



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : MATERIAUX

THEME

**Etude de l'influence du laitier granulé
sur le comportement des mortiers à
haute température**

**Dirigé par :
Pr RAHMOUNI Zine El Abidine
Melle TEBBAL Nadia**

**Présenté par :
SALMI Sarra**

Promotion : 2014/2015.

Remerciement

Au mon dieu le Clément et Miséricordieux

Je remercie avant tout mon dieu C'est grâce à lui seul que j'ai pu achevé ce modeste travail.

Je remercie ainsi : Pr. RAHMOUNI Zine El abidine et Melle. TEBBAL Nadia.

Je remercie : Mr DAHMANI Bachir : ingénieur de laboratoire physique (Lafarge M'sila).

Mr MESSEGUEM Meftah : responsable de laboratoire de chimie (Lafarge M'sila).

- Mon camarade : GUETNI Hadj Tarek

Pour leurs aides jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

- Messieurs les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*
- Mes enseignants(es) du département de génie civil et les responsables du laboratoire*
- Touts les employés de CCR Lafarge (M'sila).*
- Tout les gens qui nous ont aidé de près au de loin dans la réalisation de ce modeste travail.*

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à

Mes parents et ma tante que j'aime le plus du monde

Mes frères.....

Mes amies.....

Toutes mes connaissances.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Etude bibliographique	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralité.....	4
I.2.1. Le rôle d'utilisation de mortier	4
I.2.2. Les différents mortiers	5
I.2.2.1. Les mortiers de ciment	5
I.2.2.2. Les mortiers de chaux	5
I.2.2.3. Les mortiers bâtards	5
I.2.2.4. Les mortiers fabriqués sur chantier	5
I.2.2.5. Le mortier industriel	6
I.2.3. Caractéristiques principales	6
I.3. Les fillers cimentaires	7
I.3.1. Définition des caractéristiques des additions	7
I.3.2. Définition des fillers.....	8
I.3.2.1. Les laitiers de hauts fourneaux	8
I.3.2.2. Les cendres volantes	8
I.3.2.3. Les fumées de silice	9
I.3.2.4. Les pouzzolanes naturelles	9
I.3.2.5. Les argiles calcinées	10
I.3.2. 6. Les fillers calcaires	10
I.3.3. Les fonctions des fillers.....	11
I.3.3.1. Dans les ciments	11
I.3.3.2. Dans les bétons	11
I.3.4. La Prise en compte des additions sur la résistance en compression.....	11
I.4. La température	13

I.4.1. Effets de la température sur la structure et les propriétés thermiques et physiques du béton	13
I.4.2. Evolution des composants et de la structure du béton	13
I.4.2.1.Evolution de la pâte de ciment	13
I.4.2.2.Evolution des granulats	14
I.4.2.3. Perte de masse	17
I.4.3. Effet de la température sur le comportement mécanique des bétons	18
I.4.3.1.Résistance en compression	18
I.4.3.2. Résistance en traction	18
I.4.3.3.Module d'élasticité	18
I.4.3.4.Coefficient de dilatation thermique	19
I.5. Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température	19
I.5.1.Évolution des composants et de la structure du béton au cours de l'échauffement.....	20
I.5.2. Evolution de la pâte de ciment au cours du chauffage	20
I.5.3. Evolution de l'interface pâte - granulats à haute température.....	21
I.6. Conclusion.....	21

CHAPITRE II : Caractéristiques des matériaux utilisés

II.1. Introduction	23
II.2. Sable d'Oued (Boussaâda).....	23
II.2.1. Origine du sable	23
II.2.2. Caractéristiques physiques du sable utilise	23
II .2.2.1. La Masse spécifique (absolue) du Sable NF P18- 555	23
II.2.2.2. Masse volumique apparente: NF P 18-554	24
II.2.2.3. Equivalant de sable : NF-18-598	26
II .2.2.4. Teneur en eau : NF P 18-555	27
II .2.2.5. Analyse granulométrique : [NF P 18-304]	28
II .2.2.6. Module de finesse(EN 196-6)	28
II.2.2.7.Les Caractéristiques chimique du sable utilise	30

