. Résistance au feu et combustibilité

Le rendu extérieur cimentaire est classé comme incombustible lorsque la teneur en matière organique est inférieure à 1%. Lorsque la matière organique est supérieure à 1%, l'enduit doit être testé et classé conformément à la norme BS EN 13501-1. Un rendu contribue à la résistance au feu d'un mur, mais généralement aucune valeur distincte n'est calculée pour le système de rendu.

2.3.6. Durabilité des mortiers d'enduit

Pour assurer un mortier d'enduit durable, un certain nombre de facteurs doivent être pris en compte dans sa spécification

- La pénétration de la pluie et de l'humidité ascendante.
- Problèmes associés aux sels solubles.
- La corrosion du métal incorporé.
- Dommages dus à l'abrasion et aux chocs.
- Craquelures et fissures.

L'une des principales fonctions d'un rendu est d'aider à l'exclusion de l'eau. Si un enduit se fissure, l'eau de pluie peut pénétrer dans le système d'enduit et peut geler pendant les périodes de froid, provoquant une désintégration partielle de l'enduit. De plus, la pénétration de la pluie peut entraîner une défaillance de l'adhésif entre l'enduit et le substrat. Le rendu ne doit pas être appliqué sur des murs saturés car il y a un risque élevé qu'il se détache.

La bonne adhérence d'un enduit sur son support est fondamentale. Il est facile de la vérifier : un enduit décollé localement sonne « creux ». La non adhérence entraîne la détérioration de l'enduit qui se détachera par plaques. Les principaux défauts d'adhérence sont dus :

- à un support trop lisse ;
- à un béton brut de décoffrage, avec des traces d'huile de démoulage ou de produits de cure;
- à un support sale avec des dépôts de matière organique ou comportant des traces d'anciens enduits en plâtre; ce support ne sera pas neutre puisque le plâtre réagira ensuite sur le ciment du mortier pour donner des produits expansifs (sulfo-aluminate de chaux) ;
- à un support trop sec, qui n'a pas été suffisamment humidifié avant la projection de la première couche d'accrochage (gobetis) ;
- au mortier mal composé, appliqué trop tardivement (parfois remouillé, rebattu et dont la prise est commencée) ;
- à un mortier ayant un retrait excessif (surdosage en liant).[Cimbéton. pdf]

Les propriétés du support qui doivent être prises en compte incluent:

- **la résistance** Les supports rigides nécessitent généralement des mortiers relativement forts...
- **la Durabilité** Certains supports sont durables tandis que d'autres tels que le bois comptent sur le mortier pour assurer la durabilité.

• **Résistance à l'humidité:** De nombreux supports sont eux-mêmes résistants à l'humidité tandis que d'autres s'appuient sur le mortier pour avoir cette résistance. De plus, certains supports peuvent eux-mêmes être dégradés par les effets de la saturation.

2.3.7. Pathologies des mortiers

2.3.7.1. La fissuration

Lorsqu'un mortier est appliqué sur un support, la couche de mortier est soumise au retrait. La succion et la dessiccation sont des facteurs responsables du retrait. Pour une couche mince de 1 cm environ, ces deux facteurs en sont les causes premières. Or, ce retrait est gêné par l'adhérence au support, créant ainsi des contraintes dans la couche de mortier. Lorsque le retrait empêché est trop important, les contraintes internes deviennent plus grandes que la résistance en traction du mortier et gènèrent de la fissuration. La capacité de déformation du mortier est aussi à prendre en compte. Cette fissuration peut surgir au moment de la phase plastique du mortier ou dans les jours suivant la prise et le durcissement de ce dernier. La température, les conditions de cure, la vitesse du vent, la nature du ciment et des ajouts minéraux, le rapport E /C influencent ce phénomène de fissuration [Branch 2002], [Pigeon 2003].

Elle peut se décomposer en plusieurs types de fissures :

- le faïençage, fissuration de surface en forme de toile d'araignée,
- les microfissures mesurant moins de 0,2 mm d'ouverture,
- les fissures mesurant entre 0,2 et 2 mm de largeur,
- les lézardes supérieures à 2 mm.

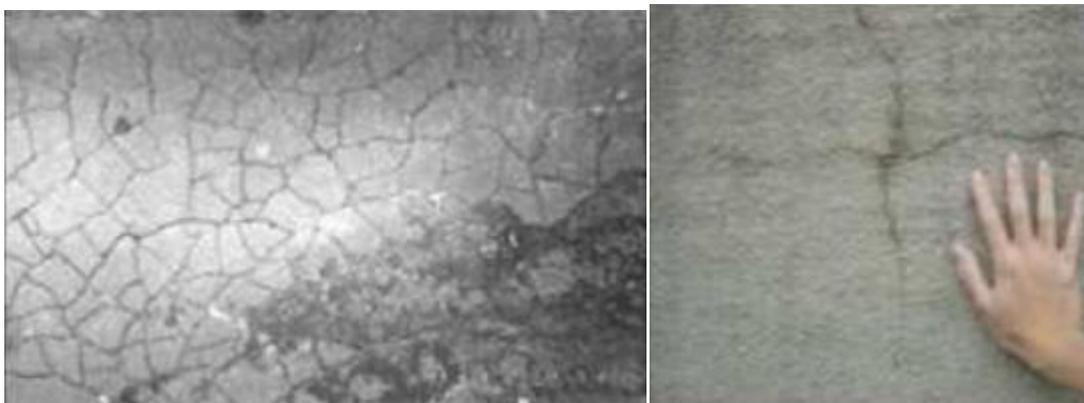


Photo 2. 5 : Faïençage de surface (à gauche) et fissuration de surface (à droite)

La cause de la fissuration peut être liée au support, dans ce cas on parle de fissuration structurelle, le problème provient du gros œuvre et du terrain et du fluage du béton. A l'origine des fissurations, les mauvaises conditions d'applications sont essentielles :

- un rapport E/C trop élevé augmente le retrait du mortier qui peut générer des microfissures. La quantité d'eau de gâchage doit être contrôlée, la teneur en liant ne doit pas être trop faible. Si l'enduit est appliqué en plusieurs passes, ces teneurs doivent être sensiblement les mêmes,
- le module élastique du produit ne doit pas être trop élevé. Un temps de malaxage insuffisant augmente le module élastique ce qui modifie sa déformabilité et sa capacité à résister aux contraintes internes,
- l'épaisseur de l'enduit trop importante peut provoquer un phénomène de tassement favorisant la fissuration,
- les variations d'épaisseurs de l'enduit dues à l'irrégularité du support génèrent des concentrations de contraintes favorisant la fissuration,
- le degré de saturation en eau du support conditionne le retrait, une humidification insuffisante du support provoque une dessiccation de l'enduit trop importante du fait de la succion du support,
- la présence de polluants comme les sulfates des matériaux à base de plâtre n'entraîne pas obligatoirement la formation d'espèces expansives mais perturbe l'hydratation de l'enduit,
- les conditions de cure influent sur le retrait, l'hydratation et donc les caractéristiques mécaniques du mortier. Une application par temps chaud et vent sec sont donc préjudiciables. Dans ce cas, une réhumidification de l'enduit est nécessaire,
- les chocs thermiques du fait de variations de température atteignant 50°C peuvent provoquer des déformations brutales de dimension et générer ainsi de la fissuration si notamment l'adhérence et les caractéristiques mécaniques de l'enduit sont faibles [Nicot 2008].

2.3.7.2. La perte d'adhérence

Elle est conditionnée par les mêmes facteurs que ceux décrits ci-dessus, auxquels on peut ajouter les suivants :

- la rugosité du support est un facteur important dans l'adhérence du mortier. Par exemple, des parois en béton banché trop lisses rendent difficile l'accrochage de l'enduit. L'absence d'une

couche d'accrochage (gobetis) ou de fixation (repiquage) du support peuvent nuire à l'adhérence,

- la présence de polluants comme l'huile de décoffrage ou la poussière peuvent empêcher l'établissement de l'adhésion par contact,

- le degré de saturation en eau du support, comme pour la fissuration, est important dans l'adhésion de l'enduit. Une humidification insuffisante de l'enduit provoque son grillage et au contraire, un support gorgé d'eau peut empêcher l'adhésion du mortier [Nicot 2008].

2.3.7.3. *Faiénçage*

Craquelure superficielle des peintures, vernis, enduits et bétons, sous forme de fins réseaux de microfissures de largeur inférieure à 0.2mm, disposées en mailles régulières fermées, de quelques cm de côté. Le faiénçage traduit un retrait superficiel trop important ou trop rapide (remontée de liant en surface, couche trop épaisse). Contrairement aux fissures, qui affectent les matériaux dans toute leur épaisseur, les faiénçages n'ont qu'un inconvénient esthétique.

(NB: Sur un béton ou un enduit de ciment, un faiénçage est mis en évidence en mouillant la surface).

2.3.7.4. *Efflorescences au séchage*

Elles résultent de la formation d'un dépôt cristallin blanchâtre à la surface des enduits à base de liants calciques ou hydrauliques. Il s'agit le plus souvent de carbonatation (formation de cristaux de carbonate de chaux) de la chaux libre (soluble dans l'eau) qui, au lieu de s'effectuer à l'intérieur de l'enduit se produit à la surface. Ce phénomène apparaît surtout lorsque l'enduit est appliqué par temps froid et humide. Le temps de séchage plus long du fait des conditions atmosphériques permet à la chaux, en solution dans l'eau de gâchage en excès, de migrer jusqu'à la surface de l'enduit.

Si ce phénomène est très gênant, il peut être atténué par un lavage à l'eau acidulée (10 % d'acide chlorhydrique) ou à l'aide de produits destinés à cet usage, accompagnés d'un brossage et suivis d'un ou plusieurs rinçages [Kadjile 2010].

2.3.7.5. *Carbonatation différentielle à long terme*

Des différences de teintes peuvent également se produire à long terme sur un enduit soumis à des conditions d'exposition différentes (parties protégées de la pluie par un balcon, une avancée, des volets toujours ouverts ou au contraire soumises à des ruissellements abondants par absence de gouttières...).

Du fait des cycles "humidification-séchage" auxquels sont soumises les parties les plus exposées, le même phénomène de migration de chaux libre et de carbonatation en surface se produit, provoquant l'éclaircissement de la teinte de l'enduit [**Kadjile 2010**].

2.3.7.6. Pénétration d'eau et décollement

En l'absence de fissures, les pénétrations d'eau par porosité de l'enduit sont rares et essentiellement dues à des épaisseurs de recouvrement du support insuffisantes. Un bon serrage de l'enduit (sous couche) améliore dans tous les cas son comportement.

Le décollement de l'enduit est généralement consécutif à une préparation mal adaptée du support ou à l'application d'un enduit inadapté à son support :

- Présence d'huiles de démoulage ou de poussières ;
- Support peint non décapé ou enduit en place pas assez performant et insuffisamment décroûté ;
- Humidification insuffisante du support ou support gorgé d'eau ;
- Absence de couche d'accrochage ou de fixation du support si l'enduit le nécessite. (ex : résine d'accrochage latex sur support béton) ;

2.3.7.7. Brûlage ou grillage de l'enduit

Ce terme traduit un séchage trop rapide de l'enduit soit par absorption d'eau du support, soit par évaporation du fait des conditions atmosphériques (temps chaud, vent sec) et qui se caractérise généralement par un poudrage de l'enduit en surface ou par une mauvaise adhérence au support. Une ré-humidification de l'enduit dans les jours qui suivent l'application (pendant 2 à 3 jours) permet de limiter cette déshydratation trop rapide. Ce phénomène est d'autant plus sensible que l'épaisseur d'application est faible [**Kadjile 2010**].

2.3.8. Causes de désordre des mortiers

Les principales causes de pathologie des mortiers sont les suivants [**Thuhien 2011**]:

2.3.8.1. Formulations inadéquates

Erreur dans le dosage des constituants, soit un mal choix des composants.

2.3.8.2. Mauvaise application sur le site

Excès d'eau, application Conditions climatiques très défavorables, inexistence ou insuffisance guérison, etc.

2.3.8.3. Anomalies de support ou autres éléments en contact

Fissuration déformation excessive du support, principalement dans le cas de déformations différentielles entre zones d'un même support, capillarité d'eau à travers le support, oxydation des éléments contacts métalliques, etc.

2.3.8.4. Causes exceptionnelles

Accidents brutes dans le support (accident de voiture), un vent étrangement fort...etc

2.3.8.5. Vieillessement naturel dû à l'âge ou à l'exposition aux conditions particulièrement agressif

Par exemple environnement salin, pollution, conditions météorologiques agressives, conditions de formation de glace ou grandes amplitudes thermiques et vent fort.

2.4. Remèdes et solutions

Pour remédier a tout ces désordres il faut bien maitriser la cause essentiel par un diagnostic bien détaillé, le mortier d'enduit est le mortier qui enveloppe et protège la construction certes mais les dégradations internes peuvent nuire à la durabilité de ce mortier le tableau suivant montre quelque solution pour remédier à la pathologie liées aux mortiers d'enduit.

Tableau 2. 2 : pathologies et solutions des vieux enduits [Weber 2008].

Le bâti ancien est déformé, et l'enduit risque de fissurer.	L'utilisation de liants faiblement hydrauliques (ciment, chaux) ou aériens, permet de développer des caractéristiques mécaniques progressives, limitant ainsi le risque de fissuration.
Le bâti est sensible aux remontées capillaires. Si l'enduit est poreux, des traces diverses risquent d'apparaître (ex. : auréoles, spectres, etc.).	L'enduit doit être perméable à la vapeur d'eau venant de l'intérieur des bâtiments et freiner la pénétration des eaux de pluie, tout en évacuant les eaux contenues dans les murs. On dit que l'enduit laisse respirer les anciens supports : cela évite l'apparition de taches d'humidité sur l'enduit, dû soit à une absorption rapide de l'eau soit aux efflorescences ou au salpêtre.
L'enduit est décollé et n'adhère plus au support.	L'adhérence au support s'exerce par l'accrochage mécanique de la première couche. L'adhérence doit être durable et l'enduit doit avoir des caractéristiques mécaniques

L'enduit	compatibles avec celles du support (un enduit dur ne sera pas compatible avec un support tendre) : cela évite que l'enduit se décolle en plaques, gonfle ou cloque (on dit que l'enduit "sonne le creux") et arrache donc le support.
L'enduit est peu résistant, non cohésif, et a perdu de sa dureté.	La surface des enduits doit résister à des sollicitations diverses (ex. : frottements et chocs, lessivage et entraînement de matières par des eaux de pluie, chocs thermiques, gel agressif). L'enduit doit présenter le plus rapidement possible un minimum de cohésion pour résister à ces sollicitations. Un enduit uniquement à base de chaux ne répond pas à cette exigence : une bonne composition du mortier évite la décohé- sion de l'enduit.

2.5. Travaux antérieurs

Velosa et al [Velosa et al, 2009] ont étudié l'influence de la composition chimique et minéralogique du métakaolin sur les caractéristiques du mortier. Le métakaolin issu des trois lots différents a été incorporé dans des mortiers de chaux afin de produire une réaction pouzzolanique et ainsi leur permettre de durcir dans des conditions d'humidité relative élevée. Ils ont noté que les mortiers utilisant du métakaolin plus riche en Al_2O_3 (étant également plus pauvres en alcalis) ont montré de meilleurs résultats mécaniques.

Patural et al [Patural et al, 2010] ont étudié l'influence des éthers de cellulose sur la rétention d'eau et la consistance des mortiers à base de ciment. Ils ont constaté que les EC ont un effet épaississant pour une teneur de 0,27% en poids. Leurs résultats ont démontré que le poids moléculaire est crucial pour contrôler la rétention d'eau et la consistance du mortier. Il a été noté que, comme le poids moléculaire augmentait, la limite d'élasticité diminuait, la consistance augmentait et la rétention d'eau était améliorée.

Ozerkan et al [Ozerkan et al, 2013] ont évalué les performances du mortier de ciment renforcé avec des pourcentages variables de fibres de palmier dattier traitées afin d'évaluer leur faisabilité pour des applications structurelles et non structurelles. Ils ont trouvé que l'inclusion de fibres de palme traitées dans des mortiers de ciment améliore les résistances à la flexion et la durabilité. Cependant, ces avantages se traduisent par un compromis sous la

forme d'une perte initiale de maniabilité et de faibles résistances à la compression subséquentes.

Andrejkovicová et al [Andrejkovicová et al, 2015] ont étudié le comportement des mortiers à base de chaux, en cherchant leur application en tant que mortier de réparation sur des murs d'adobe. En raison de la spécificité du support, deux argiles, la bentonite naturelle (5%) et l'argile artificielle metakaolin (20%) ont été utilisées comme additif au mortier de chaux pour préparer 3 types de mortiers, outre la chaux aérienne pour le mortier de référence. Les résultats obtenus par comparaison des caractéristiques de toutes les procédures expérimentales révèlent que le mortier contenant de la chaux aérienne et 5% en poids de bentonite remplit au mieux les exigences de son utilisation comme enduit de bâtiments adobe

2.6. Conclusion

La performance à long terme des bâtiments historiques peut être affectée par de nombreux facteurs, dont certains sont plus apparents sur les surfaces des façades dégradées.

Le mortier est le matériau le plus ancien utilisé, en supposant une grande diversité de fonctions. Dans les bâtis anciens, avant l'apparition du béton armé, les mortiers étaient l'un des constituants de la maçonnerie structurelle, avec des exigences de résistance mécanique et de durabilité.

Actuellement encore utilisés dans l'exécution des murs de maçonnerie, connexion de briques ou de blocs, mais aujourd'hui avec plus de exigences et de paramètres.

Le rôle des mortiers d'enduit et de protéger les constructions des différentes dégradations, telles que les attaques chimiques, les changements climatiques, ainsi que les dégradations internes des bétons telles que la carbonatation et la corrosion des armatures

Ce chapitre a expliqué les différentes causes de dégradations des ouvrages en béton armé et en maçonnerie, il a présenté les différents types de mortiers et leurs rôles dans les constructions, il a montré les exigences des mortiers de réparation ainsi que leurs pathologies et les remèdes à suivre pour minimiser les désordres des mortiers d'enduit.

CHAPITRE 3 :

Etude de l'influence des additions minérales et des fibres sur les mortiers

3.1. Introduction

L'incorporation des ajouts minéraux et des fibres est maintenant une technique importante pour améliorer de certaines propriétés du mortier telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement reliée avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

La compatibilité entre les différents constituants des ciments nécessite certes de prendre en compte tous les paramètres susceptibles d'influer son comportement. Cela nécessite un très grand nombre d'essais qu'il nous est impossible d'étudier tous à la fois, de ce fait on s'est limité aux paramètres d'étude suivants :

- **Influence de la nature des additions sur les performances des mortiers.**
- **Influence du taux des additions sur les performances des mortiers.**
- **Influence de l'incorporation des fibres de carbone sur le comportement des mortiers.**

Dans un premier temps nous allons présenter les caractéristiques et les propriétés des constituants utilisés pour la préparation des mortiers confectionnés conformément aux normes recommandées, il s'agit du ciment (C), de la fumée de silice (FS), de la pouzzolane (PZ), des laitiers (L), de fillers calcaires (FCL) de fibres de carbone (FC), de sable (S), du superplastifiant (Sp) et de l'eau (E).

Nous présentons par la suite le mode expérimental ainsi que le matériel utilisé pour la caractérisation des mortiers à l'état frais et durci suivi des résultats obtenus.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement les performances des mortiers ainsi confectionnés.

3.2. Justification du choix des matériaux de base

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude expérimentale est un ciment de type CEM I 42,5 N. Ce ciment provient de la cimenterie de SOTACIB/ EL KAIRAOUAN, TUNISIE. Le CEM I 42,5 N est un Ciment Portland pur, il ne comporte aucune addition. Nous avons choisi ce type de ciment pour déterminer l'influence exacte de chaque addition.

- Caractéristique du ciment CEM I 42,5 N

CEM I 42,5 N est utilisé pour la réalisation de bétons et de mortiers dans les domaines du bâtiment et génie civil. Il répond à toutes les exigences de la norme SN EN 197-1

Tableau 3. 1: Composition et exigences selon la norme SN EN 197-1

Type de ciment	Clinker de ciment portland	Constituants secondaires	La masse volumique absolue	La surface spécifique
CEM I 42,5 N	95 – 100 %	0 – 5 %	3200 Kg/m ³	2900 cm ² /g

Tableau 3. 2: Composition chimique et minéralogique du ciment CEMI 42.5 N

Composition chimique (%)									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O	PF
CEM I	20.01	2.97	4.65	64.01	0.62	2.15	0.015	0.24	4.34
Composition minéralogique (Bogue)									
Phases	C3S		C2S		C3A		C4AF		
% massique	61.28		15.90		7.99		9.64		

3.2.2 Additions

En ce qui concerne les additions minérales, nous avons souhaité, en premier lieu, comparer des additions différentes de manière à disposer l'adéquation entre les différents constituants des ciments. Ce choix a permis de mettre en exergue son influence sur les performances des mortiers. Ainsi, quatre additions le filler calcaire (FC), fumé de silice (FS), laitier (L) et la pouzzolane (P) ont été étudiées comparativement à un mortier normal (témoin). L'utilisation des additions calcaires dans le béton a pour objectif de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou coproduits industriels disponibles en Algérie. De ce fait, les additions calcaires, les laitiers et les pouzzolanes choisies pour l'étude sont courantes en Algérie, de faible coût, et sont déjà utilisées comme ajouts au ciment composé CEM II dans les différentes cimenteries du pays. Une addition de fumé de silice, a été incluse dans l'étude pour mettre en évidence

une éventuelle différence de comportement des matériaux cimentaires et comparer les résultats obtenus avec les travaux de recherche nationaux et internationaux.

➤ **Les Fumés de silice (FS)**

La fumée de silice utilisée pour la confection des mortiers SIKA S95 DM se présente sous forme de poudre fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium, de couleur grise. Elle est caractérisée par une surface spécifique élevée, une teneur en silice (SiO₂) de l'ordre de 95%. Ces différentes caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-après

Tableau 3. 3 : Caractéristiques de la fumée de silice.

Composition chimique de la fumée de silice							
Élément	SiO ₂	Si	C	S	Na ₂ O	Cl ⁻	Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)
%	95	1.50	1.50	0.10	0.60	0.06	1
Caractéristiques physiques de la fumée de silice							
Désignation	Surface spécifique (m ² /g)		Masse volumique réelle (g/cm ³)		Masse volumique apparente (g/cm ³)		
Valeurs	23		2.24		0.4 à 0.45		

➤ **Les fillers calcaires (FCL)**

Les filler calcaires proviennent de la carrière géante (ENG) de l'est Algérien ils sont soumis à la norme NF P 18 508, et obtenus par broyage et sélection, provenant de gisement de roche calcaire.

L'addition calcaire est obtenue par broyage poussé d'une même roche calcaire. La masse volumique réelle du filler calcaire est de 2600 Kg/m³ et sa surface spécifique de Blaine de 3460 cm²/g. La composition chimique est présentée au tableau 3.4.

Tableau 3.4 propriétés chimiques des fillers calcaires

Composition chimique							
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	MgO	SO ₃	NaCl	Al ₂ O ₃	PF
0.06	0.02	55.85	0.06	0.07	0.56	0.06	43.80

➤ **Les Laitiers de hauts fourneaux (L)**

Le laitier granulé utilisé dans cette étude a été fourni par le complexe sidérurgique d'El Hadjar situé à Annaba. Il a la forme d'un sable de granulométrie 0/3, de couleur claire, de masse volumique apparente de 1 g/cm³, de masse volumique absolue de 2.9 g/cm³ et la surface spécifique est de 2000 cm²/g. Les valeurs portées sur le tableau 3.5, relatif à sa composition chimique, indique une teneur importante de silice.

