République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Dr.YAHIA Farés de MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière

Filière : Génie Civil

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en génie civil

Option : structure

THEME :

Etude de l'activation thermique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques d'un mortier de ciment normalisé

Proposé et encadré par :

Pr. KENAI. Said
Melle Boukhelkhal Djamila

Présenté par :

Mme BERKANI-BOUMEHDI Akila

Juin 2015

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher mari ***Mourad*** *dont le soutien et les encouragements ininterrompus, ont permis à ce travail de voir le jour.*

A ma chère maman ***Louisa*** *et à la mémoire de mon cher Papa* ***Abd El Rahmane*** .

A mes sœurs ***Kenza*** *et* ***Amel*** *& mes frères* ***Sofiane***, ***Chakib*** *et* ***Islam***.

Sans oublier mon neveu ***Imad*** *et mon adorable nièce* ***Feriel*** .

A ma belle famille et en particulier mon beau père.

A mes collègues de bureau surtout ***Slimani Zora***

Akila

Remerciement

***T**ous d'abord je tiens à remercier Dieu tous puissant de m'avoir donnée le courge et la volonté de reprendre les études et de réaliser ce mémoire.*

***J**e tien en premier lieu à remercier le Professeur **KENAI Said** de m'avoir fait l'honneur d'encadrer ce travail.*

***M**es remerciements les plus sincères vont particulièrement à M^{elle} **Boukhelkhal Djamila** qui a su me faire découvrir et partager sa passion pour la recherche et pour la qualité de son encadrement et de son suivi.*

***M**es remerciements s'adressent également à Mr **ESSLIMANI Mohamed** pour son aide et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

***S**ans oublier les membres du jury qui ont acceptés de juger ce travail.*

RÉSUMÉ

A fin de pallier au déficit dans la fabrication du ciment portland, de nombreuses recherches ont été établis, et ce dans le but de trouver un liant moins couteux. Ces recherches ont été réalisés en utilisant des déchets industriels (laitier, cendre volante) ou des ressources naturelles (pouzzolane naturelle).

Dans ce travail, nous avons choisi quelques ajouts minéraux déjà utilisés dans différentes cimenteries du pays, pour étudier l'effet de la température de cure sur le comportement mécanique d'un mortier de ciment à base d'addition minérales, et pour cela nous avons choisi la pouzzolane de Beni Saf considérée comme une substance pouzzolanique, le laitier d'El-Hadjar considéré comme une substance hydraulique latente et le calcaire connu comme un produit inerte.

Ces substances sont incorporées dans des mortiers normalisés à un taux fixe de 15%, et feront l'objet d'un traitement thermique dans des conditions humides, et sous une température qui varie de 20C° à 80C°. Certaines propriétés sont suivies et quantifiées afin de dévoiler l'efficacité de chaque ajout et d'optimiser son utilisation. Les propriétés à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction, retrait, gonflement et absorption d'eau) des différents mortiers ont été réalisées analysées et comparées.

Les résultats expérimentaux montre clairement l'effet néfaste des hautes températures sur le comportement du mortier quelque soit la nature de l'addition incorporé. Par ailleurs les résultats démontrent que le laitiers s'avère le matériaux qui supporte le mieux les température élevés notamment 60°C où il développe les meilleurs résistances.

Mots clés : Mortier, Additions minérales, Température de cure, Résistance mécanique, Retrait Gonflement, Absorption capillaire.

.

المـــلخص

من أجل تخفيف العجز في صناعة الأسمنت تتجه الانشغالات الحالية للباحثين نحوى العثور على آليات و طرق جديد لتطوير مواد بناء بأقل تكلفة و باستخدام النفايات الصناعية (الخبث، والرماد المتطاير) أو الموارد الطبيعية (البوزلان الطبيعي).

في هذا العمل اخترنا بعض المضافات المعدنية المستخدمة حاليا في مختلف مصانع الإسمنت في الجزائر ودراسة تأثير العلاج برفع درجة الحرارة على السلوك الميكانيكي للإسمنت لذلك اخترنا البوزلان المتواجد ببني صاف كمادة بوزولانية، وخبث مصنع الحجار الذي يعتبر مادة هيدروليكية كامنة والحجر الجيري المعروف كمادة خاملة.

لقد تم درج هذه المواد في الملاط بنسبة ثابتة تقدر ب15 بالمائة حيث أخضع هذا الأخير لمعالجة حرارية في ظروف رطبة وعند درجة حرارة تتراوح ما بين 20 و 80 درجة مئوية أين تم رصد بعض الخصائص و مقارنة تأثيرها على الملاط في الحالة اللينة (سهولة التموضع) و الصلبة (قوة الضغط و الشد, الانكماش، التورم و امتصاص الماء).

لقد أظهرت النتائج التجريبية لهذه الدراسة بوضوح التأثير الضار لارتفاع درجات الحرارة على سلوك الملاط مهما كانت طبيعة الإضافة التي أدرجت؛ كما أوضحت النتائج أن الخبث بإمكانه تطوير مقاومة أفضل تحت درجة حرارة تصل الى 60 درجة مئوية .

كلمات مفاتيح : الملاط , الإضافات المعدنية، درجة حرارة المعالجة، القوة الميكانيكية، تورم، انكماش، امتصاص الشعيرات.

ABSTRACT

In order to avoid the deficit in the manufacturing of the Portland cement, several researches were established in the purpose of find a less expensive binder by using industrial waste (slag, fly ash) or natural resources (natural pozzolana), In this work, we chose some mineral admixtures already used in various cement works of the country to study the effect of curing temperature on the mechanical behavior of a cement mortar based on mineral admixtures.

For this work we chose the pozzolana of Béni Saf considered as a pouzzolanique material, the slag of El-Hadjar considered a latent hydraulic substance and limestone known as an inert material.

These substances are incorporated in standardized mortars which have a fixed rate of 15 % and will be subject to a heat treatment in wet conditions and under a temperature from 20 C° to 80 C°; where some properties are monitored and quantified in order to reveal the effectiveness of each addition and optimize its use. The properties in hardened state (compressive strength, tensile strength, shrinkage, swelling and water absorption by capillarity) of the different mortars were performed analyzed and compared.

The experimental results clearly shows the fatal effect of high temperatures on the behavior of the mortar about is the nature of the addition incorporated, besides result demonstrates that slag is the most efficient materials particularly in high temperatures up of 60°C, where it develops the best resistance.

Keywords : Mortar, mineral admixtures, curing temperature, mechanical strength, shrinkage, swelling, water absorption.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 :	Résumé du processus de fabrication du ciment.	3
Figure I.2 :	Besoin en eau des mortiers CEMII–additions non adjuvantés en fonction du dosage en additions minérales, selonBessa[7]**.**	12
Figure I.3 :	Illustration de l'effet filler **[19]**.	20
Figure I.4 :	Réduction de l'émission directe de CO2 entre 65% et 90%. (Laitier considère comme co-produit à zéro émission de CO2).	26
Figure 1.5 :	Exemple d'une dalle de béton réalisée sans cure.	31
Figure 1.6 :	Voile en béton protégé par une toile après décoffrage.	33
Figure I.7 :	Vaporisation sur la surface d'un béton fraîchement mis en œuvre formant membrane	34
Figure I.8 :	Arrosage continu.	34
Figure I.9 :	Utilisation d'une pellicule de polyéthylène	35
Figure I.10 :	Une bonne cure augmente la résistance du béton **[39]**.	36
Figure II.1 :	Ciment résistant aux sulfates CRS 400 utilisé	46
Figure II.2 :	Le sable normalisé utilisé.	47
Figure II.3 :	Courbe granulométrique de sable normalisé.	48
Figure II.4 :	Laitier d'El-Hadjar utilisé.	49
Figure II.5 :	Pouzzolane naturel de Beni-saf.	20
Figure II.6 :	Calcaire de Mascara utilisé	51
Figure II.7 :	Broyeur à disque	54
Figure II.8 :	Malaxeur à mortier.	55
Figure II.9 :	Une table à chocs.	55

Figure II.I0 : Eprouvettes confectionnées 55

Figure II.11: Pesée des moules vide. . 55

Figure II.12: Pesée des moules remplis. 56

Figure II.13: Essai au maniabilimètre LCPC 56

Figure II.14 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B. 56

Figure II.15 : Eprouvette après d'émoulage. 58

Figure II.16 : Bac à cure. 58

Figure II.17 : Essai de traction par flexion sur mortier. 59

Figure II.18 : Dispositif de rupture à la compression 60

Figure II.19 : Rétractomètre et son étalonnage (variation dimensionnelle). 61

Figure II.20: Pesés des éprouvette avant la mesure du retrait. 63

Figure II.21: Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier. 64

Figure II.22: Variation d'étude. 65

Figure III.1: Résistance à la compression à 20°C. 68

Figure III.2: Résistance à la compression pour MT. 69

Figure III.3: Résistance à la compression pour ML. 70

Figure III.4: Résistance à la compression pour MPZ. 70

Figure III.5: Résistance à la compression pour MCL. 71

Figure III.6: Résistance à la compression à 40°C. 71

Figure III.7: Résistance à la compression à 60°C. 71

Figure III.8 : Résistance à la compression à 80°C. 72

Figure III.9: Résistance à la traction par flexion à 20°C 74

Figure III.10: Résistance à la traction à 40°C. 75

Figure III.11: Résistance à la traction à 60°C. 75

Figure III.12: Résistance à la traction à 80°C. 75

Figure III.13: Absorption capillaire à 20°C. 76

FigureIII.14: Absorption capillaire à 40°C. 77

Figure III.15: Absorption capillaire à 60°C. 77

Figure III.16: Absorption capillaire à 80°C. 78

Figure III.17: Absorption capillaire pour MT. 78

Figure III.18: Absorption capillaire pour ML. 79

Figure III.19: Absorption capillaire pour MPZ. 79

Figure III.20: Absorption capillaire pour MCL. 80

Figure III.21: Variation de masse à l'air. 81

Figure III.22: Figure III.22. Variation de masse à 20°C. 81

Figure III.23: Variation de masse à 40°C. 82

Figure III.24: Variation de masse à 60°C 82

Figure III.25: Variation de masse à 80°C. 83

Figure III.26: Retrait à l'air de différentes éprouvettes. 84

Figure III-27: Gonflement des différentes éprouvettes à 20°C 85

Figure III.28: Gonflement des différentes éprouvettes à 40°C 86

Figure III.29: Gonflement des différentes éprouvettes à 60°C. 86

Figure III.30: Gonflement des différentes éprouvettes à 80°C. 86

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I.1 :	Les cinq types des ciments courants et leur composition	5
Tableau I.2 :	Classification normalisée des environnements	7
Tableau I.3 :	Utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes	9
Tableau I.4 :	Composition chimique élémentaire du laitier.	23
Tableau I.5 :	Régime de cures admissible **[40].**	36
Tableau II.1 :	Caractéristique chimiques du ciment.	47
Tableau II.2 :	Composition granulométrique du sable normalisé	48
Tableau II.3 :	Caractéristiques du laitier d'el hadjar.	49
Tableau II.4 :	Caractéristiques de la pouzzolane de Beni-Saf.	51
Tableau II.5	Caractéristiques chimiques des calcaires de Mascara.	51
Tableau II.6	Représente les quatre (04) types de mélanges préparés .	52
Tableau II.7 :	Séquence de malaxage du mortier.	54
Tableau III.1:	Résultats de maniabilité.	66
Tableau III.2:	Résultats des mesures de la masse volumique des mortiers.	67
Tableau III.3:	Résultats de résistance à la compression en fonction des températures de cures des différents types de mortiers.	67

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

BAP	Béton autoplaçant.
CEMI 42,5	Ciment portland ordinaire de classe 42.5 MPa.
E	Quantité d'eau.
E/C	Rapport eau sur ciment.
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées.
Rc	Résistance à la compression.
Rt	Résistance à la traction
E/C	Rapport ciment sur eau
MT	Mortier témoin
ML	Mortier à base de laitier.
MCL	Mortier à base de calcaire
MPZ	Mortier à base de pouzzolane.
NA	Norme Algérienne
NE	Norme Européenne
F_c	Résistance souhaitée du béton a 28jours
$f_{m\ c}$	Résistance nominale du ciment
C	Dosage du ciment
e	Quantité d'eau efficace
v	Quantité d'air occlus dans le béton
c	la compacité
p	la porosité
W	Teneur en eau
	Module de finesse

Mf	Le sable
S	La résistance à la traction
R_t	La résistance à compression
R_C	Variation de longueur par apport à la longueur origine
ΔL	Longueur de base, prise égale à 160mm
L_0	Variation de masse par rapport à la masse eaumoment du démoulage
ΔM	Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.
M_0	Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge
M	Moment d'inertie de la section transversale.
I	La distance de la fibre la plus éloignée.
v	gel d'hydrate de silice de calcium
C-S-H	La chaux
CaO	La silice
SiO2	L'alumine
Al2O3	Le ciment portland artificiel
CPA	Ciment de haut fourneau
CHF	Le ciment portland composé.
CPJ	

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Notation et abréviation

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I : Revue Bibliographique

I.1. Introduction……..1

I.2. Le ciment……..2

I.3. Classification normalisées des ciments…….……3

I.3.1. Classification d'après leurs resistances…….……..4

I.3.2. Classification d'après la composition……..……..4

I.4. Critères de choix du ciment……..……..4

I.4.1. Résistance du béton à 28 jours……..……6

I.4.2. Condition de mise en œuvre……..……6

I.4.3. Environnement de l'ouvrage…..……6

I.5. Additions minérales ou ajouts minéraux……...6

I.6. Modes d'utilisation des ajouts……..7

I.6.1. Utilisation dans les ciments……..8

I.6.2. Utilisation dans le béton.……...8

I.7. Utilisation des additions minérales en Algérie…….……8

I.8. Avantage de l'utilisation des additions minerals…….……..8

I.8.1. Avantage technique……..9

I.8.2. Avantage écologique…….……9

I.8.3. Avantage économique…….……10

I.9. Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires……....10

I.9.1.L'effet granulaire…….……10

I.9.2.L'effet physico-chimique et microstructural…….…….……11

I.9.3.L'effet chimique…….……13

I.10. Classification des additions…… ……14

I.10.1. Type I quasiment inerte…….…… ……15
I.10.1.1. Additions Calcaires…….……...15
I.10.1.2. Additions Siliceuses (sable)…… ……..15
I.10.2. Type II actives ……15
I.10.2.1. Fumée de Silice……15
I.10.2.2. Cendres volantes pour béton……15
I.10.2.3. Laitier Vitrifie Moulu De Haut Fourneau……16
I.10.2.4. Pouzzolane (Z)…….……..16
I.10.2.4.1. Pouzzolane naturelle……16
I.10.2.4.2. Pouzzolane artificielle…….……16
I.10.3. Les produits artificiels……..17
I.10.4. les produits naturels……..17
I.11. Pouzzolane naturelle (PZ)…….……....17
I.11.1. Effet sur les caractéristiques des bétons frais……...18
I.11.2. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis……18
I.12. Fillers de calcaires (CL)……...19
I .12.1. Effet sur les caractéristiques des bétons frais……..20
I.12.2. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis……21
I.13. Le laitier de haut fourneau (L)…….22
I.13.1. Fabrication……...……22
I.13.2. Utilisation…….22
I.13.2.1. Agrégat refroidit à l'air……22
I.13.2.2. Agrégat expanse……..23
I.13.2.3. Laitier pour ciment……..23
I.13.3. Composition chimique des laitiers des hauts fourneaux……..23
I.13.4. Le Ciment au laitier……..23
I.13.4.1. Fabrication……...23
I.13.4.1.1. Broyage Simultané……..24
I.13.4.1.2. Broyage séparé……..24
I.13.5. Effet sur les caractéristiques des bétons frais……...24
I.13.6. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis…….……...25
I.13.7. Effet des additions sur ciment ternaire…….27
I.14. La température de cure ……..…28
I.14.1. Introduction…….……..…28

I.14.2. Qu'est-ce que la cure ?.....28
I.14.3. Importance de la cure……....29
I.15. Pathologies liées a l'absence de cure…….....30
I.15.1. Par temps plus chaud……30
I.15.1.1. Fissuration plastique…….30
I.15.1.2. Fissuration thermique……...30
I.15.1.3. Résistance à la compression insuffisante…….31
I.15.2. Par temps plus froid……..31
I.16. Méthode de cure……...32
I.17. Les produits de cure…….……..33
I.17.1. Vaporisation de produits de cure formant une membrane……....33
I.17.2. L'arrosage et la vaporisation d'eau……..34
I.17.3. Utilisation de nappes d'eau et l'immersion…….……..35
I.17.4. Application de toiles imbibées d'eau…..…….35
I.17.5. Utilisation de pellicules de plastique……35
I.18. Durée de cure normalisée…….36
I.19. Température optimal…….……37
I .19.1. Effet de la cure sur bétons et mortiers à base d'additions…….…….37
I.19.1.1. La prise……..37
I.19.1.2. L'hydratation……38
I.19.1.3. La résistance mécanique…….……39
I.19.1.4. Les retraits……..…….40
I.19.1.4.1.Définition……...……..40
I.19.1.4.2. Types de retraits……..……40
I.19.1.4.2.A. Retrait plastique…….……40
I.19.1.4.2. B. Retrait endogène……..……..41
I.19.1.4.2. C. Retrait hydraulique……..…….…41
I.19.1.4.2. D. Retrait thermique…… ….…….41
I.19.1.4.2. E. Retrait de carbonatation……41
I.20. Conclusion……...……43

Chapitre II: Matériaux et essais

II.1. Introduction…….……45
II.1.1. A l'état frais……..45
II.1.2. A l'état durci……45
II.2. Matériaux utilises…….…..46
II.2.1. Le ciment……...…46
II.2.1.1. Caractéristiques physico-mécaniques…….....46
II.2.1.2. Caractéristiques chimiques……47
II.2.1.3.Emplois habituels……...47
II.2.2. Le sable normalisé……47
II.2.3. Le laitier…….…49
II.2.4. Pouzzolane naturelle……50
II.2.5. Le calcaire …….……51
II.2.6. Eau de gâchage ……52
II.3. Etude de la composition des mortiers……...52
II.3.1. Définition des mortiers…….52
II.3.2. Mortier normal……..52
II.3.3. Mortier a base d'addition…….52
II.4. Confection des éprouvettes…….…...53
II.4.1. Equipement nécessaire……..53
II.4.2. Préparation des mélanges……..53
II.4.2.1. Le broyage……53
II.4.2.2. Le Malaxage…….54
II.4.2.3. Le Moulage……...55
II.5. Essai sur mortiers a l'état frais……..56
II.5.1. Mesure de La masse volumique des mortiers……...……...56
II.5.1.2 . Maniabilimètre LCPC……..56
II.6. Mode de conservation…….…...57
II.7. Protocol d'essais…….…...58
II.8. Essai sur Mortiers à l'état durci……58
II.8.1. Essai Destructif…….58
II.8.1.1. Essai de traction par flexion …….……58
II.8.1.2. Essai de compression……...……60

II.8.1.3. Essai de retrait et gonflement ……..61
II.8.1.3.1. Mesure des variations de longueurs…….62
II.8.1.3.2. Mesure des variations de masses…….63
II.8.1.3.3. Expression des résultants……..63
II.8.1.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité……63
II.9. Variables étudiées…….64

CHAPITRE III : Interprétation des résultats et discutions.

III.1. Introduction…….…66
III.2. Maniabilité…….…...66
III.3. La masse volumique des mortiers……...66
III.4. Resistance à la compression……..……...…….....67
III.4.1.Effet des additions……68
III.4.2. Effet de la température……69
III.5. Resistance a la traction par flexion……..73
III.5.1. Effet des additions……..74
III.5.2. Effet de la température de cures …….75
III.6. Absorption d'eau par capillaire……..76
III.6.1.1Effet des additions……..76
III.6.2. Effet des températures de cure……...77
III.7. Retrait et gonflement…….…...80
III.7.1. La variation massique …….80
III.7.1.1. Effet des additions……...81
III.7.1.2. Effet des températures de cure ……...……...82
III.7.2. Variation dimensionnelle……...…….……84
III.7.2.1. Retrait à l'air……..…….…….84
III.7.2.2. Gonflement……...…….…….85
III.7.2.2.1. Effet des additions……..…….85
III.7.2.2.2. Effet de la température de cure……...86
III.8. Conclusion…….…...87
Conclusion générales perspectives…….89
Référence bibliographique.

Introduction générale

GÉNÉRALITES

Depuis sa découverte en 1817 par Louis VICAT, le ciment est devenu le matériau fondamental dans le monde de la construction, ceci est dû principalement aux avantages d'exécutions et aux qualités techniques qu'il offre pour rendre les constructions d'aujourd'hui plus solides et durables. Par contre le ciment présente des inconvénients majeurs d'ordre économique et écologique, pour cela, les chercheurs ont déployés tous leurs efforts pour le rendre plus performant, plus économique et moins polluant; en incorporant des substances minérales, cela a permis de palier ses différents déficits grâce aux avantages qu'elles présentent sur le plan technique , économique et écologique. Cette solution reste la façon la plus simple et la plus avantageuse pour limiter l'émission de gaz à effet de serre dégagé lors de la fabrication des ciments, et cela par la diminution de la consommation du clinker sans pour autant réduire la consommation du ciment en utilisant certains ajouts minéraux broyés. On obtient un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles du ciment portland.

Ces substances minérales sont des sous-produits industriels et des produits naturels réputés par leurs compositions chimiques où leurs finesses. Ces ajouts jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de la qualité de la pâte du ciment à l'état frais et durcis. Mais leurs utilisations n'est pas non plus sans inconvénients, car la substitution d'une partie du ciment affecte le comportement mécanique et fait chuter la résistance à cours comme à long terme. Pour résoudre ce problème, il existe plusieurs techniques, parmi ces méthodes, nous pouvons citer l'activation thermique de l'ajout par l'augmentation des températures de cure. De nos jours ce procédé à commencer à prendre place et à fait ses preuves notamment dans le changement des propriétés physico-chimique et mécanique des matériaux.

Dans ce travail, nous avons choisis quelques ajouts minéraux déjà utilisés dans les différentes cimenteries du pays afin de caractériser leurs modifications apportées au ciment. Nous avons choisi la pouzzolane de Beni Saf considérée comme une substance pouzzolanique, le laitier d'El-Hadjar considéré comme une substance hydraulique latente et le calcaire connu comme étant un produit inerte. Ces substances sont incorporées aux mortiers normalisés où quelques propriétés sont suivies et quantifiées afin de dévoiler l'efficacité de chaque ajout et afin d'optimiser son utilisation.

OBJECTIF

L'objet de cette étude est de rechercher un compromis pour une bonne température de cure et une meilleure résistance d'un mortier à base d'additions. Notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : la pouzzolane naturelle (ajout actif), le fillers calcaire (ajout inerte) et le laitier (ajout actif) sur les propriétés mécaniques des mortiers élaborés.

PLAN DE THESE :

La thèse s'articule sur trois chapitres :

Au cours du premier chapitre, nous passerons en revue les connaissances actuelles et les études récentes sur l'action des additions minérales. Nous expliciterons la façon dont elles contribuent à l'activité liante du ciment, et montrerons comment cette contribution est prise en compte dans les méthodes de formulation de mortiers ou des bétons avec additions minérales.

A travers le deuxième chapitre, une présentation des matériaux et méthodes expérimentales employés sera détaillée pour caractériser les composés de notre mortier de ciment à base d'additions minérales, d'un point de vue comportement mécanique sous l'effet de la température de cure.

Dans le troisième chapitre, nous interpréterons les résultats des essais expérimentaux obtenus et les conclusions tirées lors de cette étude.

Enfin une conclusion générale reprendra les principaux résultats dégagés lors de cette étude. Nous proposons également des nouvelles perspectives en termes d'expérimentation.

CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

I.1. INTRODUCTION

L'objet de cette synthèse et de passer en revue les connaissances actuelles sur l'utilisation des additions minérales, dont la lecture permet de dégager les principaux arguments permettant d'évaluer la façon dont elles contribuent à l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du béton et mortier de ciment.

I.2. LE CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, constitué de calcaire (80%) et d'argile (20%), chauffé à haute température (1450°C) dans un four en forme de tube où il circule à proximité d'une flamme de 2000°C, avant d'être refroidi brutalement. La matière extraite du four s'appelle le clinker, elle est broyé avec du sulfate de calcium sous forme de gypse ou d'anhydrite (à raison de 3 à 5 %), c'est la formule classique du ciment dit Portland. D'autres types de ciment sont obtenus par adjonction de différents constituants secondaires.



Figure I.1. Résumé du processus de fabrication du ciment.

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

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et aux propriétés de durabilité du béton. Ainsi, le choix du type de ciment est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.). Le rapport Eau/Ciment (E/C) est un facteur très influent sur les différents aspects du béton, ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique de ce dernier, la durabilité et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides, puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton.

I.3. CLASSIFICATION NORMALISEES DES CIMENTS

Différents types de ciment existent sur le marché, leurs classifications est faites soit d'après leurs compositions chimiques, soit d'après leurs classe de résistance.

I.3.1. Classification d'après leurs résistances

Les ciments peuvent être également classés selon leur résistance nominale conformément à la norme Algérienne [NA 234] **[1]**. Cette norme distingue trois classes de résistances : Classe I = 32.5 (MPa), Classe II= 42.5 (MPa) , Classe III =52.5 (MPa).

I.3.2. Classification d'après la composition

Les ciments courants sont classés, en fonction de leurs compositions minéralogiques, en quatre catégories présentées dans le tableau suivant **[2]**:

Tableau I.1. Les cinq types des ciments courants et leur composition.