II .3. Sable concassé	30
II .3.1. Origine du sable	30
II .3.2. Caractéristiques physiques du sable concassé	30
II .3.2.1.La Masse spécifique (absolue) du Sable NF P18- 555	30
II .3.2.2. Masse volumique apparente: NF P 18-554	31
II .3.2.3. Equivalant du sable : NF-18-598	32
II.3.2.4.Teneur en eau : NF P 18-555	32
II .3.2.5. Analyse granulométrique : [NF P 18-304]	33
II .3.2.6. Module de finesse(EN 196-6)	33
II.4. Ciment :	34
II .4.1. Composition chimique de CPJ utilisé	35
II.4.2. Caractéristique mécanique et physique du ciment utilisé	35
II .5. Les ajouts	36
II .6. Les adjuvants	36
II .6.1. Caractéristiques	36
II .6.2. Dosage	36
II.7. Eau de gâchage	36

CHAPITRE III : Techniques expérimentales

III.1. Introduction	38
III.2. Composition du mortier	38
III.3. La confection des éprouvettes	39
III.4. Conservation des éprouvettes	40
III.5. A l'état frais des mortiers	41
III.5.1. Définition	41
III.6 : A l'état durci de mortiers	42
III.6.1. Essai de compression (NF P 18-406)	42
III.6.1.1. Expression des résultats	43
III.6.2. Résistances à la traction (NF P 18- 408)	45

III.6.3. Estimation de perte de masse	46
---	----

CHAPITRE IV: Résultats et interprétations

IV.1. Introduction	48
IV.2. Résultat des essais à l'état frais	48
IV.3. Résultats des essais à l'état durci	49
IV.3.1. Résistance mécanique à la compression	49
IV.3.2. Résultats de la résistance mécanique des mortiers à la flexion	52
IV.4. La perte de masse	55
IV.5. Perte de masse et la résistance mécanique en fonction de la température	58
IV.6. L'interprétation des résultats	61
IV.6.1. La résistance à la compression	61
IV.6.2. La résistance à flexion	61
IV.6.3. La perte de masse	61
IV.6.4. Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température	61
IV.7. Conclusion	62
Conclusion générale.....	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.....	24
Tableau II.2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.....	25
Tableau II.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact.	25
Tableau II.4 : Equivalent du sable de Boussaâda.....	27
Tableau II.5 : Teneur en eau du sable de Boussaâda.....	27
Tableau II .6 : Classement de sable.	28
Tableau II .7 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.....	29
Tableau II .8 : Composition chimique du sable de Boussaâda.....	30
Tableau II.9 : Masse volumique absolue du sable concassé.	31
Tableau II.10 : Masse volumique apparente du sable concassé à l'état lâche.	31
Tableau II.11 : Masse volumique apparente du sable concassé à l'état compact.....	32
Tableau II.12 : Equivalent du sable concassé.	32
Tableau II.13 : Teneur en eau du sable concassé.	33
Tableau II.14 : Analyse granulométrique du sable concasse.....	33
Tableau II.15 : Classement de sable.	34
Tableau II.16: Composition chimique de CPJ utilisé (LAFARGE M'sila).....	35
Tableau II.17 : Caractéristique mécanique et physique du ciment utilisé (Lafarge M'sila).	35
Tableau II .18 : Les compositions chimique de laitier granulé utilisé.	36
Tableau II .19 : Caractéristiques de MEDAPLATS SP 40.....	36
Tableau III.1 : Les compositions des mortiers sans super plastifiant.....	38
Tableau III.2: Les compositions des mortiers avec super plastifiant	39