Tableau 3.5 Composition chimique du laitier d'El Hadjar

Composition chimique							
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
%	38.89	7.07	4.09	40.71	4.56	0.04	0.72

➤ **Les Pouzzolanes naturelles (PZ)**

La pouzzolane est une roche volcanique produite lors du refroidissement des matériaux volcaniques ou du magma. La roche qui en résulte est de couleur marron-sombre, à structure alvéolaire. Les gisements de pouzzolanes se trouvent dans la région de Béni-Saf (Wilaya de Ain-Temouchent). Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 6 : Composition chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane.

Composition chimique de la pouzzolane										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	PF
%	46.83	17.45	8.36	9.38	3.88	0.36	4.32	1.4	0.03	4.79
Caractéristiques physiques de la pouzzolane										
Désignation	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)		Masse volumique absolue (g/cm ³)			Masse volumique apparente (g/cm ³)				
Valeurs	3192		2.68			0.98				

3.2.3 Les fibres de carbone (FC)

Ces fibres proviennent de l'Espagne. Les différents composants de ces fibres ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du mortier, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques des fibres de carbone sont présentées dans le tableau 3.7, et les fibres utilisées sont représentées sur la photo 3.1.

Tableau 3. 7 : Composition chimique et les caractéristiques physiques des fibres de carbone

Composition chimique de la fibre de carbone					
Carbone		Azote		Oxygène	
90 %		8 %		1 %	
Hydrogène					
moins de 1 %					
Caractéristiques physiques de Fibre de carbone					
Longueur	Diamètre	Orientation	Couleur	Pourcentage	Masse volumique apparente (g/cm ³)
2cm	2mm	Forfaitaire	Noir	0.5%.	0.8



Photo 3. 1 : Les fibres de carbone utilisées.

3.2.4 Le Superplastifiant

Pour réaliser l'objectif de cette étude, nous avons procédé aux travaux de recherche en choisissant un adjuvant, conforme à la norme EN 934-2, ce qui permettra de juger de l'influence de l'adjuvant sur les performances des matériaux cimentaires.

Un adjuvant SP haut réducteur d'eau MEDAPLAST SP40, produit par Granitex Algérie. Plage de dosage recommandée : 1% du poids de ciment.

Les principales caractéristiques de l'adjuvant utilisé sont récapitulées dans le tableau 3.8.

Tableau 3. 8 : Caractéristiques de l'adjuvant SP

Caractéristiques	Forme	Couleur	Densité	PH	Teneur Cl-	Extrait sec
MEDAPLAST SP40	liquide	Marron	1.20±0.01	8,2	1 g/l	40%

3.2.5 Sable

Le sable utilisé est un granulat fin de classe granulaire s'étendant entre 0 et 4 mm. C'est un produit, de la carrière ENG (Entreprise Nationale des Granulats, unité d'El khroub), résultant du concassage de roche d'une pétrographie calcaire massif.

Ce sable présente une masse volumique apparente de $1,46 \text{ t/m}^3$, une masse volumique absolue de $2,6 \text{ t/m}^3$, un équivalent de sable de 69% et un module de finesse de 3.4.

- **Analyse Granulométrique du sable**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P18-560 EN 933-2.

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 4mm et inférieures à 0.063 mm avec le passage de sable sur les tamis (4 mm et 0.063 mm).

Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé sont représentés dans le tableau 3.9 et la courbe granulométrique est présente dans la Figure 3.1.

Tableau 3. 9 : Résultats d'analyse granulométrique du sable

Ouverture des tamis en millimètre	Masse des refus cumulés (Ri) en g	refus cumulés %	cumulés de tamisât %
4	0.00	0.00	100
2	228.2	19.46	80.54
1	491.6	41.94	58.05
0.500	665.6	56.78	43.22
0.250	793.8	67.72	32.29
0.125	875.7	74.71	25.29
0.063	935.5	79.81	20.18

- Masse sèche totale : $M1 = 1172.1$
- Masse sèche après lavage : $M2 = 940.8$
- Masse sèche des fines retiré après lavage : $M1 - M2 = 231.3$
- Le module de finesse MF est défini par : $Mf = \sum Rc / 100$

$\sum Rc$: La somme des pourcentages des refus cumulés ramené à l'unité pour les tamis d'ouverture (0.063-0.125-0.250-0.500-1-2-4) en mm.

Dans notre cas : $Mf = (19.46 + 41.94 + 56.78 + 67.72 + 74.71 + 79.81) / 100 = 3.40$ donc un sable moyen.

La courbe granulométrique du sable utilisé est présente dans la Figure 3.1.

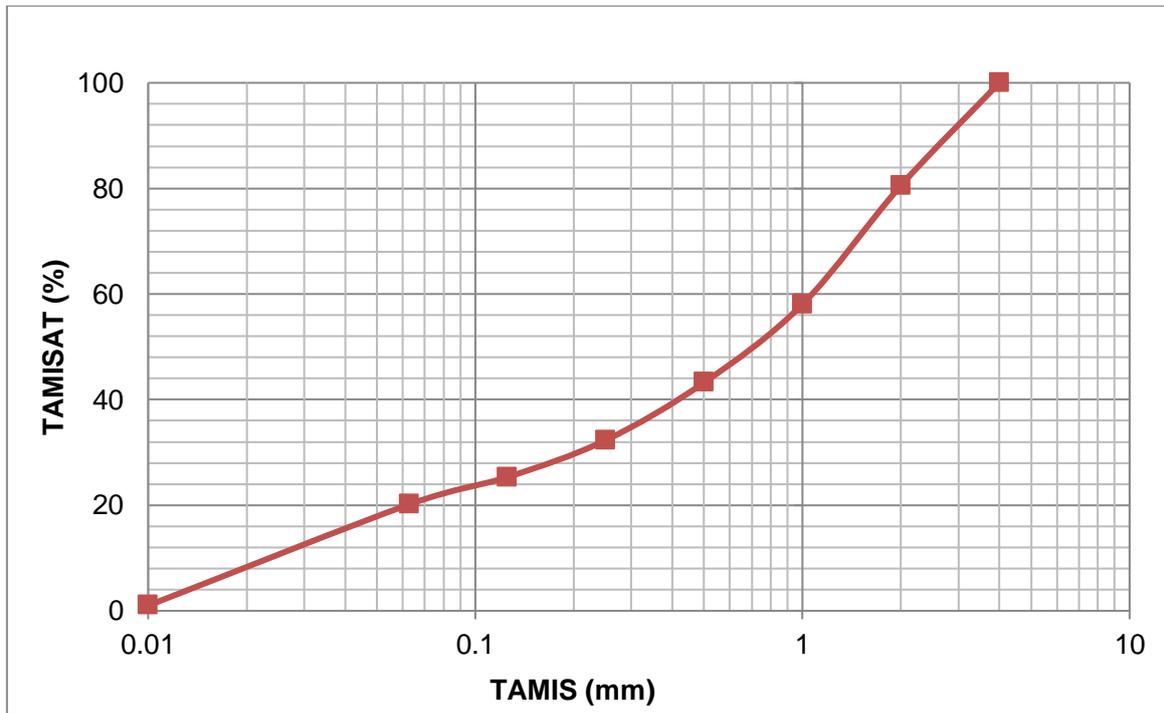


Figure 3. 1: Courbe granulométrique du sable

D'après l'analyse granulométrique par tamisage représentée à la figure 3.1, on note que le sable utilisé est moyen à granulométrie étalée et qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons et mortiers ordinaires.

3.2.6 Eau

Pour les essais de référence, il faut utiliser de l'eau distillée selon la norme EN 196-1, Mais L'eau de gâchage utilisée dans notre recherche provient du robinet. Sa température est comprise entre 18 et 22⁰C. L'analyse chimique de l'eau représentée dans le tableau 3.10 montre qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes NF P18-404 en matière de béton.

Tableau 3. 10 : Composition chimique de l'eau (mg/l).

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₂	NO ₃	Insoluble	PH
116	36	80	3	140	170	305	5	786	7.9

3.3 Essais et procédures des mortiers élaborés

3.3.1 Maniabilité

La maniabilité des mortiers est mesurée au maniabilimètre LCL à mortier (photo 3.2), conformément à la norme **NFP 18-437**. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grand que la consistance du mortier est épaisse.



Photo 3. 2 : Appareil du Maniabilimètre LCL

L'appareil utilisé est appelé maniabilimètre (figure 3.2). Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (60 cm x 30 cm x 30cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier.

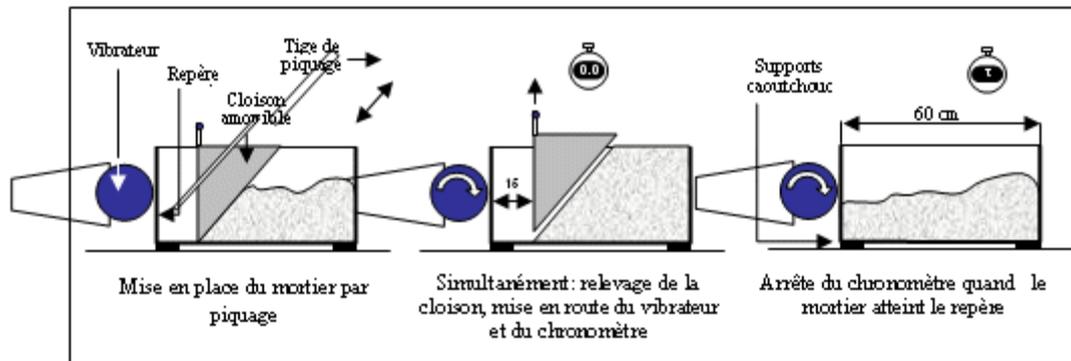


Figure 3. 2 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 4 couches. 4 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).

3.3.2 Masse volumique à l'état frais

La masse volumique « ρ » des mortiers, mis en place à la table à chocs, est mesurée par différence de pesées selon la norme NF EN 196-1 (Photo 3.4).

Les mortiers sont préparés dans des moules 4x4x16 cm. Les moules vides et pleins sont pesés. La masse volumique « ρ » est déduite. Chaque résultat est la moyenne de 3 mesures.



Photo 3. 4 : Essai de la masse volumique

3.3.3 Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression du mortier a été effectuée selon la norme NF P18-406. Les résultats obtenus à différents échéances représentent la moyenne de trois échantillons.

Les mesures se font sur des éprouvettes de mortiers 4x4x16 cm démoulées à un jour et conservées dans l'air libre jusqu'au moment de l'essai. Les essais mécaniques normalisés ont été réalisés aux échéances de 3, 7, 14, 28, 90 et 180 jours de façon à observer l'évolution progressive des performances. Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux de compression. Chaque résistance à la compression correspond à la moyenne de six mesures.

- **Démarche de l'essai**

- Essayer les demi-prismes en compression sur les faces latérales de moulage à l'aide de l'appareil normalisé.
- Centrer chaque demi prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0.5\text{mm}$ près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

La presse utilisé (Photo 3.5) pour ces essais a une capacité de 2000 KN et la vitesse de chargement est fixée à 5 KN/S soit 0,5 MPa/S (conformément à la norme NFP 18-406 et aux recommandations CPC4 de la RILEM). La presse est pilotée en effort.



Photo 3. 5: Dispositif de charge en compression pour les éprouvettes de mortiers.

3.3.4 Résistance à la traction par flexion

Les essais sont conduits conformément à la norme NF P18-407. Les éprouvettes soumises à cet essai sont des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points (Photo 3.6).



Photo 3. 6 : Dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers

- **Méthodologie d'essais**

Comme dans toute tentative d'explication de phénomènes physico-chimiques ou mécaniques, il est indispensable de préciser les conditions environnementales à savoir l'appareillage utilisé et la méthodologie empruntée.

En effet, ces deux variables influent sur les résultats trouvés et permettent de juger de la fiabilité de ces derniers, en comparaison avec d'autres essais réalisés dans les mêmes conditions. C'est ainsi qu'une valeur de résistance mécanique n'aurait pas de sens si les

conditions d'essais ne sont pas précisées, puisqu'un matériau n'a finalement pas de résistance intrinsèque.

A cet égard, le mode de préparation des mortiers, les conditions de mûrissement, les types de presses, la taille des éprouvettes testées et d'autres paramètres encore, sont autant d'éléments qui peuvent expliquer des écarts de valeurs, voire des divergences.

Il s'agit pour la plupart de matériels utilisés dans les laboratoires classiques de recherche, d'étude ou de contrôle. L'avantage de ce matériel simple est de permettre la reproductivité et la répétabilité des essais.

A noter que les étendues des mesures (sur trois échantillons au minimum) sont quasiment dépendantes du mode de confection des mélanges.

Car la norme NF P18-444 stipule que les résultats d'un prélèvement (3 éprouvettes minimum) ne sont exploitables dans le cadre d'un contrôle, que si l'étendue des résistances ($R_{\max} - R_{\min}$) est inférieure ou égale à 4 MPa, selon ce critère certains résultats d'essais ne seraient pas valables; en fait ils confirment l'hétérogénéité des mélanges concernés.

Il n'est pas légitime de donner trop d'importance à des résultats obtenus sur une seule mesure. Car la doctrine en particulier française, relative aux essais impose de raisonner sur la moyenne de trois mesures, correspondant au même prélèvement.

On peut simplement constater l'absence d'anomalie majeure sur la corrélation des résultats sachant en outre que des essais sont par nature même, plus dispersés que d'autres.

3.4 Normes

Les travaux et les manipulations de laboratoire ont été réalisés suivant les exigences des normes suivantes (Tableau 3.11) :

Tableau 3. 11 : Les normes des travaux et les manipulations de laboratoire.

EN 196-6	Surface spécifique de Blaine
EN196	Les densités des ciments et des fillers
NF EN 196-1	Masse volumique
NF P15-402	Préparation et la confection des éprouvettes de mortier
NF P18-437	Essais de maniabilité au maniabilimètre LCL

NF P18-403	Malaxage de mortier
NF P18-404	Eau de gâchage pour béton
NF P-18-406	Résistance à la compression
NF P18-407	Résistance à la traction par flexion
NF P18-444	Prélèvement des échantillons

3.5 Programme expérimental

Nous envisageons dans cette recherche de travailler sur l'interaction des différents composants. Nous abordons le problème par analogie avec les très nombreuses études menées sur le même domaine d'intérêt.

D'une part, on étudie l'effet de la substitution d'une partie du ciment par les additions (fumé de silice, fillers calcaire, laitier et pouzzolanes) sur les performances des mortiers. Et d'autre part l'introduction de fibres de carbone, On évalue au cours de cette étape les propriétés des mortiers à l'état frais et durcis

Les paramètres retenus sont :

a. Influence de la nature des additions

Quatre types d'additions ont été utilisés les fillers calcaires, les laitiers de haut Fournaux, la fumée de silice et les pouzzolanes, nous avons souhaité, en premier lieu, comparer des additions différentes de manière à disposer l'adéquation entre les différents constituants des ciments.

Ce choix a permis de mettre en exergue son influence sur les performances des mortiers. Ainsi, ils ont été étudiés comparativement à un mortier normal. L'utilisation des additions dans le béton a pour objectif de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou coproduits industriels disponibles en Algérie.

De ce fait, la pouzzolane naturelle, les fillers calcaires, les laitiers de haut Fournaux choisie pour l'étude sont courantes en Algérie, de faible coût, et déjà utilisée comme ajout aux ciments composés dans les différentes cimenteries du pays. Une addition de fumée de silice,

provenant de l'importation a été incluse dans l'étude pour mettre en évidence selon les cas, l'action favorable ou défavorable de ces additions.

Les additions minérales choisies, d'une part, en fonction de leur fréquence d'utilisation réelle dans l'industrie bétonnière et, d'autre part, de façon à ce que leurs propriétés physico-chimiques, supposées influencer les paramètres rhéologiques des suspensions.

b. Influence du pourcentage des additions substitué au ciment (en poids)

Quatre pourcentages de substitution ont été retenus : 0%, 5%, 10% et 15%. Il est intéressant de remarquer que les meilleures performances sont obtenues pour une valeur optimale entre 10% et 15% qui permettent l'obtention des résistances les plus élevées. Résultats en accord avec les travaux antérieurs rapportés dans la littérature, ce qui justifie notre choix. D'autre part, il est important de noter que dans la majorité des études publiées et conformément aux textes normatifs, les additions minérales ont été introduites dans les mélanges en substitution massique du ciment.

c. Influence de la combinaison addition/fibre

En ce qui concerne l'addition, Un seul taux de substitution a été retenu (10%), et deux additions ont été choisies (la fumée de silice et la pouzzolane). Pour l'ajout de fibre un taux de 0,5% de fibres de carbone a été incorporé.

- 10% FS + 0.5% FC.
- 10% PZ +0,5 FC

La combinaison de l'ensemble de ces configurations expérimentales a conduit à la confection de 15 formulations de mortiers.

3.6 Formulation des mélanges

Le mortier témoin, confectionné selon la norme NF EN 196-1, est constitué, en masse, d'une part de ciment et 3 parts de sable avec un rapport de E/C fixe égale à 0.5.

Les mortiers avec additions sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de ciment par l'addition minérale, les quantités de sable, d'eau et du plastifiant restant inchangées.

En fixant la quantité d'eau, l'effet réducteur d'eau de certaines additions n'est pas mis à profit mais cette approche permet de réduire le nombre de paramètres variant simultanément. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé à quantité d'eau constante et non pas à maniabilité. Les taux de substitution massiques étudiés sont 0, 5, 10 et 15 %.

Les différentes proportions des formulations des mortiers ayant les paramètres retenus sont présentées dans le tableau 3.12.

Tableau 3. 4 : Composition des mortiers

Compositions	Sable (g)	Ciment (g)	Addition (g)	FC (g)	SP (g)	E/L
Témoin	3000	1000	0	-	30	0.5
FS 5%	3000	950	50	-	30	0.5
FS 10%		900	100			
FS 15%		850	150			
PZ 5%	3000	950	50	-	30	0.5
PZ 10%		900	100			
PZ 15%		850	150			
FCL5%	3000	950	50	-	30	0.5
FCL10%		900	100			
FCL15%		850	150			
L5%	3000	950	50	-	30	0.5
L10%		900	100			
L15%		850	150			
FS+FC	3000	895	100	5	30	0.5
PZ+FC						

Nous avons réalisé des combinaisons de paramètres cités ci-dessus afin d'étudier l'effet de la substitution d'une partie du ciment par une addition sur les performances, et d'évaluer leurs caractéristiques dans le cas d'un ajout de fibres de carbone.

3.7 Confection des éprouvettes

3.7.1 Gâchage

La préparation des mortiers et la confection des éprouvettes sont effectués selon la norme NF P15-402. Le malaxage a été effectué selon la norme NF P18-403.

Cette norme régit la préparation des masses de mortier confectionnées dans un malaxeur planétaire de 5 litres de capacité. Les éprouvettes de 4x4x16 cm sont mises en œuvre sur une table à chocs de 60 coups.

Les mélanges avec additions sont obtenus en substitutions massique de ciment, la quantité de sable reste inchangée.

3.7.2 Procédure de malaxage

Tous les mélanges sont confectionnés selon les recommandations usuelles. Le même principe a été respecté pour l'ensemble de formulations des mélanges.

L'ordre d'introduction des composants et les séquences de malaxage sont les suivants:

- Introduction des éléments (sable, ciment, addition) et malaxage pendant 1 min.
- Introduction de l'eau et des adjuvants et poursuite de malaxage pendant 5 min

Les moules ont été remplis en trois couches d'épaisseurs égales et consolidés par vibration. Les surfaces ont été finies à l'aide d'un pilant et couvertes par des plaques rigides en plastiques pour éviter l'évaporation de l'eau. Tous les moules étaient enduits d'huile à l'avance.

3.7.3 Prélèvement et cure des échantillons

Les mesures se font sur des éprouvettes de mortiers normal 4x4x16 cm démoulées à un jour et conservées dans l'air libre jusqu'au moment de l'essai.

Le démoulage est effectué à 24 heures, toutes les éprouvettes confectionnées ont été couvertes par un film en plastique afin d'éviter les risques d'évaporation d'eau. Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et placées dans le mode de conservation à l'air ($T = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 60 \pm 5\%$).

3.8 Résultats et discussions

3.8.1 Effets des additions sur les performances des mortiers - A l'état frais

3.8.1.1 Masse volumique

Les masses volumiques des différents mélanges contenant différents pourcentages des additions présentées dans les sections suivantes. D'après l'essai effectué la masse volumique du mortier témoin était de 2129.1 kg/m^3 .

a. Fumé de silice

Pour la fumée de silice la variation des masses volumiques des mortiers en fonction du taux de dosage en fumée de silice est illustrée dans la figure 3.3.

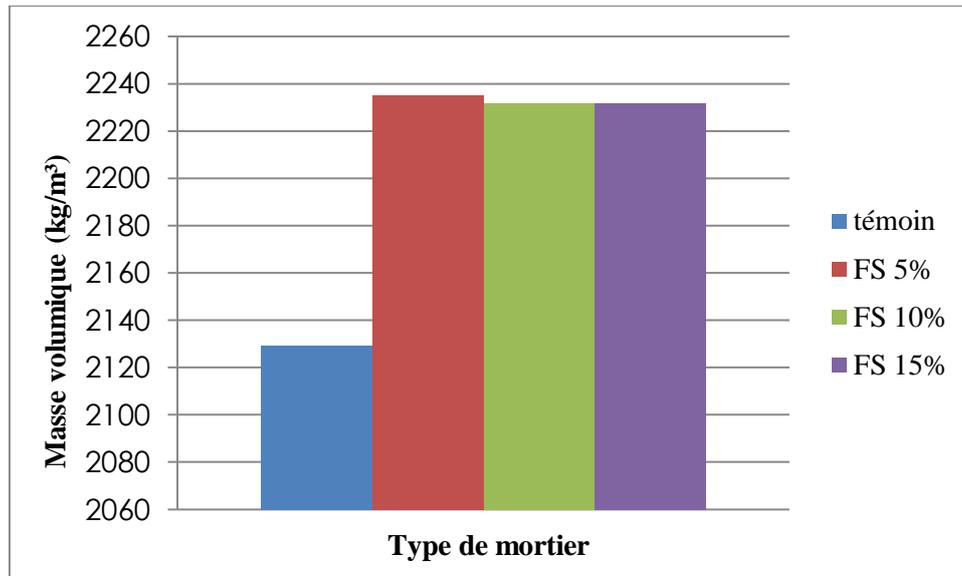


Figure 3. 3 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en fumée de silice.

D'après la figure 3.3 la fumée de silice a un effet important sur la masse volumique du témoin d'un taux de 5% la masse a augmentée de 4.59 % au-delà de 5% cette valeur est resté constante avec une chute de 0.13%. L'addition de FS conduit à une réduction de la porosité de la zone de transition entre la matrice et les granulats dans le béton frais [Amouri 2009].

b. Pouzzolanes

La figure 3.4 illustre les variations des masses volumiques des mortiers en fonction du taux de dosage en pouzzolanes.