Notion Autres	Clinker (K)	Autre constituants	Constituants secondaires
Ciment portland			
CPA-CEM I	95-100	-	0-5
CPJ-CEM II/A	80-94	6-20*	-
CPJ-CEM II/B	65-79	21-35*	-
* Les constituants autres que le clinker sont : - (S), (Z), (V), (W), (T), (L) ; - (D), en proportion limitée à 10% ; - (F), en proportion limitée à 5% (constituants secondaire compté avec les autres constituants).			
Ciment de haut fourneau			
CPF-CEM III/A	35-64	36-65*	0-5
CPF-CEM III/B	20-34	66-80*	0-5
CLK-CEM III/C	5-19	81-95*	0-5
Ciment Pouzzolanique			
CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35*	0-5
CPZ-CEM IV/B	4-64	36-55*	0-5
* Les constituants autres que le clinker sont : -Les pouzzolanes naturelles (Z) et les cendres volantes siliceuses (V) ; - Les fumées de silice (D), en proportion limité à 10%.			
Ciment au Laitier et aux Cendres			
CLC-CEM V/A	40-94	18-30*	0-5
CLC-CEM V/B	20-39	31-50*	0-5
*Pouzzolanes naturelles (Z) ou cendres volantes siliceuses (V)			

I.4. CRITERES DE CHOIX DU CIMENT

Les ciments peuvent être utilisés selon les critères suivant :

I.4.1. Résistance du béton à 28 jours

Le ciment permet d'obtenir la résistance souhaitée et apporte les éléments fins nécessaires pour un bon comportement du béton frais. La relation de Bolomey permet de déterminer la résistance normale du ciment en fonction de la résistance de béton souhaitée.

$$fc = Kb\ fmc\ [(c/e+v)-0.5] \quad .$$

fc: résistance souhaitée du béton a 28 jours;

fmc : résistance nominale du ciment;

Kb : coefficient relatif au squelette granulaire ; il varie de 0.5 a 0.6 selon la région.

C : dosage du ciment exprimée en Kg/m3 ;

e: quantité d'eau nécessaire exprimée en Kg/ m3;

v: quantité d'air occlus dans le béton exprimée en litres /m^3;

Pour un béton plastique, on pourra admettre que : $v \approx 0.1$ e.

I.4.2. Condition de mise en œuvre

Pour un décoffrage rapide, une mise en précontrainte il ya lieu d'avoir recours aux ciments dont la classe de résistance au jeune âge est élevée. Pour un bétonnage par temps froid, le béton reste plus longtemps mou et déformable, le développement des résistances et retardé et le raisonnement est inversé pour le bétonnage par temps chaud.

I.4.3. Environnement de l'ouvrage

Le béton doit dans sa formulation et ses caractéristiques être adapté a l'environnement. La norme française [NF P 18-011] **[3]** classe l'environnement en 5 classes qui sont illustrées dans le tableau (I-2).

Tableau I.2. Classification normalisée des environnements

Classes	Environnement	Ciment recommandé
Classe 1	- Secs	Tous types de ciments.
Classe 2	- Humides sans gel ou avec un gel faible - Humides avec gel modéré. -Humides avec gel sévère.	Tous types de ciments.
Classe 3	-Humides avec gel modéré ou sévère et produits dégivrant	Tous types de ciments sauf en cas de contact avec des sels fondants et des sulfates, il est préconisé un ciment à caractéristiques complémentaires
Classe 4	Marins immergés sans gel ou avec gel faible.	Ciment a caractéristique «prise mer »
Classe 5	Faiblement agressifs chimiquement. Moyennement agressifs chimiquement Fortement agressifs chimiquement;	En cas de contact avec de l'agent agressif : les ions sulfate, ou acide il est préconisé un ciment de caractéristique complémentaire.

I.5. ADDITIONS MINERALES OU AJOUTS MINERAUX

Une addition minérale est définie par la norme européenne comme étant un matériau minéral d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé), ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés où conférer aux matériaux des propriétés particulières. L'utilisation des additions minérales est devenue une pratique courante depuis de nombreuses années, du fait de leurs disponibilités et de leurs prix modérés, La préoccupation des recherches est de mettre au point un liant dans lequel sont incorporés des déchets industriels (laitiers ou cendre volante) ou des ressources naturelles telles que la pouzzolane qui permettent d'améliorer les caractéristiques du béton et du mortier de ciment.

La connaissance de leurs compositions et de leurs propriétés est primordiale pour obtenir et fabriquer des produits de qualité reconnue, garantissant la maîtrise de la fabrication des bétons.

I.6. MODES D'UTILISATION DES AJOUTS

Les ajouts peuvent se diviser en deux catégories selon leurs modes d'utilisation :

I.6.1. Utilisation dans les ciments

Les cimenteries fabriquent un ciment nommé CEM II, III (CPJ) ayant un intérêt économique et écologique. Ce ciment peut contenir des proportions différentes des sous-produits industriels tels que les cendres volantes, le laitier ou les roches naturelles comme le calcaire et la pouzzolane.

I.6.2. Utilisation dans le béton

Les ajouts minéraux sont indispensables dans la confection du béton à hautes performances. Ils viennent s'ajouter à la composition du béton pour rendre l'empilement granulaire plus compact. Ils apportent avec les adjuvants organiques une cohésion intergranulaire modifiant la rhéologie du béton dans le sens d'une maniabilité favorable. Après durcissement, le béton obtenu est plus résistant et plus durable.

I.7. UTILISATION DES ADDITIONS MINERALES EN ALGERIE

Bien que l'emploi des additions minérales soit généralisé dans le monde, il reste limité en Algérie malgré la disponibilité en grande quantité de ces ajouts et leurs coûts relativement réduit par rapport au ciment. Leurs emploi dans le domaine du génie civil n'est pas encore répandu. En effet, de nombreuses études ont été réalisées, traitant de l'influence des additions minérales sur plusieurs aspects des bétons ; actuellement, l'emploi des additions se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire pour la production du ciment composé.

On peut citer l'utilisation des ajouts actifs tels que le laitier d'EL-Hadjar par la cimenterie de Hamma Bouziane, et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf par l'ERCO. Par contre, d'autres cimenteries utilisent des ajouts inertes tels que le calcaire comme l'ECDE (Chlef). La nouvelle cimenterie de M'sila utilise déjà un ciment ternaire combinant la pouzzolane (7.5%) et le calcaire (7.5%) **[4].**

Tableau I.3. Utilisation des différentes additions dans les cimenteries algériennes.

Cimenterie	Ajouts utilisés
Ain Touta (Batna) Ain El Kebira (Sétif) Hamma Bouziane (Constantine) Beni Saf (Tlemcen) Zahana (Oran) Saida	Pouzzolane
HadjarSoud (Skikda) Tebessa	Laitier granulé
Meftah (Alger) Raïs Hamidou (Alger) Sour EL Ghozlane (Bouira)	Tuf/Calcaire - Calcaire/Tuf
Chlef M'sila	Calcaire Laitier granulé / Pouzzolane

I.8. AVANTAGE DE L'UTILISATION DES ADDITIONS MINERALES

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages dont les plus importants sont :

I.8.1. Avantage technique

L'incorporation des ajouts minéraux dans le ciment conduit à une amélioration considérable des propriétés du béton, cela est favorisée par l'incorporation des particules fines qui vient combler les vides entre les granulats fins et les grains du ciment. Cette incorporation améliore la maniabilité, contribue à la réduction du dosage en eau et engendre une réduction de la ségrégation dans le béton frais, et par conséquent améliore les propriétés mécaniques du béton durci.

I.8.2. Avantage écologique

L'industrie cimentaire se trouve dans l'obligation de diminuer les rejets dans l'atmosphère des gaz à effet de serre responsable du réchauffement de la planète. Les additions minérales telles que les cendres volantes, laitiers, pouzzolanes naturelles constituent une alternative favorable pour réduire la quantité de clinker responsable de l'émission du CO_2, et par la même occasion, on les récupère dans la construction au lieux de les rejeter dans la nature..

D'autres solutions permettant de réduire l'émission de gaz carbonique ont été mises en œuvre par l'industrie cimentaire depuis de nombreuses années telles que **[5]**:

- L'incorporation, dans les matières premières, avant cuisson, de certains matériaux sélectionnés, déjà décarbonatés ou ne contenant pas de calcaire.
- L'utilisation des combustibles de substitution comme certains déchets destinés à l'incinération. Leur utilisation comme combustible permet, outre la réduction de CO_2,
- Une destruction totale des molécules organiques, une élimination de toute sorte de déchets ou mâchefer et une économie des dépenses énergétiques.

I.8.3. Avantage économique

Le remplacement ou la substitution d'une partie de ciment par l'addition minérale permet de réduire la consommation en clinker. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile+calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante. Cette dernière peut être réduite par l'introduction de ces ajouts dans le ciment dont le prix de fabrication ne cesse d'augmenter. Cela nous amène à une réduction du coût énergétique nécessaire à sa fabrication.

I.9. ACTION DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Par leurs finesses et par leurs réactivités plus ou moins importantes en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci.

En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules

des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés **[6].** En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment. De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Cependant plusieurs étude récentes s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions **[7, 8]** :

I.9.1. L'effet granulaire

L'effet granulaire appelé aussi effet filler ; Engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules fines ou ultrafines de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet peut être favorable ou défavorable en raison de plusieurs facteurs tels que la morphologie, la surface texturale et la distribution granulaire; qui influent essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires dès le malaxage et sur toutes les étapes de mise en œuvre et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la stabilité des mélanges frais **[9]**. Lorsque les particules de l'addition modifient peu les frictions inter granulaires et parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, l'effet granulaire devient favorable et conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci.

En revanche, lorsque les particules des additions modifient considérablement les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les pores du squelette granulaires, l'effet granulaire peut avoir des conséquences défavorables.

Plusieurs études ont montré en effet l'existence d'une optimisation des propriétés du squelette granulaire par l'incorporation d'additions minérales de natures et de quantités différentes.

BESSA**[7]** a pu montrer en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers sans adjuvant dépend en premier lieu de

la finesse et de la quantité de l'addition introduite ;c'est a dire l'introduction des additions ultrafines entraîne une augmentation du besoin en eau, largement supérieure à la contribution des additions à la réduction de la porosité. Cette augmentation est d'autant plus importante que la finesse et la quantité d'addition sont grandes.

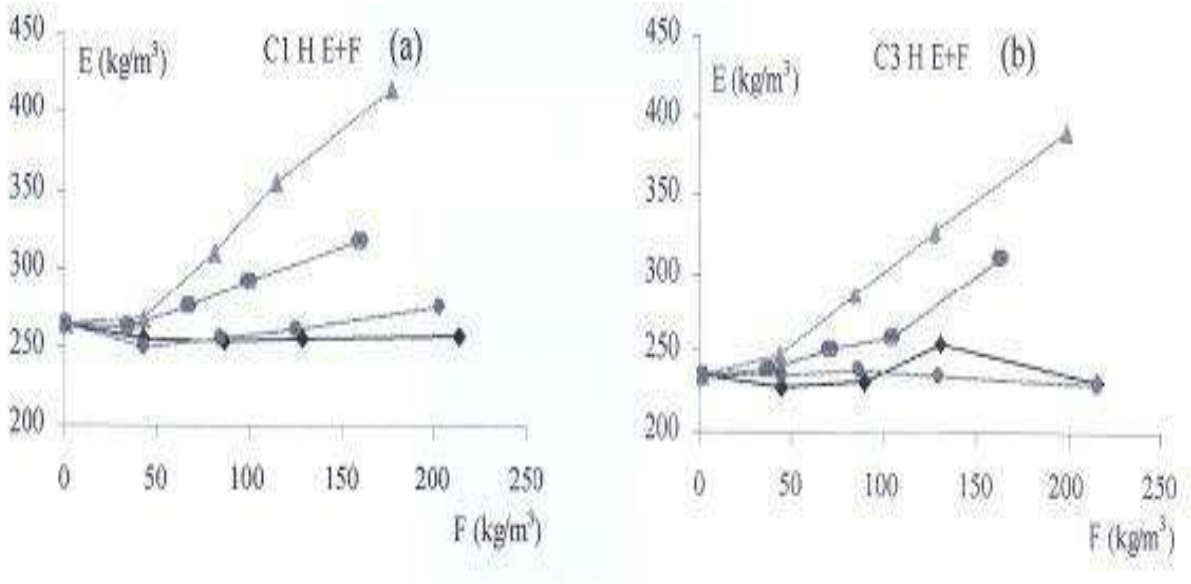


Figure I.2. Besoin en eau des mortiers CEMII–additions non adjuvantés en fonction du dosage en additions minérales, selon Bessa **[7]**

D'autre part BOUDCHICHA **[8]** a démontré que le besoin en eau des bétons avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Les bétons avec additions présentent un besoin en eau plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10% , le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange , mais diffère d'une addition à une autre.

Par ailleurs La nature et le dosage de l'addition minérale ont plus ou moins d'avantages sur les caractéristiques du béton auto-compactage dans les deux états frais et durcis où il a été démontré **[10]** que :

- L'utilisation de filler calcaire permet d'augmenter la fluidité du mélange mais elle affecte négativement sa stabilité. L'augmentation de la quantité de filler calcaire diminue la viscosité plastique du mélange.

- L'incorporation de laitier granulé et du laitier cristallisé réduire la fluidité du mélange. L'augmentation de la quantité de ces ajouts conduit à l'augmentation de la matière plastique la viscosité du mélange et par conséquent leur stabilité.

L'analyse des différents résultats permet de conclure que l'effet granulaire des additions minérales**,** peut être favorable ou défavorable sur le comportement des matériaux cimentaires à l'état frais. Cet effet dépend de plusieurs facteurs qui caractérise les additions minérales (nature, quantité, finesse et morphologie), et qui influence la rhéologie des matériaux cimentaires. Il influe sur le serrage des particules dans le squelette granulaire et par conséquence, sur le processus d'hydratation du ciment et le développement des effets physico-chimiques, microstructuraux et chimiques.

I.9.2. L'effet physico-chimique et microstructural

Engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires.

A ce propos Les résultats obtenus lors de l'analyse des effets des additions minérales sur la force des mortiers **[11]** ont montrés que :

- Les besoins en eau des mortiers varient sensiblement avec la nature minéralogique et les caractéristiques granulaires de l'addition minérale incorporée et cela pour un faibles taux de substitution de ciment, elle est directement liée aux phénomènes d'empilement granulaire, ainsi qu'à la compacité des mélanges frais .Ensuite, le mortier avec la fumée de silice présente les besoins en eau plus fort en accord avec sa grande finesse.

- L'action des additions minérales fines sur le ciment est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation à un jeune âge.

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 **[12].**

D'une manière générale, on peut conclure que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

I.9.3. L'effet chimique

L'effet chimique est directement lié à la composition minéralogique des additions, il concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants hydratés du ciment. Il forme de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et peut se manifester à différents âges en fonction de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment .Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment.

La norme européenne désigne les additions chimiquement actives comme étant du type II, en prenant en compte leur activité hydraulique latente ou leur activité 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 la portlandite formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés.

L'introduction des additions minérales dans la matrice cimentaire permet d'améliorer la résistance en compression et ceci d'autant plus que I 'effet chimique de l'addition est important, permet aussi de maintenir les propriétés de transfert des mortiers et permet enfin de compléter l'apport du ciment tant sur le plan du remplissage de la porosité que sur celui de la résistance chimique a une agression sévère **[7].**

I.10. CLASSIFICATION DES ADDITIONS

La normalisation actuelle distingue les additions en deux types :

I.10.1. Type I quasiment inerte

Ce sont des matériaux organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés, qui par leurs composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Les ajouts servent à remplir les pores de pates de ciments, ils jouent le rôle de micro-agrégat; parmi ces additions on distingue :

I.10.1.1. Additions Calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles.

I.10.1.2. Additions Siliceuses (sable)

Les additions siliceuses sont des produits finement divisés, constitués à plus de 96 % (Valeur spécifiée inférieure) et à plus de 93.5 % (valeur limite absolue inférieure), par de la silice exprimé en SiO2 mesurée sur produit sec et obtenus par broyage et/ou sélection de quartzeuses ou de cristobalites synthétiques.

I.10.2. Type II actives

Additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent telles que :

I.10.2.1. Fumée de Silice

La fumée de silice est une poudre amorphe fine résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, Toutefois, compte tenu de la très grande finesse de ces additions et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

I.10.2.2. Cendres volantes pour béton

Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolanique et composées essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3 ; la proportion de SiO_2 réactive constituant au moins 25% de la masse.

I.10.2.3. Laitier Vitrifie Moulu De Haut Fourneau

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, coproduit de la fabrication de la fonte et obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion. les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié utilisés comme ballast ou comme granulats et également les laitiers d'aciéries et tous les Laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons tels que les sels métalliques.

I.10.2.4. Pouzzolane (Z)

Les pouzzolanes sont des produits d'origine volcanique composé de silice, alumine et oxyde de fer qui sous forme de poudre fine est susceptible de se combiner à la chaux pour former des composés stables ayant des propriétés hydrauliques (durcissement sous l'eau).Exploitées pour la production des ciments composés. Elles peuvent être naturelles ou artificiels.

I.10.2.4.1. Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné.

I.10.2.4.2. Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composes de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Elles sont des déchets des déférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que, le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de

brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuite.

Une autre classification est basée sur la source de chaque produit où on trouve:

I.10.3. Les produits artificiels

-les laitiers des hauts fourneaux,

-les cendres volantes,

-la fumée de silice,

-l'argile calcinée,

-les déchets d'incinération,

-les déchets de briques concassées.

I.10.4. les produits naturels

-la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)

-les additions siliceuses (sable).

-le calcaire

-l'argile opaline

Nous nous limiterons au cours de ce chapitre à l'étude de l'incorporation des trois additions entrant dans la composition du mortier lors de l'étude expérimentale à savoir : la pouzzolane naturelle, les laitiers des hauts fourneaux et le filler calcaire.

I.11. POUZZOLANE NATURELLE (PZ)

C'est les romains qui ont développé le ciment pouzzolanique formé de chaux, de briques concassées et de poussières de cendres volcaniques. Ce mélange avait la particularité de pouvoir faire prise sous l'eau.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle disponible en grandes quantités dans l'Algérie n'est qu'à ses débuts. Dans nos cimenteries, elle est utilisée en faibles quantités (15 % en moyenne) comme ajouts au clinker seulement lors du broyage, alors que les études faites sont concluantes sur la revalorisation de ce matériau, tant technique qu'économique, préconisent une meilleure utilisation comme substitution au ciment à différentes proportion. Néanmoins aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier ou optimiser les dosages permettant d'assurer les résultats de ces effets.

I.11.1. Effet sur les caractéristiques des bétons frais

La pouzzolane confère aux bétons :

- ✓ Une amélioration de l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau **[13].**
- ✓ Bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage.
- ✓ Réduit la chaleur d'hydratation, qui se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

I.11.2. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis

- ✓ Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment.
- ✓ La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables comme : accroissement de la résistance finale. Légère diminution du retrait et du fluage.
- ✓ Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- ✓ Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- ✓ Protection des armatures contre la corrosion.
- ✓ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

Une étude comparative du comportement des mortiers élaborés à base de ciment seul (CPA 42.5) et celui des mortiers contenant différents dosages de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle a permis de conclure les résultats suivantes **[14]**:

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

- L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4 pour un taux de substitution varie de 20% à 30%.

De même il a été démontré **[15]** que l'incorporation de la pouzzolane naturelle comme un mélange de minéraux dans le béton auto compactant semble être très bénéfique pour la résistance de ces bétons dans un milieu de sulfate de sodium.

Le traitement des matrices cimentaire par l'utilisation de pouzzolane naturelle extraite du gisement de la région de TEBESSA a raison de 20% ; et des débris de briques cuites **[16]**, a montré que l'utilisation de pouzzolane empêche la libération de la chaux de ciment qui influe défavorablement sur la durabilité et les caractéristique physiques et mécaniques des fibres végétales.

Des améliorations dans les performances mécaniques des mortiers ont été constatées **[17]** avec l'ajout de l'addition siliceuse pour les dosages 5 à 10 % de fumée de silice au ciment Portland contenant 15 % de pouzzolane naturelle en comparaison avec le mortier témoin. Ceci donne des résistances mécaniques supérieures à celle du mortier témoin

[18] Pour le même taux de substitutions par la Pouzzolane naturel de béni-saf (15%) à un ciment (CPJ 32.5), il a été remarqué une augmentation importante de la résistance à la compression et à la flexion dès le $28^{ième}$ jour pour les Béton auto plaçant.

I.12. FILLERS DE CALCAIRES (CL)

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes (calcite, aragonite, vatérite).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. Leurs compositions chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme CaMg (CO3)2), s'il réagit de calcaires dolomitique.

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats)(Figure I.3).
L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'a l'état durci. Les additions calcaires sont des additions de type(I) classées comme quasiment inertes**[19]**.

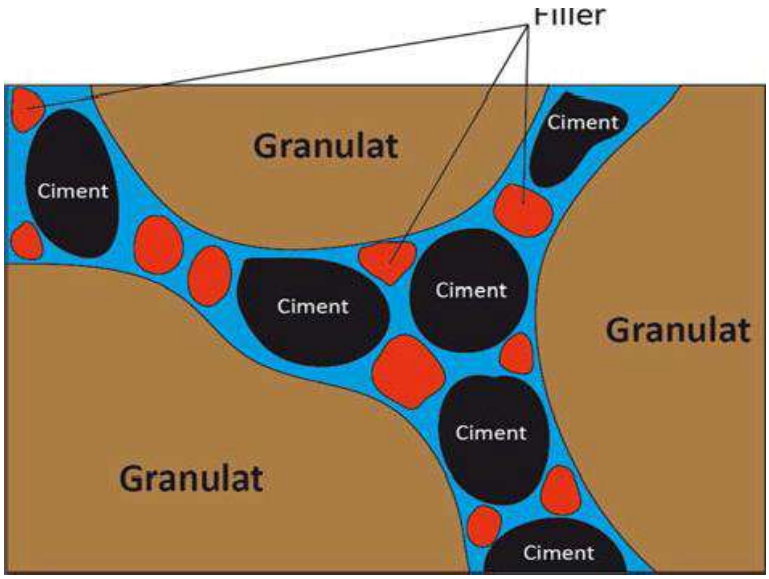


Figure I.3. Illustration de l'effet filler **[19]**.

I .12.1. <u>Effet sur les caractéristiques des bétons frais</u>

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 particules fines d'argile dans le filler peut augmenter la demande en eau. Il a été rapporté 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 carbo aluminate de calcium (structure similaire à celle du monosulfoaluminate).

[20] Le but de cette recherche était de déterminer la fluidité du ciment pâte contenant des additifs organiques et minéraux. Les mélanges réalisés avec la poudre de calcaire représentent une meilleure rhéologie compatible avec les superplastifiants utilisés. L'addition de poudre de calcaire peut améliorer la dispersion et donner une certaine compatibilité du couple ciment superplastifiant particulier pour un taux de remplacement élevé que 20%. le calcaire en poudre se révèle être le meilleur mélange minéral lors du remplacement d'une partie de ciment, où plus de fluidité est exposée provoquée par l'effet de dilution.

I.12.2. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis

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

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 .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. À note que pour une finesse de 300 à 350 m2/kg, il y a seulement l'effet filler.

En étudiant quelque propriété des mortiers à base d'addition, AMOURI .C **[21]** a pu observer que les mortiers avec calcaires à 10% de substitution ne provoquent aucune augmentation de la masse volumique des mortiers frais; cette dernière décroissent pour les taux plus forts (20%), L'étude a démontré également que les mortiers avec calcaires à 10% de substitution et de finesse voisine du ciment donnent des résistances à jeune âge légèrement supérieures aux autres. Mais ils présentent les mêmes résistances que les cendres volantes pour les échéances supérieures (28 et 90 jours),

Certains de ces résultats ont étés confirmés par EZZIANE **[12]** qui a trouvé que l'incorporation des fillers ayant des surfaces spécifiques élevées (3600 et 3100 cm^2/g) améliore sensiblement les résistances à la compression surtout pour des valeurs de substitution de l'ordre de 10%. Au-delà de cette valeur, une chute de résistance a été observée allant jusqu'à 45% pour 40% de calcaire dans le ciment. De même Bouali **[22]** confirme que la résistance à la compression du ciment contenant du calcaire augmente avec l'augmentation de la finesse jusqu'à 5890 cm^2/g, mais reste toujours inférieure à celle du ciment de référence. Néanmoins avec des proportions de 5 et 15%, la résistance à la compression au jeune âge est meilleure que celle du ciment témoin. 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.

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.

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

[19] Les additions calcaires sont majoritairement utilisées. Dans le cadre de la formulation des bétons autoplaçant, un grand volume d'addition est nécessaire de manière à réduire la quantité de ciment induite par l'augmentation du volume de pâte nécessaire pour permettre l'écoulement du béton.

I.13. LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU (L)

I.13.1. Fabrication

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Constitués essentiellement de silicates ou de silico-aluminates de chaux ; traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau **[11]** :

- 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.

I.13.2. Utilisation

Son utilisation dépend du traitement thermique qu'il a subit lors de son refroidissement depuis l'état liquide on retrouve le laitier de haut fourneau sous trois formes **[23]** :

I.13.2.1. Agrégat refroidit à l'air

C'est la solidification lente du laitier liquide à l'air, qui conduit à un solide stable. Cette méthode permet la production d'un produit de très haute densité. Après broyage et tamisage, le produit est employé principalement comme matériau de construction dans le terrassement des routes et pour la fabrication du béton.

I.13.2.2. Agrégat expansé

Ce processus fait intervenir l'introduction de l'eau sous des conditions contrôlées, a l'intérieure d'un cru cible a trous carres dans lesquels se trouve du laitier liquide avec un rapport volumique assez bas d'eau/laitier. Le produit obtenu par cette méthode possède une structure poreuse de faible conductivité thermique à cause de la présence des gaz et vapeur dans les pores. Apres broyage et tamisage, le matériau peut être utilise dans la production des bétons léger.

I.13.2.3. Laitier pour ciment

Le laitier est obtenu à partir des décharges du haut fourneau pendant la fabrication de la fonte liquide. Sa transformation en un produit utile pour supplier une fraction de ciment dans le béton est réalisée par une trempe rapide afin de lui donner un état vitreux.

I.13.3. Composition chimique des laitiers des hauts fourneaux

Le laitier contient essentiellement quatre éléments dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO2), alumine (Al2O3), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. Cette composition dépend de plusieurs facteurs; elle varie suivant la nature du minérale, du métal à obtenir, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement **[24]**.