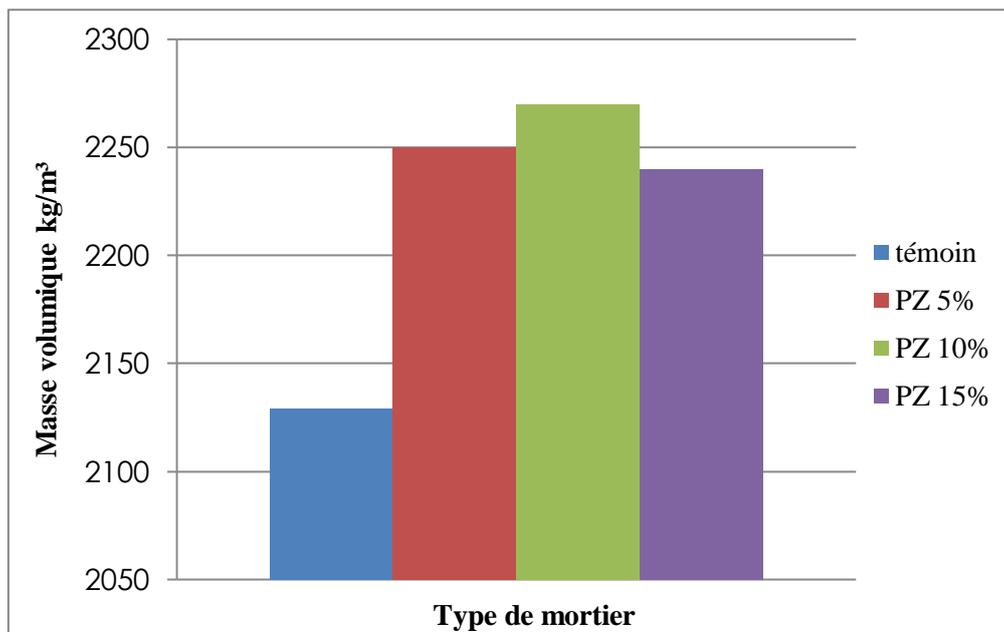


Figure 3. 4 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en pouzzolanes.

D'après la figure 3.4, on constate que l'ajout des pouzzolanes permet d'avoir des masses volumiques plus grandes pour les trois taux de substitution, notons un optimum pour un taux de 10% de substitution. Pour un taux de 5% de pouzzolane la masse volumique a augmentée de 5.46% par rapport a celle du mortier témoin

Ces résultats confirment les théories de la littérature, la granulométrie des particules des additions de dimensions moyennes plus faible, que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique qui conduit à un empilement plus compact des grains solides, et à modifier la microstructure en réduisant les pores de la matrices cimentaires [Boudchicha 2007].c'est le cas de l'addition de fumé de silice et de la pouzzolane naturelle utilisées .

c. Filler calcaire

La figure 3.5 illustre les variations des masses volumiques des mortiers en fonction du taux de substitution des en fillers calcaires.

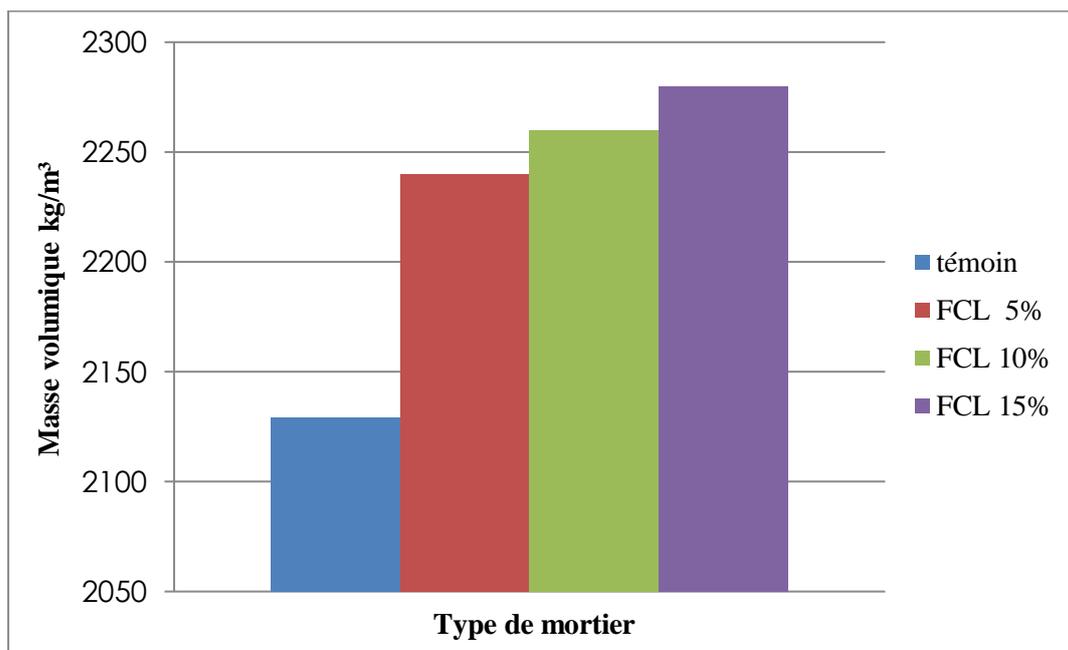


Figure 3. 5 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage en fillers calcaires.

On constate, selon la figure 3.5, que la masse volumique est influencée par l'ajout de fine, pour un taux de 5% la masse volumique a augmentée de (3.143%) cette dernière croit avec le taux de substitution. Ce qui a été constaté par [Benachour 2009] dans sa recherche sur l'effet de l'ajout des fillers avec des taux de substitutions qui dépasse les 15%, il a constaté l'atteinte d'un maximum pour un taux de 15% et une chute progressive au delà de 15%. Selon [Béderina et al 2005], les fillers calcaires arrivent à remplir une partie de la porosité tout en libérant l'eau. L'excès de fillers favorise la formation d'un volume de pate (eau

+ciment+fillers) plus important par rapport aux grains solides du sable du moment que l'ajout de fillers est fait par substitution du sable

d. Laitier de haut fourneau

La figure 3.6 illustre les variations des masses volumiques des mortiers en fonction du taux de dosage en laitiers.

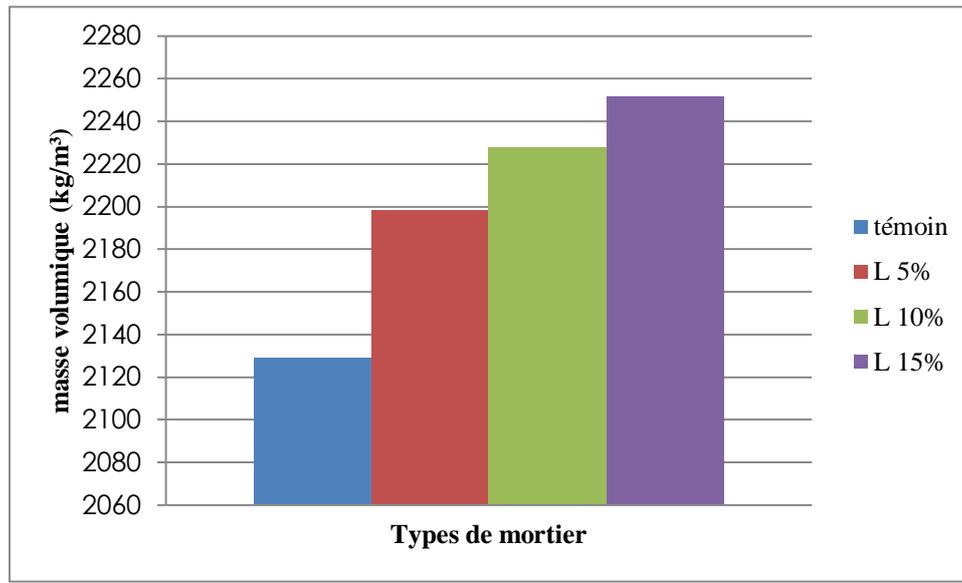


Figure 3. 6 : Variation de la masse volumique en fonction du dosage de laitier

D'après la figure 3.6 on remarque que la masse volumique du mortier avec des laitiers est beaucoup plus grande que celle du mortier témoin, elle croit avec le taux de substitution.

3.8.1.2 Maniabilité

Les essais empiriques maniabilimètre LCL « mesurer le temps d'écoulement » nous ont permis d'étudier pratiquement, et simplement les principaux effets des additions sur l'écoulement des mortiers.

a. Fumé de silice

La figure 3.7 présente la maniabilité des mortiers à base de fumée de silice pour les quatre taux de substitution 0, 5, 10 et 15% de fumé de silice. On constate que le mortier témoin était plus ouvrable qu'avec un taux de 5% et qu'au delà de 5% on remarque une amélioration de la maniabilité dont 10% est le dosage qui présente la borne inférieure, ces résultats sont proches de celles de [Mennai 1995].

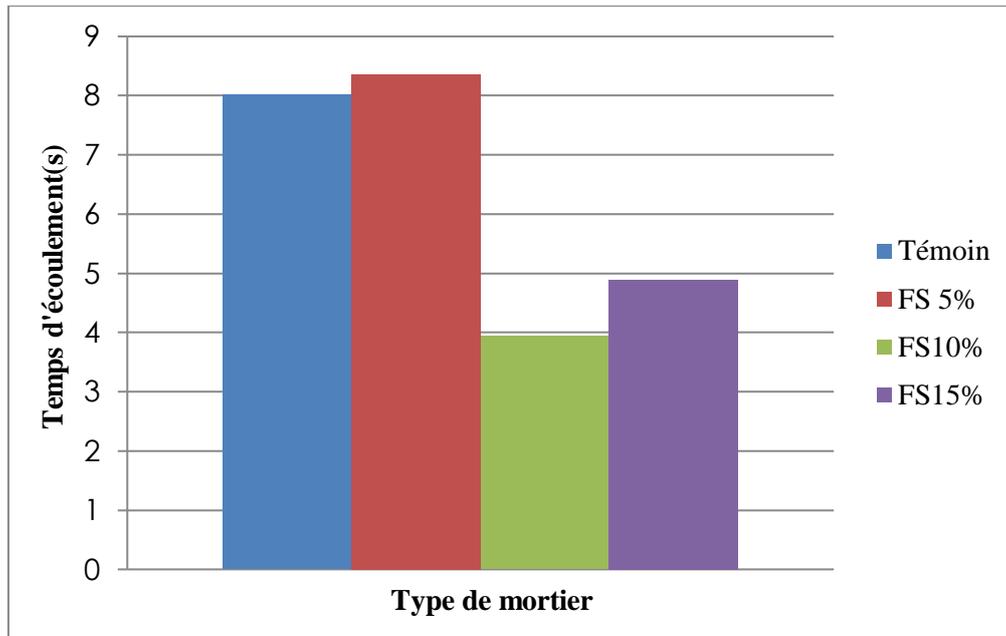


Figure 3. 7 : Variation de l'écoulement en fonction du dosage en fumée de silice

Toutefois ce comportement peut être attribué à la libération d'une certaine quantité d'eau qui était emprisonnée dans les pores, par la présence de microsphères de fumée de silice (Dosage 10%) et par un effet de billes de ces derniers. Les grains sphériques de la fumée de silice diminuent les frictions entre les particules granulaires du ciment, cependant l'ajout de la fumée de silice peut aussi, à cause de la surface spécifique élevée, causer une absorption d'eau supplémentaire. Ce qui diminue l'eau libre disponible pour la lubrification du mélange. Dans le cas du dosage de 5%, l'addition de la fumée de silice n'est probablement pas encore assez significative du point de vue de la réduction des frictions internes dans la pâte et l'effet des particules de ciment est probablement toujours dominant [Mennai 1995].

L'influence des fumées de silice n'est pas très claire. Pour certains auteurs [Carde 1996] les fumées de silice augmentent le seuil de viscosité en augmentant la compacité des mélanges. Par contre, pour [Adenot 1992], les fumées de silice ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence.

[Kwan 2000] et [Larard et al 1986], ont montré que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau /liant constant.

[Carde 1996] montre que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

b. Pouzzolanes

La figure 3.8 présente la maniabilité des mortiers à base de pouzzolane pour les quatre taux de substitution 0, 5%, 10% et 15%.

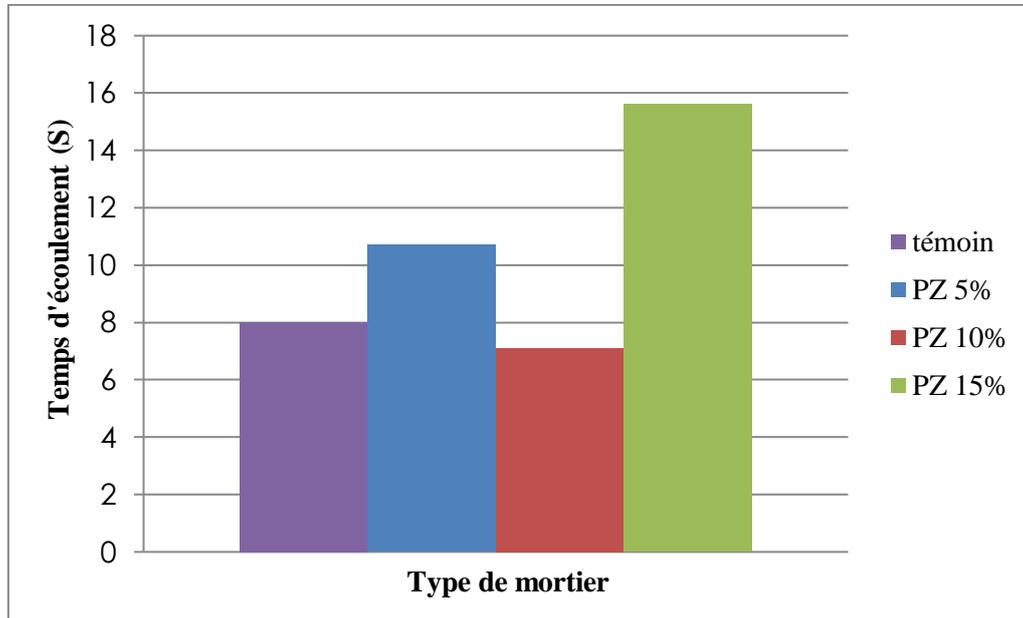


Figure 3. 8: Variation de l'écoulement en fonction du dosage en pouzzolanes

La figure 3.8 met en relief que :

- Le taux de 10% de pouzzolane a augmenté l'écoulement du mortier
- Les taux de 5 et 15% ont réduit la fluidité des mortiers,

On retient que le taux de 10% de pouzzolane est le taux à appliquer pour assurer la maniabilité du mortier, ce qui a été trouvé par plusieurs auteurs [Chihaoui et al 2009][benkaddour et al 2009]

[Boudchicha 2007] a noté que les pouzzolanes sont favorisées par des effets granulaires et physico-chimiques. Ces résultats sont probablement dus à la différence de finesse entre le ciment et la pouzzolane.

D'après les recherches de [Belaribi 2003], l'addition progressive de la pouzzolane fait augmenter sensiblement le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale. Cela s'explique par le fait que la réaction pouzzolanique est retardée à court terme, ce qui veut dire que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de l'augmentation de la teneur en pouzzolane. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en faible quantité aux très jeunes âges.

Plusieurs auteurs [BESSA 2004, Béderina 2005], ont relevé que l'incorporation des additions minérales dans les matériaux cimentaires peuvent réduire la fluidité ou augmenter le besoin en eau des mélanges à même consistance, dans certains cas en fonction de la nature, de la quantité de la morphologie et de la finesse de l'addition incorporée dans le mélange cimentaire.

3.8.2. Effets des additions sur les performances des mortiers - À l'état durci

3.8.2.1. Résistance en compression

A chaque échéance d'âge, une série de 6 demi-prismes de dimensions égales à 4x4x16 cm, est soumise à l'essai de compression. Les incertitudes relevées sur l'ensemble des mesures évoluent selon l'échéance des essais. L'évolution des résistances en compression des mortiers, est différente selon le type de fines.

a. Fumé de silice

L'influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression des mortiers à différentes échéances est illustrée à la figure 3.9.

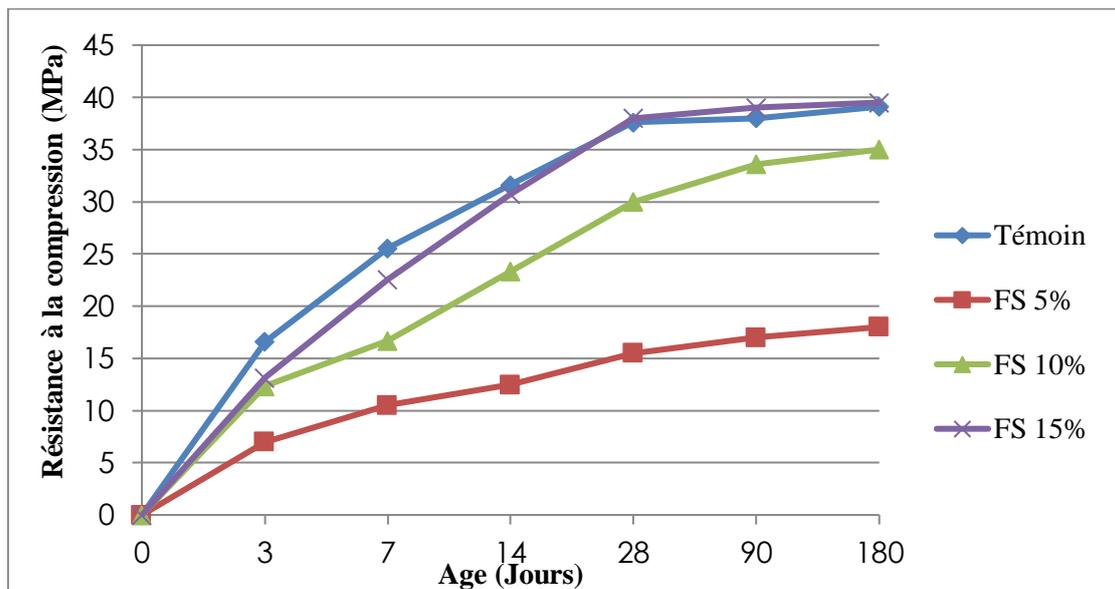


Figure 3. 9 : L'évolution des résistances à la compression des mortiers de fumée de silice

D'après la figure 3.9, on peut remarquer que la résistance à la compression des mortiers augmente au fur et à mesure que le pourcentage de la fumée de silice augmente quelque soit l'âge des mortiers. Mais elles restent inférieures à celle du témoin sauf au delà de 28 jours pour le taux de 15%.

La fumée de silice est une addition reconnue par l'apport du développement des résistances des mortiers à long terme. C'est ce qui a été remarqué dans notre cas pour un taux de 15% .Au

delà de 28 jours la résistance à la compression du mortier de 15% de FS a enregistré une amélioration remarquable par rapport aux autres taux de substitution.

Ce gain de résistance est du à la forte pouzzolanicité 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.

[Zouaoui 2007] a indiqué une diminution du temps de prise d'un mélange à base de fumée de silice, cette diminution conduit à une amélioration des résistances mécaniques a très court terme. C'est aussi [Manai 1995] qui a prouvé par des essais à base de cendre volantes et de fumée de silice qu'il est normal que la résistance soit élevée compte tenu des propriétés de ces ajouts par rapport aux grains de résistance au jeune âge. [Boudchicha 2007] quant a lui, la fumée de silice qui est caractérisée par l'effet granulaire le plus défavorable présente l'effet global le plus faible sur les résistances en compression à 07 jours. [Dotto et al 2004] ont étudié l'influence de la fumée de silice sur les propriétés physiques du béton. Ils trouvent que la fumée de silice amélioré les propriétés physiques du béton (la résistance à la compression et la durabilité) et la résistivité électrique (l'introduction de 6% de FS augmente la résistivité électrique du béton 2,5 fois et 12% de FS progresse de 5 fois).

b. Pouzzolanes

La figure 3.10 présente l'évolution de la résistance en compression du mortier de pouzzolanes dans le temps.

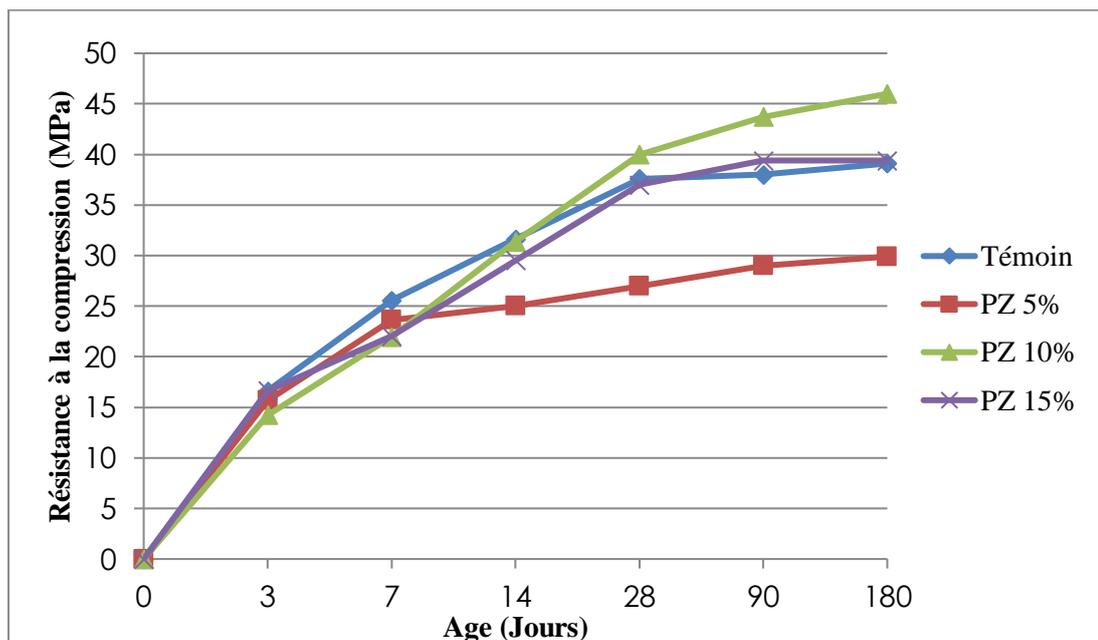


Figure 3. 10 : L'évolution des résistances à la compression des mortiers de pouzzolane

L'explotation des graphes de la figure 3.10 montre que les mortiers de pouzzolane ne présentent pas de résistances à court terme, ce n'est qu'à long terme que les résistances se développent surtout pour le taux de 10%, tandis que pour un taux de 5% les résistances restent faibles tout le temps.

Le développement des résistances est du à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants de ciment à la pouzzolane qui devient de plus en plus active. Autant que l'hydratation se poursuit, plus les produits d'hydratation et des réactions pouzzolaniques sont formés (notamment la formation des hydrosilicates de calcium CSH), lesquels conduisent à une augmentation dans les résistances mécaniques.

[**Houhou et Mazghiche 2002**] ont montré en étudiant l'influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, que la plus grande partie de l'évolution de la résistance mécanique et par conséquent de l'effet pouzzolanique qui y est associé se produisait à partir de l'âge de 7 jours. [**Aichouba et al 2005**] ont montré en étudiant l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10% à 30% engendre une diminution du temps de prise, une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme.

Selon [**Belaribi et al 2003**] l'évolution des résistances pendant les premiers jours est faible tandis que dans les périodes qui suivent elles augmentent avec le temps cela est du à la cinétique d'hydratation du ciment et de la réaction pouzzolanique de l'ajout. Selon le schéma des réactions suivantes :



Durant toute la phase d'hydratation, les produits d'hydratation et les réactions pouzzolaniques se formes (notamment CSH), en assurant une amélioration régulière de la résistance mécanique.

c. Fillers Calcaires

La figure 3.11 présente la résistance en compression du mortier de fillers calcaires dans le temps.

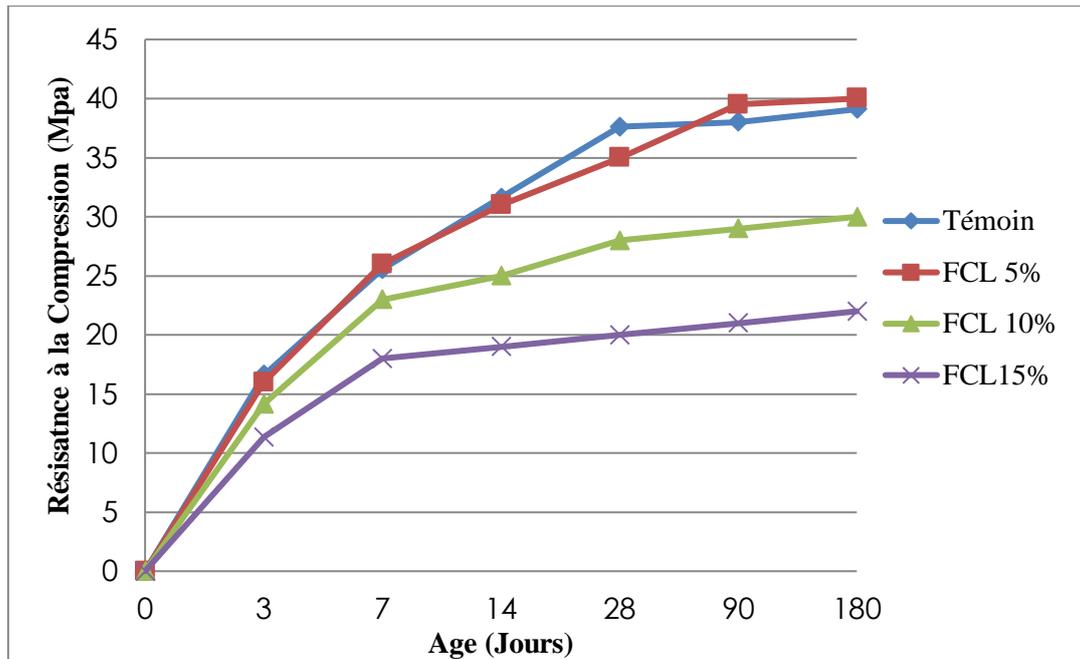


Figure 3. 11 : L'évolution des résistances à la compression du mortier des fillers calcaires.

La figure 3.11 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant des taux de substitution (5-10-15%) de calcaire en fonction de l'âge. On remarque d'après cette figure, un taux de 5% paraît idéal. Les résistances sont améliorées au jeune âge, l'amélioration des résistances au jeunes âge indépendamment de l'effet remplisseur est due à la nucléation hétérogène qui produit un excès d'hydrate formé. Cela est due au fait que la réaction entre l'eau et le ciment est plus rapide en présence de poudre calcaire [Baron et al 1995], il a été démontré que l'effet de la finesse est bénéfique pour les surfaces spécifiques en dessous de 500kg/m² [Lawrence 2005]. L'amélioration de la résistance peut s'expliquer aussi par la formation des aluminates et des carboaluminates du moment qu'il ya réaction chimique entre le carbonate de calcium et l'aluminate tricalcique [Soroka 1976].

Même si la plupart des auteurs prétendent que le filler calcaire favorise la nucléation du C3S et contribue aux grains de résistance. Il se peut que le taux de (15%) remplacement ajouté à une activité du fillers utilisé probablement faible, ont contribué à la baisse de la résistance.

d. Laitier de haut fourneau

La figure 3.12 présente la résistance en compression du mortier de laitier dans le temps.

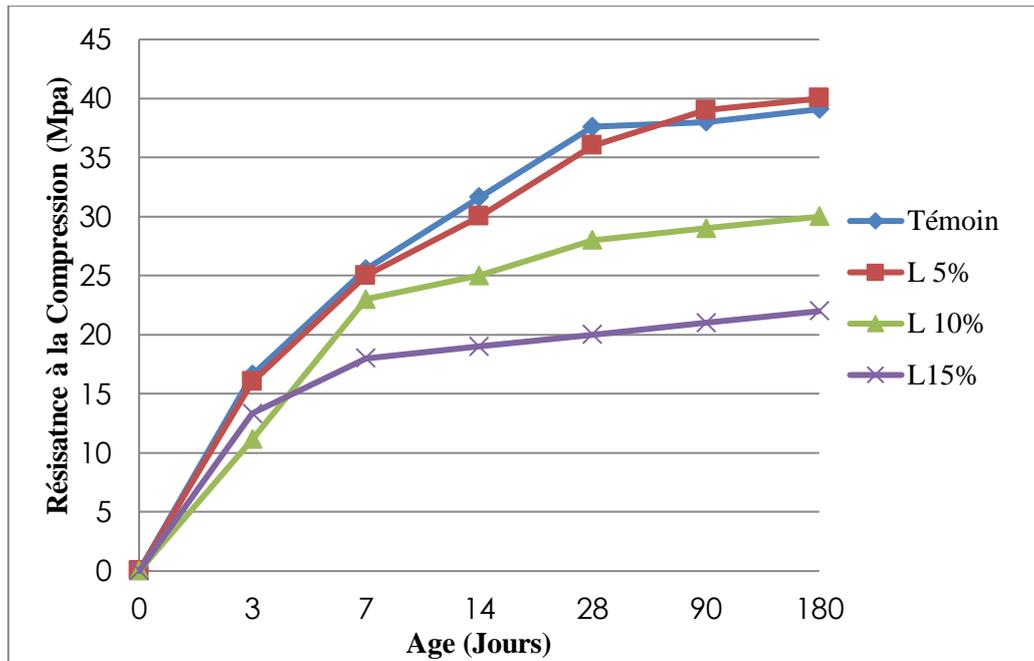


Figure 3.12 : L'évolution des résistances à la compression du mortier de laitier

La figure 3.12 montre la décroissance de la résistance avec le taux de dosage en laitier. Les résistances d'un taux de 5 % sont proches de celles du mortier témoin est ils présentent une certaine linéarité hors une augmentation progressive a été observée au très jeune âge pour un taux de 10 %. Les faibles valeurs ont été enregistrées dans le cas de 15% de dosage.

[Ezziane et al 2002] ont montré en étudiant l'efficacité du laitier d'El Hadjer par le concept du liant équivalent, que l'utilisation d'un taux élevé du laitier d'El Hadjar (40%) lui confère un déclenchement d'activité très précoce (2j), seulement cette activité ne sera jamais achevée à long terme (90j).

3.8.2.2. Résistance à la traction par flexion flexion

Les résistances à la traction par flexion ont été déterminées de façon à observer l'évolution progressive des performances enregistrées.

a. Fumée de silice

La figure 3.13 présente la résistance en traction indirecte du mortier de fumée de silice dans le temps.

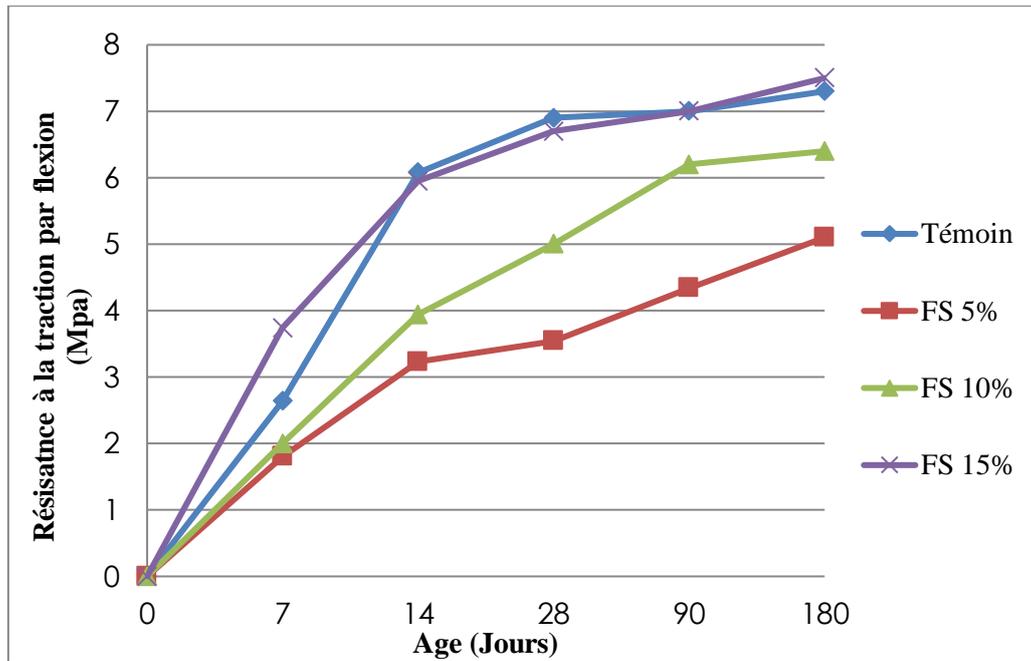


Figure 3. 13 : L'évolution des résistances à traction des mortiers de fumée de silice

D'après la figure 3.13 la résistance a la traction du mortier à base de fumée de silice a évolué après le 3^{ème} jour, le taux de 15% a présenté des résistances meilleurs par rapports aux autres taux de substitution surtout à court terme, les taux de 10% et 5% ont donné des résistances inférieures au mortiers témoin. En résumé un taux de 15% est le taux idéal que se soit en compression ou en traction.

b. Pouzzolanes

La figure 3.14 présente la résistance en traction du mortier à base de la pouzzolane dans le temps.

La figure 3.14 montre que pendant les premiers jours (3 jours) les résistances sont nulles pour les trois types de substitution et au-delà de 3 jours la résistance a été améliorée

Au delà du 14 jours les taux de 10% et 15% ont développé des résistances supérieures aux résistances du mortier témoin, c'est le même comportement qu'on a enregistré en compression,

Tant que l'hydratation se poursuit, les produits et la réaction pouzzolanique se forment, notamment la formation des hydrosilicates de calcium, lesquels conduisent à une augmentation dans la résistance mécanique [Belaribi 2003]. Un taux de 5% est toujours insuffisant pour développer les résistances.

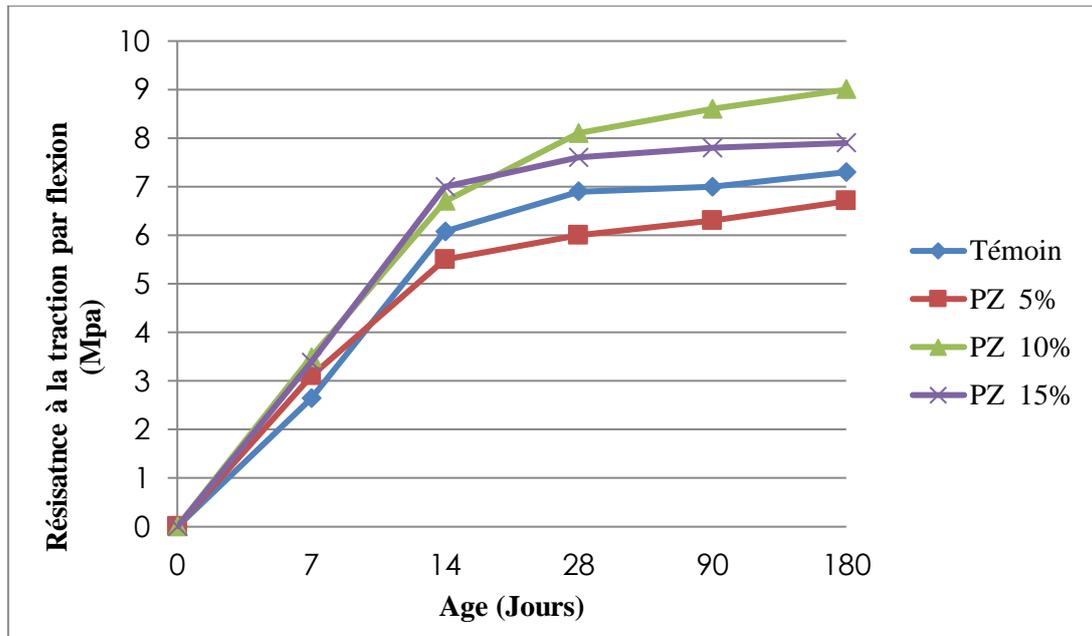


Figure 3. 14 : L'évolution des résistances à la traction des mortiers de pouzzolane.

[Houhou et Mazghiche 2002] ont montré en étudiant l'influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, que la plus grande partie de l'évolution de la résistance mécanique et par conséquent de l'effet pouzzolanique qui y est associé se produisait à partir de l'âge de 7 jours.

c. Fillers calcaires

La figure 3.15 présente la résistance en traction par flexion du mortier de fillers calcaires dans le temps.

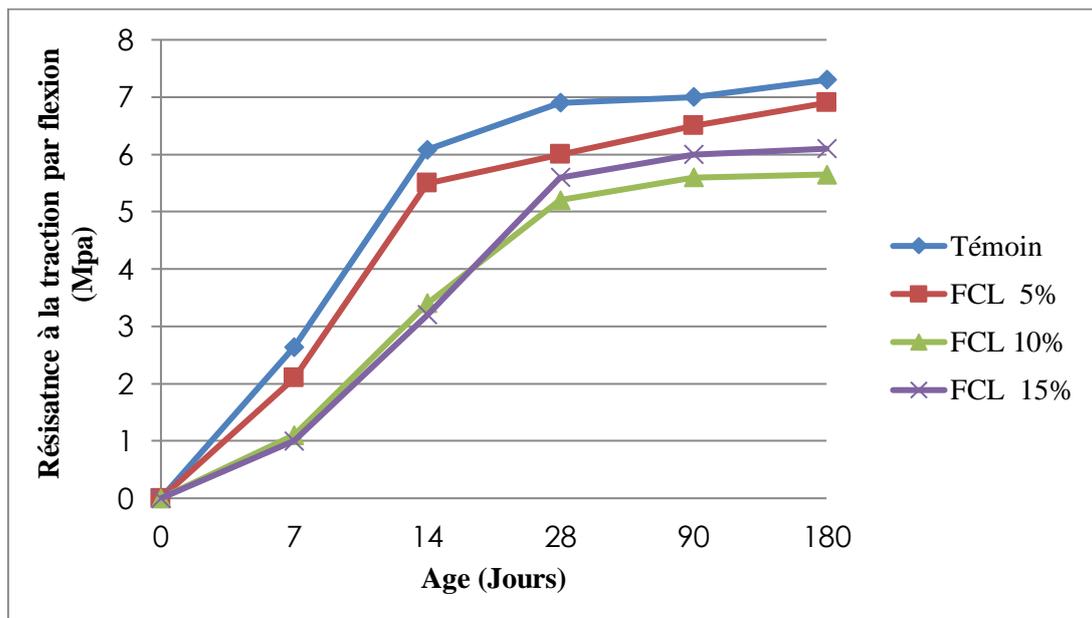


Figure 3. 15: L'évolution des résistances à la traction du mortier de fillers calcaires

D'après la figure 3.15 on constate que l'augmentation du taux de substitution en fillers calcaires réduit la résistance en flexion, la résistance a évoluée a 7 jours pour un pourcentage de 5%, on remarque une linéarité dans les trois courbes. En général le taux de 5% a donné des valeurs meilleures, et les résistances restent basses à long terme

Ces résultats rejoignent globalement les résultats obtenus pour la résistance en compression où le taux de 5 % a donné les meilleures résistances.

d. Laitier de haut Fournaux

La figure 3.16 présente la résistance en traction du mortier des laitiers dans le temps.

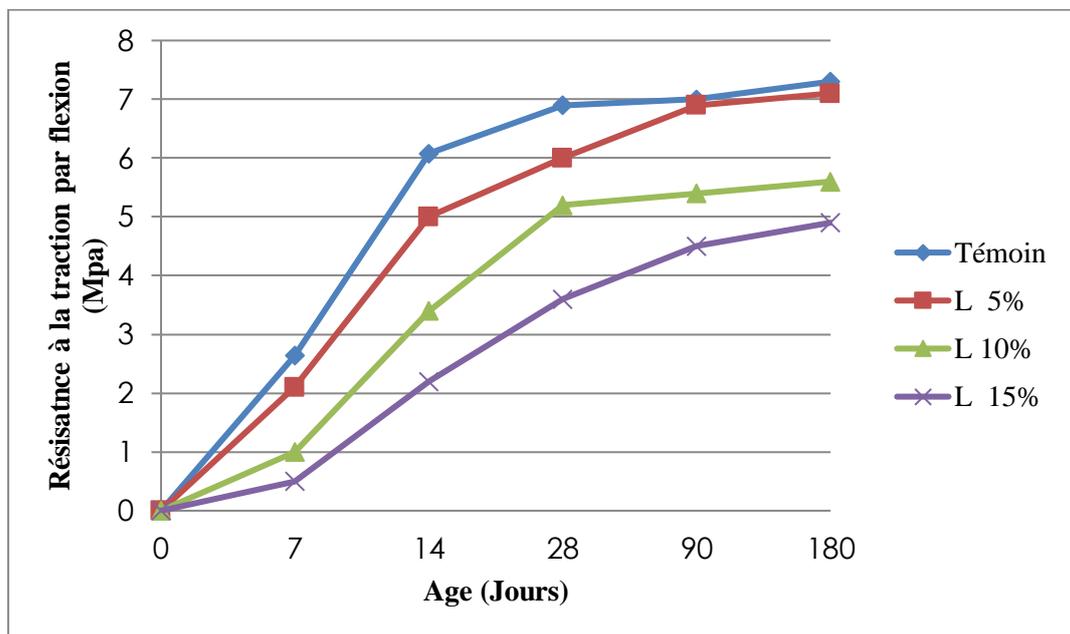


Figure 3. 16 : L'évolution des résistances à la traction par flexion du mortier de laitier

La figure 3.16 montre que pour les trois taux de substitutions les laitiers ont présentés des résistances inférieure au mortier témoin sauf au jeune âge (3 et 7 jours) pour le taux de 5% ou on a enregistré une amélioration par rapport aux résistances du mortier témoin, cela confirme l'effet bénéfique des laitiers aux jeunes âges mais avec des petits pourcentages

3.8.3. Effets des fibres de carbone sur les performances des mortiers - A l'état frais

Le but de cette partie d'étude est la compréhension du rôle des fibres de carbones par rapport à l'ajout des deux additions, la fumée de silice et la pouzzolane naturelle. D'après les résultats précédents ces deux additions ont présentés des résultats meilleurs par rapport aux autres additions, avec un taux de substitution de 10%.

3.8.3.1. Maniabilité

La figure 3.17 représente les résultats de l'écoulement des mortiers fibrés.

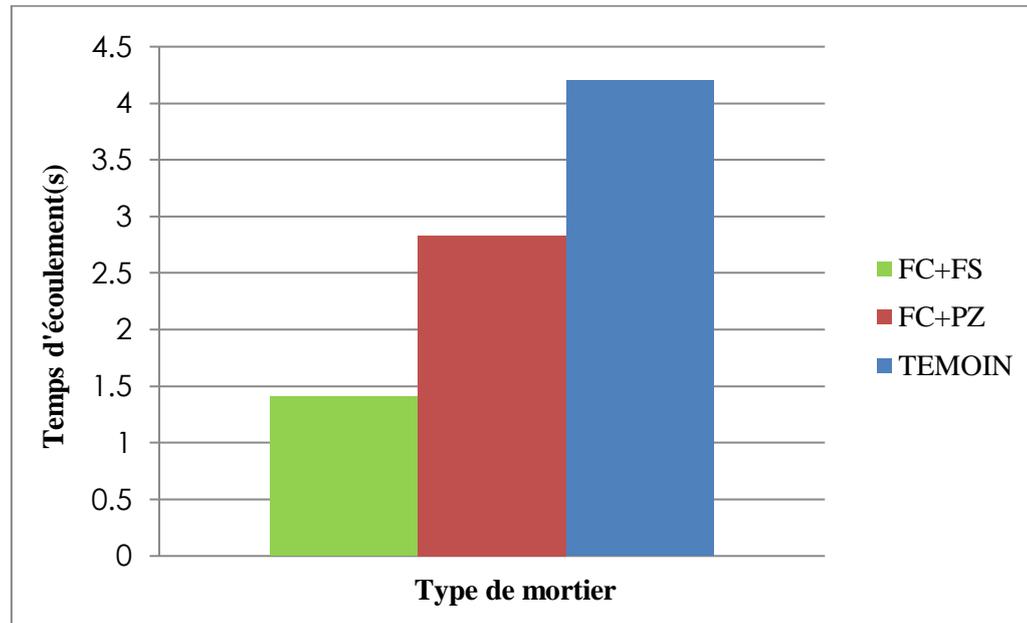


Figure 3. 17 : Les résultats de l'écoulement des mortiers fibrés

Par exemple, Si on compare la figure 3.17 à la figure 3.7, (page 92), traitant la maniabilité des mortiers à base de fumée de silice, on constate que l'ajout de fibre de carbone n'a pas trop influencé la maniabilité des mortiers.

[Chung et al 2005] a étudié La dispersion des fibres de carbone dans le Ciment ; ils ont trouvé que les fibres de carbone sont des ajouts utilisées dans les matériaux à base de ciment pour des raisons structurelles et fonctionnelles dans le but de diminuer le retrait de séchage, augmenter la ténacité à la flexion.

Le degré de dispersion est amélioré par l'utilisation des additions telles que la fumée de silice qui donne une meilleure dispersion ;

D'après [Yoshitake et al 2004], Un pourcentage en fibres est habituellement préféré, ça réduit les coûts des mortiers, augmente la maniabilité.

D'après [Wasan et Akar 2011] qui ont étudié les propriétés mécaniques du béton à haute performance renforcés par des fibres de carbone, Le pourcentage de réduction de maniabilité est d'environ 68% lorsque le dosage en fibres est de 0,5%.

L'utilisation de 0,19 % de fibre de carbone et de 15% de fumée de silice donne une diminution de 84% de réduction de la maniabilité.

3.8.3.2. la masse volumique

La figure 3.18 présente la variation de la masse volumique en fonction de l'ajout de fibre de carbone.

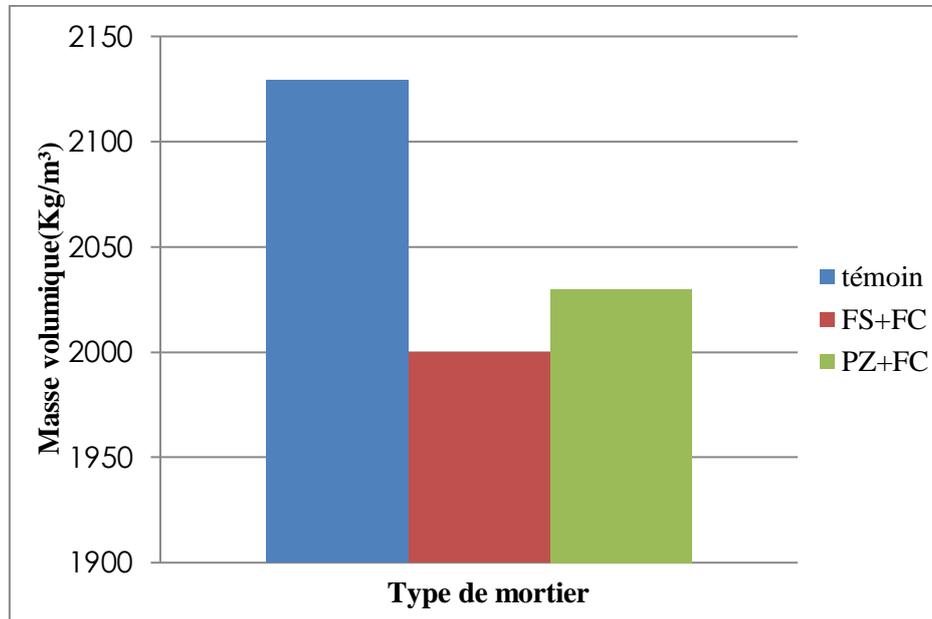


Figure 3. 18 : Les résultats de la masse volumique des mortiers fibrés

D'après la figure 3.18 la masse volumique des mortiers de (FC+PZ) et des mortiers (FS+FC) est beaucoup plus inférieure à la masse volumique du mortier témoin, la granulométrie des additions provoque l'augmentation de la masse volumique certes mais l'introduction des fibres de carbone fait augmenter le volume de l'ensemble du mortier, ce qui est pour conséquence la réduction de la masse volumique des mortiers fibrés.