Tableau I.4. Composition chimique élémentaire du laitier.

Eléments	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	MnO	S
%	40 a48	32 a41	9 a 18	4 a 9	0.2a 1	0.4a 0.7	0.6a1.5

I.13.4. Le Ciment au laitier

I.13.4.1. Fabrication

Le ciment de laitier est fabriqué en broyant et en mélangeant le laitier granulé, ciment Portland et sulfate de calcium (CaSO 4 2HO2). Il y a deux processus qui sont largement répandus dans le monde, broyage simultané et broyage séparé.

I.13.4.1.1. Broyage Simultané

Dans ce procédé le clinker, le laitier granulé et le gypse sont broyé ensemble dans des broyeurs à boulets ou dans des moulins à ciment. Le produit est connu sous le nom de ciment portland des hauts fourneaux.

I.13.4.1.2. Broyage séparé

Ce procédé est utilisé principalement dans la construction des barrages. Le broyage séparé présente plusieurs avantages par rapport au précèdent à savoir :

- ✓ Empêche l'excès de broyage du clinker et du gypse.
- ✓ Un meilleur contrôle de la qualité du produit donc de production.
- ✓ Optimisation des proportions pour différentes conditions d'utilisation.
- ✓ Pouvoir préserver les propriétés du laitier.

I.13.5. Effet sur les caractéristiques des bétons frais

De nombreuses études ont été effectuées pour déterminer la relation entre la composition chimique des laitiers et ses propriétés hydrauliques.

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel ; Le broyage du laitier donne des particules de forme irrégulière, de surface lisse qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte du ciment ce qui entraîne une amélioration des propriétés de l'ouvrabilité du béton contenant du laitier. Ce résultat a été rapporté par beaucoup de chercheurs **[25]**, cette propriété est améliorer notamment par le faite que la densité du laitier est inférieure à celle du ciment qui signifie que le remplacement sur la base d'un poids égal aura comme conséquence une augmentation du volume de la poudre.

A souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage. 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.

I.13.6. Effet sur les caractéristiques des bétons durcis

L'étude du comportement du béton à base du laitier a confirmé qu'une microstructure dense liée à l'augmentation de la quantité de laitier dans le béton contribue de manière significative à l'amélioration de la résistance **[23]**.

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, 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 à des taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité **[26]**.

Par ailleurs il a été démontré **[27]** que l'ajout de laitier par substitution de ciment est très bénéfique pour béton frais autoplaçant avec une teneur optimale de 15% (amélioration de la maniabilité et fluidité). Cependant, l'inconvénient d'ajouts minéraux contre les adjuvants chimiques est la réduction de la résistance quand une partie du ciment est remplacée par les ajouts. Résistance à la compression diminue avec l'augmentation de laitier contenu, de façon similaire à la comparaison du béton ordinaire .Son utilisation semble être très favorable si sa constitution est limitée à moins de 20% **[15].**

La possibilité d'emploi des laitiers comme additions fines au béton autoplaçant pour un dosage de l'ordre de30 à 45 % mais qui peut être optimisé en relation avec le dosage en superplastifiant et l'emploi d'agent viscosant.

[28] L'analyse des résultats obtenus des résistances mécaniques (compression, flexion et traction par flexion), des mortiers confectionnés a base de sable de dunes et du laitier granulé confirme que les mortiers contenant 15% de laitier avec une finesse de l'ordre de 4200 cm^2/g ont des résistances mécaniques supérieures à celles d'un mortier témoin et ce quel que soit l'âge d'essai.

Des résultats des tests réalisé **[29]** montrent que la résistance augmente avec l'augmentation de laitier jusqu'à une valeur de remplacement optimale qui peut aller jusqu'a 40%, au-delà de laquelle, les valeurs de résistance commencent à diminuer; ce qui fournit 19% de résistance à la compression plus élevée et résistance à la traction de 25% supérieure par rapport au mortier réalisé avec le ciment portland.

De mémé ; une étude **[30]** a permis de mettre en évidence l'effet du laitier granulé, par l'augmentation des résistances mécaniques en particulier à longs termes (28 et 365 jours) vraisemblablement par action pouzzolanique.

L'utilisation la plus valorisante de cet ajout reste toutefois son incorporation dans le ciment qui met à profit sa propriété hydraulique latente. Au point de vue de cette incorporation, seul le laitier peut être substitué au ciment portland, dans des proportions maximales puisqu'elles peuvent atteindre plus de 95% en poids du ciment. A ce niveau de substitution, la valorisation, en termes de limitation d'émissions directes de CO2 est maximale **[31].**

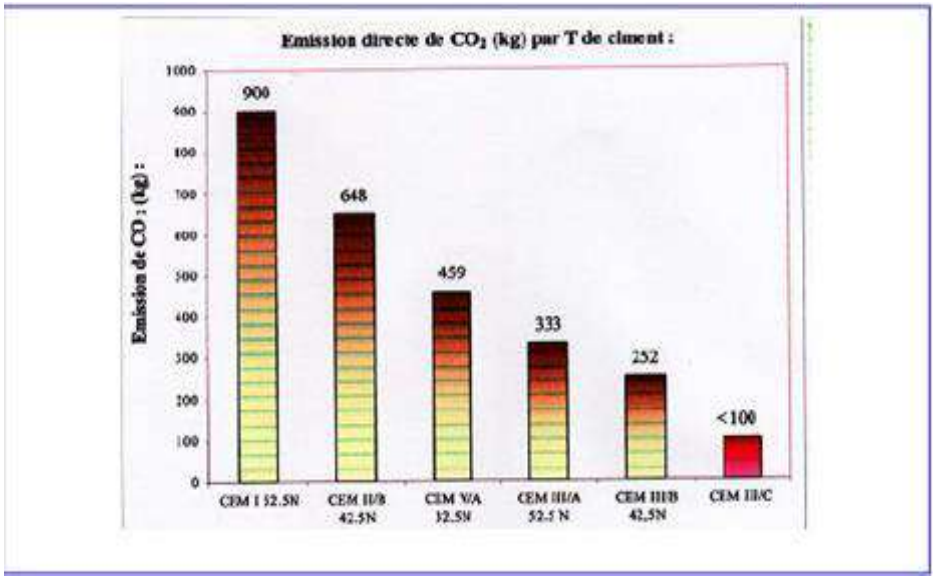


Figure I.4. Réduction de l'émission directe de CO2 entre 65% et 90%.
(Laitier considère comme co-produit à zéro émission de CO2).

I.13.7. Effet des additions sur ciment ternaire

Les études entreprises indiquent qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, les gisements de calcaire ainsi que les résidus industriels disponibles en Algérie pour produire des ciments et ternaires.

La substitution de ciment par deux ajouts est devenue très répandue de nos jours, cela peut donner un effet synergique entre les différentes substances et compléter les effets positifs entre les ajouts actifs et inertes.

GHRICI M et al **[32]** ont menés une étude pour évaluer l'effet de l'interaction entre des additions; le filler calcaire et de pouzzolane naturelle sur les propriétés des mortiers et bétons. Ils ont conclus que ; Le point de forces maximales est d'environ 10% de filler calcaire et un faible niveau de remplacement pouzzolane naturelle dans les premiers âges. Après 28 jours, ce point se déplace vers le haut niveau de remplacement de la pouzzolane naturelle et faible teneur en filler calcaire.

[33] Les résultats menés à travers cette étude permettent de conclure que la substitution d'un ciment Portland par un taux de 10% de fines calcaire améliore les résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers binaires au très jeune âge (2 jours) par contre ces dernières sont améliorées par des taux de 30% de pouzzolane naturelle et 10% de fumée de silice à long terme (90 jours). Pour les mortiers ternaires combinant à la fois deux ajouts, les substitutions (10% pouzzolane/10% calcaire) et (10% pouzzolane/10% fumée de silice) améliorent nettement leurs résistances mécaniques à long terme (90 jours).

Une étude sur l'effet de l'incorporation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur les propriétés physico-mécaniques d'un ciment à base de calcaire a été menée par AICHOUBA.A et al **[34]**, ils ont confirmés que l'utilisation des ciments ternaires contribue d'une façon positive à l'amélioration des résistances mécaniques des ciments, de La durabilité est une meilleure résistance aux acides.

Le remplacement de 10 à 30 % du ciment au calcaire par la pouzzolane naturelle augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant **[34]**. Cela est probablement dû à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau, afin de mouiller toute la surface.

En combinant la pouzzolane et le laitier, CHABI et al **[35]** ont abouti à une quantité optimale de 35% qui représente une meilleure résistance et une meilleure économie, de même le ciment à la pouzzolane et au laitier montre une meilleure durabilité grâce à sa résistance aux milieux agressifs. Avec 15% de laitier et 15% de pouzzolane dans une pâte de ciment.

MANSOUR.S **[36]** a mené un travail qui consiste à introduire une addition inerte (calcaire) dans un ciment contenant de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Le couple composé de 70% CPA, 20% pouzzolane et 10% calcaire développe une résistance très comparable à celle du mortier témoin. En plus, une amélioration de la durabilité est observée vis-à-vis de l'attaque des mortiers par les sulfates et les acides.

I.14. LA TEMPERATURE DE CURE

I.14.1. Introduction

La maturation du béton est communément admise comme étant le paramètre primordial responsable du bon développement des propriétés du matériau. Dans des conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton .

L'humidité relative et les conditions climatiques défavorables lors de la mise en place d'un béton exposé peuvent contribuer à sa perte rapide d'eau ; d'ou la nécessité d'une cure permettant ainsi le maintien des taux d'humidité et de température adéquates durant une période définie . Essentielle, elle permet au béton de développer les propriétés requises telles que la durabilité, l'étanchéité, la résistance à la compression et à l'usure, la stabilité volumétrique, la résistance au gel/dégel et aux sels déglaçant.

I.14.2. Qu'est-ce que la cure ?

La cure fait partie de la dernière opération de mise en œuvre du béton, C'est un ensemble de précautions qui permettent de protéger le matériau cimentaire fluide dès la fin de sa mise en place jusqu'au moment où il atteint une résistance suffisante ; La cure a pour objet de protéger le matériau de surface et proche de la surface des facteurs atmosphériques afin que son évolution soit similaire à celle au cœur du matériau ; permettant ainsi l'hydratation du ciment.

Cette hydratation ininterrompue rend le matériau plus solide, moins poreux et plus durable. Elle a une grande influence sur les propriétés finales du matériau, indispensable si l'on souhaite qu'il atteigne les propriétés escomptées : résistance mécanique, mais aussi résistance aux agressions environnementales. En l'absence d'humidité, ou lorsque la température tombe sous 10 °C, l'hydratation cesse.

I.14.3. Importance de la cure

La réaction chimique d'hydratation du ciment nécessite une quantité d'eau suffisante ainsi que des conditions appropriées de température pour permettre au béton d'atteindre la résistance et la durabilité spécifiées. Une cure inexistante ou inadéquate peut entraîner de la fissuration et affecter la durabilité ainsi que les propriétés mécaniques et physiques du béton.

Pourquoi « curer » le béton ?

- Pour le protéger contre une dessiccation prématurée en surface.
- pour éviter un ralentissement de l'hydratation (par manque d'eau).
- pour limiter le retrait plastique.
- Pour diminuer le temps d'apparition de la première fissure.
- Pour retarder le départ précoce de l'eau surtout pour les bétons à base de ciments dont les constituants secondaires sont des laitiers de hauts fourneaux ou des cendres volantes ou pour des bétons contenant ces mêmes composants sous forme d'additions. Les additions du type laitier de haut fourneau ou cendres volantes ont des cinétiques de réaction plus lentes que le ciment.
- Pour protéger les armatures lorsque l'enrobage est faible, l'effet de la cure sur la durabilité est important ; il se fait sentir sur la peau du béton (quelques centimètres) et si l'enrobage est suffisant la couche de béton restera bien hydratée (a ne peut pas compenser une non cure par un surcroît d'enrobage).

I.15. PATHOLOGIES LIEES A L'ABSENCE DE CURE

I.15.1. Par temps plus chaud

Les conditions de température élevées généralement rencontrées en période estivale produisent une évaporation rapide de la surface du béton et en accélèrent la prise. Différents facteurs climatiques tels que des vents forts, une humidité relative faible, la radiation solaire ou un surchauffage d'abri provoquent également des effets similaires. Il en survient des fissurations et une baisse de la résistance à la compression. Les normes spécifies que lorsque la température ambiante dépasse 27ºC (à l'ombre) ou que des prévisions météorologiques affichent que cette température sera dépassée, des précautions supplémentaires doivent être prises lors de la mise en place du béton.

Il est important de tenir compte du temps chaud et des facteurs climatiques équivalents lors du bétonnage à cause de leur influence sur les propriétés plastiques du béton fraîchement mis en place. La température élevée provoque un accroissement de la demande en eau, ce qui se traduit par une augmentation du rapport eau/liants et une diminution de la résistance à la compression. Des effets peuvent se produire **[37]** :

I.15.1.1. Fissuration plastique

L'évaporation de l'eau de la surface du béton frais est en relation directe avec la température ambiante, la température du béton, la vitesse du vent et le faible taux d'humidité de l'air. Lorsqu'elle se fait trop rapidement, cette évaporation provoque un retrait élevé entraînant, l'apparition de fissurations plastiques de dalles de béton ou de tout autre élément soumis à ce phénomène.

I.15.1.2. Fissuration thermique

Des fissures d'origine thermique sont susceptibles d'apparaître lors de la mise en place d'un élément mince (dalle, mur), particulièrement lors de temps chaud suivi d'un refroidissement rapide (nuit fraîche).Le potentiel de fissuration est accru dans les ouvrages de masse, conséquence de l'accélération du dégagement de la chaleur produite par l'hydratation du ciment. Dans la majorité des cas, il suffit que le différentiel maximal de température entre la surface et le centre de l'élément de béton soit inférieur à 20°C pour contrer le phénomène.

I.15.1.3. Résistance à la compression insuffisante

Le béton mis en place et mûri dans des conditions de températures élevées développe, à court terme, une forte résistance mécanique. Par contre, le gain de résistance entre le 7^{e} et le 28^{e} jour s'avère plus faible que celui d'un même béton conservé à de basses températures.

D'autres conséquences s'ensuivent du bétonnage par temps chaud, parmi lesquelles :

-la perte d'affaissement et la diminution de la teneur en air entraîné.

-l'accélération du temps de prise et du temps de finition

I.15.2. Par temps plus froid

Lorsque le béton est mis en place par temps froid, sa teneur en eau à l'état frais, qui varie de 15 à 18 %, le rend vulnérable au gel et dégel, lorsque la température ambiante est froide et que la température des éléments en contact avec le béton est trop basse. Il en découle des implications directes sur les caractéristiques et le comportement du béton, dont une diminution de la résistance à la compression pouvant aller jusqu'à 50 %.

L'action du froid sur le béton frais ralentit, voire stoppe le processus de prise, et transforme en glace l'eau de gâchage, provoquant une expansion de son volume avec formation à l'intérieur d'un gradient thermique créant une migration de l'eau vers les surfaces froides d'où formation les cristaux de glace qui se forment dans les pores du béton endommageant la surface et produisant des fissures; sûr le béton jeune, il agit sur le processus de durcissement en le ralentissant et provoque des désordres dus à la formation des fissures internes.

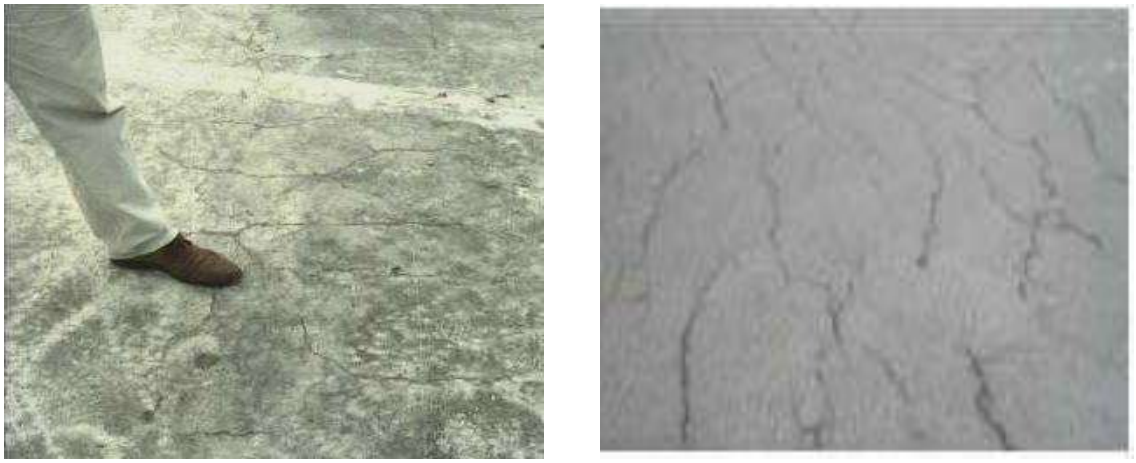


Figure I.5. Exemple d'une dalle de béton réalisée sans cure.

I.16. METHODE DE CURE

Pour assurer une bonne cure et obtenir les caractéristiques finales souhaitées, il est essentiel de maîtriser la température de l'air ambiant autour de l'emplacement du béton. Les températures de cure peuvent aller de 10 à 35 °C, la valeur optimale étant de 15 °C. Certaines mesures sont à prendre en compte :

Le béton doit être protégé des pertes d'humidité jusqu'à la dernière étape de finition. Il est de mise d'utiliser des barrières contre le vent et des vaporisateurs d'eau afin d'éviter l'apparition de fissure de retrait plastique. Une cure adaptée du béton débute immédiatement lorsque la finition est complétée

- Maintenir le ciment au degré d'humidité voulu et assurer son hydratation, couvrir le béton de plastique ou appliquer des produits de cure en aérosols. Ces pare-vapeur (plastique ou produits de cure) empêchent l'évaporation de l'eau contenue dans le béton. Sur les surfaces planes, on peut ajouter de l'eau par arrosage ou recouvrir la dalle d'une nappe d'eau, de films imperméables, de sable mouillé ou de jute ou de paille imbibée d'eau. Dans le cas du béton coffré, le fait de garder les coffrages en place contribue à maintenir l'humidité dans le béton.
- Si la mise en place a lieu par temps froid, empêcher le béton de perdre sa chaleur à l'aide de matériaux isolants ou de coffrages ou d'abris chauffés. La chaleur générée par la réaction chimique du ciment et de l'eau peut être mise à profit si elle est conservée à l'aide d'isolants ou autrement. La prolongation de la période de cure jusqu’ à ce que le béton ait une résistance adéquate au gel-dégel. L'utilisation d'un accélérateur de prise peut également être requise.

Le remblai des fondations ne doit être effectué qu'après une cure du béton d'au minimum 5 jours en été et de 7 jours durant la saison froide. Avant ce laps de temps, le béton n'a pas la résistance minimale voulue pour retenir les poussées latérales exercées par le sol de remblai **[38].**



Figure I.6. Voile en béton protégé par une toile après décoffrage.

I.17. LES PRODUITS DE CURE

Ce sont des produits de couvertures que l'on pulvérise sur le béton frais pour empêcher l'évaporation de l'eau de gâchage. on les applique sur le béton frais, Il existe un certain nombre de produits dont l'efficacité est variable dont on cite **[39]** :

I.17.1. Vaporisation de produits de cure formant une membrane

Les produits de cure formant une membrane sont composés de cire, de résines, de caoutchouc chloré et de solvants très volatils et servent à réduire ou à retarder l'évaporation de l'eau du béton. Ils doivent être appliqués rapidement sur le béton frais ou sur les surfaces de béton après le décoffrage. De plus, ces produits doivent être vaporisés manuellement ou mécaniquement, en respectant le taux d'application recommandé par le manufacturier, et être appliqués au moment opportun figure I.7. Leur utilisation est à éviter pendant la période de ressuage du béton.





Figure I.7. Vaporisation sur la surface d'un béton fraîchement mis en œuvre formant membrane.

I.17.2. L'arrosage et la vaporisation d'eau

L'arrosage continu ou la vaporisation sont des méthodes de cure souhaitables lorsque la température ambiante est à ≥ 10 °C et que le taux d'humidité relative est très faible. Le béton doit demeurer humide, car l'alternance de cycles de mouillage/séchage altère la qualité de surface.



Figure I.8. Arrosage continu .

I.17.3. Utilisation de nappes d'eau et l'immersion

L'utilisation de la nappes d'eau et l'immersion sont les méthodes les plus efficaces pour éviter les pertes d'humidité et maintenir le béton à une température uniforme. Les surfaces planes telles que les planchers peuvent être recouvertes d'une nappe d'eau. La différence de température entre l'eau et le béton doit être de moins de 10 °C afin d'éviter les fissures de retrait thermique

I.17.4. Application de toiles imbibées d'eau

Les toiles imbibées d'eau sont faites de coton, de jute, de géotextiles ou d'autres matières capables de retenir l'eau et sont fréquemment utilisées. Les toiles doivent être exemptes d'apprêt ou d'autres substances incompatibles avec le béton ou qui peuvent le décolorer. Elles doivent être maintenues continuellement humides durant la période de cure afin d'éviter d'absorber l'eau du béton. Une pellicule de polyéthylène recouvrant la toile diminue le nombre d'arrosages et peut être utilisée lorsqu'un arrosage soutenu est optionnel pour refroidir le béton.

I.17.5. Utilisation de pellicules de plastique

L'utilisation de pellicules de plastique ou de papiers imperméables peut s'avérer suffisante sur des surfaces horizontales ou sur des bétons structuraux ayant des formes simples .Ces méthodes diminuent le besoin d'apport d'eau continuel et assurent une hydratation adéquate du ciment en empêchant l'eau de s'évaporer. Elles sont à éviter lorsque les surfaces apparentes du béton sont importantes, ainsi que par temps chaud à cause de l'effet de serre. Si le papier imperméable est abîmé pendant la période de protection, il faut réparer et sceller la partie endommagée.



Figure I.9. Utilisation d'une pellicule de polyéthylène.

I.18. DUREE DE CURE NORMALISEE

La cure doit être maintenue de 3 à 7 jours ou pendant le temps nécessaire pour obtenir 40 % à 70 % de la résistance à la compression spécifiée selon la classe de béton .La description détaillée de chaque type de cure est présentée au tableau I.5.

Tableau I.5. Régime de cures admissible **[40].**

Type de cure	Nom	Description
1	Cure de base	3 Jours à une température ≥10 °C ou pendant le temps nécessaire pour atteindre 40% de la résistance spécifiée.
2	Cure supplémentaire	7 jours à une température ≥ 10°C et pendant le temps nécessaire pour atteindre 70% de la résistance spécifiée. Lorsqu'on utilise du béton à la fumée de silice, on doit recourir à des méthodes de cure additionnelles.
3	Cure prolongée	Période de cure par voie humide de 7 jours ≥ 10°C. Les types de cure acceptables sont les suivantes : nappe d'eau, arrosage continu, matériau absorbant ou toile maintenue continuellement mouillée.

Un béton soumis à sept (7 j) jours de cure à l'humidité atteint 75 % et 100 % de sa résistance nominale après 7 jours et 180 jours respectivement, Par comparaison, au bout de 180 jours, le béton ayant subi trois jours de cure n'atteint que 80 % de sa résistance nominale, et celui qui n'a subi aucune cure n'atteint que 55 % de cette valeur.

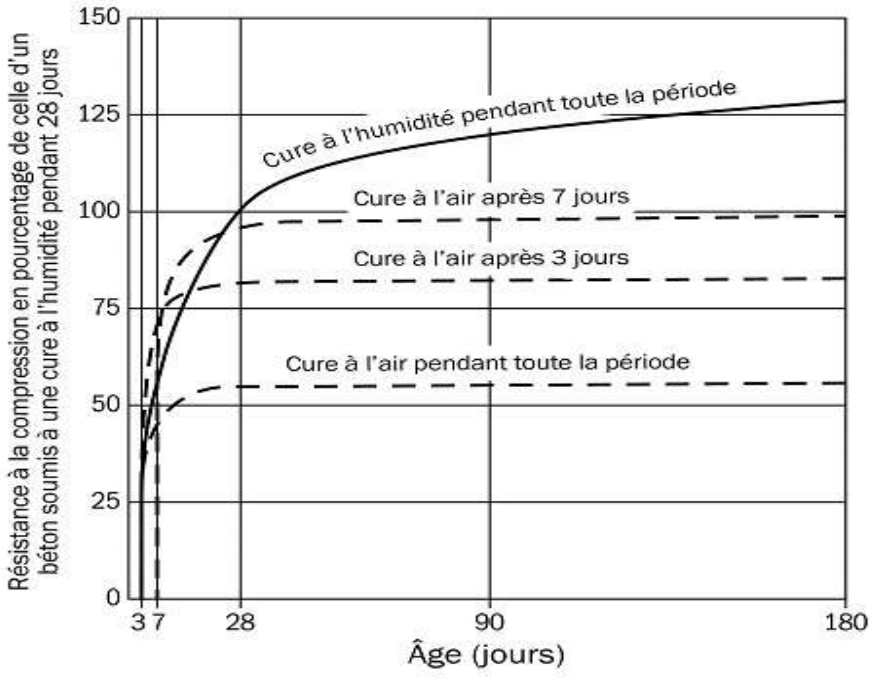


Figure I.10. Une bonne cure augmente la résistance du béton **[39]**.

Pour une même période de traitement il a été démontré **[41]** qu'une cure humide de 7 jours pour un béton auto plaçant permet à ce dernier d'atteindre la résistance maximale à la compression et à la flexion.

BOUIKNI **[23]** a pu trouver que le traitement à l'air après un traitement à l'humidité de 7 jours développement des résistances à la compression du béton à haute concentration de laitier plus grandes de 10à 30% que le béton traité par séchage dans tous les âges.

I.19. TEMPERATURE OPTIMALE

La température est un facteur important à respecter pour obtenir une cure adéquate. Des températures supérieures ou égales à 10°C doivent être maintenues. Lorsque la température ambiante se situe en dessous de 5°C, des couvertures isolantes ou d'autres matériaux isolants peuvent suffire à protéger le béton.