3.8.4. Effets des fibres de carbone sur les performances des mortiers - A l'état durci

3.8.4.1. Résistance à la compression

Les résistances à la compression des mortiers à base des fibres de carbone sont présentées dans la figure 3.19.

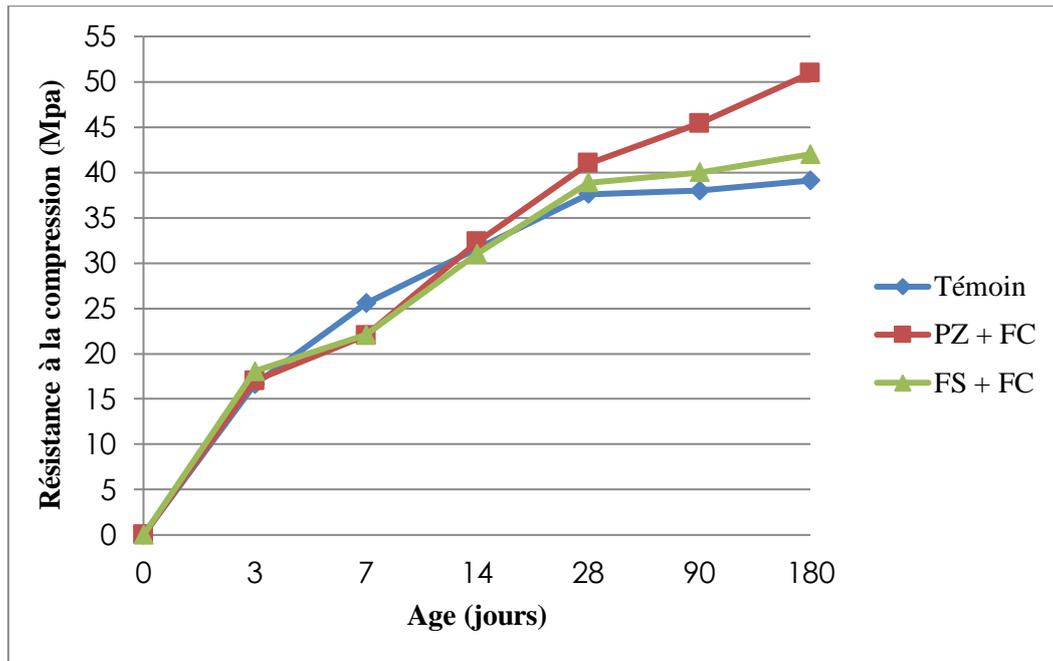


Figure 3. 19 : Les résultats des résistances à la compression des mortiers fibrés.

D'après la figure 3.19, on constate l'effet bénéfique de l'introduction des fibres de carbone sur les résistances en compression des mortiers car au-delà de 14 jours les résistances des mortiers étudiés ont dépassé les résistances du mortier témoin, l'introduction des fibres de carbone a augmenté les résistances à la compression. D'après ces résultats on constate une compatibilité remarquable entre l'ajout de pouzzolane et la fibre de carbone.

[Chung 1992] a étudié un béton renforcé par des fibres de carbone, ils trouvent que les fibres de carbone engendrent une augmentation de la résistance à la compression de 22%, avec une teneur optimale de FC est 1% de poids de ciment pour la réalisation des essais

D'après [Wasan et Akar 2011], l'ajout de fibre de carbone provoque une augmentation de la résistance à la compression qui peut arriver jusqu'à 5% à 28 jours avec un taux de 0,5%. Ils ont également constaté que l'utilisation combinée de fibres de carbone et de fumée de silice maintient une bonne résistance à la compression et une bonne résistance aux produits chimiques.

3.8.4.2. Résistance à la flexion

Les résistances à la flexion des mortiers à base des fibres de carbone sont présentées dans la figure 3.20.

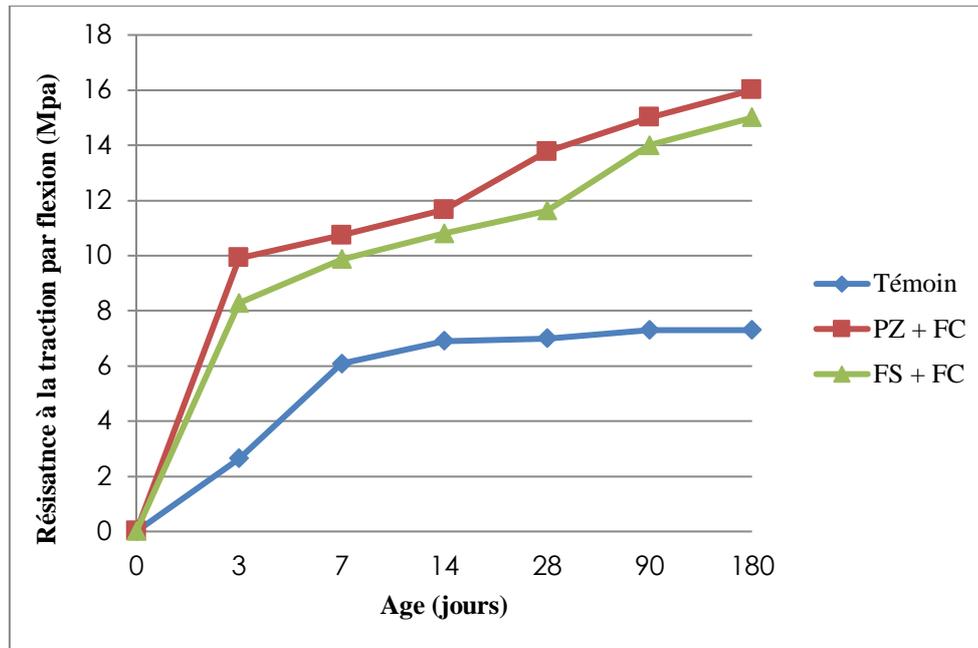


Figure 3. 20 : Les résultats des résistances à la traction des mortiers fibrés.

La figure 3.20 nous montre clairement l'effet bénéfique qu'apporte les fibre de carbone aux mortiers à base de pouzzolane et de fumée de silice pour la résistance à la traction , en effet une augmentation de 54.3% a été enregistré pour les mortiers de pouzzolanes , et 48.1% pour les mortiers de fumée de silice.

L'amélioration de la résistance à la flexion des fibres de carbone a été étudiée par plusieurs auteurs, d'après [AL-Mishhadani et al 2009] ont étudié les caractéristiques mécaniques du béton renforcé par les fibres de carbone. Les tests ont été réalisés pour les spécimens à des âges de (7, 28, 60, 90 et 180) jours. Les résultats des essais ont montré que l'inclusion de la fibre de carbone dans le béton léger n'a pas affecté la résistance à la compression de manière significative, tandis que la force de traction par fendage et le module de rupture ont été améliorés de façon significative. .

Selon [Daojun et al 2006],[Chung 2000] et [Avier et Clarke 1995], l'ajout de fibres courtes est connu pour diminuer le retrait de séchage et d'augmenter la résistance à la flexion. D'après [Vossoughi 2004] et[Chung 2017] Les fibres sont destinées à améliorer la résistance à la traction, à la flexion, résistance aux chocs pour renforcée matériaux cimentaires.

3.9.Conclusion

Cette campagne d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant les performances des mortiers à l'état frais et durci.

Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé, il a été décidé de procéder aux travaux de recherche en considérant des additions disponibles en Algérie avec une addition provenant de l'importation, afin de pouvoir mettre en évidence tous les effets physiques et chimiques par les additions sur les matériaux cimentaires et comparer les résultats obtenus avec les travaux de recherches nationaux et internationaux.

Toutes les additions utilisées ont donné lieu à une augmentation de masse volumique. Le maximum de cette augmentation a été enregistré dans l'ajout de fillers calcaires avec un taux de 15% et le minimum pour un taux de 5% dans l'ajout de laitiers.

D'après les résultats précédents, la meilleure maniabilité a été constatée pour un mortier avec ajout de fumée de silice avec un taux de 10%, ce taux a également présenté un optimum dans le cas des fillers calcaires. Les laitiers et les pouzzolanes présentent une croissance dans le temps d'écoulement en fonction du taux de substitution, notons que l'addition pouzzolanique a retardé l'écoulement d'une valeur remarquable (le temps d'écoulement d'un mortier en 5% de pouzzolane a duré plus de deux fois le temps d'écoulement du mortier témoin).

D'après les résultats précédents on remarque que pour toutes les additions utilisées, la résistance à la traction a un comportement similaire à celui de la compression dont une valeur maximale a été enregistrée pour les laitiers d'un taux de substitution de 5% et la valeur minimale pour les mortiers à base de fumée de silice pour un taux de 15%. On remarque que le comportement des laitiers et des fillers calcaires sont semblables ou les résistances augmentent avec le taux de substitution, ce comportement est totalement inversé dans le cas de la fumée de silice, cette chute de résistance indique un effet granulaire défavorable qui devient prédominant. La pouzzolane quant à elle baisse les résistances pour un taux de 10%, et ses valeurs se rapprochent des différents taux de substitution.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle est plus prometteuse, elle a amélioré les performances mécaniques des mortiers plus que la fumée de silice, en ce qui concerne le taux d'après les campagnes d'essais effectuées un taux de 10% en substitution de ciment est le taux idéal non seulement pour avoir une meilleure ouvrabilité mais aussi pour augmenter les résistances mécaniques.

Plusieurs études ont montré l'efficacité de l'ajout de fibre de carbone, notamment elles augmentent les résistances mécaniques surtout à la flexion, elles présentent un faible retrait de séchage et une faible conductivité thermique et une conductivité électrique élevée.

Cette étude apporte un éclairage sur l'adéquation des différents composants et devrait aider à terme, à la mise en place de règles de formulation des mortiers fibrés destinés non seulement à enduire les constructions mais aussi pour plusieurs utilisations dans le domaine de construction, un mortier résistant et ouvrable est un mortier demandé pour corriger les fissuration et traiter les joints ou même jouer le rôle d'un gobetis .

La formulation d'un mortier de réparation est complexe non seulement en ce qui concerne les composants du mortier et leur interactions mais aussi pour la complexité du support et leur compatibilité avec ces supports.

Le vieux bâti en Algérie se divise en patrimoine colonial à base de béton, et en patrimoine à base de pierres, l'application du mortier est plus complexe et demande encore plus d'exigence que la maniabilité et la résistance à long terme, dans le chapitre qui suit on va prendre un exemple d'un vieux bâti afin d'appliquer les formulations qu'on a étudiées à base d'addition et de fibres, d'autant que ce n'est pas évident de généraliser un prototype pour diverses interventions.

Chapitre 4 : CAS D'ETUDE

Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis

4.1.Introduction

Au cours des dernières années, beaucoup d'études ont été entreprises dans les quartiers anciens; elles ont conduit à la création de secteurs sauvegardés, à la protection des centres-villes et à la réhabilitation du patrimoine bâti qui est devenu un marché important de la construction [BOUANANE 2008]. Cependant, l'opposition "rénovation ou réhabilitation" est toujours présente, car pour de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, il est plus facile de démolir et de reconstruire que de restaurer. On prétend aussi que la rénovation coûte moins cher que la restauration. En fait, le choix relève de nombreux facteurs : techniques, économiques, sociaux, historiques, esthétiques, etc... [STAP DU CALVADOS, 2013].

Depuis 2003, l'Algérie a mis en place une loi (98-04) relative à la protection du patrimoine culturel ainsi que son décret exécutif (03-324 du 5/10/2003), qui sont applicables pour la protection et mise en valeur des sites historiques par le biais des PPSMVSS (plan permanent de mise en valeur des secteurs sauvegardés). Au jour d'aujourd'hui en Algérie, plusieurs secteurs sauvegardés sont dotés d'un plan permanent de sauvegarde, dont celui de la vieille ville de Constantine. Les composants du bâti ancien a des caractéristiques mécaniques faibles. Il est souvent perméable à l'air et à l'humidité et a donc besoin d'un mortier d'enduit durable et adapté aux caractéristiques mécaniques du support existant pour pérenniser les parois. L'enduit se révèle à travers les siècles un formidable atout pour l'architecture, à condition de veiller à la compatibilité entre le support et le mortier [Weber 2008, Vejmelkova et al 2012]. L'enduit est le mortier qui enveloppe et protège la construction. Un enduit durable conduit à une construction durable. La compatibilité avec le support est une préoccupation majeure, une fois la compatibilité assurée d'autres paramètres tels que l'adhérence et la durabilité, doivent être également assurées. Avant toute action de réhabilitation un diagnostic d'états des lieux est obligatoire. Le diagnostic est la clé d'une réhabilitation correcte, l'étude de diagnostic est le passage obligatoire de toute réhabilitation. Il permet par l'expertise technique de déterminer la nature des matériaux employés, de reconstituer les différentes étapes de sa réalisation et d'identifier ainsi leur niveau d'altération et d'évaluer leur évolution pour au final identifier l'état de la construction vis-à-vis la capacité portante, les priorités d'intervention, de faire un

programme bien détaillé et structuré et de maîtriser toutes les phases des travaux de réhabilitation

Dans ce chapitre on va prendre un bâtiment comme cas d'étude, et envisager de remplacer son mortier d'enduit dégradé par un enduit compatible ayant toutes les qualités d'un enduit durable, pour cela un diagnostic et une expertise approfondie doivent être menées

Le chapitre précédent nous a permis de nous familiariser avec ce sujet très complexe notamment les difficultés liées à la conception des mortiers de réparation, les phénomènes observés suite à l'introduction d'ajouts, d'adjuvants et de renforts dans les matrices cimentaires et comprendre les mécanismes d'action de cette incorporation sur le comportement global.

Il existe une grande différence entre une étude de ces matériaux menée en laboratoire et l'étude d'un cas concret, en effet dans d'un cas réel où d'autres paramètres d'influence rentrent en jeu tels que l'adéquation entre l'ancien bâti (le support) et le mortier élaboré. Car la formulation passe par plusieurs étapes et règles bien définies qui représentent d'autres exigences pour pouvoir qualifier le mortier comme mortier de réparation.

Etant bien entendu que les piliers majeurs de ce mortier de réparation sont la compatibilité avec le support ancien, l'adhérence et la résistance thermique

4.2. Identification du cas d'étude : Réhabilitation d'un immeuble vieux bâtis

4.2.1. Expertise

Il a été retenu comme échantillon un immeuble vieux bâti, classé en degré 3 de vétusté. (Sur une échelle de 5), l'immeuble, objet de cette étude, est situé au 43, Rue Abane Ramadane Constantine. Il est à usage d'habitation, de faible hauteur (R+2) réalisé à l'époque coloniale avec les techniques de construction de l'époque.

L'étude de diagnostic a été élaborée au niveau des laboratoires CTC-EST de Constantine et de l'entreprise de rénovation et réhabilitation des ouvrages BENHAMIDA HACEN. (Voir fiches techniques en Annexe), la description et présentai sur le tableau 4.1. Les tableaux 4.2, 4.3 et 4.4 représentent respectivement la description, la structure porteuse, le diagnostic et les recommandations à suivre du bâtiment.

a. Description

Tableau 4. 1 : Description de l'immeuble

Occupation	collectif
nombre de logements	5
Année de la construction	1837-1962
Nombre de niveau	2
Nombre de sous sols	2
Etat de la construction	achevée
Intervention sur la construction	aucune
Construction accolé sur	02 cotés adjacents

b. Structure porteuse

Tableau 4. 2 : Structure porteuse de l'immeuble

Structure verticale	Maçonnerie en pierre de taille
Structure horizontale	Plancher mixte (poutrelle métallique, maçonnerie)
escaliers	Béton armé
Garde corps	Maçonnerie
Parement extérieur	Enduit

c. Diagnostic

Tableau 4. 3 : Diagnostic

Pour l'ensemble de la construction	Ouvrages intacts
Structure porteuse en maçonnerie (pierre de taille)	Eléments porteurs intacts
Pour la Structure Horizontale	Aucune dégradation
Cloisonnement et remplissage	Apparition de fissures : Horizontales, Verticales et Obliques
Escaliers	Aucune dégradation
Couvertures/ Bardages/Etanchéité	Fissure des enduits
	Défection du complexe d'étanchéité
	Dysfonctionnement des gargouilles
Apparition de traces d'humidité	Humidité provenant des infiltrations
	Dégradation des enduits
	Cloquages des peintures

d. Recommandations à suivre

Tableau 4. 4 : Recommandations à suivre

Niveau de dégradations des constructions	Légèrement dégradés
Bâtiment à conforter	non
Bâtiment à réhabiliter	oui
Classement de l'intervention	Légère
Construction menaçant ruine (IMR)	non

e. Pathologies recensées

- ✓ Fissuration des façades
- ✓ Décollement des enduits
- ✓ Dislocation du mortier de jointage

f. Illustrations photographiques

La façade principale de l'immeuble choisie comme cas d'étude est photographiée sur la photo 4.1. La photo 4.2 représente la dégradation des enduits, la photo 4.4 montre la dislocalisation du mortier de jointage.



Photo 4. 1 : Façade principale de l'immeuble



Photo 4. 2 : Dégradation des enduits



Photo 4. 3 : Dislocation du mortier de jointage

✚ Pour cela notre intervention concerne le ravalement des façades ainsi l'élimination des fissurations avec un enduit compatible

4.2.2. Identification des mortiers existants

4.2.2.1. Analyse chimique

Le but recherché par cet essai est de déterminer le pourcentage de la teneur en chaux avec prélèvement de carottes et analyse chimique appropriée, en veillant à reproduire une formulation équivalente à celle du mortier existant.

Les essais ont été effectués auprès du laboratoire national de l'habitat et de l'urbanisme (LNHC), les résultats sont présentés sur le tableau 4.5

Nous avons pris trois types d'échantillons de liants à analyser :

- un liant de jointage de mur en brique
- un liant d'enduit des murs de séparation (mur hétéroclite : brique, moellon, pierre)
- un liant d'enduit des murs extérieurs

Tableau 4.5 : Analyse chimique des trois types d'échantillons de mortier (Résultats exprimés en % et en poids)

Sondage ou puits	Liant entre les briques	Mur de séparation	Mur extérieur
Profondeur(m)	/	/	/
Silice SiO ₂	25	30.02	28.06
Alumine AL ₂ O ₃	2.04	9.02	2.05
Hématite Fe ₂ O ₃	4.40	3.40	4.40
Magnésie MgO	/	/	/
Chaux Cao	25.76	24.20	27.68
Sulfates So ₄ --	21.88	15.75	7.31
Chlorure Cl	0.063	0.09	0.16
Matières organiques	0.32	1.09	1.77
Perte au feu à 1000°C	15	15.13	25.66
Oxide de sodium Na ₂ O	/	/	/
Oxyde de potassium K ₂ O	/	/	/

- présence du SiO₂

Il est établie que pour améliorer les performances des matrices cimentaires il convient d'en réduire la porosité en rajoutant des additions ultrafines, c'est ce qui a été constaté sur le mortier du mur de séparation, où on a enregistré une présence remarquable de la silice du à l'ajout d'une addition siliceuse, probablement un sable siliceux local. Ce qui explique également la durabilité de ce mortier comparé aux deux autres types surtout qu'il est appliqué à l'intérieur de l'immeuble.

- présence du AL₂O₃ et Fe₂O₃

La présence d'Argile est la source d'apparition dans le temps d'autres minéraux notamment la silice SiO₂ de l'alumine AL₂O₃ et des oxydes de fer Fe₂O₃ [**Ginouves 1993**].

- présence du CaO

Pour l'oxyde de calcium, on constate que son taux est supérieur dans le mortier du mur extérieur sachant que la CaO est le produit direct de la thermolyse du calcaire.

- présence du SO₄⁻

En général, on préconise de réduire le taux des sulfates sur les murs extérieurs, selon ces résultats obtenus le mortier étudié assure cette théorie avec une faible présence des chlorures (principale cause de la corrosion).

- Perte au feu

Quand à la perte de feu, le liant du mur extérieur présente une perte de feu de l'ordre de 25%, plus élevée par rapport aux autres types étudiés, ce qui améliore les performances énergétiques de l'immeuble.

- Oxide de magnésium MgO

D'après cette analyse la chaux est riche en calcium. Le principal constituant du calcaire est la calcite, le CaCO₃, mais il peut aussi contenir de la dolomite, du MgCa(CO₃)₂ et des quantités variables d'impuretés. En règle générale, la chaux produite à partir de calcaire avec moins de 5% de magnésium est classée comme chaux riche en calcium, tandis que la chaux calcaire contenant plus de 20% de magnésium produit de la chaux dolomitique. [**Kerstin et al 2002**]

4.3.Élaboration des mortiers de réparation au Laboratoire

4.3.1. Choix des matériaux de base

Ces investigations (diagnostic, analyse chimique) nous ont permis de déceler trois types de besoin en mortiers :

Mortier de Catégorie I : Mortier destiné à la réparation de défauts ou dégradations superficielles, dus à une mise en œuvre déficiente, ou à des sollicitations mécaniques, physiques ou chimiques, en vue de restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la construction.

Mortier de Catégorie II : Même domaine d'emploi que la catégorie I, mais pour lequel des exigences particulières sont imposées du point de vue résistances mécaniques.

Mortier de Catégorie III : Même domaine d'emploi que la catégorie II, mais pour lequel des exigences particulières sont imposées du point de vue durabilité et confort

Notre travail consiste à concevoir un mortier pour remplacer le mortier d'enduit et le mortier de jointement dégradé de façon à assurer la durabilité et la compatibilité avec le support ancien.

S'agissant d'une construction à base de pierres naturelles, les formulations étudiées en chapitres trois (à base de ciment) sont reconnues ne pas être adaptées pour ce genre de constructions (à base de pierres). L'utilisation de la chaux au lieu du ciment est incontournable, en effet la littérature est riche à ce sujet.

Selon [Bouanane 2008] et [Weber 2008] au cours du 20ème siècle, les mortiers de ciment ont été fréquemment utilisés à la place des mortiers de chaux dans les travaux de restauration, montrant plusieurs incompatibilités: haute résistance mécanique, phénomènes d'efflorescence en raison de la formation de grandes quantités de sels solubles par migration d'ions alcalins. Faible perméabilité à la vapeur d'eau et un coefficient de dilatation thermique plus élevé que la plupart des maçonneries

Selon Andrew [Andrew 2005], un vieux mur avec un enduit à la chaux absorbe une certaine quantité d'humidité qui s'évapore facilement et donc il maintient un équilibre. Un enduit de ciment sur un tel mur aurait des fissures microscopiques à mesure que le mur répondrait aux mouvements atmosphériques et de fondations. L'humidité serait aspirée à travers ces minuscules fissures, mais ensuite était incapable de s'évaporer à travers l'enduit, ce qui a entraîné une accumulation d'humidité dans le mur.

Comme la compatibilité entre le nouveau mortier de réparation et les composants d'origine de la maçonnerie est essentielle pour la structure [Ellis 2013]. Dernièrement, il y a eu un intérêt croissant pour l'utilisation de mortiers à base de chaux pour la restauration de monuments historiques [Mammar, Mouli 2009, Vejmelkova et al 2012]. Cette compatibilité doit se refléter dans plusieurs aspects: [Bouanane 2008] : compatibilité chimique entre le mortier appliqué et les pierres, briques et mortiers antiques, [Calvados 2013] : compatibilité physique, en particulier liée à la solubilité et au transport d'eau [Kribeche 2012] : compatibilité structurelle et mécanique, reflétée dans des forces mécaniques similaires [Izaguirre 2011].

Selon [Al-Mukhtar, Kevin 2005] ,[Torgal et al 2012], l'utilisation de la chaux est la clé de la durabilité de réhabilitation des construction en pierre , les mortiers composés de chaux, obtenue par calcination de calcaire y compris des coquillages, de gypse et de sable, ont été retrouvés sur des ouvrages luxueux, comme les temples et palais de Pergame, ancienne ville grecque. En Égypte, les grandes pyramides ont été recouvertes d'une peau lisse et protectrice dont l'analyse indique la présence d'argile, de chaux aérienne et de sable de quartz [Weber 2008].

4.3.2. Caractérisation et choix des matériaux utilisés

La chaux, la pouzzolane naturelle, le sable, les fibres polypropylènes, l'épaississant

4.3.2.1. La chaux

L'utilisation de la chaux est la clé de la durabilité des restaurations actuelles, les enduits au ciment entraînent des désordres tels que la détérioration des pierres qui ne respirent plus. La chaux utilisée dans notre étude est une chaux éteinte provenant de l'unité de production El-Khroub, wilaya de Constantine, les tableaux 4.6 et 4.7 présentent les caractéristiques physiques et chimiques de cette chaux.

Tableau 4. 6 : Caractéristiques physiques de la chaux

Diamètre moyen des particules	5 μ
Densité apparente	0.65g/cm ³
Surface apparente	1.5 à 18m ² /g
Structure cristalline	Hexagonale
Poids moléculaire	74.09
Poids spécifique	2.342
Aspect	Fine poudre blanche inodore

Tableau 4. 7 : Caractéristiques chimiques de la chaux

Hydroxyde de calcium $CA(OH)_2$	97.90%
Hydroxyde de calcium soluble $CA(OH)_2$	95% min
Oxyde de fer Fe_2O_3	0.1%
Dioxyde de carbone CO_2	0.70%
Oxyde d'aluminium AL_2O_3	0.15%
Dioxyde de silicium SiO_2	0.50%
Oxyde de magnésie Mgo	0.35%
Oxyde de magnèse $Mn O_4$	0.01%

4.3.2.2. La pouzzolane

Nous avons choisi la pouzzolane naturelle, car mélangée à la chaux elle donne naissance à des CSH (silicates de calcium hydratés), les Mortiers d'enduits composés de chaux et de pouzzolane ont été utilisés depuis les temps anciens. La réaction de pouzzolane avec de la chaux forme des silicates de calcium hydratés qui offrent plus de durabilité à l'enduit.

En raison de la plus grande résistance de ces matériaux aux effets de l'environnement, certains enduits ont été conservés jusqu'à maintenant. Les pouzzolanes sont les premières matières pouzzolaniques utilisées dans une large mesure, soit sous la forme d'agrégats grossiers ou de poudres, cela est dû à leur grande disponibilité sur le territoire de l'ancienne Rome [Bouanan2008], [Mammar, Mouli 2009], [Vejmelkova 2012].

Les Grecs avaient aussi l'habitude d'ajouter quelques pouzzolanes volcaniques de « Santorin » à leurs mortiers, puis à travers les Romains l'utilisation de pouzzolanes dans les mortiers est devenue une technique bien réglementaire [falchi et al 2013].

Dans notre pays l'utilisation de la pouzzolane, offre un gain économique intéressant En effet l'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 Km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran [Siad & all 2005].

Les gisements de pouzzolanes utilisés pour notre étude se trouvent dans la région de Béni-Saf (Wilaya de Ain-Temouchent). La composition chimique et les caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau 4.8.

Tableau 4. 8 : Composition chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane

Composition chimique de la pouzzolane										
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	PF
%	46.83	17.45	8.36	9.38	3.88	0.36	4.32	1.4	0.03	4.79
Caractéristiques physiques de la pouzzolane										
Désignation	Surface spécifique Blaine		Masse volumique absolue		Masse volumique apparente					
Valeurs	3192(cm ² /g)		2.68(t/m ³)		0.98(t/m ³)					

4.3.2.3. Le sable

Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable d'Oued courant utilisé pour la confection des bétons ordinaires dans la région de Constantine en Algérie. Les principales caractéristiques et la granulométrie du sable utilisé sont récapitulées dans les tableaux 4.9 et 4.10.

- Dénomination : Sable d'Oued.

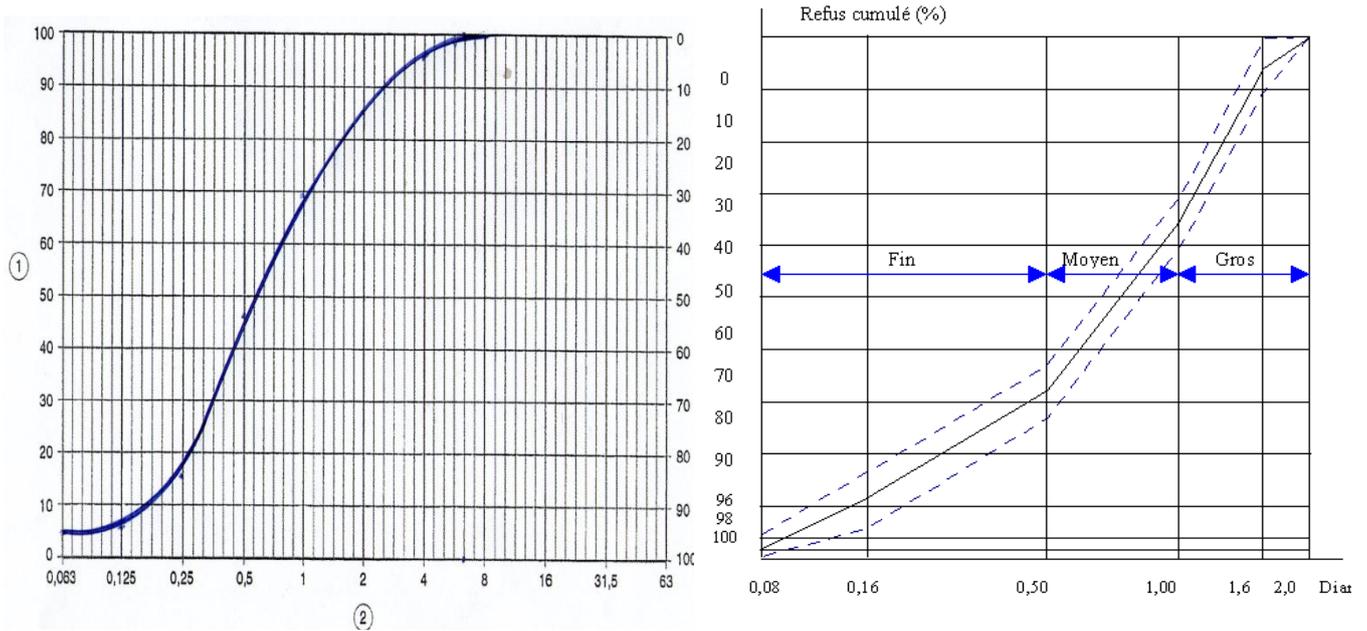
- Origine : Oued Rhumel (IBN ZIAD), provient de la sablière EL NASR de Hamma Bouzianne, wilaya de Constantine, Algérie.

Tableau 4. 9 : Caractéristiques physiques du sable

Désignation	Valeur au bleu de méthylène	Equivalent de sable (%)	Module de finesse
Sable roulé	1.47	87	2.5

Tableau 4. 10 : Granulométrie du sable utilisé

Tamis Ouverture en (mm)	Masse des refus cumules (g)	Pourcentage refus cumules (%)	Pourcentage tamisas cumules (%)
6.3	0	0	100
5	7.1	0.601	99
4	30.2	2.559	97
2	188.6	15.983	84
1	360.9	30.585	69
0.500	623.7	52.857	47
0.250	998.0	84.579	15
0.125	1121.6	95.054	5
0.063	1138.3	96.469	4



a- courbe granulométrique du sable utilisé

b- courbe granulométrique du sable normalisé

Figure 4. 1 : Comparaison entre le sable utilisé et le sable normalisé

D'après les courbes de la figure 4.1 on remarque une grande similitude entre les deux types de sable. Notre sable a les mêmes caractéristiques granulométriques que le sable normalisé.

• **Analyse de DRX (diffraction par rayon X) sur le sable**

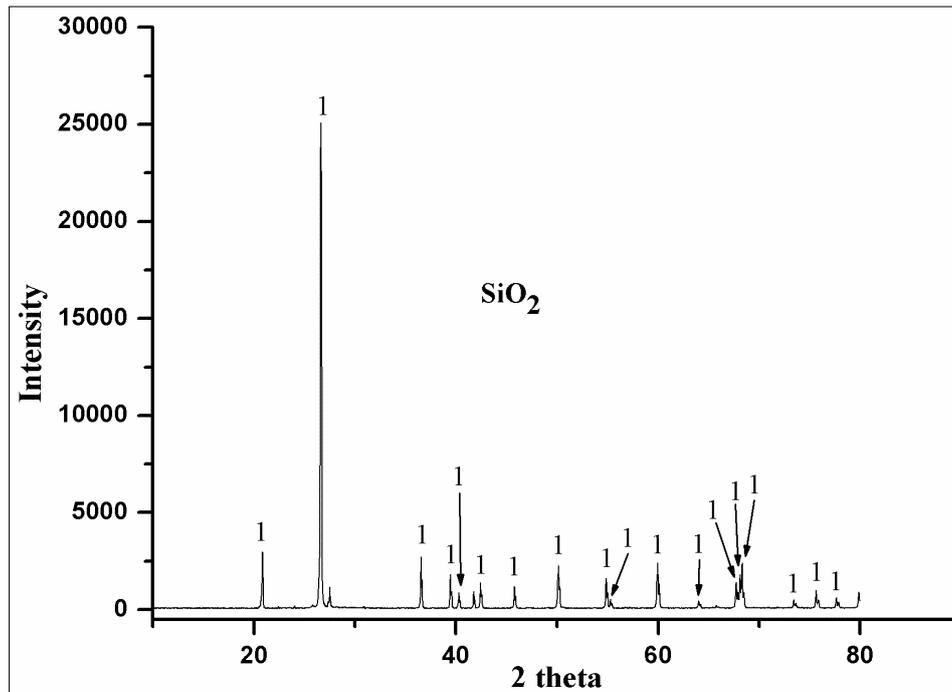


Figure 4. 2 : Analyse de DRX sur le sable

D'après l'analyse présentée à la figure 4.2, on constate :

- Une présence excessive de silice.
- Caractéristique retrouvée dans l'analyse de l'échantillon du mortier du bâtiment diagnostiqué.

4.3.2.4. *L'épaississant*

Les épaississants « Penta EC » pour Enduits sont des éthers de cellulose modifiés pour obtenir une solubilisation très rapide dans l'eau en milieu soit neutre soit alcalin.

Le développement rapide de la viscosité des Penta EC pour enduits, sans produire des grumeaux en milieu soit neutre soit alcalin, permet d'obtenir immédiatement la consistance désirée. Cette caractéristique les rend parfaits pour la préparation d'enduits soit à base de gypse, soit à base de ciment et de chaux pour l'application mécanique. Les viscosités différentes et les modifications disponibles facilitent la préparation d'enduits et ragréages avec tout type de liants et d'inertes disponibles. Les Penta EC pour Enduits offrent l'atout d'obtenir de mélanges humides très plastiques et thixotropiques, et au même temps faciles à appliquer. L'excellente rétention d'eau permet un long temps d'ouvrabilité sans compromettre l'adhésion au support même humide, y compris aux plafonds, et élimine l'ennuyeux « écorchement » superficiel. Les caractéristiques du PENTA EC 18 sont présentées sur le tableau 4.11.

Tableau 4. 11 : Caractéristiques du Penta EC 18

Composition	État	Rétention d'eau	Densité	Granulométrie	Humidité	Dosage conseillé
Méthyl hydroxypropyl cellulose	Poudre	min. 70 % après 8 minutes	max 0.450 kg/dm ³	min 95% < 0.300 mm.	4.0%	0,065 – 0,115

4.3.2.5. *Les fibres polypropylènes*

Les fibres de polypropylène sont utilisées dans les mortiers pour diminuer le retrait plastique, la fissuration et micro-fissuration de la surface [Grzybowski, Shah 1990]. Elles augmentent la cohésion et réduisent la chute [Johnston 1990] .

Les caractéristiques des fibres polypropylènes utilisées sont présentées dans le tableau 4.12.

Tableau 4. 12 : Caractéristiques des fibres polypropylènes

Composition	Polypropylène
Aspect	Monofilament
Longueur	12mm
Diamètre	18mm
Résistance à la traction	300-400 Mpa
Temps de Malaxage	2 minutes
Consistance (g/m ³)	600
Document technique de référence	Norme EN 14889-2

4.4. Formulations élaborées

Le tableau ci-après montre pour chaque formulation étudiée le temps de prise.

Tableau 4. 13 : Détails de formulations effectuées, et le temps de prise

	Composants en Kg					eau	Temps de prise	
	Sable	chaux	PZ	FPP	Ep		début	Fin
M1	3.75	1.25	0	0	0.005	24%	51h 00	123h 04
M2	3.75	1.125	0.125	0	0.005	29%	46h 38	90h 26
M3	3.75	1.125	0.125	0.025	0.005	29%	45h 42	93h 00

• L'addition de pouzzolane

La pouzzolane (PZ) a été incorporée dans les deux mélanges (M2, M3) de 10% en poids de chaux; ce taux a été sélectionné sur la base d'une revue de la littérature [Ginouves 1994] et [Ezziane et al 2011].

• L'incorporation de fibres polypropylène

Dans le mélange M3, les fibres PP ont été incorporées par 0,5% du poids du mortier sec, un rapport très commun qui a été rapporté dans plusieurs travaux précédents [Madhkhan 2012],[Zhang 2016],[Ezziane 2015].

Selon [Izaguirre 2011], la présence de 0,5% de fibres de polypropylène élimine complètement les fissures dans le mortier à base de chaux.

• L'incorporation de l'épaississant

Un 0,1% d'éther de cellulose a été utilisé dans les trois mortiers. Ce dosage est recommandé par le fournisseur "Granitex" pour les matériaux à base de chaux ou de ciment.

NB : - le pourcentage de l'eau est par rapport au poids total du mortier sec

- Un rapport de trois parts de sable avec une part de chaux a été utilisé (DTR E 6.1)

Principe de malaxage :

Dans un mélangeur, tous les matériaux secs ont été mélangés pendant 90 s à basse vitesse. De l'eau a ensuite été ajoutée et mélangée pendant 90 secondes supplémentaires à basse vitesse. Le temps de prise de chaque mortier a été déterminé et les résultats sont présentés dans le tableau 4. La chaux est connue pour sa lenteur et sa vulnérabilité à un âge précoce, ce qui explique son maintien définitif à 123h 04. Selon le tableau 4, utilisation de fibres PZ et PP réduit le temps de prise final de 31h 14 et 28h 04 pour les mortiers M2 et M3 respectivement.

4.5. Résultats et discussions

4.5.1. Essais d'adhérence

4.5.1.1. Arrachement selon les normes EN 1015-12 et EN 998-1

L'adhérence au support s'exerce par l'accrochage mécanique de la première couche. L'adhérence doit être durable et l'enduit doit avoir des caractéristiques mécaniques compatibles avec celles du support (un enduit dur ne sera pas compatible avec un support tendre) : cela évite que l'enduit se décolle en plaques, gonfle ou cloque (on dit que l'enduit "sonne le creux") et arrache donc le support [Weber 2008].

L'essai d'adhérence a été effectué au laboratoire CNERIB sur la base de la norme EN 1015-12, on isole une portion de surface en effectuant une incision ($\varnothing=5\text{cm}$) dans la maquette.

On vient ensuite coller une pastille métallique sur la surface de la maquette. Lorsque la colle est sèche, on dispose l'appareil de traction sur la pastille métallique et on réalise un arrachement.

Enfin on note la force nécessaire à l'arrachement ainsi que le type de rupture

Les résultats obtenus sont consignés dans la figure 4.3.

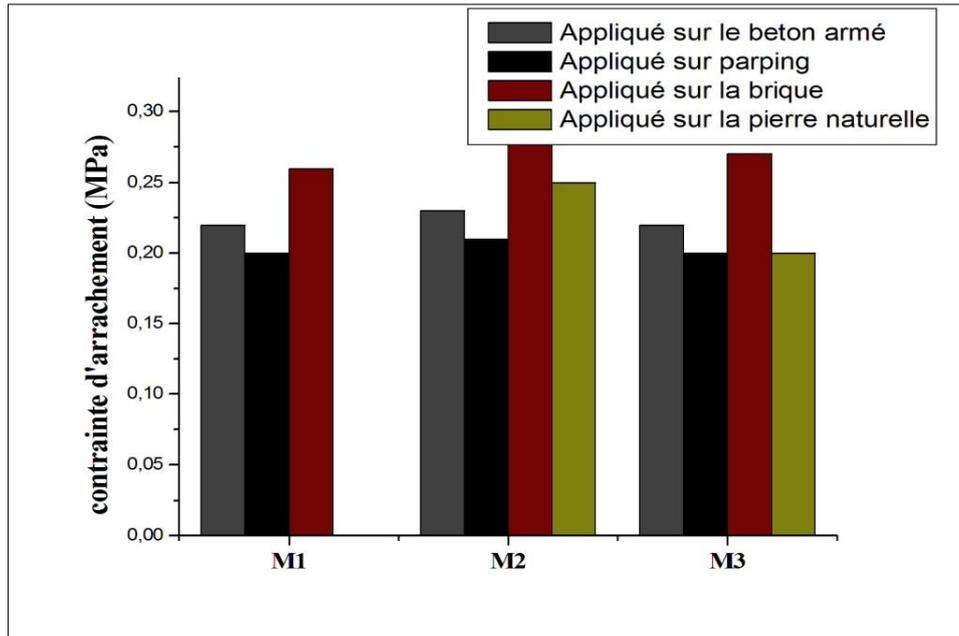


Figure 4. 3 : Contrainte d'arrachement des différents mortiers étudiés

En général, ces résultats sont de l'ordre de 0.2 N/mm², ce qui est largement suffisant pour les travaux d'enduit.

• L'apport de l'épaississant

L'épaississant penta EC18 est le produit assurant cette adhérence. Les éthers cellulose sont employés comme rétenteurs d'eau et agents épaississants ; ils contribuent à l'ajustement de la rhéologie des enduits. Ils font chuter le module d'Young et la densité d'un mortier. Ils forment des films forts et flexibles dans la structure du mortier lui conférant ainsi une meilleure adhérence au support [Jenni et al 2005][Sugo 2001].

Une des hypothèses avancées par [Sugo 2001] est que l'entraînement de l'air ou la rétention d'eau n'est peut-être pas favorable pour certains mélanges à la création d'une bonne adhérence. La cohésion de la pâte est à contrôler lorsque les adjuvants sont ajoutés. Une autre hypothèse peut venir d'une mouillabilité moins bonne lorsque l'éther de cellulose a été ajouté [Nicot 2008]. Pour finir, la nature de l'éther cellulosique peut influencer l'adhérence du mortier sur un support.

• L'apport de la pouzzolane

La pouzzolane a joué un rôle bénéfique pour l'adhérence cas de M2. Même si la pouzzolane est présente dans la formulation M3 les fibres polypropylènes ont réduits l'adhérence ce qui est une conséquence de la réduction de la quantité du liant qui est la clef de l'adhérence [Nicot 2008]

- L'impact du support

La mauvaise rugosité de la surface du parpaing a causé la chute de l'adhérence des mortier hors la brique de terre cuite a présenté une meilleure adhérence, la brique de terre cuite est caractérisée par son taux d'absorption d'eau élevé la qualité d'adhésion dépend principalement du taux d'absorption de l'eau par le support ,plusieurs recherches ont montré la relation entre absorption et adhérence [Groot 2010], [Larbi 1999] .Les trois types de mortiers ont présenté une adhérence meilleure sur les briques que sur un bloc de béton et enfin sur le parpaing .

4.5.1.2. Essai d'Arrachement sur une pierre naturelle

Visualisation de l'essai sur la pierre est présentée sur la Figure 4.4 et 4.5.

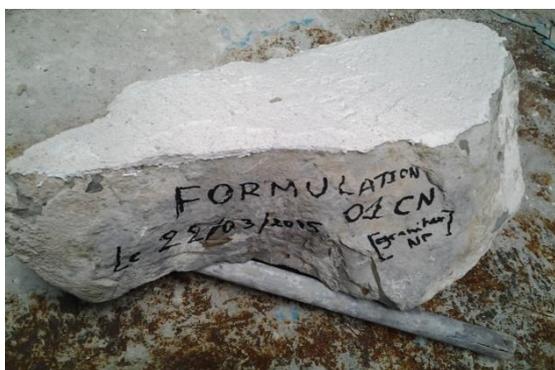


Figure 4. 4 : essai d'arrachement sur la pierre.



Figure 4. 5 : la pierre choisie pour effectuer l'essai.

- Appréciation du support

La plupart des constructions du vieux bâti sont en pierre naturelle la raison pour laquelle on a effectué un essai d'adhérence dont le support est une pierre bleue naturelle de la région de Constantine (est Algérie), la rugosité du support est un facteur important dans l'adhérence du mortier. Une surface trop lisse rendent difficile l'accrochage de l'enduit. Pour cela et à cause de la surface lisse de la pierre Le mortier préparé joue le rôle d'une couche d'accrochage (gobetis).

- Résultat de l'essai

L'essai a été effectué après 28 jours de l'application des trois formulations avec des petites épaisseurs (5 mm)

Nous avons enregistré une contrainte 0,25 N / mm² pour le mortier de (chaux + PZ), et une contrainte de 0.2 N / mm² dans le cas du mortier de (chaux+PZ+FP), mais une contrainte

négligeable Pour le mortier de chaux. Cela est dû à la réaction pouzzolane fournie par la pouzzolane naturelle mélangée à la chaux, qui a donné la dureté et la contrainte au mortier Chung montre que adhérence est encore améliorée par la combinaison d'un éther cellulosique et de fumée de silice [Chung 2004], Bertrand montre que l'ajout d'un éther de cellulose augmente l'adhérence au support (pierre de tuffeau).