Un béton qui durcit sous une température élevée se caractérise par une accélération de son hydratation au jeune âge donnant lieu à des résistances élevées mais qui se stabilisent rapidement à des valeurs bien inférieures à celles d'un béton durci sous une température ambiante de 20°C. De plus, les recherches actuelles confirment que l'élévation de la température a un effet négatif sur la microstructure du ciment durci par l'augmentation de sa porosité, la diminution de ses résistances ultimes et la détérioration de sa durabilité **[42].**

Sur un large domaine de température de cure de 20, 40, 60 et 80°C **[43]**, il a été démontré que 40°C présente la température de cure optimale des résistances d'un ciment aux cendres volantes. D'autres travaux **[42]** conclurent que 30°C est l'optimum pour le développement des résistances d'un ciment composé au laitier.

I .19.1. Effet de la cure sur bétons et mortiers à base d'additions

I.19.1.1. La prise

Il est reconnu par de nombreuses études qu'une baisse de température ambiante augmente le temps de prise du béton et le ressuage. En étudiant l'effet de la température (20, 30, 40 et 50°C) sur la prise d'un ciment contenant différents taux de fumée de silice, Alshamsi et al **[44]** constatent que pour des taux de substitution inférieurs à 10% la prise n'est pas influencée, par contre pour un taux de 20% les temps de début et de fin de prise sont augmentés de 6 à 20% par rapport à ceux du ciment ordinaire. Sous des températures élevées la prise est souvent semblable pour différents taux de fumée de silice .

I.19.1.2. L'hydratation

De nombreuses études ont été menées afin d'élucider l'influence de la température sur les différents mécanismes impliqués durant l'hydratation. Une élévation de température durant les premiers stades de l'hydratation augmente le développement de la résistance mais a des conséquences néfastes sur les propriétés à long terme .Ceci résulte d'une hydratation plus rapide mais qui favorise le développement d'un réseau poreux plus grossier **[12]** .

L'augmentation de la température de cure engendre une accélération de dégagement de chaleur d'hydratation au très jeune âge. Cependant plusieurs études confirment que sous une température élevée l'hydratation du ciment produit une grande chaleur aux premières heures, mais les chaleurs ultimes sont réduites. MA et al **[45]** examinent l'effet de la température de cure sur la chaleur d'hydratation en présence d'addition minérale. La fumée de silice est plus efficace sous des basses températures que sous des températures élevées, contrairement au laitier qui s'avère très actif pour l'élévation de température, par contre les cendres volantes restent pratiquement insensibles. Sous des températures élevées (>40°C), Ces résultats sont confirmé **[46]** par l'étude de hydratation de deux ciments (CEM I 42,5 R et CEM II / AV ; avec et sans cendres volante) durcies à des températures allant de 4 à 85 ° C. où il a été démontré que le durcissement du ciment à des températures plus élevées a tendance à augmenter le taux d'hydratation à jeune âge de façon significative et diminuer à long terme la résistance à la compression. La baisse de la résistance à la compression à 28 jours dans les pâtes durcies à des températures élevées a été attribuée à leur porosité plus élevée et la microstructure moins uniforme.

Une étude d'influence de la température sur le développement microstructural des bétons **[47]** a permis de générer de nombreuses données liées au développement microstructural des bétons ou la température a pour effet d'accélérer significativement l'hydratation du ciment :

- La consommation plus rapide des grains de ciment génère du C-S-H et de la portlandite en quantités importantes dès les premières heures de la cure, ce qui induit un développement de résistance plus rapide. De la même manière, les sources de sulfates sont épuisées plus rapidement à jeunes âge lorsque la température augmente.
- Les résultats obtenus montrent que pour une température donnée, il existe une relation linéaire entre le degré d'hydratation et la résistance en compression du béton. Le fait que ces relations soient dépendantes de la température montre

que c'est le développement microstructural qui est à l'origine de ces différences et non pas le degré d'hydratation lui-même : à degré d'hydratation égal, plus la température est élevée, plus la résistance est faible.

Pour un ciment ordinaire, il apparaît que les résistances ultimes décroissent linéairement avec l'élévation de température **[45]**. La présence de certaines substances minérales peut modifier la cinétique de l'hydratation, réduire le flux de chaleur dégagée et produire des hydrates CSH additionnels **[12].** A une température élevée, ces substances minérales affectent l'hydratation du ciment et minimisent les désordres causés par la température selon la quantité et la qualité de ces additions.

MARTINEZ et al **[48]** a mis en évidence que la température de cure joue un rôle fondamental sur l'évolution de l'hydratation du ciment, tel qu'après 9 jours sous 60°C il a pu obtenir le même degré d'hydratation à 90 jours sous 20°C.

KELLOUCH.Y **[49]** a étudié l'effet de la température de cure sur une pâte renfermant 50% de laitier en élevant la température de 20°C à 40°C ; elle a déduit que la température de 40°C est la température la plus favorable pour l'hydratation des ciments au laitier (l'élévation de température de cure favorise la production de CH supplémentaire dû à l'activation thermique du laitier).

I.19.1.3. La résistance mécanique

La température de cure a un rôle majeur sur le développement des propriétés mécaniques du béton. A jeune âge, l'augmentation du degré de réaction qui est responsable des résistances plus élevées à haute température. Sur le long terme, la résistance des bétons dont la cure a été conduite à basse température est largement supérieure à ceux dont la cure a eu lieu à plus haute température sans pour autant que leur hydratation soit plus élevée **[47].** Ceci est dû a un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment le C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène, permettent ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, à l'origine de la perte de résistance.

L'amélioration des résistances au jeune âge est due à une formation accélérée des CSH et à une dissolution rapide des cristaux. A long terme, ce qui engendre une chute des résistances finales **[43].**

AMRANE et KENAI **[50]** ont étudiés la résistance à la compression de bétons dont le ciment a été substitué par 0, 15, 30 et 40 % de laitier d'El-Hadjar et conservés dans l'eau, à l'intérieur du laboratoire et dans trois environnements simulant un climat chaud. Pour une conservation sous l'eau à 20°C, les résistances du béton aux laitiers au jeune âge sont faibles comparées à celles du béton témoin. Par contre, à long terme, elles deviennent comparables sinon meilleures. Dans les environnements à température élevée l'hydratation du ciment au laitier est plus rapide et en baisse d'humidité.

BOUIKNI. A **[23]** a trouvé qu'une cure à l'eau a des bienfaits sur le développement de la résistance de compression du béton à haute concentration de laitier. Ce type de traitement manifeste aussi des résistances plus grandes de que le béton traité par séchage dans tous les âges et améliore toutes les propriétés associées à la durabilité et les avantages de la cure à l'eau ont été beaucoup plus prononcés avec un remplacement de laitier plus élevé ; Pour le béton ayant une haute concentration en laitier, les spécimens traités à l'humidité ont donné une résistance et des propriétés élastiques plus grandes que les spécimens traités dans la condition de cure sèche.

I.19.1.4. Les retraits

I.19.1.4.1. Définition

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maitrisées par le ferraillage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maitrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures de fissures.

I.19.1.4.2. Types de retraits

Cinq types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements **[51]:**

A. Retrait plastique

Le retrait en phase plastique du béton résulte d'un séchage rapide du mélange non encore durci, principalement en surface, sous l'effet du vent ou de l'ensoleillement. La différence de température entre l'air et le béton joue également un rôle important : il est

évident que le retrait plastique n'est pas uniquement à craindre en période de forte chaleur mais aussi en hiver. Cette dessiccation provoque une diminution de volume considérable.

B. Retrait endogène

Le retrait endogène trouve son origine dans une autodessiccation c'est-à-dire une consommation interne de l'eau lors de l'hydratation du ciment. En effet, tout élément en béton, qui n'est pas immergé sous eau, a tendance à se rétracter au cours du temps, même s'il est isolé du milieu extérieur afin d'éviter sa dessiccation.

C. Retrait hydraulique

Le retrait hydraulique résulte du séchage lent du béton dans le temps. Il résulte donc d'un déséquilibre hygrométrique entre le béton et le milieu extérieur. Dans le cas où l'humidité relative extérieure est inférieure à l'humidité interne, un processus de séchage se déclenche et génère une diminution de volume. Dans le cas contraire un gonflement se produit. Le processus de séchage et le retrait qui en résulte sont d'autant plus élevés et rapides que l'excès d'eau non liée dans le béton est important (E/C élevé) car la porosité et la perméabilité de celui-ci augmentent, ce qui accélère encore le phénomène. De plus, lorsque la quantité d'eau non liée s'évapore rapidement, le retrait du béton est également plus élevé et rapide.

D. Retrait thermique

Ce type est observé lorsqu'il y a une diminution de température du béton au moment de sa prise ou juste après. L'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui peut donner lieu à une augmentation considérable de la température du béton. Celle-ci peut éventuellement aussi avoir lieu lors d'une variation thermique du milieu de conservation (ensoleillement direct après décoffrage). Dans la période de refroidissement ultérieure c'est-à-dire de contraction ou de retrait thermique, des fissures peuvent se produire lorsqu'un obstacle empêche le retrait de l'élément.

E. Retrait de carbonatation

Il se développe dans les bétons lorsque la réaction de la pate de ciment hydraté avec le gaz carbonique de l'air en présence de l'humidité.

ITIM, A **[52]** rapporte que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure. Le calcaire engendre un retrait semblable à celui du ciment ordinaire, par contre le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. De

son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution et une fois ce taux dépassé sa valeur est réduite. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire et le laitier. Ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes de laitier et de calcaire et un peu moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eau qui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation.

BOUALI .R **[22]** a démontré lors de son étude sur la contribution du calcaire dans un ciment portland artificiel et d'un béton que 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 pas de différence pour le retrait par séchage Un mortier contenant 15% de calcaire possède, à 2, 7 et 28 jours, un retrait de 25, 16 et 7% inférieur à celui d'un mortier sans calcaire.

Au travers l'étude sur le risque de fissuration endogène précoce des pâtes de ciment mesuré par la méthode à l'anneau **[53],** il a constaté que :

- La diminution de la quantité d'eau dans la pâte de ciment provoque une diminution de l'âge de la première fissure endogène ; ce phénomène est probablement lié au fait que les déformations endogènes se développent d'autant plus rapidement et plus intensément que la quantité d'eau initiale dans le matériau est plus faible .
- L'augmentation de la température cause une diminution du temps d'apparition de la première fissure. Ce phénomène est une conséquence directe de la thermo activation de l'hydratation des pâtes de ciment au jeune âge.
- Une diminution du module d'Young de l'anneau métallique central provoque un retardement de l'apparition de la fissure et une augmentation de la déformation endogène à la rupture de l'échantillon.

I.20. CONCLUSION

A l'issue de la consultation des textes et l'analyse bibliographique des études sur l'incorporation des additions minérales dans la formulation des bétons et matériaux cimentaires, certains facteurs bénéfiques et avantages ont été tirés dont les principaux sont :

- ✓ Il est possible même indispensable d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle de Beni-saf, les gisements de calcaire ainsi que les résidus industriels disponibles en Algérie pour produire des ciments binaires et ternaires vue leurs grande disponibilités.

- ✓ La température de cure a un rôle majeur sur le développement des propriétés mécaniques des ciments. La plupart des chercheurs ont démontré que lorsque le mortier est exposé à des températures élevées au jeune âge, conduit à une chute considérable de la résistance à long terme et augmente le nombre des pores dans la matrice cimentaires.
- ✓ Les ajouts employés comme substituant du ciment ou comme aditions dans le béton peuvent apporter des modifications du comportement des matériaux cimentaire tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Le laitier permet un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte du ciment et entraîne une amélioration des propriétés de l'ouvrabilité du béton. Les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours et se rattrapent au bout de 7 jours **[23]**. La résistance augmente avec l'augmentation de laitier jusqu'à une valeur de remplacement optimale qui peut aller jusqu'a 40% néanmoins il a été démontré que 15% de substitution de ciment est très bénéfique pour le béton autoplaçant **[27],** le béton à haute performance **[54]** et les mortiers confectionnés a base de sable de dunes **[28].** Des travaux **[49]** concluent que 40°C est l'optimum pour le développement des résistances d'un ciment composé au laitier. D'autres recherches menées **[42]** sur les ciments contenant du laitier ont conclu que 30°C est la température optimale pour le développement de la résistance.

Le calcaire donne une bonne rhéologie des pâtes de mortier et des bétons avec l'augmentation de la finesse; ceci conduit a une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe. Le retrait augmente aussi avec la finesse du filler. Les résistances

mécaniques augmentent à des proportions qui varient de 5 et 15%, la résistance à la compression au jeune âge est meilleure que celle du ciment témoin. Le calcaire à un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment, ainsi que la résistance à la compression du ciment à base de calcaire au jeune âge augmente avec l'augmentation de la température. La présence de calcaire augmente l'effet néfaste de la température **[55].**

Pouzzolane confère aux bétons une amélioration de l'ouvrabilité, la plasticité et la rétention d'eau. Elle améliore la résistance à la compression à long terme pour le béton autoplacant à un taux de substitutions par la Pouzzolane naturel de béni-saf (15%) à un ciment (CPJ 32.5) et améliore pour le même taux les performances mécaniques d'un mortier avec de la siliceuse dosé de 5 à 10%. Dans une cure standard de 20°C et après 28 jours, les ciments contenants 10 à 20% de Pouzzolane, présentent des résistances comparables à celles du CPA. L'incorporation de la pouzzolane dans le ciment diminue l'effet néfaste de l'élévation de la température s'explique par les résistances à long terme qui dépasse celle des ciments sans ajouts **[55,56].**

Notre recherche bibliographique s'est appuyée sur les études les plus récentes dans le domaine, ainsi que sur la normalisation actuelle dont l'analyse à permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous avons appuyé notre approche méthodologique pour la formulation des mortiers de ciment.

CHAPITRE II

Matériaux et essais

II.1. INTRODUCTION

Dans la présente étude, nous nous intéressons à l'étude du comportement mécanique d'un mortier de ciment à base d'additions minérales sous l'effet de la température de cure, Pour cela, nous avons choisi deux matières chimiquement actives en l'occurrence le laitier d'El-Hadjar et la pouzzolane de Beni-Saf ainsi que le calcaire considéré comme inerte, se trouvant dans la région de mascara en quantités abondantes; ces derniers feront l'objet d'un traitement thermique dans des conditions humides et sous une température qui varie de 20° à 80°.

Au cours de ce chapitre nous procéderons en premier lieu à l'identification de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, à leurs compositions et a leur provenances, nous présenterons par la suite les différentes méthodes d'essais réalisés ainsi que leurs modes opératoires.

Afin de mettre en évidence le rôle physique ,chimique et mécanique de chaque ajouts Une série d'essais et de mesure seront effectué au laboratoire génie civil du Hall de Technologie de l'université de Médéa .

Les différents essais effectués au cours de ce travail sont :

II.1.1. A l'état frais

- Maniabilité (LCPC) (NF P 15-452) **[57]**.
- Densité (NF EN 12350-6) **[75],** NA 436 **[58]**.

II.1.2. A l'état durci

- Essai de compression sur éprouvettes prismatique 4*4*16 à l'âge de 7 ,28 et 56 jours NF EN 12390 [59] et NA427 **[60].**
- Essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatique 4*4*16 à l'âge de 7,28 et 56j NF P 18-407 **[61],** NA428 **[62].**
- Essai d'absorption capillaire sur éprouvette prismatique 4*4*16 à différent âge [**63]** NF 13057 NBN NE 13057.
- Essai de gonflement sur éprouvettes prismatique 4*4*16 à différent âg**e** NF P 15-404**[64] .**
- Essai de retrait à différent âge NF P 15-404 **[64]**.

II.2. MATERIAUX UTILISES

Les additions étudiées sont les plus utilisées dans le pays à savoir le laitier d'El-hadjar, la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et le calcaire de la région de Mascara. Nous avons procédé à leurs broyages à l'aide de l'appareil de Los Angeles jusqu'à l'obtention d'une poudre fine similaire à celle des ciments ordinaires.

II.2.1. Le ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale Il s'agit du ciment résistant aux sulfates de classe CM I 42,5 produit par la cimenterie du groupe GICA société de ciments de Ain Touta, Annaba ; il est constitué de :

- 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) ; peuvent être incorporés dans ce ciment du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.



Figure II.1. Ciment utilisé

II.2.1.1. Caractéristiques physico-mécaniques

- Expansion à chaud inférieur 10 mm sur pate .
- Surface spécifique de Blaine 3200 cm²/g ±250 normes.
- Résistance à la compression à : 07 Jours 315 Kgf/cm².

  28 jours 425 Kgf/cm².
- Temps de prise en minutes : Début : 1h30 min.

  Fin (mesuré) 4h20 min.

II.2.1.2. Caractéristiques chimiques

Tableau II.1. Caractéristique chimiques du ciment.

Composition chimique						
Fe	**C3S**	**C3A**	**C4AF+2C3A**	**Mg O**	**SO_3**	**Residu insoluble**
4%	50%	5%	22%	5 %	3,5 %	3%

II.2.1.3. Emplois habituels

- Il est utilisé comme ciment de base pour les travaux de génie civil en milieu agressif.
- Il est utilisé dans les travaux de béton nécessitant une faible chaleur d'hydratation.

II.2.2. Le sable normalisé

Le sable utilisé est un sable normalisé CEN de LEUCATE (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et conditionné et est commercialisé en sac plastique de 1350 ± 5 g (conforme à la norme EN196-1) **[30].**



Figure II.2. Le sable normalisé utilisé.

La courbe granulométrique du sable utilisé se situe à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure II.3.

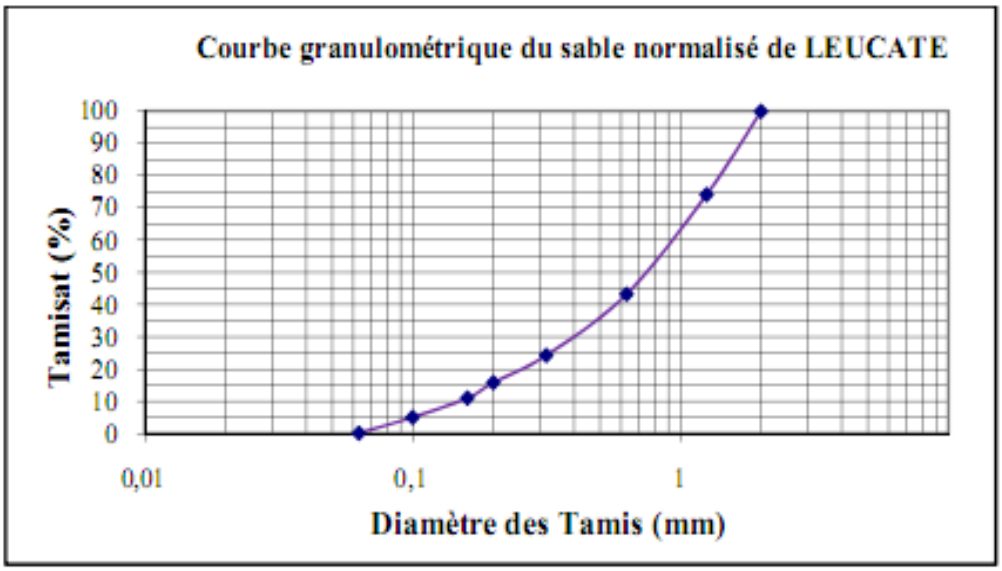


Figure II.3. Courbe granulométrique de sable normalisé.

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme EN 196-1 **[30]** et de la norme ISO 679 : 2009.

Tableau II.2. Composition granulométrique du sable normalisé

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

II.2.3. Le laitier

Le laitier des hauts fourneaux est lié à la production de la fonte à partir desquelles seront élaborés les aciers. En Algérie, le complexe sidérurgique d'El-Hadjar compte un tonnage impressionnant de laitier sous différents aspects. Ce matériau ne trouve son utilisation que dans certains domaines très restreints comme la confection des routes et en cimenterie. Il se présente sous forme de sable de couleur grise claire, de granulométrie de 0 à 5 mm, Le laitier d'El-Hadjar est inactif dans l'eau avec une dissolution des ions presque nulle même pour des finesses allant jusqu'à 6000 cm^2/g. Par contre, il est très actif en présence d'un activateur **[65]** ; la composition chimique est donnée dans les tableaux ci-dessous.



Figure II.4. Laitier d'El-Hadjar utilisé.

Tableau II.3. Caractéristiques du laitier d'el hadjar.

Composition chimique							
$Si\ O_2$	**$Al_2\ O_3$**	**$Fe_2\ O_3$**	**Ca O**	**Mg O**	**$Na_2\ O$**	**$K_2\ O$**	**$S\ O_3$**
42.20	5.85	1.90	42.20	4.72	0.12	0.43	1.54

II.2.4. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques scoriacées. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer. La pouzzolane de la région de Beni-Saf est l'unique gisement dont l'exploitation revient actuellement à FER PHOS, cette dernière ne produit que 600 à 800 tonnes/jour ;La quasi-totalité de cette quantité est destinée à la cimenterie de Beni-Saf, tandis qu'une faible proportion est utilisée dans la fabrication de parpaings et d'hourdis dans le domaine du bâtiment. Suite à des directives économiques, certaines cimenteries du centre et de l'Est ont commencé à introduire cette matière dans leurs produits **[12].**

Cette pouzzolane possède un indice d'activité de 0,82 pour un taux de substitution de 25%, sachant que pour une poudre inerte, l'indice d'activité est de 0,67 et 1 pour le ciment ; la pouzzolane de Beni-Saf est donc réactive **[26].**

La pouzzolane utilisée est fournie par la cimenterie de LAFARGE. Cette pouzzolane de couleur grise est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2 /g. Le temps de broyage a été fixé à 43 min. Sa masse volumique absolue est de 2590 kg/m^3. Sa composition chimique est donnée dans le tableau II.4.



Figure II .5. Pouzzolane naturel de Beni-saf.

Tableau II.4. Caractéristiques de la pouzzolane de Beni-Saf .

Composition chimique									
Si O_2	**Al_2 O_3**	**Fe_2 O_3**	**Ca O**	**Mg O**	**Na_2 O**	**K_2 O**	**S O_3**	**PAF**	**total**
46.40	17.50	10.50	10.50	3.80	3.40	1.50	0.40	4.31	98.31

II.2.5. Le calcaire

Le calcaire utilisé dans cette étude, est extrait de la carrière de la région de Mascara, et est fourni aussi par la cimenterie de LAFARGE (Figure II.6) Cette addition de couleur blanc jaunâtre est fournie sous forme de pierres concassées et ensuite broyée à une finesse de 3500 cm^2/g. Sa masse volumique absolue est de l'ordre de 2544 kg/m^3. Sa composition chimique est reportée sur le tableau II.5, sa teneur en CaCO3) est 95,80 %.

Tableau II.5. Caractéristiques chimiques des calcaires de Mascara.

Composition chimique (%)										
SiO_2	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**Na_2O**	**K_2O**	**RI**	**PF**	**Total**
0,85	0,93	0,56	53,08	0.23	0,60	0.08	0,53	0,52	42,55	99.57



Figure II.6. Calcaire de Mascara utilisé.

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication des mortiers est celle du robinet considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au mélange et conforme à la norme NF EN 1008 **[66].**

II.3. ETUDE DE LA COMPOSITION DES MORTIERS

II.3.1. Définition des mortiers

Les mortiers sont composés de deux parties ; partie active (le liant (ciment)) et partie inerte (le sable) ; mélangés à l'eau, éventuellement complétés par des adjuvants et des additions. Ils se distinguent du béton par l'absence de gravillons. Préparés sur le chantier à partir de mortier industriel sec prédosé ou en dosant et mélangeant tous les constituants - ou livrés sur place depuis une centrale, les mortiers sont utilisés pour la réalisation de joints, d'enduits, de chapes et pour divers travaux de scellement, reprise et bouchage.

II.3.2. Mortier normal

On appelle mortier normal ; mortier conforme à la norme (NF EN 196-1) **[67]** qui se compose, d'une partie du liant à contrôler, de trois parties de sable normal(C/S=1/3) et d'une demi partie d'eau (E/C = 0,5) ; et dans le but de pouvoir comparaitre les résultats nous avons procédé à la confection d'un mortier normale qu'on appelle témoin (Mt).

II.3.3. Mortier a base d'addition

Dans ce travail expérimental trois mélanges ont été préparés en remplaçant une partie de ciment avec l'une des additions minérales employées à savoir : laitiers (ML), pouzzolane naturelle (Mpz) et calcaires (Mc) pour un taux de substitution de ciment fixé à 15% et un rapport E/C = ½ constant.

Tableau II.6. Représente les quatre (04) types de mélanges préparés.

mortier / matériaux	MT	ML	MPZ	MC
Ciment (g)	450	382.5	382.5	382.5
Sable (g)	1350	1350	1350	1350
Eau (g)	225	225	225	225
Ajout (g)	/	61.23	55 .50	54.52

II.4. CONFECTION DES EPROUVETTES

II.4.1. Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme [EN 196-1] **[67]** :

*Une salle maintenue à une température de 20 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

*Des bacs d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à des températures de (20 °C ± 2°C) ;(40C°± 2°C) ; (60 °C ± 2°C) ; (80°C ± 2°C) et à une humidité relative supérieure à 90 % ;

*Un malaxeur à mortier normalisé avec une cuve de 5 L et pale de malaxage en inox;

*Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4cm x 4cm x 16cm);

*Une table à chocs pour le serrage des éprouvettes, permettant d'appliquer 60chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.

*Balances pour la mesure des petites et grandes quantités ;

*Spatules flexibles en acier inox ;

II.4.2. Préparation des mélanges

II.4.2.1. Le broyage

Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante). Avant d'être utilisé pour les différents mélanges on a procédé au broyage, du laitier, calcaire et la pouzzolane; à l'aide d'un broyeur jusqu'à l'obtention de la finesse équivalente à celle du ciment (3500 cm2 /g),la vitesse de broyage a été fixée à 8 min pour 50 g.