4.5.2. Essai de conductivité thermique

L'objectif de l'essai consiste à déterminer la conductivité thermique des différents mélanges et comparer les résultats obtenus,

Paramètres : - flux de chaleur : max 500W/m² et min 20W/m²

- température de chauffage de référence utilisée est de 80°C
- la température de refroidissement de référence est de 30°C

La figure 4.6 présente les résultats de la conductivité thermiques des différents mortiers étudiés

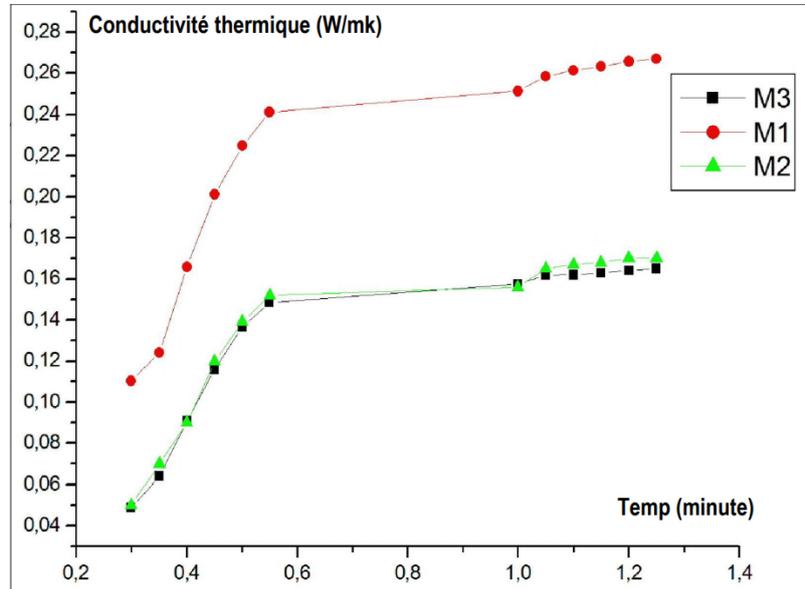


Figure 4. 6 : La conductivité thermique des différents mortiers étudiés

D'après la figure 4.6, on constate une diminution de 40,08% de la valeur de la conductivité thermique des mortiers de pouzzolane et de fibres polypropylènes, la pouzzolane est une roche volcanique connue par sa résistance thermique élevée, elle améliore les performances des mélanges à base de chaux [Barbero et al 2014].

Une petite réduction de la conductivité thermique du M3 par rapport au M2 à été enregistrée dont l'ajout des fibres polypropylènes a joué un rôle bénéfique.

- Argumentation bibliographique

Des études expérimentales sur des mortiers à fibres courtes telles que le polypropylène soulignent des améliorations sur les performances acoustiques, thermiques et mécaniques [Izaguirre et al 2011].

la conductivité thermique des mortiers à base de FP augmente en raison de l'apparition de «ponts thermiques» du à la création des pores après fondement des fibres [Barbero et al 2011], mais il est connu que seulement à partir de 170 ° C, les fibres de polypropylène fondent et créent une porosité connectée [Komonen et Penttala 2003]

Les résultats d'une étude précédente ont aussi montré que les fibres de polypropylène avaient plus d'effet sur la réduction du craquage que sur la réduction des modifications physico-chimiques [Ezziane et al 2011], les fibres de polypropylène limitent La fissuration au cours du chauffage[Ezziane et al 2015].

D'après les travaux de [Missemer et Ouedraogo 2012], les formulations étudiées à base de fibres polypropylènes résistent à l'éclatement après avoir les exposés à une température de 600°C pendant 300 secondes, sous un essai au chalumeau, ce qui prouve l'efficacité de ces fibres vis-vis la chaleur, De la même manière, la fiabilité des résultats de conductivité thermique a été confirmée par rapport aux mortiers de ciment, compte tenu de la conductivité thermique élevée [Stefanidou et al 2010].

En général, les liants classiques(les mortiers sans ciment) présentent une bonne performance thermique, par exemple, la conductivité thermique des mortiers de ciment à base de perliteexpanséa atteint 0,18w/mK [Demirboga et Gul 2003], et elle est 0,44 w/mK dans un cas d'une étude d'un mortier de ciment-chaux et de fibres polypropylène [Palomar et al 2015]

4.5.3. Résistances mécaniques

4.5.3.1. Résistance à la compression

Les résistances à la compression des différents mélanges étudiés sont présentées sur la figure 4.7.

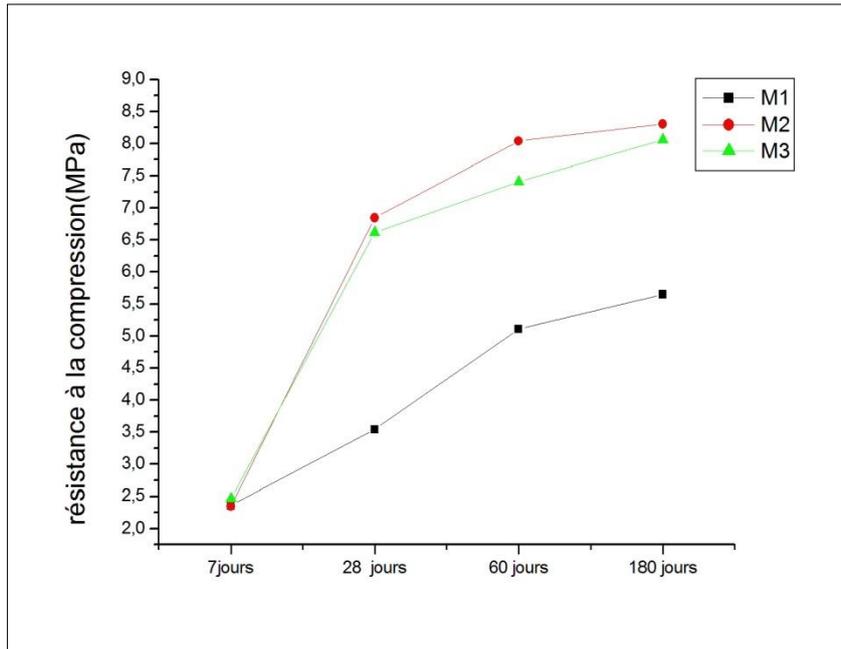


Figure 4. 7 : Résistance à la compression des différents mélanges

a/ Constat

D'après cette recherche, la pouzzolane a amélioré la résistance à la compression surtout à long terme où on a enregistré une amélioration remarquable des résistances des mortiers M2 et M3. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants de la chaux à la pouzzolane, qui devient de plus en plus active.

Tant que l'hydratation se poursuit, plus les produits d'hydratation et des réactions pouzzolaniques sont formés (notamment la formation des hydrosilicates de calcium CSH), lesquels conduisent à une augmentation des résistances mécaniques.

Selon la figure 4.10, la résistance à la compression M3 est inférieure à M2 en raison de l'introduction de fibres PP

b/ Argumentation bibliographique

La chaux mélangée à la pouzzolane donne naissance à des C-S-H et augmente l'hydraulicité du mortier et le rend ainsi capable de durcir sous l'eau et ne pas s'altérer [Kurtz, 2004], [Benkaddour 2009]. [Moropoulou et al 2004].

d'après [Dron 1982] qui a étudié les domaines d'hydratation des liants du système CaO - Al₂O₃ - SiO₂ le point représentatif des pouzzolanes se situe à l'intérieur du triangle formé par le silicate de calcium hydraté C-S-H, l'hydroxyde d'aluminium Al(OH)₃ et l'acide silicique Si(OH)₄. D'après [Largent 1978], L'addition de chaux a pour effet de modifier la

composition globale du système et amène le point représentatif dans le triangle $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H, C_4AH_{13} .

L'efficacité de chacune des matières pozolaniques a été analysée par [Grist et al 2013] en calculant l'indice pozolanique PI (%), ce qui représente la contribution favorable de la pouzzolane à la résistance à la compression, par rapport au liant. [Lanas, Alvarez 2003] et [Lanas et al 2004] ont montré que la résistance en compression après un an de mûrissement est trois fois plus élevée que celle obtenue après 28 jours.

Confirmant ainsi les résultats de [Puertas et al 2003]. [Kerstin et al 2002], où ils ont constaté que les propriétés mécaniques diminuent avec l'incorporation de fibres de polypropylène dans les mortiers de ciment, et ils ont associé ce comportement au fait que cet additif donnait un matériau moins malléable avec une faible compaction [Vejmelkova et al 2012]

[Lanas et al 2004] et [Ardaillon 1897] ont également rapporté que les discontinuités le long de la structure du mortier conduiraient à une diminution de la résistance mécanique. La carbonatation de la calcite par la portlandite étant le seul moyen de durcissement dans les mortiers de chaux aérienne, la continuité de la calcite formée pourrait être essentielle pour obtenir un bon comportement mécanique. Une trop grande quantité de fibres de polypropylène pourrait affecter cette continuité et empêcher le matériau de générer une matrice cohérente. Dans les mortiers de chaux, une limite de dosage des fibres peut exister ce qui leur permet d'obtenir un renforcement souhaitable sans affecter la continuité de la matrice dans une mesure dangereuse et sans nécessiter une quantité d'eau extrêmement élevée qui serait préjudiciable au comportement du mortier.

c/ Confirmation de la création des silicates de calcium hydratés par le test de DRX

L'amélioration de la résistance à la compression du mortier M2 et M3 est confirmée par les résultats obtenus par le test de DRX en effet:

- Les spectres ci après (figure 4.8 et 4.9) mettent en évidence la présence de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ non gazéifiée, cette dernière étant à l'origine de l'amélioration de la résistance à la compression des mortiers M2 et M3 constatée lors de l'essai d'écrasement représenté sur la figure 4.7

PRECISION : le test a été effectué après 6 mois de durcissement du mortier soumis à l'essai pour être en conformité avec l'âge des mortiers soumis à l'essai de compression.

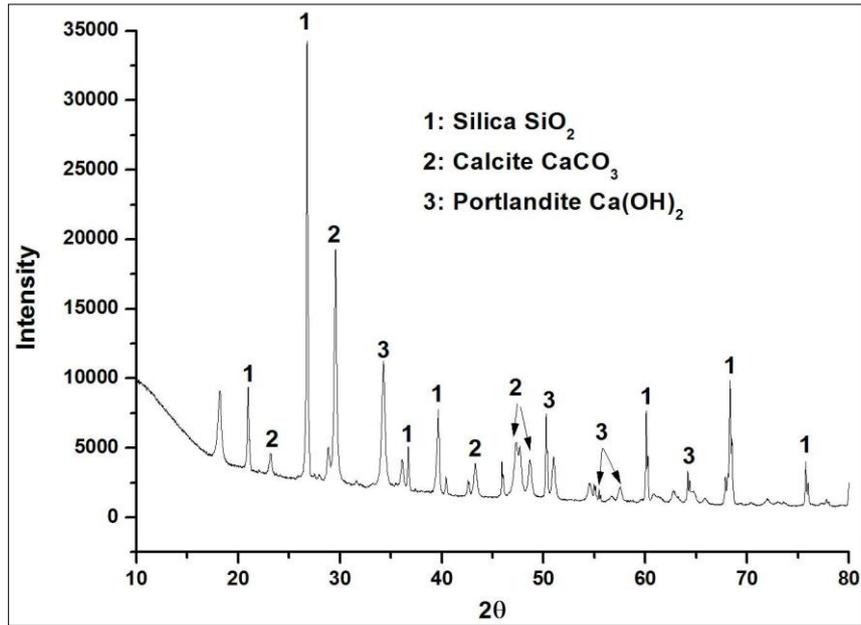


Figure 4. 8 : Diffraction des rayons X du mortier M2 (pouzzolane+chaux)

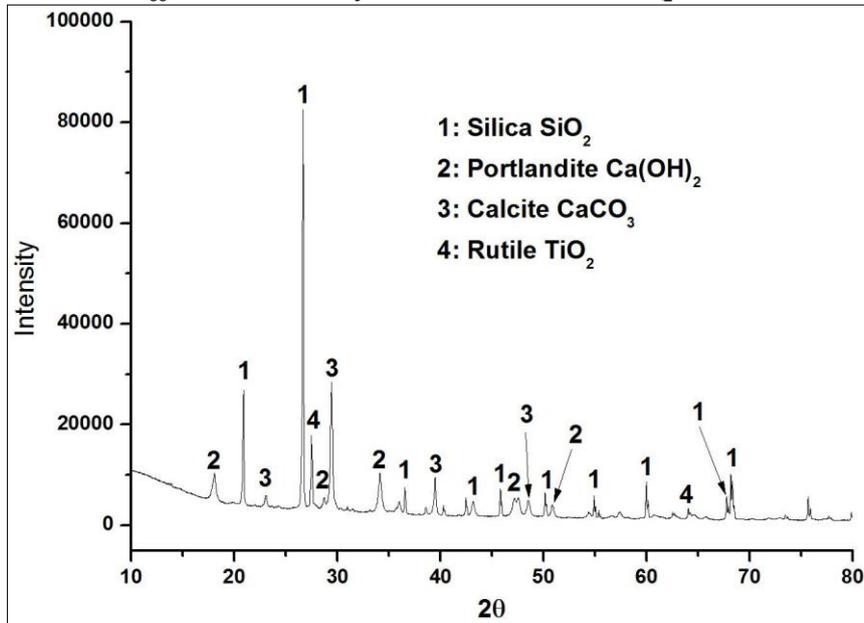


Figure 4. 9 : Diffraction des rayons X du mortier M3 (pouzzolane + chaux + fibres polypropylènes)

4.5.3.2. Résistance à la traction

La figure 4.10 présente les résultats de la résistance à la traction des différents mélanges.

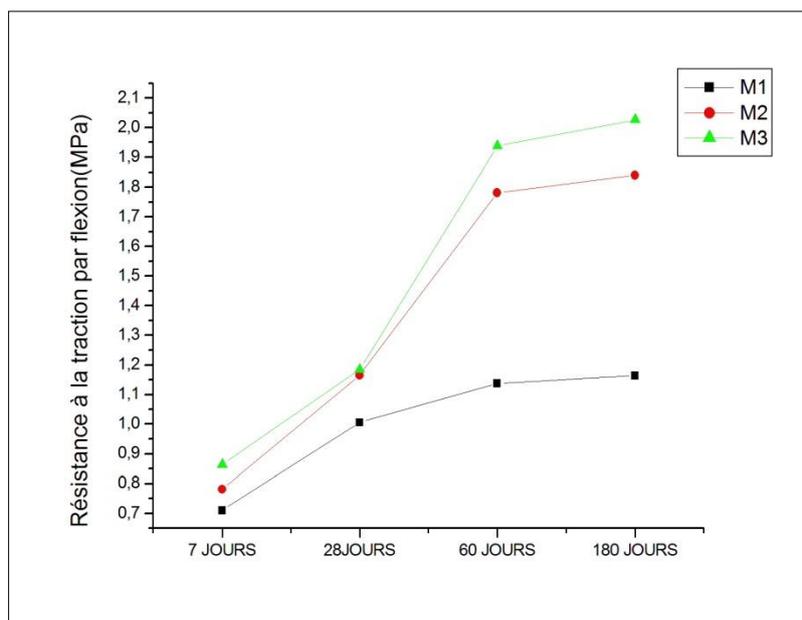


Figure 4. 10 : Résistance à la traction par flexion des différents mélanges

L'utilisation de la pouzzolane a été bénéfique aussi pour la résistance en traction, voir figure 4.10. Mais on constate que les fibres polypropylènes ont joué un rôle important en ce qui concerne la résistance à la traction :

- une augmentation de 9% par rapport au mortier M2
- une augmentation de 14% par rapport au mortier M1

En général les fibres sont connues par leurs résistances élevées à la traction.

Selon la littérature :

Les fibres de polypropylène sont utilisées dans le béton de mortier de sable pour diminuer le retrait plastique, la fissuration et microfissuration de la surface [Grzybowski et Shah 1990]. Ils augmentent la cohésion et réduisent la chute [Johnston 1996] ainsi que la résistance en flexion et en compression peut s'améliorer de 16% à 211% entre 28 et 120 jours. [Bromlet 2000]

4.5.3.3. Variation pondérale

Parfois la légèreté est un paramètre essentiel dans la réhabilitation du vieux bâti, surtout pour la rénovation des éléments horizontaux, planchers, poutres et poutrelles. La figure 4.11 présente la variation pondérale des différentes éprouvettes effectuées après 7 et 60 jours.

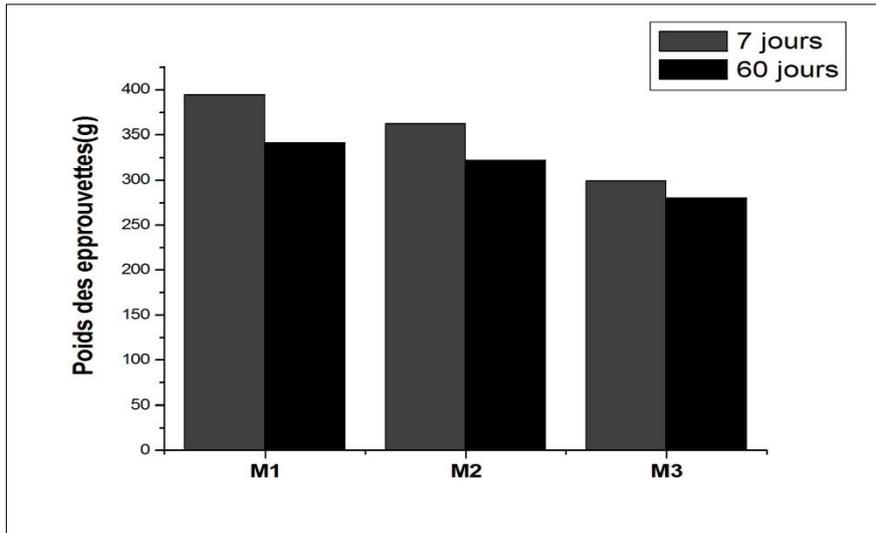


Figure 4. 11 : Variation pondérale des différents mélanges

Formulation M2 (chaux + pouzzolane) :

Comme la masse volumique de la pouzzolane utilisée est de 2.68 (t/m³), les éprouvettes à base de pouzzolane ont un poids réduit par rapport aux éprouvettes à base de chaux, nous avons enregistré à 60 jours, une chute de 5.26%.

Formulation M3 (chaux + pouzzolane + fibres polypropylène) :

Mais l'ajout de fibres polypropylènes, et grâce à leur légèreté remarquable, les mortiers de CH+PZ+FS ont enregistré une chute de 18.12% par rapport aux mortiers de chaux, ce qui est bénéfique pour les travaux de rénovation

4.6.Application sur chantier

Dans le cadre de rénovation du vieux bâtis de la ville de Constantine, Des tests de jointement de pierres avec le mortier M2 et des essais d'enduit avec les trois formulations cités ci-dessus. (M1,M2 et M3) ont été réalisés

Le joint à base de chaux et de pouzzolane retenu, outre le fait qu'il homogénéise l'ensemble de la maçonnerie, permet, la continuité mécanique des efforts transmis, en protégeant le hourdage et, assure une certaine étanchéité du parement.

4.6.1. Préparation des surfaces

Les joints des maçonneries ont été débarrassés des micro-organismes, des mousses et de la végétation. Les travaux de jointoiment ont été réalisés de la même manière que le rejointoiment, hormis le dégarnissage des joints [NF P 95-107]. La photo 4.4 représente le sablage des surfaces.



Photo 4. 4 : Sablage des surfaces

✓ Même si l'utilisation de la chaux éteinte à l'extérieur est déconseillé pour la rénovation des bâtiments à l'extérieur mais selon la littérature et grâce à l'ajout de la pouzzolane le mélange chaux-pouzzolane devient un mélange hydraulique [EN 998-1] [EN 459-1] [Moropoulou et al 1996].

Sur le plan esthétique, les maisons anciennes sont reconnues pour leur façade harmonieuse et leur intégration dans l'environnement local : l'emploi de la chaux contribue à retrouver l'état original des façades

✓ Les résultats obtenus sont jugés satisfaisants, sur le plan esthétique et sur le plan adhérence Les photos 4.5, 4.6 et 4.7 montrent la façade principale avant, pendant et après notre intervention.



Photo 4. 5 : Façade principale avant intervention.



Photo 4. 6 : Façade principale pendant l'intervention.



Photo 4. 7 : Façade principale après l'intervention.

4.7. Conclusion

La formulation d'un mortier de réparation est complexe, elle dépend de plusieurs facteurs, non seulement des composants du mortier lui-même mais aussi des caractéristiques du support ancien

La compatibilité du mortier élaboré avec le support ancien est la première exigence des mortiers de réparation, une construction à base de pierre n'est pas compatible avec un mortier à base de ciment.

L'adhérence est également une caractéristique essentielle pour les mortiers de réhabilitation. Un mortier bien adhérent au support protège mieux la surface et conduit à sa durabilité.

Afin de sauvegarder le vieux bâti de la ville de Constantine (Algérie) et dans le cadre de l'événement CONSTANTINE CAPITALE DE LA CULTURE ARABE, une étude de diagnostic est avérée essentielle, un immeuble vieux bâti situé au centre de la ville est choisi comme cas d'étude, une analyse chimique des mortiers de revêtement de cet immeuble a été effectué dans le but de reproduire un mortier équivalent au mortier ancien ,ce diagnostic a permis de déceler trois types de mortier M1, M2 et M3. La compatibilité avec le support ancien, l'adhérence et la résistance thermique de ces mortiers sont les piliers majeurs de ce chapitre Des essais d'adhérence sur trois types de supports ont été réalisés.

Les contraintes obtenues sont suffisantes pour les différents travaux de rénovation. Les tests d'adhérence entre les mortiers M2 et M3 et la pierre ont donné des résultats acceptables pour les travaux de réhabilitation mais le mortier M1 qui est composé à base de chaux seulement n'a pas pu adhérer à la pierre.

Le vieux bâti à base de pierre présente également un confort thermique remarquable. Afin de garder ce confort, l'introduction d'ajout de pouzzolane et de fibres polypropylènes s'est avérée très bénéfique.

L'ajout de la pouzzolane à la chaux a présenté une augmentation des résistances mécaniques du mortier surtout à long terme, et l'ajout des fibres polypropylènes augmenta la résistance à la flexion, sachant qu'une résistance très élevée des mortiers de revêtement n'est pas favorable. Les fibres polypropylènes et la pouzzolane ont également réduit le poids des mortiers élaborés ce qui est une caractéristique importante pour les travaux de réhabilitation.

CONCLUSION GENERALE

Dans la première partie de ce mémoire, les différents composants des matériaux cimentaires ont été passés en revue. Le rôle et les effets des additions, et des fibres, familier au praticien ont été explicités. Contrairement aux idées reçues, leurs influences dépendent des interactions avec d'autres composants. De plus, les résultats expérimentaux relevés dans la littérature ont montré une grande disparité de leurs comportements.

La deuxième partie a montré le rôle des mortiers de réparations dans la restauration des ouvrages, les différentes causes de dégradations de constructions et leur conséquences sur le mortier ont été expliqués.

C'est donc dans ce cadre que s'est inséré ce mémoire sur l'influence des additions minérales en présence de fibres sur les mortiers de réparation, des essais expérimentaux ont été effectués en vue de conforter ou compléter les éléments bibliographiques présentés. Les additions ont été identifiées par leur finesse, leur masse volumique et leur nature minéralogique.

Ces additions ainsi que les fibres de carbones et les fibres polypropylènes sont les composants du mortier étudié. Le mortier élaboré est destiné principalement pour la réhabilitation des ouvrages, le ragréage des façades et le remplissage des joints dégradés

Dans la partie investigation expérimentale, L'influence des quatre additions minérales (les fillers calcaires, Fumés de silice, laitiers et les pouzzolanes) a été étudiée et débattue à partir de nombreux essais sur mortiers. Pour chacune d'elles, ce comportement des mélanges à l'état frais (masse volumique, maniabilité) puis à l'état durci (résistances mécaniques) à différentes échéances pour différents taux de substitution est analysé. Les mortiers ont été confectionnés avec un rapport E/L= constant.