Figure II.7. Broyeur à disque.

II.4.2.2. Le Malaxage

On mélange les composants de chaque mortier à l'aide d'un malaxeur de 5 litres de capacité conformément aux prescriptions de la norme [EN 196-1] **[67]** pendant 4 minutes répartie comme il est présenté dans le tableau suivant :

Tableau II.7. Séquence de malaxage du mortier.

Opération	**Introduction de l'eau**	**Introduction de ciment**		**Introduction du sable**		**Raclage de la cuve**		
Durée de l'opération			30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide





Figure II.8. Malaxeur à mortier.

II.4.2.3. Le Moulage

Les mortiers préparés sont remplit dans des moules normalisés permettant de réaliser trois éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm*4 cm et de longueur 16cm ces éprouvettes sont appelées « éprouvettes 4 cm x 4 cm x 16 cm».

Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois ; après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle.



Figure II 9. Une table à chocs.

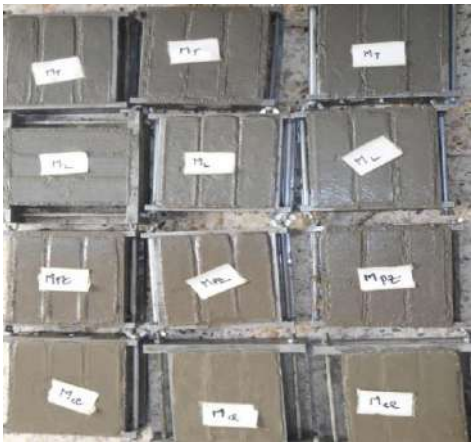


Figure II.10.Eprouvettes confectionnées.

II.5. ESSAI SUR MORTIERS A L'ETAT FRAIS

II.5.1. Mesure de La masse volumique des mortiers

Afin de bien évaluer la masse volumique du mortier, on a procédé a la pesée du moule à trois compartiment vide (M1) et la pesée du même moule avec le mortier rempli et mis en place à la table à chocs et cela pour chaque mélange préparé (M2).

La masse volumique (ρm) des mortiers, est mesurée par différence de pesées du moule 4X4X16 cm selon la norme NF EN 196-1, calculée par la formule :

$$\rho m = \Delta M \ / Vm$$

D'où : $\Delta M = M2-M1$, $Vm = 4\times4\times16$.



Figure II.11. Pesée des moules vide.

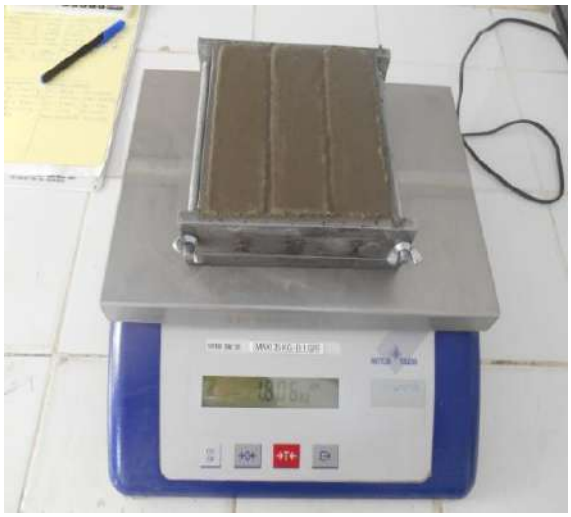


Figure II.12. Pesée des moules remplis.

II.5.1.2. Maniabilimètre LCPC

Appareil de mesure de l'ouvrabilité du béton. Le maniabilimètre du L.C.P.C. est formé d'un caisson de métal parallélépipédique, divisé en deux parties séparées par une trappe amovible ; Le Mortier est mis en place dans l'un des compartiments et après par relèvement de la séparation, on mesure la durée nécessaire au mortier pour remplir l'autre compartiment jusqu'à un niveau donné.

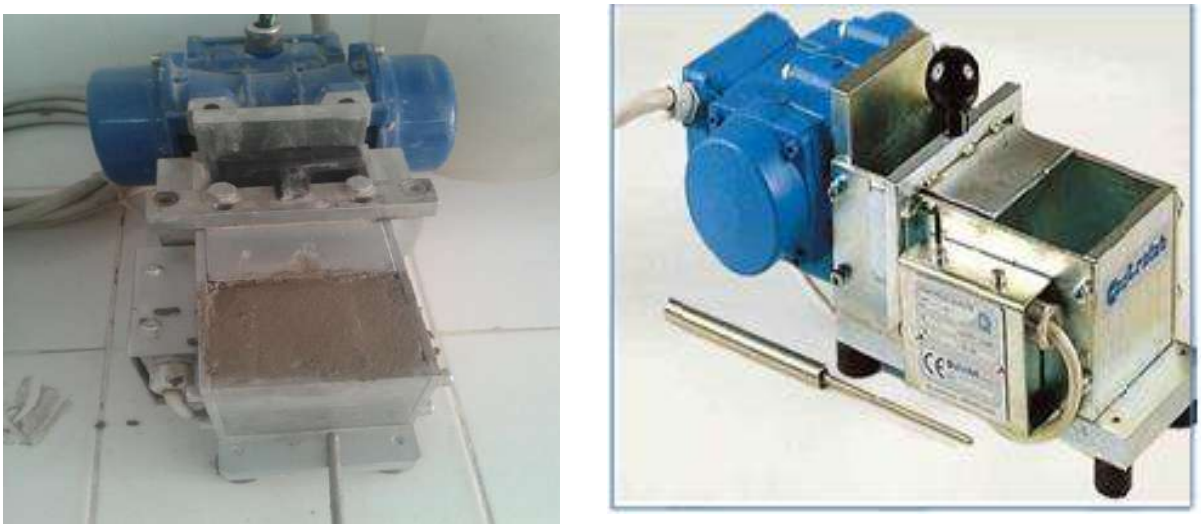


Figure II.13. Essai au maniabilimètre LCPC .

Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule. Le mortier est d'autant fluide que le temps d'écoulement est court.

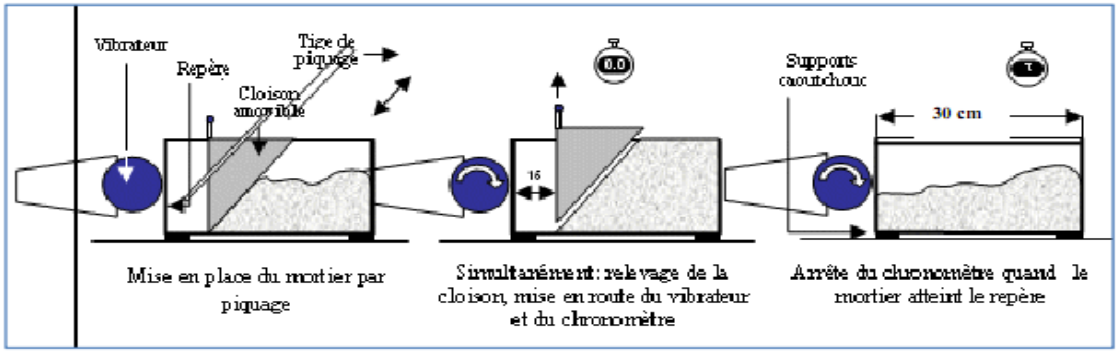


Figure II.14. Principe de fonctionnement du maniabilimètre B.

II.6. MODE DE CONSERVATION

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans un bac à des températures de cure jusqu'à l'échéance de l'essai:

- ✓ Dans l'eau à 20 C° ± 2 jusqu'à l'âge de l'essai.
- ✓ Dans de l'eau à 40C°durant 07 jours, puis dans l'eau à 20 C°.
- ✓ Dans de l'eau à 60C° durant 07 jours puis dans l'eau à 20 C°.
- ✓ Dans de l'eau à 80C° durant 07 jours puis dans l'eau à 20 C°.



Figure II.15. Eprouvette après d'émoulage.



Figure II.16. Bac à cure

II.7. PROTOCOL D'ESSAIS

A raison de trois éprouvettes par essai, trois âges (7j, 28j, 56j), quatre cures différents (20C° ,40 C°,60C°,80C°). Le nombre d'essais effectué sur les mortiers réalisés est résumé comme suite :

- 03 essais sur ouvrabilité.
- 03 essais sur la masse volumique.
- 144 essais de traction par flexion .
- 228 Essais de compression simple.
- 16 Essais d'absorption d'eau .
- 16 Essais gonflement.
- 16 essais de retrait .

II.8. Essai sur Mortiers à l'état durci

II.8.1. Essai Destructif

Les éprouvettes de mortier subissent un essai de flexion suivi d'un essai de compression à des âges de 7, 28 et 90 jours.

II.8.1.1. Essai de traction par flexion

Selon la norme [EN 196-1] **[67]**, c'est l'essai le plus couramment utilisé ; Il consiste à rompre en flexion (par trois points) ,une éprouvette prismatique de dimensions (4×4×16 cm) à 7, 28,90 jours.

L'essai de flexion est assuré par une machine de flexion d'une capacité de 5000 N avec une précision de 50 N ; La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure.





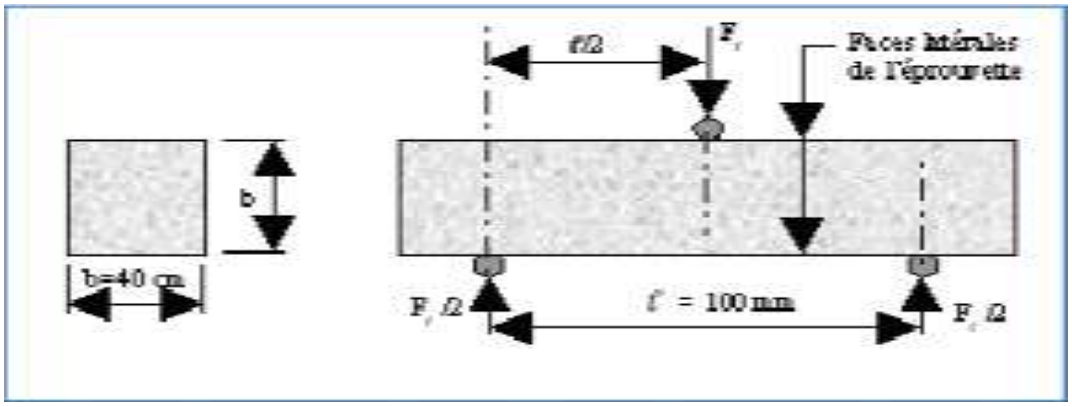


Figure II.17. Essai de traction par flexion sur mortier.

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

$$\sigma_t = \frac{M}{I}\nu$$

Avec : **M** : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge : $\mathbf{M = \frac{F_f L}{4}}$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $\mathbf{I = \frac{a^4}{12}}$

ν : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée : $\mathbf{\nu = \frac{a}{2}}$

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

$$\sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{a^3}$$

II.8.1.2. Essai de compression

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale d'éprouvettes cubiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 et 56 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN .figure (II-19) La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur les éprouvettes à chaque âge d'essai.

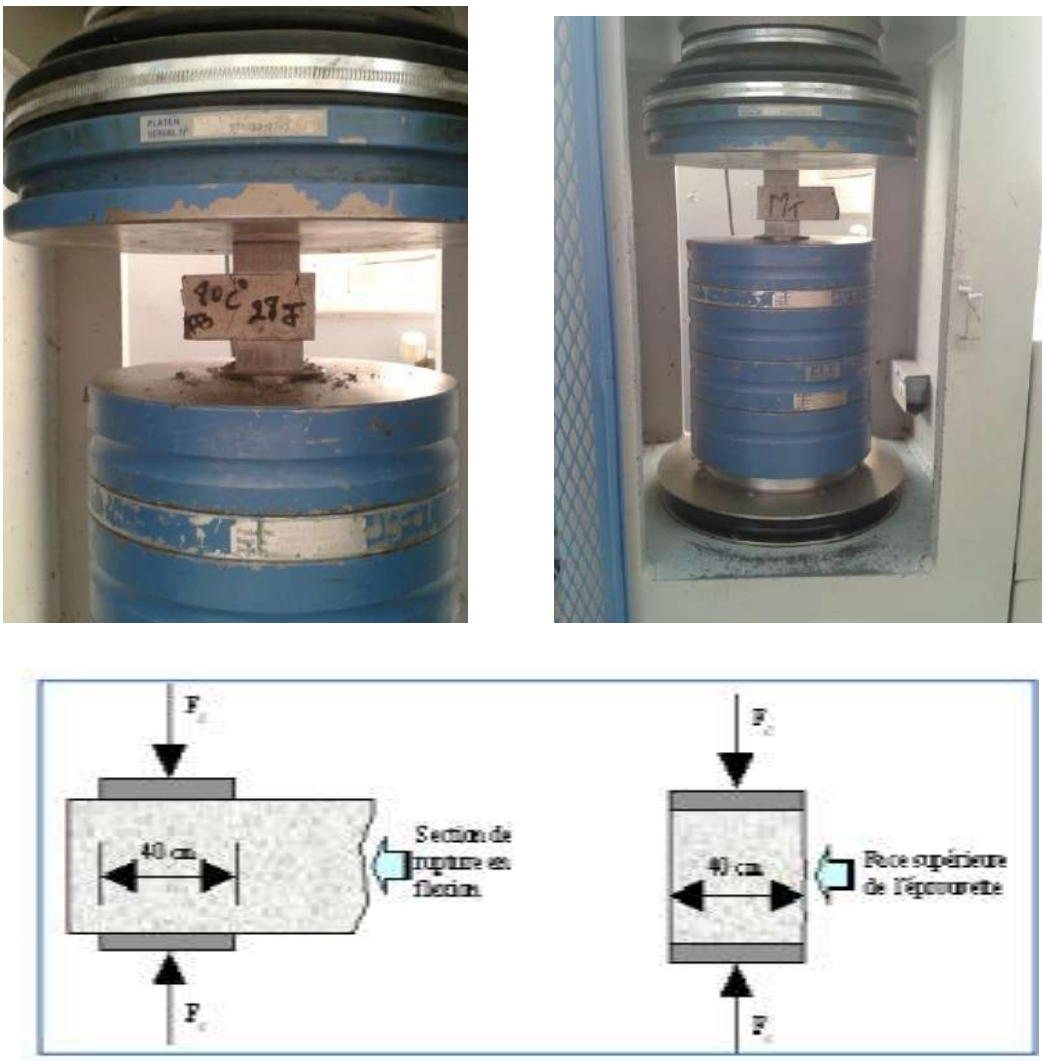


Figure II.18. Dispositif de rupture à la compression.

II.8.1.3. Essai de retrait et gonflement

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation , qui se traduit par un rétrécissement des éléments en mortier. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du mortier **[68].**

Il s'agit d'évaluer le retrait ; ou le gonflement que provoque le ciment ,l'ajout utilisés ou les condition de conservation des éprouvettes 4x4x16cm^3 ;ces dernières sont placées dans un bâti de mesure des déformations équipé d'un comparateur d'une précision de 1µm. Les mesures obéissent à la Norme NF 15-433 **[69]** où les résultats visent à caractériser chaque ajout et sa contribution à modifier les déformations différées ainsi que son aptitude à lutter contre la dessiccation.



Figure II.19. Rétractomètre et son étalonnage (variation dimensionnelle).

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

II.8.1.3.1. Mesure des variations de longueurs

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

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subi au cours des manipulations) (figure II .17).

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

$\Delta \mathbf{L}$: Variation de longueur par apport à la longueur origine,

$\mathbf{L_0}$: Longueur de base, prise égale à 160mm.

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

$$\boldsymbol{l = L + dl(t)}$$

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

$$\boldsymbol{\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)}$$

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

$$\boldsymbol{\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}}$$

Δl (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les éprouvettes. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air,Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors du retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou à froid, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement.

II.8.1.3.2. Mesure des variations de masses

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1g chaque éprouvette à chaque moment de mesure du retrait ou gonflement.

II.8.1.3.3. Expression des résultats

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

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

L0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

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

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



Figure II.20. Pesés des éprouvette avant la mesure du retrait.

II.8.1.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18 **[70],** après l'éssais de compression on prend un morceau de chaque type de mortier, séché, on le pèse (m_0), après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5 mm d'eau) (figure II.18) ;L'augmentation de la masse de l'échantillon a été mesurée à intervalle de temps (0 min,12 min,30 min,1h,2h,4h,24h) on procède à la pesée des morceaux (m_1) ,La différence de poids entre (m_1) et (m_0) est le poids de l'eau absorbée (m_1- m_0).

L'absorption d'eau (CA) est alors calculée par la formule suivante:

$$CA\ (\%) = 100*(M1 - M0)/M0.$$

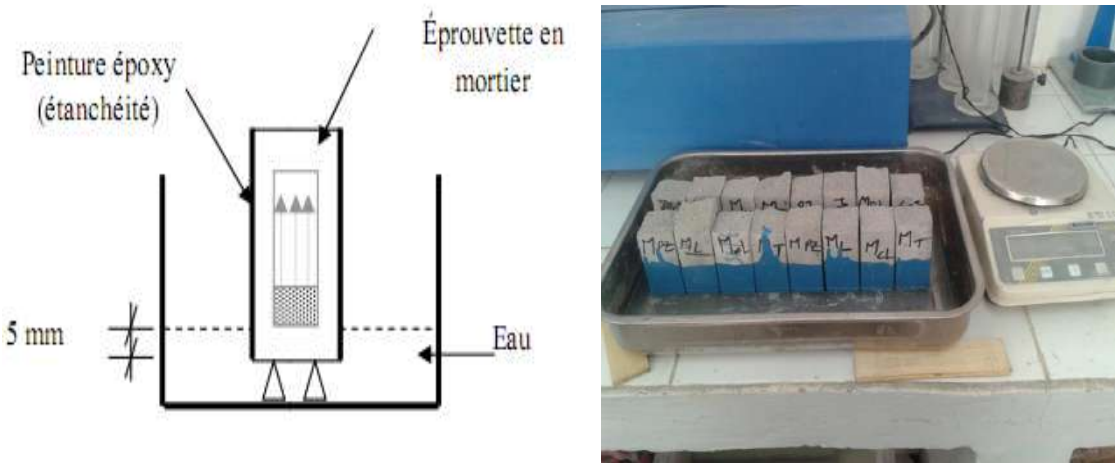


Figure II.21. Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier.

II.9. Variables étudiées

L'organigramme suivant présente les variables de l'étude expérimentale réalisée au laboratoire (Fig. II.22).

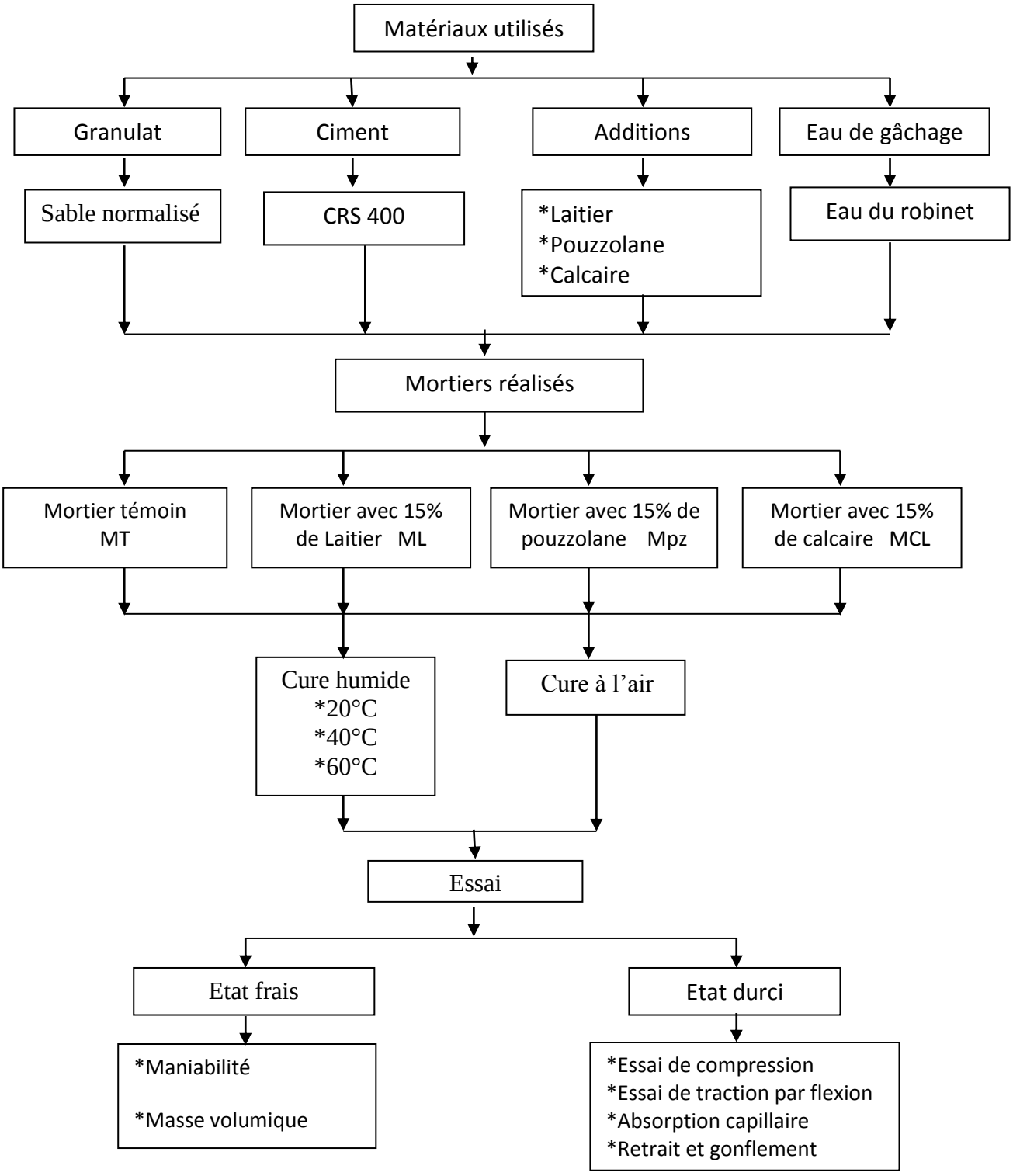


Figure II.22. Variation d'étude.

CHAPITRE III

Interprétations des résultats

Et discussions.

III.1. INTRODUCTION

Les résultats des différents essais faits sur les mortiers frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III.2. MANIABILITE

Les résultats présentés dans le tableau III.1 montrent une trop faible variation du temps d'écoulement de l'ensemble des compositions pour être significative. La maniabilité pour les mortiers avec additions est sensiblement identique à celle du mortier témoin. On peut conclure que l'incorporation de 15% d'addition quelque soit sont type n'a pas d'effet sur la maniabilité.

Tableau III.1. Résultats de maniabilité.

Maniabilité (S) / Mortiers	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
MT	7	6	6	6,3
ML	7	6	5,25	6,1
MC	6	5,4	5,65	5,7
MPZ	6	5	5,54	5,5

Ces résultats confirment ceux démontrés pour un mortier auto compactant et bétons autoplaçant, notamment sur l'utilisation de la PZ par la substitution au ciment portland ordinaire n'a pas d'effets négatifs sur la maniabilité **[71].**

III.3. LA MASSE VOLUMIQUE DES MORTIERS

A la lecture des résultats présentés dans le tableau (III-2) on remarque que la masse volumique du mortier témoin est supérieure aux mortiers à bases d'additions, suivi du mortier contenant le laitier, la pouzzolane et en dernier le calcaire. Cette décroissance s'explique logiquement par le fait que les additions qui remplacent le ciment ont une masse volumique réelle inférieure et gardent le même ordre :

$\rho T = 3,15$ (g /cm2) ; $\rho l = 2,85$(g /cm2) ; $\rho PZ = 2,59$ (g /cm2) $\rho CL = (2,54$ g /cm2)

Tableau III.2. Résultats des mesures de la masse volumique des mortiers.

Masse / Mortier	M1 (Kg)	M2 (Kg)	ΔM(Kg)	ρm (Kg /m3)
MT	7,92	9,749	1,829	2381
ML	7,271	9,093	1,822	2372
MPZ	7,21	9,023	1,813	2360
MCL	7,192	9,003	1,811	2358

III.4. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Le but de cette partie est de déterminer les résistances à la compression sur les éprouvettes de forme prismatiques 4*4*16 *cm* confectionnées par un mortier normal et à base d'additions pendant respectivement 7, 28 et 56 jours. Les résultats des essais d'écrasement en compression sont présentés dans le tableau III.3.

Tableau III.3.Résultats de résistance à la compression en fonction des températures de cures des différents types de mortiers.

Température (°C)	Age (J)	MT	ML	MPZ	MCL
20°C	7	31,87	28,91	27,19	27,75
	28	41,48	36,85	34,38	31,96
	56	43,34	41,23	39,24	38,41
40°C	7	36,42	32,21	29,71	31,27
	28	40,36	39,62	34,86	35,38
	56	43,78	41,26	36,61	39,45
60°C	7	31,61	37,08	32,51	31, 21
	28	41,02	42,13	34,41	33,68
	56	48,43	45,26	38,6	36,24
80°C	7	29,88	29,68	27,76	24,50
	28	34,51	35,35	29,18	29,15
	56	37,51	39,15	34,41	30,05

III.4.1. Effet des additions

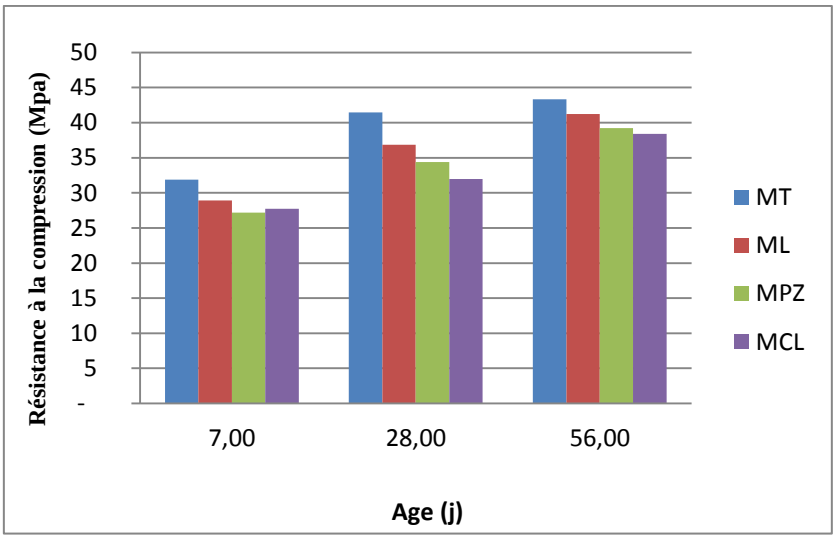


Figure III.1.Résistance à la compression à 20°C.

La Figure III.1 illustre une synthèse de l'évolution de la résistance en compression dans le temps des mortiers confectionnés et conservés à la température de cure standard de 20°C, Il ressort de l'examen de l'histogramme ce qui suit :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.

- Pour le laitier ML, la résistance à la compression est inferieure au MT de 9,29%, 11,16% et 4,87 % respectivement à 7j ,28j et 56 jours. Le laitier a développé des résistances à long terme voisine à celle du MT résultat confortant celui de MICAH H.W **[57]**; et celui d'EZZIANE .K **[12]** ou il a remarqué que le mortier au laitier présente des résistances inférieures à celles du mortier témoin au jeune âge quelle que soit la proportion du laitier utilisée.

- A jeune âge (7jours), la résistance à la compression des mortiers contenant la pouzzolane naturelle MPZ est inferieure de 14,68% par rapport à celle du mortier témoin, à 28 jours l'écart est de l'ordre de 17,12% , à long terme le MPZ développe des résistances proche mais reste inferieures de 9,46% à celle du mortier témoin MT à l'âges de 56 jours, ce qui confirme les travaux de BELAIDI et al **[71],** et les résultats trouvés par EZZIANE .K **[12]** et BEN KADOUR et al **[14]** qui ont conclus que L'incorporation de 10% à 20% de pouzzolane donne des résistances voisines de celles du mortier de référence en attribuant ceci à l'activité

pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme; ces mêmes conclusions ont été cité par KERBOUCH **[33]** mais pour un taux de substitution de 30%.

- Concernant le calcaire MCL sa résistance est comparable au MPZ à 7jours soit inférieure au MT de 12,93% , à 28 jours elle est à 22 ,95% et elle atteint 11,38 % au dessous de la résistance MT à 56 j. Des résultats qui s'avèrent différents de ceux trouvés par EZZIANE .K **[12]** qui a constaté que l'effet des taux de substitution de 5 et 15 % de calcaire est bénéfique, et que les deux mortiers atteignent des résistances similaires à celles du ciment ordinaire avant 28 jours d'âge pour une finesse de 3600 cm2/g. De même l'étude de KERBOUCH.A **[33]** a démontré que la substitution d'un ciment Portland par un taux de 10% de fines calcaire améliore les résistances mécaniques des mortiers binaires au très jeune âge (2 jours) .

III.4.2. Effet de la température

A travers les courbes ci-après (Figure III .2.3.4) nous avons pu déterminer l'évolution des résistances des différents mélanges en fonction des températures de cures et à des âges 7j ; 28J et 56J, on a conclu ce qui suit :

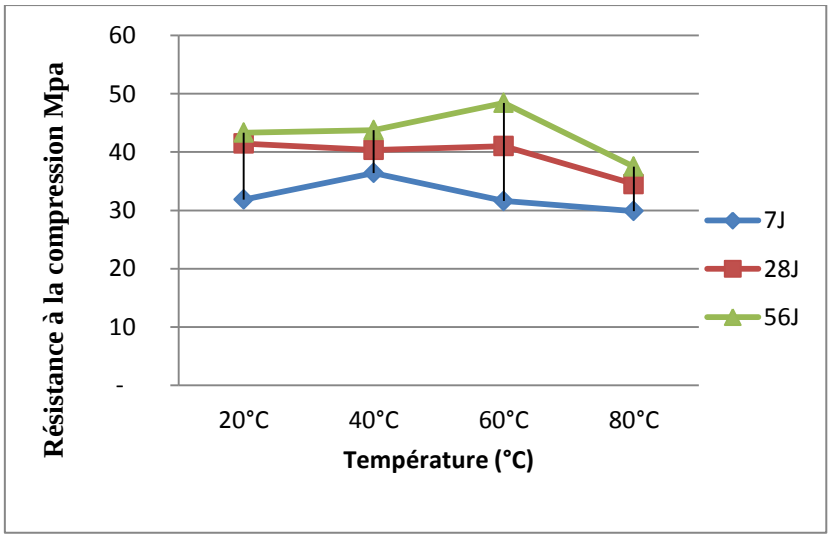


Figure III.2. Résistance à la compression pour MT.

Pour MT : à l'âge de 7J le mortier témoin développe des résistances comparables à 20°C et 60°C et qui chute à 80°C ; la valeur la plus élevée à été prélevée à 40°C avec un taux de 14,27% supérieur à la valeur enregistrée à cure standard. A 28J MT enregistre des résistances très proche pour les cures de 20°C ,40°C et 60°C et diminue à 80°C de 16,80% par rapport à 20°C. A long terme on a remarqué une élévation de la résistance en fonction de la température jusqu'à 60°C avec une augmentation du taux de 11,74%.

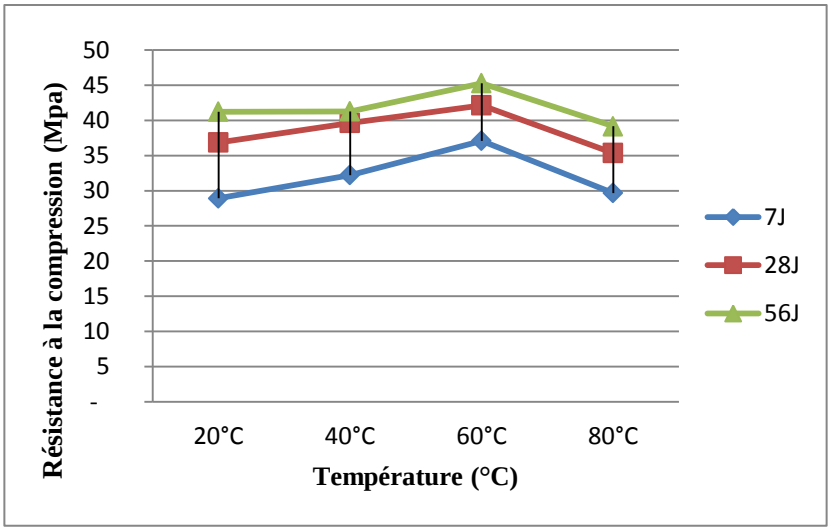


Figure III.3.Résistance à la compression pour ML.

Pour le ML les résistances à tous les âges augmentent avec l'augmentation de la température jusqu'à 60°C ou il à été prélevé la valeur maximale pour un taux supérieure à 20°C de 9,77% ; A 80°C les résistances diminue à tous les âges selon la figure III.3.

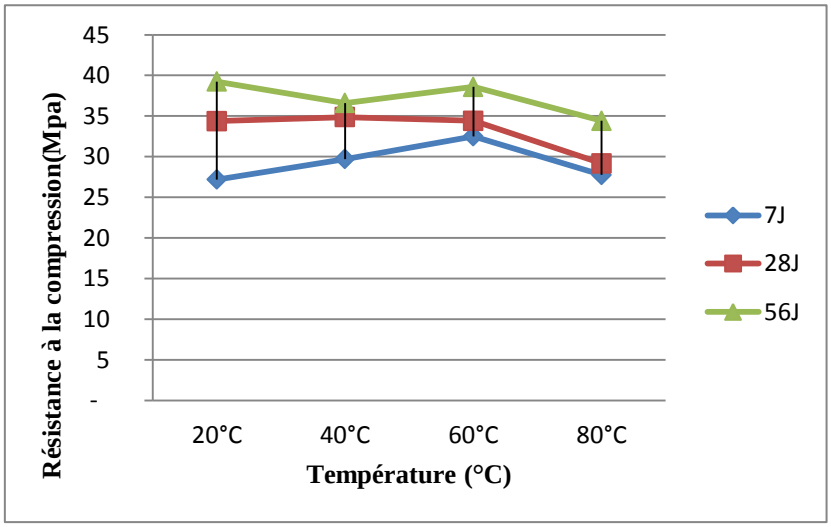


Figure III.4. Résistance à la compression pour MPZ.

A 7 jours le MPZ développe des résistances à la compression croissantes avec les températures 20°C ,40C et 60°C ; à 28 jours elles sont égales jusqu'a 60°C ; et à 56 jours la résistance à 20°C et 60°C sont proche et supérieure à la résistance à 40°C et 80°C qui sont également proche. Comme toutes les additions le mortier à la pouzzolane présente une chute de résistance à 80°C à travers tous les âges.

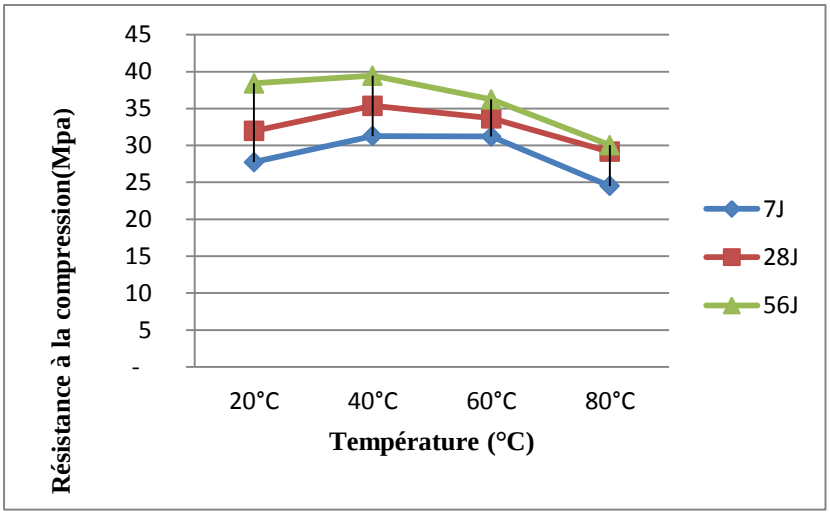


Figure .III .5. Résistance à la compression pour MCL.

Contrairement aux autres additions le calcaire développe les meilleures résistances à 40°C inferieure à celle enregistrées pour MT d'un taux de 14,01%, 12,34% et 9,89% respectivement à 7J ; 28J et 56J au-delà de cette température le MCL présente une chute de résistance à tous les âges ; figure III.5.

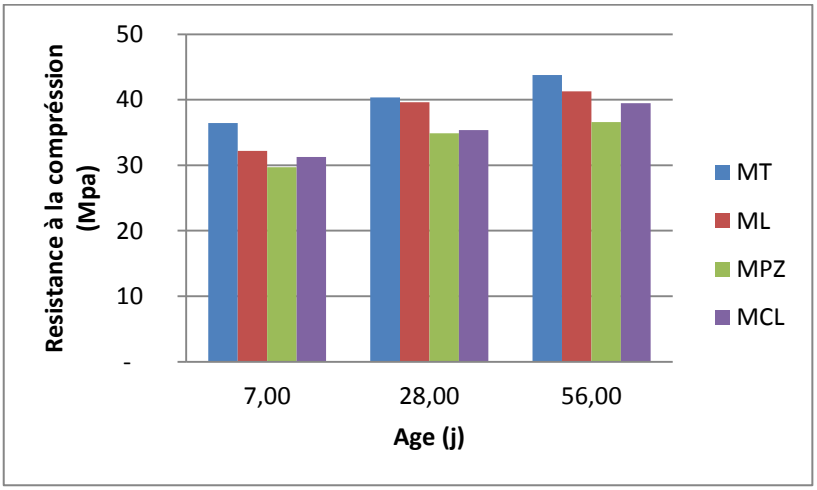


Figure III.6. Résistance à la compression à 40°C.

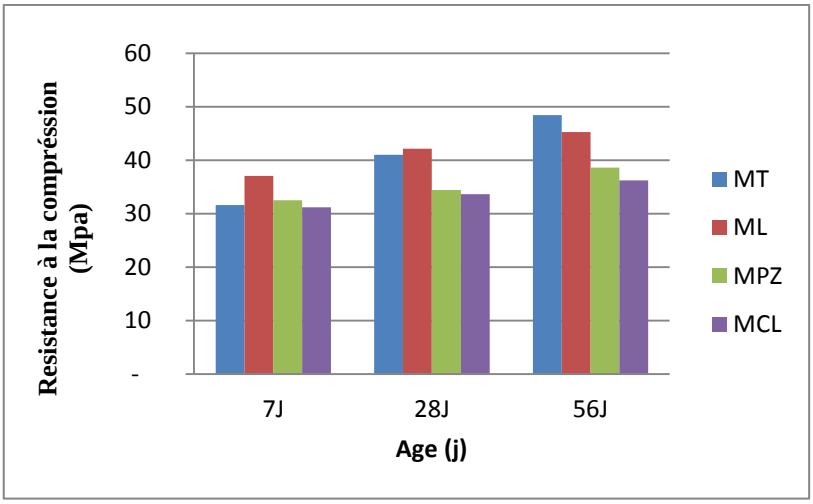


Figure III.7. Résistance à la compression à 60°C.

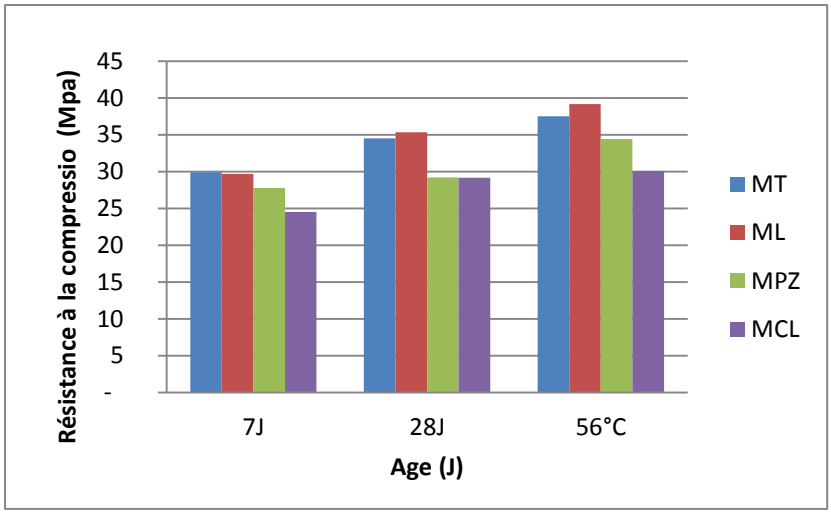


Figure III.8. Résistance à la compression à 80°C.

L'effet de la température de cure est plus visible pour laitier ML que pour MCL et MPZ car il enregistre les taux des résistances à la compression les plus proches par rapport au MT, notamment pour les températures à 40°C ou on a relevé à 28J et 56J respectivement une diminution de 1,83% et 5,76%, à 80°C ou le taux à 7j est inférieur de 0,67%, à 28j il développe des résistances supérieures au MT de 2 ,43%. Ainsi à long terme ou elle atteint 4,37% supérieure au MT, l'effet de la température est plus prononcé à 60°C pour le mortier au laitier car il développe des résistances supérieures au mortier témoin à jeune âge avec un taux supérieurs de 17,3 % à 7 j et de 2,71% à 28 jours. KELLOUCH.Y **[33]** a trouvé que la température de cure de 40°C est la température la plus favorable pour l'hydratation des ciments au laitier, D'autres recherches menées par ESCALANTE.G et al **[42]** sur les ciments composé au laitier ont conclus que 30°C est la température optimale pour le développement de la résistance.

Les résistances à la compression du mortier au calcaire durcissant sous l'eau à une température à 40°C progressent avec l'âge où on a enregistré des taux par rapport au MT inferieurs de 14,1% à 7J ; 12,34% à 28J et 9,89% à 56J, Contrairement à la température de 60°C qui à fait développer une résistance comparable au MT a jeune âge et qui s'est peu développée à long terme où le taux s'est écarté à 25,17%. Les valeurs des résistances les plus faibles prélevés sont à 80°C .

La pouzzolane naturelle de Beni Saf considérée comme active développe des résistances comparables au calcaire qui demeure inerte surtout pour des températures de 40°C et 60°C. Les résultats montrent que la pouzzolane est moins sensible à la température à 28 j ou on a enregistré la même valeur de résistance et qui reste inférieur à MT avec le taux le plus faible

de 13,63%. Néanmoins il développe des résistances supérieures au MT à 60°C pour un taux de 2,85%. A long terme l'effet de la température 60°C est comparative à 20°C et reste inférieure de 20,30% par rapport au MT ce qui vient en contradiction avec l'étude **[12]** qui a conclu que l'incorporation de la pouzzolane dans le ciment diminue l'effet néfaste de l'élévation de la température et s'explique par les résistances à long terme qui dépasse celle des ciments sans ajouts.

III.5. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment -additions. L'analyse des résultats est faite de la même façon que la résistance à la compression, les résultats sont présentés dans le tableau III.4:

Tableau III.4. Résultats de résistance à la traction par flexion en fonction des températures de cures des différents types de mortiers.

Température (°C)	Age (J)	MT	ML	MPZ	MCL
20°C	7	4,03	3,94	3,67	3,24
	28	7,00	5,99	5,38	5,95
	56	8,07	7,90	6,83	7,42
40°C	7	5,23	4,32	3,33	3,70
	28	7,18	6,46	6,13	3,91
	56	7,62	6,73	7,09	5,97
60°C	7	4,44	5,42	4,93	3,89
	28	6,96	7,80	5,27	4,48
	56	7,95	8,06	6,79	5,93
80°C	7	4,04	3,90	3,36	3,62
	28	5,28	6,04	5,05	4,90
	56	5,69	6,65	6,21	5,57

III.5.1. Effet des additions

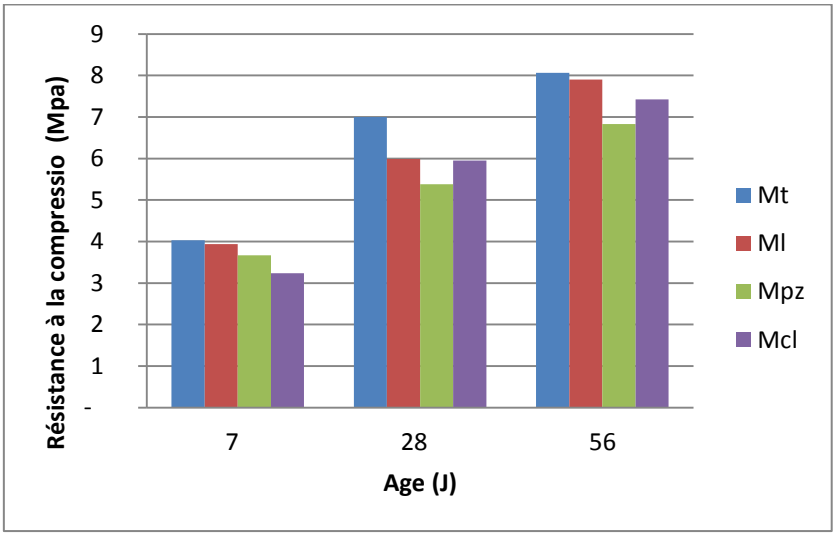


Figure III.9. Résistance à la traction par flexion à 20°C.

A partir des résultats présentés dans la figure III.9. on constate qu'à 7jours ML développe des résistances comparables au MT, alors que MPZ enregistre une résistance à la traction inferieure d'environ 9% tandis que MCL donne des résistances inferieure au MT de 19 ,7% ; à 28 jours le MPZ et ML reculent devant MT à des taux respectivement de 14,51% et 23,15% alors que le calcaire améliore sa résistance en dépassant M PZ et donne une valeur équivalente au ML avec un taux de 14 % inférieur au MT.

A long terme tous les mélanges présentent une augmentation de la résistance qui reste inférieur à MT ; le ML présente une résistance proche du MT pour un taux 2,05%, suivi du MCL avec un taux de 7,95% et le MPZ dont les taux est de l'ordre de 15,28%.

KERBOUCH [33] avait trouvé au jeune âge (2 à 7 jours), les résistances à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane sont faibles comparativement à celle du mortier témoin et deviennent comparables à long terme (28 et 90 jours) pour un taux de 30% Les mortiers contenant 10% de fines calcaire développent des résistances comparables à celle du mortier témoin au très jeune âge (2 jours) par contre elles diminuent de 11% à l'âge de 7 jours et de 7% à l'âge de 28 jours .

III.5.2. Effet de la température de cures

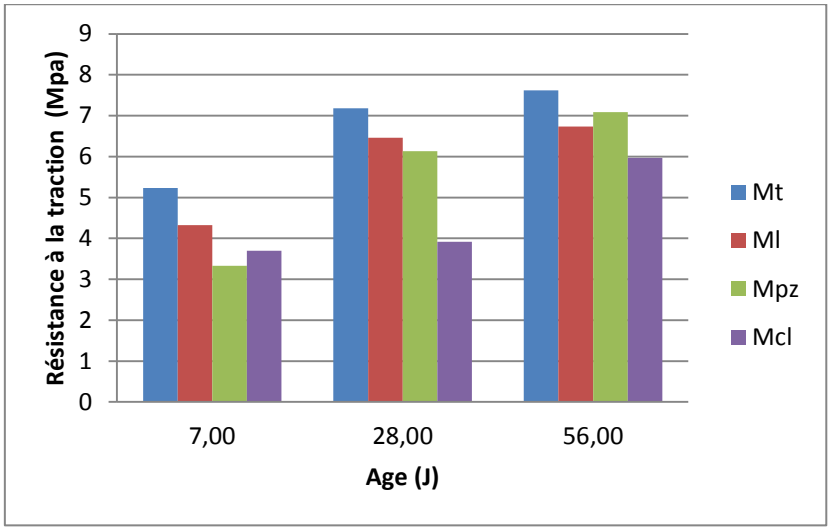


Figure III.10. Résistance à la traction à 40°C

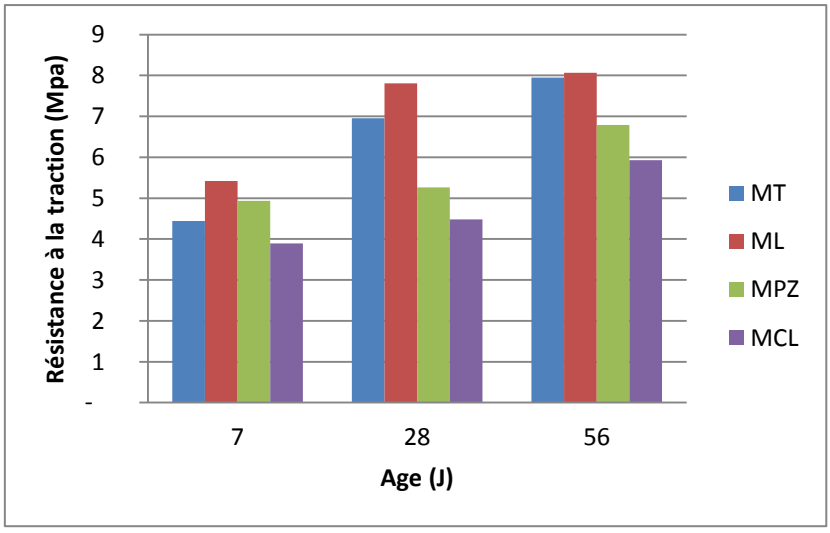


Figure III.11. Résistance à la traction à 60°C.

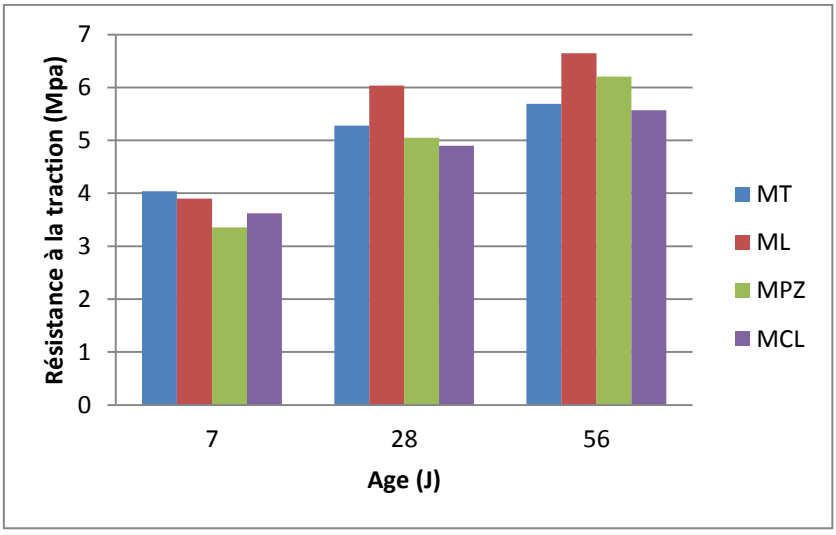


Figure III.12. Résistance à la traction à 80°C.

A travers les figure (III-10-11-12.) ci-dessus on remarque qu'à 7j la résistance à la traction du ML est inférieure au MT à 40°C de 17,37% mais reste comparable a MT à 20°C , à 28jours. Sa résistance à la traction augmente et dépasse MT à 60°C d'un taux de 12,16% (valeurs maximum) et de 14 , 33% à 80°C , à 56 jours ces résistance se stabilisent et atteignent des taux inférieurs à MT pour 40°C de 11,62% et supérieur de 1,42 % à 60°C (valeur max) et 16 ,80 % à 80°C et reste inférieure à MT à 20°C.