Afin d'appliquer les formulations étudiés dans un cas réel, un immeuble vieux bâti a été retenu comme échantillon, objet d'un cas d'étude, réalisé à l'époque coloniale avec les techniques de construction de l'époque.une étude de diagnostic détaillée a été effectuée.

Suite à l'analyse chimique du support ancien, ils s'est avéré que les formulations étudiées en chapitres trois (à base de ciment) sont reconnues ne pas être adaptées pour ce genre de constructions (à base de pierre), l'utilisation de la chaux au lieu du ciment dans ce cas est incontournable.

Trois formulations à base de chaux de pouzzolanes et de fibres polypropylène ont été étudiées. Un essai d'adhérence à été effectué sur trois types de supports ainsi que sur une pierre bleu de la région de la wilaya de Constantine.

La construction à base de pierre offre un confort climatique reconnu, pour garder ce confort un essai de conductivité thermique a été effectué sur les trois formulations élaborées

Parfois la légèreté est un paramètre essentiel dans la réhabilitation du vieux bâti, surtout pour la rénovation des éléments horizontaux, planchers, poutres et poutrelles, la variation pondérale des différents mortiers ainsi élaborés a été mesurée, et des essais sur la résistance à la compression et à la flexion par traction ont été aussi menés

Cette campagne d'essais a permis de confronter nos résultats avec les travaux antérieurs et qui sont souvent contradictoires. Ceci n'étonne pas puisque les interactions entre le ciment, la chaux et les additions sont fortement influencées par les compositions chimiques et minéralogiques des ces matériaux, ce qui confirme la complexité des interactions entre les différents matériaux car le mélange de ces ajouts n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants.

Sur le plan général, l'hydratation du ciment est favorisée par la présence d'une fine minérale avec sa finesse et son dosage. Toutes les additions utilisées ont donné lieu à une augmentation de masse volumique.

La meilleure maniabilité a été constatée pour un mortier avec ajout de fumée de silice avec un taux de 10%, ce taux a également présenté un optimum dans le cas des fillers calcaires et Les laitiers présentent une croissance dans le temps d'écoulement en fonction du taux de substitution. Le taux de 10% de pouzzolane a augmenté la fluidité du mortier

L'ajout de fibre de carbone n'a pas trop influencé la maniabilité des mortiers. La masse volumique des mortiers de (FC+PZ) et des mortiers (FS+FC) est beaucoup plus inférieure à la masse volumique du mortier témoin,

Au-delà de 14 jours les résistances des mortiers à base de pz de FS et de fibres ont dépassé les résistances du mortier témoin, l'introduction des fibres de carbone a augmenté les résistances à la compression, l'effet bénéfique qu'apportent les fibres de carbone aux mortiers à base de pouzzolane et de fumée de silice pour la résistance à la traction est remarquable.

Pour les mortiers de chaux, Les éthers cellulosiques sont employés comme rétenteurs d'eau et agents épaisissants, Ils favorisent l'adhérence des mortiers aux différents supports, la

pouzzolane a joué un rôle bénéfique pour l'adhérence et pour la résistance thermique des mortiers, les fibres polypropylènes ont eu aussi un effet bénéfique sur la résistance thermique des mortiers

L'essai d'analyse de rayons X (DRX) a confirmé l'effet bénéfique qu'apporte la pouzzolane à la chaux notamment la création des CSH (silicates de calcium hydratés) qui sont l'origine de la résistance des mortiers à base de pouzzolane et de la chaux.

En résumé un mortier de réparation demande beaucoup plus d'exigences qu'un mortier ordinaire, l'adhérence, la compatibilité avec le support ancien, sont des paramètres essentiels pour l'élaboration d'un mortier de réparation, de ce fait L'étude de diagnostic est un passage obligatoire de toute réhabilitation. Elle permet par l'expertise technique de déterminer la nature des matériaux de base

La formulation des mortiers passe par plusieurs étapes, par des règles bien définies et d'autres exigences pour pouvoir qualifier le mortier comme mortier de réparation.

Perspectives :

- Etude rhéologique des différents mortiers permettrait de préciser le rôle de la viscosité et de la consistance des mortiers sur le retrait à jeune âge, sur l'adhérence et sur la fissuration.
- Caractérisation de la mouillabilité des mortiers par rapport à un support absorbant.
- Influence des facteurs environnementaux (Température, Humidité Relative, Vitesse du vent, carbonatation, Cycles gel-dégel, Cycles Humidification-Séchage) sur les phénomènes et les indicateurs de durabilité.
- Constitution de bases de données pour l'élaboration d'un système Expert aidant à prendre les décisions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adenot F. Durabilité du béton: caractéristique et modélisation des processus physique et chimique de dégradation du ciment. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 1992
Aichoube A, Ghrici M, Benaissa A. Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire. Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005
AIT Ameur. Contribution a l'étude expérimentale des bétons renforcés des fibres d'acier locales, Mémoire de magister, Université Tiaret, 1998.
Aitcin P.C. Concrete the most widely used construction material, Adam Neville Symposium on Concrete Technology, 2nd CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, SP-154, Las Vegas, p. 257-266, 1995.
Aitcin P.C. La compatibilité ciment/superplastifiant, Rapport interne, Chaire industrielle en technologie du béton, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada, J1K 2R1, PQ, p 29, 1996.
AL-Mishhadani Shakir, Al- Hyally Israa, AL- Attar Aly. Some properties of light weight concrete containing carbon fiber. Iraqi Journal of Civil Engineering, Vol6, N°1 June 2009
Al-Mukhtar M, Kevin Beck. Caractéristiques d'un mortier é a base de chaux et de poudre de roche pour la restauration des monuments. Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen, Meknés, Maroc. RIPAM, p 26-28, septembre 2005.
Amouri Chahinez. Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires. Thèse de doctorat en science en génie civil. Université Constantine, 2009.
Andrew J. Edwards. Properties of hydraulic and nonhydraulic limes for use in construction, thèse de doctorat, Napier university school of the built environment, Scotland, May 2005
Appa Rao G. Development of strength with age of mortars containing silica fume, Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 1141-1146, 2001.
Ardaillon E. Les mines du Laurion dans l'antiquité , p 65 ,Paris 1897
Avier M, ClarkeP. Experimental Techniques for the Investigation of the Effects of Impact

Damage on Carbon Fiber Composites. Composites Science and Technology, vol 55, n°2, p157-169. 1995
Baalbaki M. Influence des interactions du couple ciment-adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons, Thèse de doctorat en science, université de Sherbrook, Canada, 1998.
Barbero Barrera M M, Garcia-Santos A, Gonzalez Neila F.J. Thermal conductivity of lime mortars and calcined diatoms. Parameters influencing their performance and comparison with the traditional lime and mortars containing crushed marble used as renders, Elsevier, Energy and Buildings, vol 76, p422-428, March 2014
Baron J et al. Le béton hydraulique (connaissance et pratique). Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, France, 1995.
Barron J, ollivier J.P. Les bétons, Bases et données pour leur formulation, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition Eyrolles, Paris, 1997.
Beaudoin, J. J. Béton renforcé de fibres' institut de recherche en construction. Conseil nationale de recherche, Canada, p.04 ,1982.
Béderina, Khenfe M, Dheilly M, Quéneudec M. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. Cem Concr Res, Vol 35, p 1172-1179, 2005.
Belaribi B, M Semcha, L Laoufi. Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Can J Civ Eng, Vol 30, 2003
Belferrag Allaoua. Valorisation des fibres métalliques issue des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, thèse de magister, Université de Ouargla, 2006
Benachour. Y. Etude expérimentale sur l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructural, de transfert et de durabilité des mortiers, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2009.
Benaddi, EL hachemi. Formulation et Caractérisation des Bétons Autonivelants pour les Travaux de Réparation. Thèse de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2008.
Benkaddour Mokhtaria, Kazi aoual Fatiha, Semcha Abdelaziz. Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. Revue Nature et Technologie, n°1, p 63-73, Juin 2009.
Bessa-Badreddine A. Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers. Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004

Bouali Khaled. Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires. Mémoire de Magister. Université m'hamed Bougara, Boumerdes. 2014
Bouanane Kentouche N. patrimoine et sa place dans les politiques urbaine algériennes. mémoire pour l'obtention du diplôme de magister, université Constantine, Algérie 2008
Bouchekouk, M.M. Etudes du béton renforcé par les fibres de verre enduites de polymère thermoplastiques, thèse doctorat, INSA de Lyon, France, 1992
Boudchicha A. Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, Thèse de doctorat, université de Constantine, 2007.
Bouraoui S. Effet des sulfates alcalins sur les propriétés des ciments avec et sans superplastifiant, Mémoire de maître ès Sciences appliquées, Département de génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada, 115 p, 1997.
Branch J, Hannant D J, Mulheron M. Factors affecting the plastic shrinkage cracking of high-strength concrete. Magazine of Concrete Research, vol. 54, n°5, p 347-354, 2002.
Bromlet Ph. Evaluation of the durability and compatibility of traditional repair lime-based mortars on three limestones. Int. Journal for Restoration of Building Monuments, vol 6, N° 5, p 513-528. 2000.
Calvados Stap du Calvados. Réhabilitation du bâti ancien, http://www.calvados.gouv.fr/ , 2013
Carde C. Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaire. Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 1996
Cheikh-Zouaoui M. Contribution a l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons a hautes résistances. Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine-Algérie, 2007.
Chihaoui R, H. Khelafi, M. Mouli, Y.Senhadji. Effets de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques sulfatiques. SBEIDCO, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran, Algeria, October 12-14, 2009
Chung D.D.L. Use of polymers for cement-based structural materials. Journal of Materials Science, vol 39, p 2973-2978, 2004
Chung D D L, Chung J. H, Wang S. Impact Damage of Carbon Fiber Polymer-Matrix

Composites, Monitored by Electrical Resistance Measurement. Composites, Part A, vol 36, p 1707-1715, 2005
Chung Deborah D.L. Carbon Fiber Reinforced Concrete. Department of Mechanical and Aerospace Engineering State University of New York at Buffalo. SHRP-ID/UFR-p 92-605. April 1992
Chung Deborah, Eddib Asma. Radio-frequency linear absorption coefficient of carbon materials, its dependence on the thickness and its dependence on the carbon structure. Carbon 124, Vol 09, Septembre 2017.
Chung Deborah. Cement reinforced with short carbon fibers: A multifunctional material. Composites Part B Engineering 31(s 6-7), p 511-526, October 2000
Cimbéton Collection technique Cimbéton .Tom 2. G11. Réédition janvier 2013
Daojun Wang, Shoukai Wang, Chung D. D. L, Chung Jaycee. Comparison of the Electrical Resistance and Potential Techniques for the Self-sensing of Damage in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composites. Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol 17, p 853, October 2006
De Larrard F, Moreau A, Buil M, Paillere A M. Improvement of mortars and concretes really attributable to condensed silica fume. 2nd international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans, Vol 2, p 959-971, Madrid 1986
De Larrard F. Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Rapport de recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 149, France, 1987.
Debicki, G. Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance a la fissuration des matériaux. Thèse de doctorat, INSA de France Lyon, France, 1988
Demirboga R, Gul R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of light weight concrete, Cement and Concrete Research, vol 33, n°5, p 723-727. 2003
Dotto J. M. R, Aguida Gomes de Abreu, Denise C.C. Dal Molin, I. L. Muller. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. Cement and Concrete Composites ,vol 26(1),p 31-39 · January 2004
Double D.D. New development in understanding the chemistry of cement hydration, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A310, p. 53-66, 1983.
Dron R., Voinovitch I.A. L'activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes in Le béton hydraulique Paris, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,

1982.
EN 459-1, EN 459-2, EN 459-3. Building lime. Part 1: Definitions specifications and conformity criteria, part 2 test methods, part 3 conformity evaluation.1996
EN 998-1. Specification for mortar for masonry.Part 1: rendering and plastering mortar. European Committee for Standardization.2003
Ezziane K, Bougara A, Kassoul A. Efficacité du laitier d’El Hadjar par le concept du liant équivalent. 2ème colloque Maghrébin en Génie Civil, p 87-96, Biskara, Algérie, 10-11 décembre 2002
Ezziane M, L Molez, R Jauberthie, D.Rangeard. Heatex posuretestsonvarious types of fibre mortar, Eur J Environ Civil Eng. V 15 , p 715–726, 2011.
Ezziane Mohammed, Kadri Tahar, Molez Laurent, Jauberthie Raoul, Belhacen Ali. High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced Mortars, Fire Safety Journal,vol 71, p324–331, 2015.
Falchi Laura, Urs Müller, Fontana Patrick, Francesca C. Izzo, Elisabetta Zendri. Construction and Building Materials, vol 49, p272–280, 2013.
Fariborz Vossoughi. Electrical Resistivity of Carbon Fiber Reinforced Concrete. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720. MARS 2004
Ginouves R. Les mortiers de pouzzolanes artificielles chez vitruve évolution et historique architecturale. Thèse de D.E.A, Université Paris X-Nanterre, 1992-1993
Gosh S.N. Advances in Cement Technology, Permagon Press Ltd, 1983.
Grist E R, Paine K A, Heath A, Norman J, Pinder H. Compressive strength development of binary and ternary lime–pozzolan mortars, Materials and Design, vol 52, p 514–523, 2013.
Groot C.J.W.P, J.T.M. Gunneweg. The influence of materials characteristics and workmanship on rain penetration in historic fired clay brick masonry. HERON, Vol 55 ,N° 2,2010.
Grzybowski M, S.P.Shah. Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, ACI Mater.J. vol 87,p 138–148. 1990
Guillaume Camps. Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d’un élément de stockage en béton. Doctorat de l’université de Toulouse 2008.
Houget, V. Etude des caractéristiques mécaniques et physicochimiques de composites ciments fibres organiques. Thèse de doctorat, INSA, Lyon, France 1992.

<p>Houhou M. N, Mezghiche B. Influence de l'ajout pouzzoulanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment. 2ème colloque Maghrébin en Génie Civil, p. 129-137, Biskara, Algérie, 10-11 décembre 2002.</p>
<p>https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/577947/mortier-de-reparation</p>
<p>Humboldt K.D.H, Wedag A.G. L'évolution technologique du four rotatif avec préchauffeur à cyclones vers le four court, Pyrorapid, 1986.</p>
<p>Husson S. Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers, Thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991.</p>
<p>Izaguirre A, Lanas J, Alvarez J. Effect of polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars. Constr Build Mater, vol 25, p 992–1000. 2011</p>
<p>Jenni A, L. Holzer, R. Zurbruggen, M. Herwegh. Influence on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. Cement and Concrete Research, vol 35, p 35-50. 2005.</p>
<p>Johnston C D. Proportioning mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete. Proceedings of the international RILEM conference, edited by Bartos, Mars and Cleland, E&FN Spon, London, p 155 179, 1996.</p>
<p>kadjile edouard. Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité. Thèse de master, institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. juin 2010</p>
<p>Kenneth Sandin. Mortars for Masonry and Rendering Choice and Application. Volume 7, N° 3, Building Issues ,1995.</p>
<p>Kerstin Elert, Carlos Rodriguez-Navarro, Eduardo Sebastian Eric Hansen and Olg. Studies in Conservation, Vol 47, N°1, p 62-75, 2002.</p>
<p>Komonen J, V.Penttala. Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fibre reinforced cement pastes. Fire Technol .vol 39, p 23–34. 2003</p>
<p>Kribeche J, Youcef Ali. Manuel des typologies constructives, architecturales et architectoniques de la vieille ville de Constantine, p58-81, octobre 2012</p>
<p>Kriker, A. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortier renforcés par ces fibres en climat chaud et sec. Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2005.</p>
<p>Kurtz Jean-paul. Dictionary of Civil Engineering, Springer Science & Business Media,</p>

2004
Kwan A.K.H. Use of condensed silica fume for marking high-strength. self-consolidating concrete Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 27, p 620-627, 2000
Lacroix R, Fuentes A, Thonier H. Traité de béton armé. Edition EYROLLES Paris, 1982.
Lanas J, Alvarez J I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior . Cement and Concrete Research , vol 33, p 1867-1876.2003
Lanas J, Pérez J L, Bello M A, Alvarez Galino J I. Mechanical properties of hydraulic lime- based mortars . Cement and Concrte Research, vol 34, p 2191-2201. 2004.
Larbi L, Groot C.J.W.P. The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. Heron, vol 44, n°2, p 63-78, 1999
Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars: effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. Cement Concret Research, vol 35, p 1092-1105, 2005
Lea F.M. The Chemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold Ltd, London, 1970.
Locher F.W, Richartz W, Sprung S. Studies on the behavior of C3A in the early stages of cement hydration, Seminar on the Reaction of Aluminates During the Setting of Cements, Eindhoven, Netherlands, Ed. Cembureau, Avril 1980.
Madhkhan M, Azizkhani R, Torki Harchegani. Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements, Construction and Building Materials, vol 26, p 102–112, 2012.
Maggion R. Etude bibliographique sur l'hydratation et la structure du ciment, Centre de recherche sur les solides à organisations cristalline imparfaite, France, 1989.
Mammar I, M Mouli. Etude de réhabilitation d'un immeuble vieux bâti a oran, sbeidco, 1st international conférence on sustainable built environment infrastructures in developing countries ENSET Oran, Alegria, 2009
Manai K. Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise, Sherbrooke, Canada, 1995.
Mehta P.K. Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, 1986.
Missemer L, E.Ouedraogo. Influence de la nature des fibres synthétiques incorporées sur le comportement au feu des BFUP : cas du BCV .Colloque sur les performances du béton soumis à haute température, Université de Cergy-Pontoise, France, Octobre 2012.

Mokhtari Abdessamed. Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier. Mémoire de magister, 2006.
Moropoulou A, A. Cakmak, K.C. Labropoulos, R. Van Grieken, K. Torfs. Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars, <i>Cement and Concrete Research</i> , vol 34, p 1 –6, 2004.
Moropoulou A, T h Tsiourva, K Bisbikou, G Biscontin, A Bakolas, E Zendri. Hot lime technology imparting high strength to historic mortars, <i>Constr. Build. Mater.</i> vol10, p 151–159, 1996.
Nagataki S, Fujiwara H. Self-compacting property of highly flowable concrete, <i>Proceeding, ACI SP 154, Las Vegas</i> , p. 301-314, 1995.
Neville A.M. Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Edition Eyrolles, 2000.
Nicot Pierre M. Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier, Thèse de doctorat, l'Université Toulouse III, Paul Sabatier, p 48-115, octobre 2008.
Older I, Wonneman R, Hydration of C3A in Portland cement in the presence of different forms of calcium sulfate, 7 th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, vol 4, p 510-513, 1980.
P.Ellis [Internet]. Gauging lime mortars. < www.buildingconservation.com/articles/limegauging.htm >. [updated 2001, accessed 2013]
Palomar I, Barluenga G, Puentes J. Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance, <i>Construction and Building Materials</i> , vol 75, p 306–314, 2015.
PCA, Portland Cement Association. Masonry Information, Factors affecting bond strength of masonry, Page6, 1994.
Pigeon M, Toma G, Marchand J, Bissonnette B. Etude expérimentale du retrait endogène restreint au jeune âge. <i>Materials and Structures</i> , vol 36, p 666-672, 2003
Pliskin L. La fabrication du ciment, Edition Eyrolles, 1993.
Puertas F, Amat T, Fernandez-Jimenez A, Vazquez T. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibers. <i>Cem Concr Res</i> , vol 33, 2003.

R. LARGENT. Estimation de l'activité pouzzolanique – recherche d'un essai. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Réf. 2143, P 61-65. janv-févr 1978
Regourd M. Microstructure et propriétés des ciments, mortiers et bétons. Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, vol 82, n° 1, p 41-49, 1982.
Rossi P, Harrouche N, Belloc A. Méthode de composition des bétons de fibres métallique. Annales ITBTP, n°475,Série : Béton 266, Juin-Juillet 1989.
Soroka I, stern N. calcareous fillers and compressive strength of portland cement. CEM, Concr, Res, vol 6, n°3,p 367-376, 1976
Stefanidou M, M Assael, K Antoniadis, G Matziaroglou. Thermal conductivity of building materials employed in the preservation of traditional structures, International Journal of Thermophysics, vol 31, p 844–851. 2010.
Sugo H O, A.W. Page, S.J. Lawrence. The development of mortar/unit bond. Proceedings of the 9th Canadian Masonry Symposium, 2001.
Teixeira B, Valente C.S, Velosa A.L, Veiga M.R, Ferreira I.M. Development of lime based mortars for repairing glazed tiles coatings of historic buildings in the city of Ovar, Portugal. In HMC08, 1st Historical Mortars Conference, Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Lisbonne, LNEC, 24-26 septembre, 2008.
Thu Hien Tran. influence des caractéristiques intrinsèques d'un mortier sur son encrassement biologique. Thèse de doctorat. Ecole des mines de saint Etienne.2011
Torgal Pacheco F b, Faria J a, Jalali S. Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil, Construction and Building Materials, vol 30,p 488–494, 2012.
Vejmelkova Eva, Martin Keppert, PAVLA Rovnanikova, Zbynek Kersner, Robert Cerny. Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar, Elsevier, Cement & Concrete Composites, vol 34,p 486–492, 2012.
Venuat M. La pratique des ciments et des bétons, Edition du Moniteur, Paris, p. 75-224, 1976.
Vernet C. Séquence cinétique des réactions d'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de gypse de chaux et de fillers calcaires, Proceeding of the 8 ^{ème} Congrès International de la Chimie des Ciments. RIO de Janeiro-Brasil, V3 pp.70-74, 1986.
Von Euw V. Ciment contenant des additions minérales, Preceding of the 8 ^{ème} Congrès International de la Chimie des Ciments. RIO de Janeiro-Brésil, V7, pp 170-177, 1986.
Wasan I, Khalil, Akar Abdulrazaq. Mechanical Properties of High Performance Carbon

Fiber Concrete. Eng & Tech Journal, Vol 29, N°5, 2011
Weber et Broutin. Restaurer le caractère du bâti ancien. France, 2008
Yoshitake K, Shiba K, Suzuki M, Sugita M and Okuhara Y. Damage Evaluation for Concrete Structures using Fiber Reinforced Composites as Self-Diagnosis Materials. In: Eric Udd and Daniele Inaudi (eds), Smart Structures and Materials, Smart Sensor Technology and Measurement Systems, Proceedings of SPIE, Vol. 5384, pp 89-97, 2004
Zhang Hua, Yang Liu , Hao Sun , Shoufeng Wua. Transient dynamic behavior of polypropylene fiber reinforced mortar under compressive impact loading. Construction and Building Materials, vol 111, p 30–42, 2016.
Velosa Ana Luisa, Rocha Fernando, Rosário Veiga. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. Acta Geodyn. Geomater. Vol 6, N°1,p 121–126, 2009.
Patural Laetitia, Marchal Philippe, Govin Alexandre, Grosseau Philippe, Bertrand Ruot, Olivier Devès. Cement and Concrete Research, vol 41, n°1, p 46-55, 2010.
Ozerkan Nesibe Gozde, Bappy Ahsan, Said Mansour, Srinath R. Iyengar. Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars. International Journal of Sustainable Built Environment. Vol 2, p131–142,2013
Andrejkovicova S, Alves C, Velosa A, Rocha A. Bentonite as a natural additive for lime and lime–metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings. Cement & Concrete Composites, vol 60, p 99–110,2015