Pour le MPZ les résistances à 7j sont comparable pour toutes les températures avec une légère supériorité pour la température de 60°C, ce qui améliore la résistance pour un taux dépassant 11%. Ces valeurs se stabilisent à 28 jours avec un taux maximum enregistré à 40°C (Inférieur à MT de 14,61%), à long terme ces résistances continuent a se stabiliser mais dépassent MT à 80°C de 9,10%. La meilleurs résistance prélevée est à 60°C.

Pour le calcaire MCL sa résistance se développe très peu à 40°C à 7J et 28J pour atteindre un taux de moins 21,66% à 56 jours par rapport au MT. Cette valeur reste proche à celle enregistré à 60°C et 80°C. La plus grande valeur de résistance reste celle enregistrée à 60°C.

III.6. ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLAIRE

La masse d'eau absorbée par unité de surface a été tracée en fonction de la racine carrée du temps, Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différents mélanges réalisés sont représentés dans les courbes ci-après :

III.6.1. Effet des additions

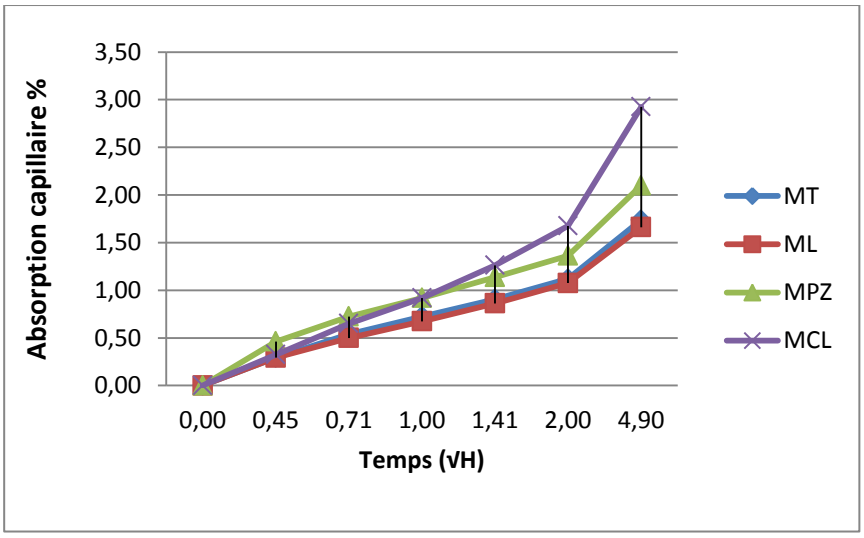


Figure III.13. Absorption capillaire à 20°C.

A la lecture de la courbe ci-dessus ; figure III.13. On remarque que le taux d'absorption d'eau par capillarité est le même pour tous les mélanges dans la première demi- heure. Ce résultat à été confirmé par BUIL et al **[72]** notamment pour les fillers calcaire , A partir de la deuxième heure on remarque une augmentation par rapport au MT pour MPZ et MCL ; ce dernier présente le taux le plus élevé enregistré après 24 heures. Pour ML le taux d'absorbions est identique à celui du MT ce qui signifie que le ML n'a aucun effet sur l'absorption et son incorporation n'entraine pas une porosité supérieur par rapport au MT.

III.6.2. Effet des températures de cure

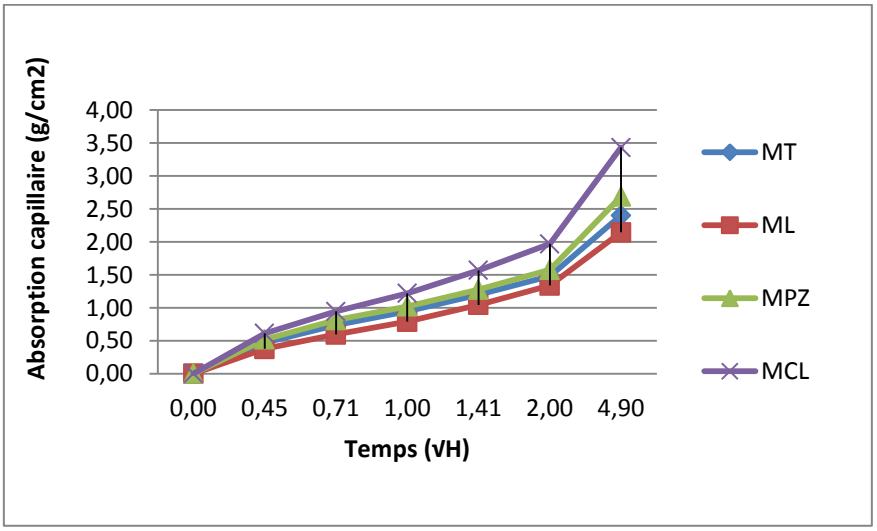


Figure III.14. Absorption capillaire à 40°C.

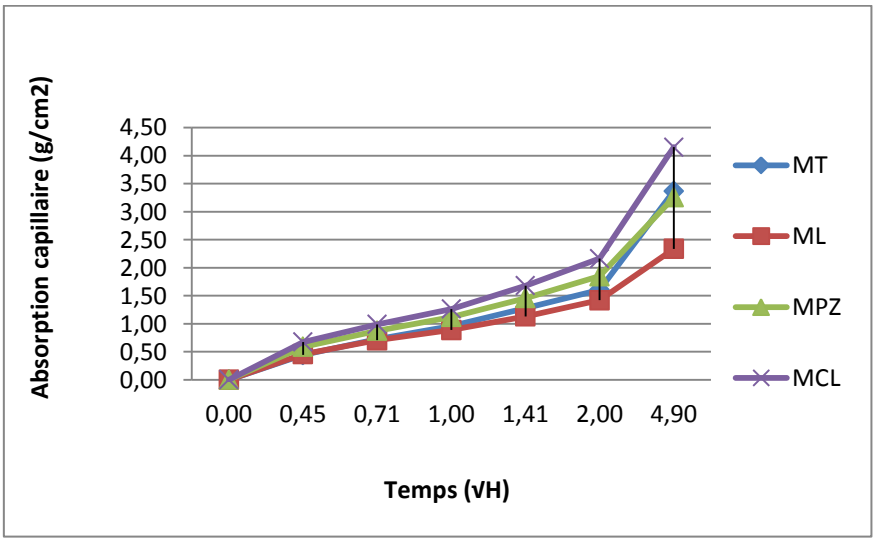


Figure III.15. Absorption capillaire à 60°C.

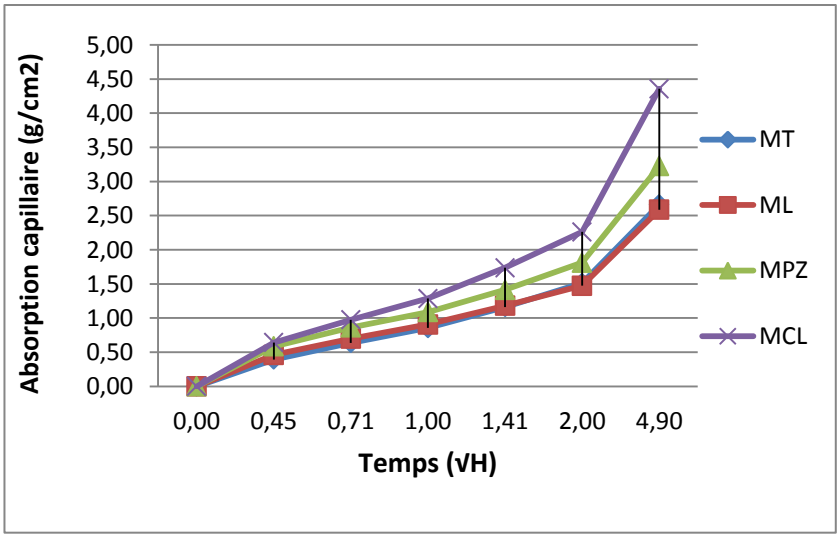


Figure III .16. Absorption capillaire à 80°C.

A travers les figures III.(14.15.16) on peut apercevoir l'effet de la température sur tous les mortiers où on a enregistré une augmentation des taux d'absorptions de tous les mélanges en fonction de l'élévation de la température de cure, le MCL reste le mélange qui absorbe le plus suivie par le MPZ , le MT et ML qui à le taux le plus faible sauf à 80°C ou il a le mémé taux d'absorption capillaire que le MT,

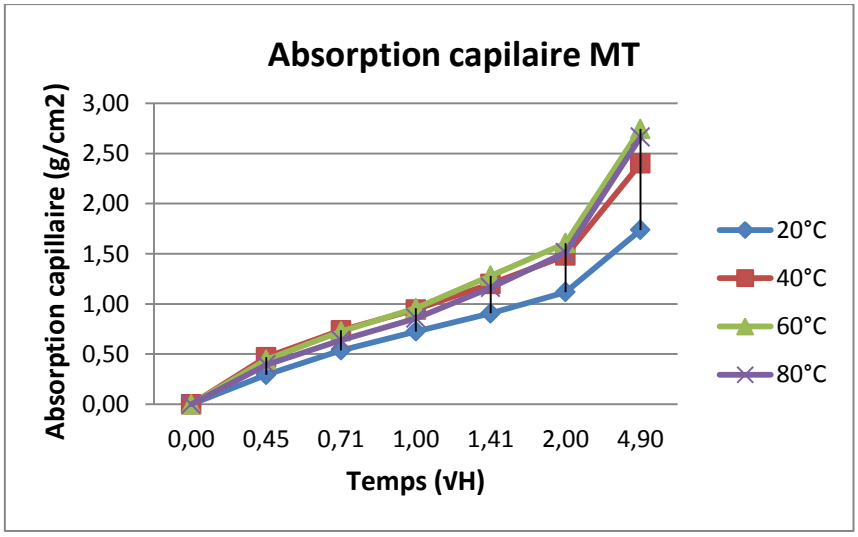


Figure III.17.Absorption capillaire pour MT.

L'absorption capillaire pour le mortier témoin MT augmente avec l'augmentation de la température et cela à partir de la première heure où on a enregistré une diminution à 20°C par rapport à 60°C et 80°C qui ont enregistrés la plus grande augmentation du coefficient d'absorption d'eau et qui s'avère identique pour les hautes températures.

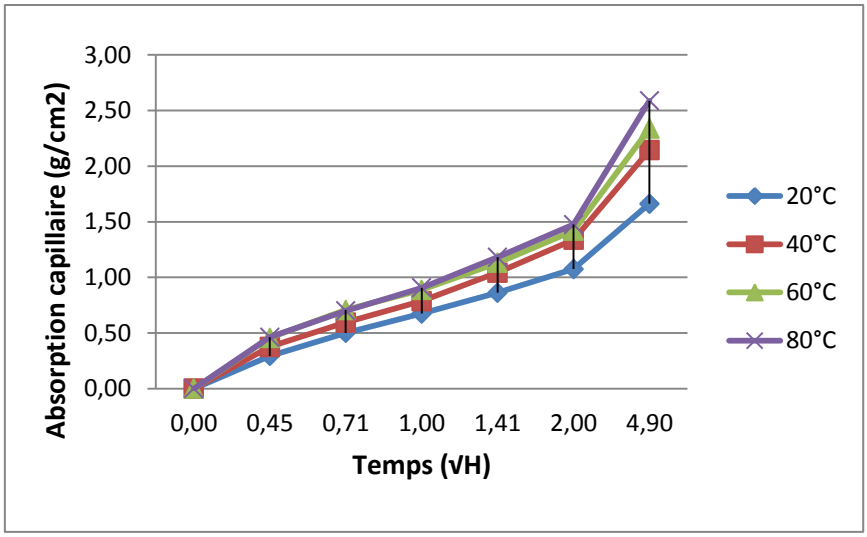


Figure III.18. Absorption capillaire pour ML.

Pour le mortier à base 15% de laitier on constate à travers la figure III.18. que les mélanges des différentes cures ont absorbés les taux les moins élevés par rapport aux autres mélanges, mais qui dépasse MT à 20°C, plus la température augmente plus la quantité d'eau absorbé est importante.

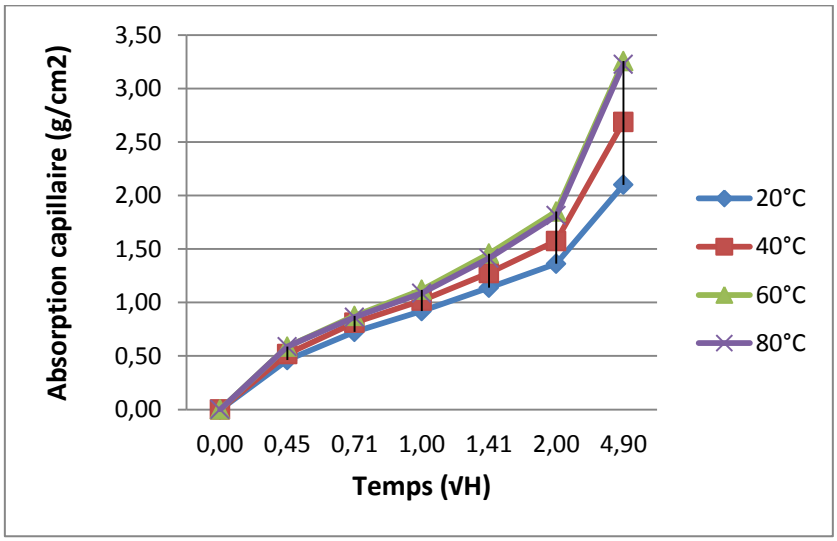


Figure III.19.Absorption capillaire pour MPZ.

La figure III.19.montre que le MPZ est sensible à la haute température de cure cela est visible à partir de la 2eme heure ou le taux d'absorption augmente pour les cure de 80°C et 60°C ses valeurs sont supérieurs à ceux trouvés à 20°C et au MT.

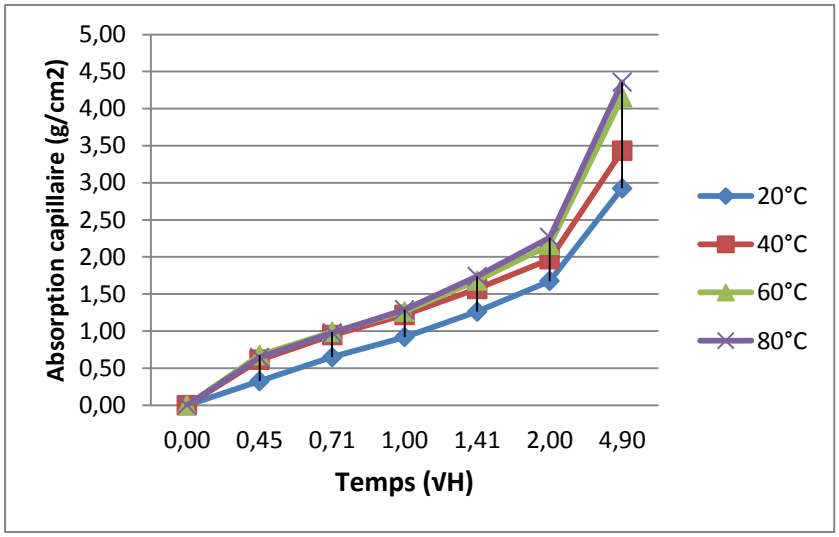


Figure III.20. Absorption capillaire pour MCL.

Pour le calcaire MCL le coefficient d'absorption augmente avec les mêmes taux pour les mélanges à 40°C ,60°C et 80°C jusqu'à la deuxième heure d'immersion après ce temps les valeurs augmentent en fonction de la température où la valeur maximale est enregistrée pour le MCL à 80°C et elle est supérieure à toutes les valeurs prélevées pour tous les mélanges et cures. La cure à 20°C présente le taux le plus faible pour MCL qui reste nettement supérieur au MT.

III.7. RETRAIT ET GONFLEMENT

Le retrait du mortier peut être défini comme étant la déformation d'un élément du matériau libre de toutes sollicitations mécaniques extérieures dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée.

Il s'agit dans cette partie d'évaluer le retrait et le gonflement que provoque la température de cure sur des éprouvettes de mortier normalisé et à base d'addition. On compare, à différents temps, la variation de longueur et de la masse d'une éprouvette de dimensions (4×4×16) cm3par rapport un temps (t0) pris pour origine.

III.7.1. La variation massique

La mesure de perte en poids a été menée durant toute la période de mesure de retrait ; La figure III.21 .Illustre le pourcentage de masse perdue en fonction du temps pour les différentes compositions des mortiers utilisés.

III.7.1.1. Effet des additions

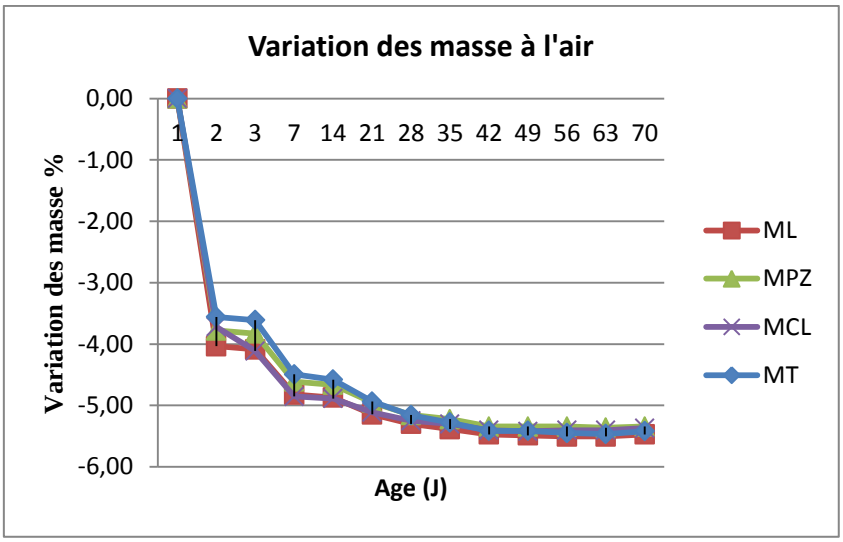


Figure III.21.Variation de masse à l'air.

Pour les différents mortiers conservés à l'air, on constate une perte de masse importante à compter du premier jour jusqu'à 28 jours, après cette période, la perte devient moins importante et a tendance à se stabiliser. La figure III.21.Montre que les pertes en poids après 28J varient indépendamment de la nature de l'addition utilisé puisque elles évoluent avec les mêmes taux à l'exception d'une légère variation par rapport au MT des ML,MPZ et MCL entre la période entre 2J et 28J ; ceci démontre que le taux de remplacement de 15% par les additions (calcaire, pouzzolane et laitier) n'a aucun effet sur la perte de masse à l'air.

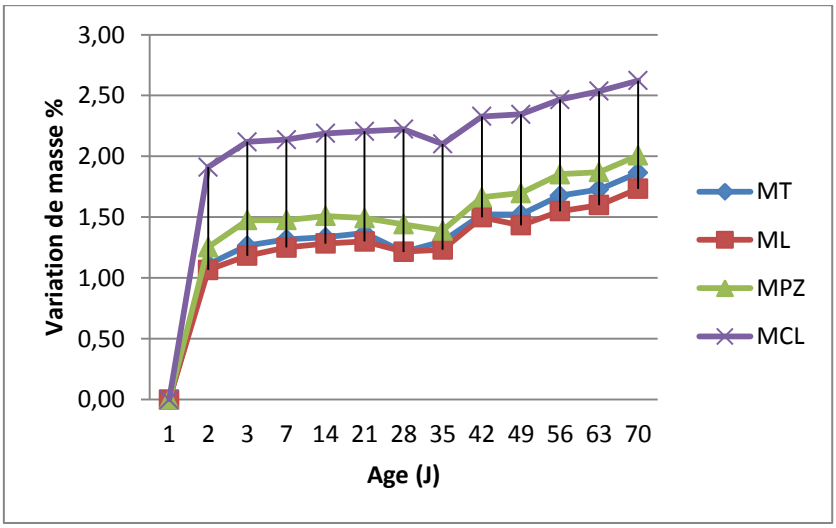


Figure III.22. Variation de masse à 20°C.

Contrairement aux éprouvettes conservées à l'air ; celles conservés à une température de cure standards à 20°C présente un gain de masse, Les résultats présentés sur la figure III.22.Montre que le ML se caractérise par une augmentation en poids proche au MT et MPZ légèrement supérieure au MT, alors que le calcaire MCL engendre une plus forte augmentation de masse produite à partir du 1er jour, ce résultat peut être justifié par l'augmentation de la porosité due à l'introduction du calcaire .

III.7.1.2. Effet des températures de cure

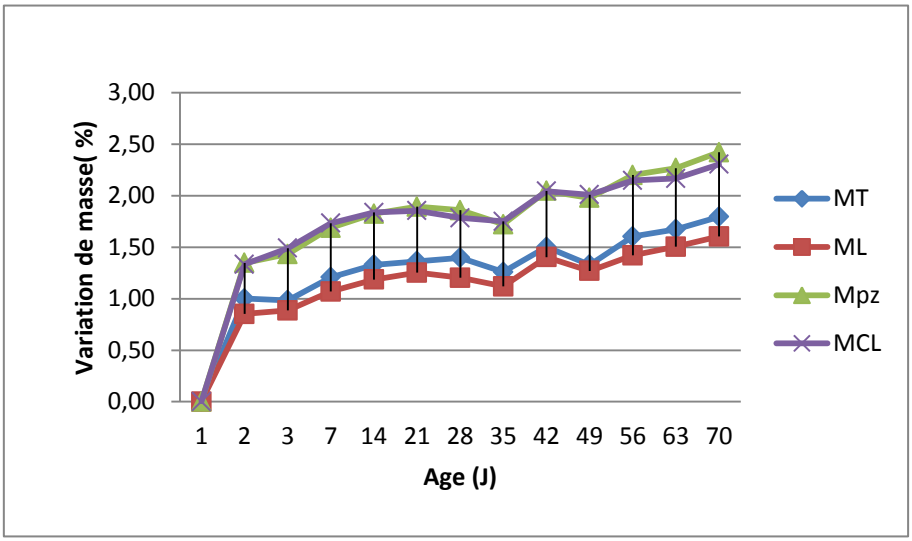


Figure .III.23. Variation de masse à 40°C.

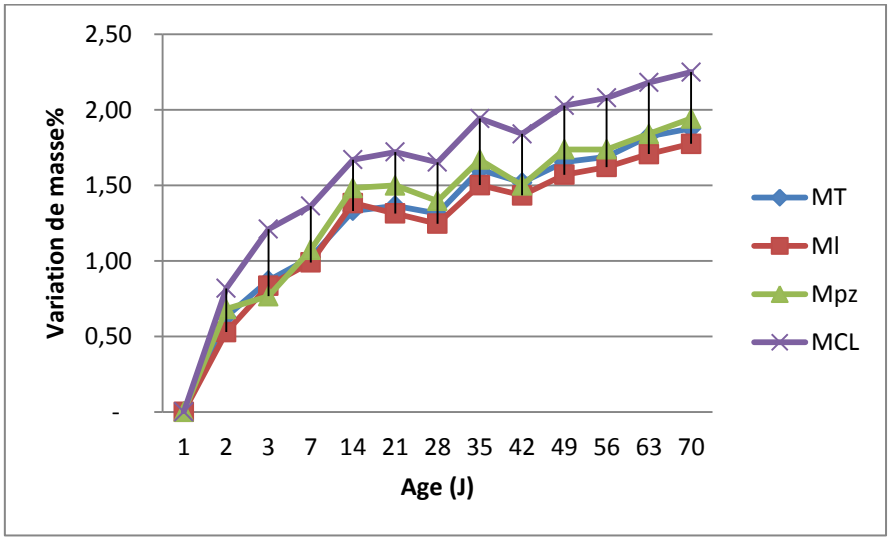


Figure .III.24. Variation de masse à 60°C.

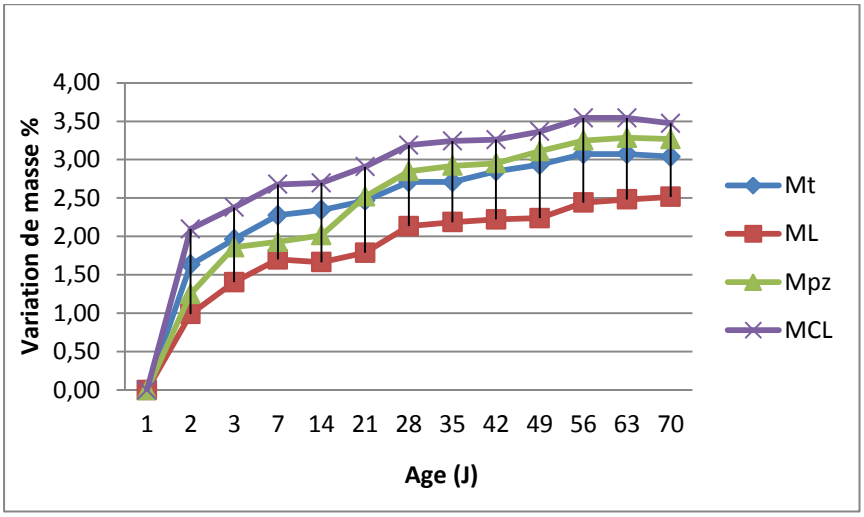


Figure .III.25. Variation de masse à 80°C.

L'analyse des résultats illustrés sur les figures (III-23-24-25) ci-dessus nous permet de tirer les remarques suivantes :

Le mortier sans additions MT a subi des variations de masse peu importantes à 40°C et 60°C par rapport à la cure standard de 20°C, contrairement à 80°C ou il a subi une expansion de masse d'un taux qui atteint 62,74%.

L'effet des températures 40°C et 60°C engendre pour le mortier à base de laitier ML un gain de masse qui est proche au MT par contre la température de cure de 80°C fait augmenter sensiblement la masse qui peut atteindre 2,52% à 56J, où MT a enregistré un taux de 3,4%.

Pour le MPZ on remarque que la masse a subi la plus grande augmentation à 80°C en dépassant MT à 28J avec un taux supérieur de 7,48% à 70j, à 60°C elle est similaire, et dépasse MT de 33,34% à 40°C.

Quant au MCL on remarque à travers les courbes que les masses ont subis une augmentent proportionnelle aux variations de température avec un taux maximum prélevé pour cet essai supérieur au MT de 15,22% à 80°C.

III.7.2. Variation dimensionnelle

III.7.2.1. Retrait à l'air

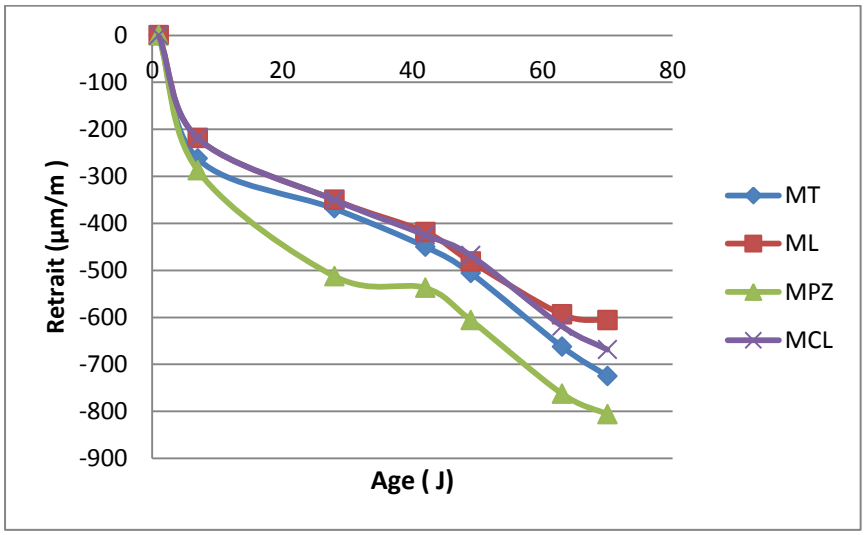


Figure III.26. Retrait à l'air de différentes éprouvettes.

Au jeune âge le retrait est presque indépendant de la composition du mortier, l'effet des ajouts minéraux ne se manifeste qu'après la première semaine avec une légère supériorité pour le mortier témoin MT **[52]** et la pouzzolane MPZ, A long terme, la présence des ajouts minéraux diminue ou augmente le retrait final en fonction de la qualité de ces ajouts.

L'évaporation de l'eau des éprouvettes conservées à l'air non saturé provoque un retrait important pour le mortier à base de pouzzolane naturelle MPZ par rapport au MT dès la première semaine et atteint 11,20% du MT dans ce sens EZZIANE .K **[12]** avait remarqué cette différence à partir du dixième jour pour un échantillon à 10% de pouzzolane qui déclenche un retrait très important et dépasse celui du mortier témoin.

Le retrait du laitier est peu inférieur au MT jusqu'à 63 jours ou l'écart se creuse pour atteindre un taux de 19,58% à 70 jours**, [57]** MICAH H.W avait conclu que le laitier fait diminuer le retrait à 90J , ITIM et al **[52]** avait trouvé que le laitier d'El-Hadjar fait diminuer le retrait après une année d'observation ou il atteint 1250 µm/m pour le mortier au ciment ordinaire contenant 10% de laitier.

Quant au MCL son retrait enregistre une légère différence par rapport au MT et il diminue le retrait de 10%, BOUALI et al **[22]** a démontrer qu'un mortier contenant 15% de

calcaire possède un retrait de 7% inférieur à celui d'un mortier sans calcaire des résultats confirmé aussi par BOUDRA et al **[73].**

III.7.2.2. Gonflement

III.7.2.2.1. Effet des additions

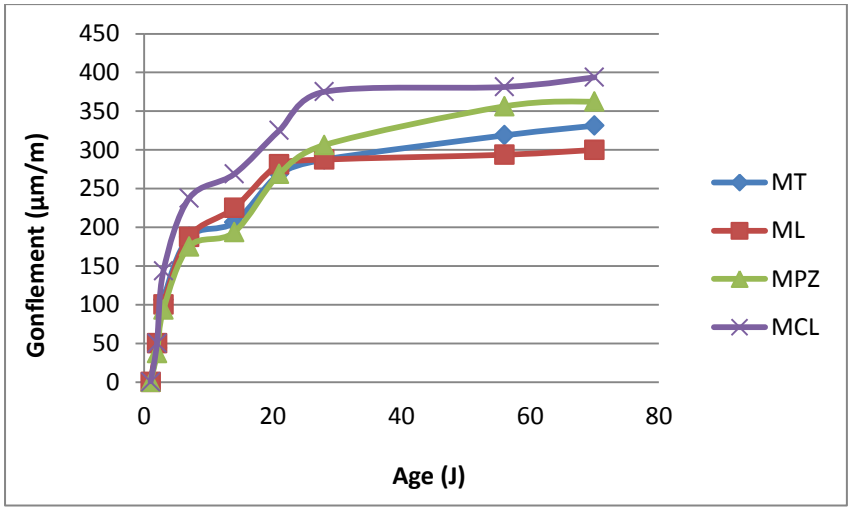


Figure III-27. Gonflement des différentes éprouvettes à 20°C.

La Figure III-27. Montre les variations dimensionnelles des éprouvettes des différents mélanges en fonction de l'âge, à la température de cure humide de 20°C. A travers ces courbes nous constatons que l'effet des additions et négligeable jusqu'a l'âge de 7jours, au delà de cette période nous remarquons que le calcaire est celui qui présente la variation dimensionnelle la plus élevée (15,87% sup MT). L'effet du MPZ et ML se manifeste à partir de 20éme jours de conservation ou le MPZ provoque un gonflement supérieur au MT de 8,62% et ML participe à la réduction de 10,42% par rapport au MT.

III.7.2.2.2. Effet de la température de cure

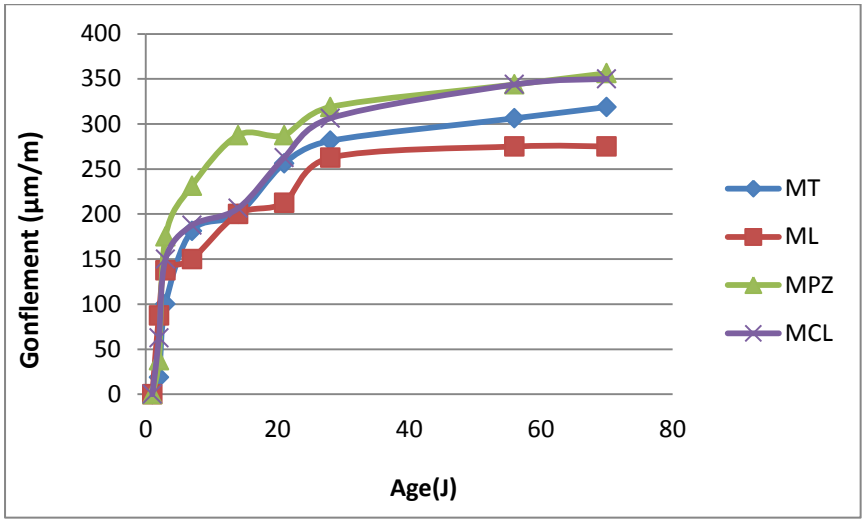


Figure III.28.Gonflement des différentes éprouvettes à 40°C

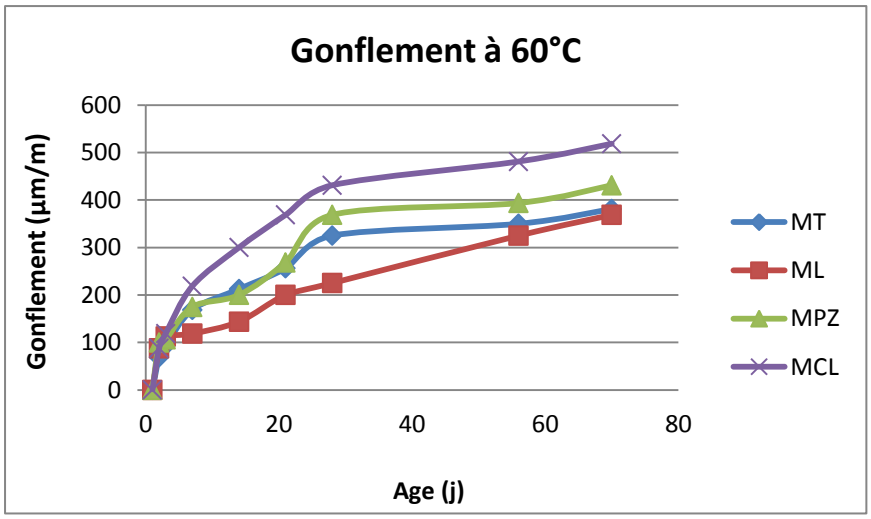


Figure III.29. Gonflement des différentes éprouvettes à 60°C.

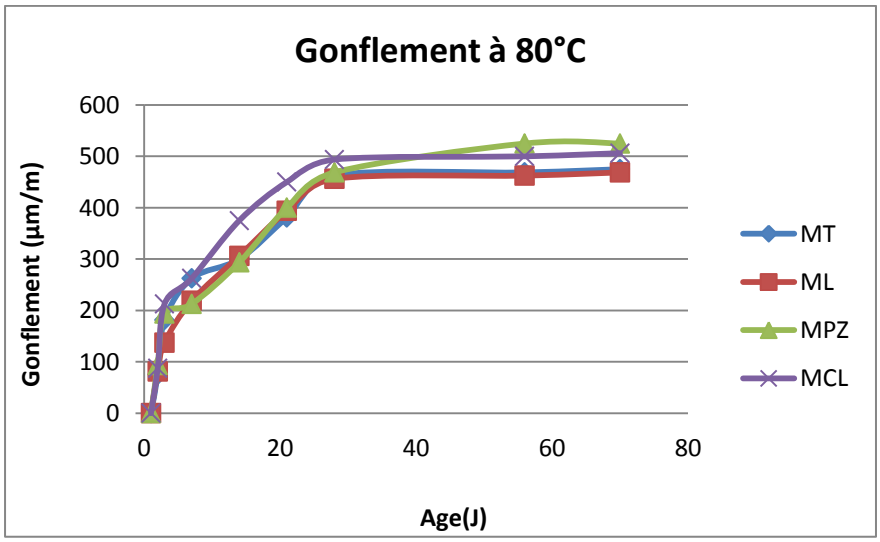


Figure III.30.Gonflement des différentes éprouvettes à 80°C.

Les résultats prélevés lors de la mesure des variations de longueurs à des températures variables de 40°C ,60°C et 80°C sont présentés dans les figures III.(28.29.30). L'analyse de ces résultat nous permet de déduire que tous les mélanges ont eu un gonflement supplémentaire engendré par l'élévation de la température. Ceci est visible pour les cures de 60°C et 80°C, la cures de 40°C n'a pas provoqué de variation dimensionnelle significatives par rapport à 20°C; quant aux additions, on note que le ML réduit le gonflement à 40°C et 60°C où il présente une variation moins importante que celle du MT et qui s'aligne à 80°C , le MPZ et le MCL subissent des variations comparables à 40°C et se rapprochent à 80°C ou MPZ atteint la déformation la plus importante qui est supérieure au MT d'environ 35% .

III.8. CONCLUSION

A l'issu de ces essais on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ On a constaté que tous les mortiers sont très sensible à une élévation de température et que leurs résistances augmentent avec l'augmentation de la température à l'exception de 80°C où on a enregistré une diminution quel que soit l'addition par rapport à une cure standard de 20°C.

- ✓ Les hautes températures de cures ont un effet néfaste sur la microstructure des Mélanges. Ceci est dû à l'augmentation de la porosité et se traduit par les résultats obtenues sur les taux d'absorptions et les variations massives et dimensionnelles enregistrés.

- ✓ Le laitier a enregistré les taux les plus faibles d'absorption capillaire, son incorporation a fait diminuer le retrait et les gonflements au-dessous du mortier témoin. Ceci nous mène à conclure que le laitier réduit l'effet néfaste et supporte le mieux les hautes températures jusqu'à 60°C où on a prélevé la meilleurs résistance.

- ✓ Contrairement au laitier, le calcaire a enregistré les taux d'absorptions et variations dimensionnelles (gonflement et retrait) les plus élevés et par conséquent les plus faibles résistances de tous les mélange, on peut conclure que le calcaire est très passif sous les hautes températures où on a remarqué une chute de résistance au-delà de 40°C (valeurs maximum prélevées).

- ✓ Pour la pouzzolane et comme tous les mélanges, l'effet de la température de cure fait augmenter le taux d'absorption capillaires, son taux augmente avec l'augmentation de la température à des valeurs proche du MT à 40°C et 60°C et est supérieurs à 80°C. Par ailleurs on remarque une nette amélioration des résistances à des températures élevées (60 °C) et qui reste inférieure à celle enregistrée par le laitier.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générales

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et devant les exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités d'utilisation et de valorisation des sous-produits industriels.

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, ont été menés mais aucune règle générale n'a pu être arrêtés à ce jours.

L'objectif de ce travail a été de déterminer l'effet du changement de température sur les performances des mortiers à base d'additions minérales à l'état durci. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Les résistances mécaniques des mortiers durcissant sous l'eau à une température standard de 20°C progressent avec l'âge en fonction de la nature de l'addition minérale utilisée. Généralement, il est constaté une baisse des résistances au jeune âge où les additions demeurent inertes qui se développent à moyen et à long terme.

- ✓ Les hautes températures de cures ont un effet néfaste sur les mélanges et par conséquent les résistances ultimes; ces résultats sont prouvés par les recherches actuelles. **[47]** confirment que l'élévation de la température a un effet négatif sur la microstructure du ciment durci par l'augmentation de sa porosité, la diminution de ses résistances ultimes et la détérioration de sa durabilité. L'amélioration des résistances au jeune âge est due à une formation accélérée des CSH et à une dissolution rapide des cristaux. A long terme, les hydrates formés n'ont pas eu le temps de s'arranger convenablement ce qui engendre une chute des résistances finales.
- ✓ En comparant les valeurs des résistances ultimes obtenues nous avons pu déduire les températures de cures optimales de chaque ajout ; telle qu'on a trouvé:

- Le calcaire et le laitier diminuent le risque du retrait, la substitution de 15% de ciment par ces additions peut être le mélange le plus adapté pour les mortiers de crépissages.
- Le laitier supporte le mieux l'augmentation des températures jusqu'à 60° et convient le plus pour les éléments préfabriqués qui subissent des traitements thermiques à haute température.
- Etant donnés que tous les mélanges développent des résistances acceptables à la température de 40°C, l'utilisations dans un climat chaux et au sud du pays est envisageable pour réduire les effets négatifs dû aux chutes de résistances ultimes.

Perspectives et recommandations

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette étude pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du traitement thermiques des mortiers à base d'additions minérales. Pour cela on recommande d'approfondir notre recherche par les points suivant :

- ✓ Etude des effets des températures élevées sur d'autres propriétés des mortiers telles que les propriétés de transport (perméabilité à l'oxygène et à l'eau, migration des ions chlores, etc.) et la durabilité (carbonatation, gel dégel lixiviation, etc.) ;
- ✓ Etude détaillé de la microstructure des différents mélanges (MEB et DRX) ;
- ✓ L'application du traitement thermique dans les premières heures d'hydratation des mélanges ;
- ✓ Etude de l'effet de température sur des mélanges à des taux plus élevés de substituions de ciment par des additions ;
- ✓ Etude de l'effet de température sur des mortiers ternaires et quaternaire (combinaison des ajouts).

Références

Bibliographique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] NA 234, 1989, Méthodes d'essais des ciments détermination des résistances mécaniques

[2] NF P 15-301, 1994, Liants hydrauliques. Ciments courants: Composition, spécifications et critères de conformité, AFNOR.

[3] Dreux G., Festa J., 1998, Nouveau guide du béton et de ses constituants,8ème édition, Eyrolles.

[4] SGPIC, Société de gestion et de participations, industrie de ciment.

[5] Infociments, Préserver les ressources naturelles : La valorisation des déchets en cimenterie, Collection comprendre N°3, www.infociments.fr .

[6] CHEIKH Z., M., 2008, Contribution à l'étude de cinétique d'hydratation a jeune âge de béton a haute résistance, Université de Constantine.

[7] Bessa B. A., 2004, Etude de la contribution des additions minérales auxpropriétés physiques et mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse doctorat, Université de Cergy pantoise, France.

[8] Boudchicha A.,Cheikh-zouaoui M., Mezghiche B., Gallias J., 2006, Evaluation of the physicaland chemical action of fine and ultra-fine additions on mortars, 7th ICCE, Iran, pp. 8-10.

[9] BOUDCHICHA A., 2007, Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, Thèse de Doctorat Université de Constantine, Algérie.

[10] Derbala R., BenmalekM. L., 2014, Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term, construction and Building Materials J., Vol. 66, pp. 787-794.

[11] Boudchicha.A,Cheikh Z.M, GalliasL., Mezghiche B.2007, Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars. Application of the predictive model of ferret, Journal of Civil Engineering and Management.

[12] EZZIANE K., 2006, Etude des modifications physico-mécaniques apportées par les ajouts minéraux aux bétons, Thèse doctorat, Université d'Oran, Algérie.

[13] VanyoS., Petar.A.,Vili L.,Vasileva, 1996, Effect of the pozzolit active mineral admixture on the proprieties of ciment mortars and concretes : Physical and mechanical Properties, Université de Bulgaria.

[14] BENKADDOUR M., Kazi A., SEMCHAA., Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturel et pouzzolane artificielle, ENSET Oran.

[15] SIADH., KAMALIS., BERNARD M., ESCADEILLAS G., MOULIM. , KHELAFIC.H. 2013, Characterization of the degradation of self-Compacting concretes in sodium sulfate Environment : Influence of different mineral admixtures, Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1189-1200.

[16] MOKHTARIA., 2006, Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des Bétons Renforcés deFibres Végétales de Palmier dattier, Thèse magistère, Université de Ourgla. Algérie.

[17] KAZI A., B., SEMCHA A., KERDALD.,Influence des additions minérales sur la résistance mécanique des mortiers, Université d'Oran, Algérie.

[18] KRACHAÏ M, BOUABDALLAHA,ABDELHADI H., HAMOUK.,Influence de la pouzzolane de beni –saf sur les performances mécaniques des bétons autoplacant.

[19] DIEDERICH P,2010,Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton,Thèse doctorat ,Toulouse.

[20] HALLAL.A, KADRI.H, EZZIANE. K, A. KADRI.H, KHELAFI.C, 2010,Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste ,Construction and Building Materials .

[21] AMOURI Chahinez ,2009, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performance, durabilité, Université de Constantine.

[22] BOUALI. R. 1993 ,Contribution à l'étude d'un ciment Portland artificiel et d'un béton avec ajout calcaire, Mémoire de fin d'étude, INFSB, Alger.

[23] BOUIKNI Amar ,2010, Comportement du béton a base du laitier d'el hadjar sous différentes cures , thèse doctorat ENP.

[24] BURTEAUX. M 1976, Laitiers de haut fourneau ,Technique de l'ingénieur.

[25] VENUAT.M «La pratique des ciments et des bétons, Edition du Moniteur, Paris.

[26] EZZIANE.K,BOUGARA.A, KASSOUl.A, DJEZZAR.M,2003, Activation de la pouzzolane de Béni-Saf sous différentes température de cure , Séminaire national de génie civil, Sidi Belabas, 16-17 Avril.

[27] BOUKENDAKDJI .O, KENAI.S ,KADRI.H, ROUIS.F, 2009 , Effect of slag on the rhéology of fresh self-compacted concrete .Construction and Building Materials.

[28] MESSAOUDENE, A. NACERI, Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau rn sur la réponse mécanique du mortier, Université de M'sila.

[29] MOINUl I, SAIFULI ,AFTABUR R, strength behavior of mortar using slag as partial replacement of cement » Department of Civil Engineering, Chittagong, University of Engineering and Technology.

[30] ALI-BOUCETTA , BEHIM M, LAIFA W 2011,Etude comparative sur l'effet d'une même addition inerte ou chimiquement réactive sur les propriétés des béton autoplaçant (cas des laitiers granulé et cristallisé) , Université d'Annaba.

[31] ROMPAEY G.V, étude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sous ajout chloruré , Doctorat université de Bruxelles,

[32] GHRICI M., KENAI S, SAID-MANSOUR M., 2004, Efficiency of Beni-Saf's natural pozzolana in durability of mortars and concrete,CITDUB 1, BabEzzouar, 24-26 mai , 7p.

[33] KERBOUCHE.A,MOULI .M,LAOUFI .L,Y.SENHADJI,BENOSMANE .S.,2009, influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers , International Conference on sustainable Buil tEnvironment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12-14.

[34] AICHOUBA A., GHRICI M., BENAISSA A. 2005 , Effets de la pouzzolane naturelle de Beni-Safsur les propriétés d'un ciment à base de calcaire , Colloque CMEDIMAT, 06 et 07 décembre, 8p.

[35]CHABI S, MEZGHICHE B .,2004 , Etude de l'influence de s additions minérales actives sur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments pour les fondations immergées, (Cas du sud Algérien) BabEzzouar.

[36] SAID MANSOUR .M, 2003, Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaire, Mémoire de Magister, Université de Blida, Décembre.

[37] Techno-béton n°7 , Le bétonnage par temps chaud , l'Association béton Québec.

[38] Techno-béton n°9 , Le béton pour usage résiduel, publié par l'Association béton Québec.

[39] Techno-béton n°8 « La cure » publié par l'Association béton Québec.

[40] CSA. Béton ,2009,Constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton. Canada. Association canadienne de normalisation, 674 p.

[41] HUI ZHAO A, WEI SUN A, XIAOMING WU B, Bo Gao b Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concret, China.

[42] ESCALANTE-GARCIA J.I.; SHARP J.H ,2001,The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, Cement Concrete Research, Vol 31.

[43]Monzo J.; Borrachero M.V,1995,Mechanical treatment of fly ashes: strength development and workability of mortars containing ground fly ashes, Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on fly Ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA,.

[44] ALSHAMSI.M, SABOUNI.A, BASHLAIBI.A, Influence of set-retarding superplasticizer and microsilica on setting time of pastes at various temperatures,

[45] CARINO N.J.; LEW H.S, 1983, Temperature effect on strength-maturity relations of Mortars, ACI Journal, Vol 80, N°3, May,pp.177-182.

[46] ELKHADIRI.I, PALACIOS.M,PUERTAS.F, 2009, Effect of curing temperature on cement hydration, Eduardo Torroja Institute for Construction Sciences Madrid, Spain.

[47] GALLUCCI.E, XINYU.Z,.SCRIVENER.K «Influence de la température sur le développement microstructural des bétons » Toulouse, France ; juin 2006.

[48] MARTÍNEZ- RAMÍREZ.S, M. Frías ,2009, The effect of curing temperature on white cement hydration» Construction and Building Materials 23 .

[49]KELLOUCHE Yasmina , Abdelkader Bougara ,2014 , Effet de la température de cure sur la réactivité d'un ciment au Laitier , 1st international conférence on pouzzolanic construction materials .

[50] AMRANE A, KENAI S, Propriétés mécaniques et durabilité du béton au laitier en climat chaud , Séminaire International sur la qualité du béton en climat chaud,Ghardaia.

[51] PLOYAERT .IRC, 2010, limiter la fissuration condition indispensable à la durabilité des Bétons, revue technologie .

[52] ITIM .A, EZZIANE .K KADRI.H , 2010, Etude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales ,Université de Chlef .

[53] PERTUE.A,MOUNANGA.P, KHELIDJ.A ,2007, Influence de la température et du rapport eau/Ciment sur le retrait empêché des pâtes de ciment au Jeune âge Nantes

[54] SHI, H. S., XU B. W. et ZHOU X. C.2009. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete, Construction and Building Materials, vol.23, n° 5, p.1980-1985.

[55] BOUBEKEUR a, EZZIANE K.,KADRI C , Estimation de la résistance à la compression d'un ciment compose sous différentes température de cure par le principe de la maturité .

[56] K. Ezziane, A. Bougara, A. Kadri, H. Khalafi, 2007,Compressive strength of mortar Containing natural pozzolan under various curing temperature. Cement and Concrete Composites,Mars.

[57] MICAH H.W., Seamus F., FREYNE , THOMAS D. BUSH JR.c, Bruce W.Russell, 2008, Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures, Construction and Building Materials J.22.

[58] NA 436,1992-08-20 , béton frais , détermination de la consistance-essais d'affaissement, Norme algérienne.

[59] NF EN 12390-3, 2003, Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR.

[60] NA427 ,1989 «Détermination de la résistance a la compression des éprouvettes» Norme algérienne.

[61] NF P 18-407,2003,Essai pour béton durci. Partie 4 : Résistance à la traction des éprouvettes, AFNOR .

[62] NA428 ,1992-08-20, béton –détermination de la résistance a la flexion des éprouvettes, Norme algérienne.

[63] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, 2002, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire, Octobre 1997.

[64] NF P 15-404, Normes AFNOR, 1989,Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.

[65] GUETTACH.M , 2002, Contribution à la valorisation des laitiers de haut-fourneau d'ElHadjar dans le domaine de la construction: caractérisation des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine, 210 p .

[66] NF EN 1008, 2003, Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton , AFNOR .

[67] NF EN 196-1, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire conforme aux normes européennes, P 123.

[68] DUPAIN.R et all, Granulats sols et béton, Caractérisation des matériaux de génie civil par Les essais de laboratoire conforme aux normes européenne, Edition CASTEILLA.

[69]NF P 15-433, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire conforme aux normes européennes, P 139.

[70] NF EN 1015-18, 2002, Méthodes d'essais sur mortier de maçonnerie, Partie 18 : Absorption d'eau par capillarité du mortier durci.

[71] BELAIDIA, L. AZZOUZB, E. KADRIC, S. KENAI A ,2012, Effect of natural pozzolan and marble powder on the properties of self-compacting concrete .

[72] BUIL, M., OLLIVIER, J.P.,1992, Conception des bétons : la structure poreuse. Durabilité des bétons, sous la direction de Baron. J et Ollivier. J.P., Presse de l'ENPC, p.57-99.

[73] BOUDRA .S, S .BENSEBTI.S,LASSOUED.R , Effet de filler de calcaire sur le retrait des bétons autoplacants .