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Laitier de haut fourneau.....	8
Figure I.2 : Cendre volante.....	9
Figure I.3 : Fumée de silice.....	9
Figure I.4 : Pouzzolane naturelle.	9
Figure I.5 : Argile calcinée.....	10
Figure I.6 : Le filler calcaire.....	10
Figure I.7 : Schéma de principe du calcul des effets physico-chimique et microstnictural et chimique (d'après Lawrence [LAW 001).	12
Figure I.8 : ATD (analyse thermique différentielle) du gel CSH, C/S=1.....	14
Figure I.9 : Transformations principales dues à la température entre la température ambiante et la température de la destruction du matériau béton.....	15
Figure I.10. Courbes ATD des différents types de granulats Erreur ! Signet non défini.....	17
Figure II .1 : Méthode de l'éprouvette.....	24
Figure II.2 : La courbe granulométrique de sable de dune.....	29
Figure II.3 : La courbe granulométrique de sable concassé.....	34
Figure III.1 a : Les moules des mortiers.....	39
Figure III.1 b: Malaxeur.....	40
Figure III.2: Table vibrante.....	40
Figure III.3 : Armoire d'humidité	40
Figure III.4 : Le four (Heraeus).	41
Figure III.5 : Mesure de la fluidité du mortier.....	41
Figure III.6 : Appareil de flexion et de compression (Toni Technic).....	44
Figure III.7 : Dispositif de rupture en compression.....	44

Figure III.8 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	46
Figure IV.1: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 1).....	49
Figure IV.2: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 2).....	49
Figure IV.3: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 3).....	50
Figure IV.4: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 4).....	50
Figure IV.5: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 5).....	51
Figure IV.6: Résistance mécanique en fonction de température (Composition 6).....	51
Figure IV.7: Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 1).....	52
Figure IV.8: Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 2).....	52
Figure IV.9: Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 3).....	53
Figure IV.10: Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 4).....	53
Figure IV.11: Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 5).....	54
Figure IV.12 Résistance a la flexion en fonction de température (Composition 6)	54
Figure IV.13: Perte de masse en fonction de la température (Composition 1).....	55
Figure IV.14: Perte de masse en fonction de la température (Composition 2).....	55
Figure IV.15: Perte de masse en fonction de la température (Composition 3).....	56
Figure IV.16: Perte de masse en fonction de la température (Composition 4).....	56
Figure IV.17: Perte de masse en fonction de la température (Composition 5).....	57
Figure IV.18: Perte de masse en fonction de la température (Composition 6).....	57
Figure IV.19: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition1)	58
Figure IV.20: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition2)	58
Figure IV.21: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition3)	59
Figure IV.22: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition4)	59

Figure IV.23: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition5)	60
Figure IV.24: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition6)	60

LISTE DES SYMBOLES

app : La masse volumique apparente

abs : La masse volumique absolue

E.S.V : Equivalant de sable visuel

E.S.P : Equivalant de sable piston

LHF : Laitier de hauts fourneaux

CLC : Ciment au laitier et aux cendres

CHF : Ciment de hauts fourneaux

ADT : Analyse thermique différentielle

ATG : Analyse thermogravimétrique

Mf : Module de finesse

RESUME

L'élévation de la température dans le mortier entraîne une destruction des hydrates constitutifs de la pâte de ciment durcie. Cette destruction implique un affaissement du matériau par dégradation de ses propriétés mécaniques : rigidité et résistance. L'élévation de la température génère également des pressions de fluides importantes au niveau de la porosité du matériau pouvant conduire à l'endommagement de celui-ci. Cet endommagement se conjugue à l'endommagement généré par le chargement mécanique. La prévision du comportement aux hautes températures implique donc la connaissance de l'évolution des variations des propriétés mécaniques.

Cette étude s'articule sur la comparaison de l'évolution des résistances résiduelles, en flexion, en compression mécanique et la perte de charge de six formulations des mortiers avec des pourcentages différents de laitier. Il s'agit de trois formulations des mortiers avec ajout de fillers sans super plastifiant, trois formulations des mortiers avec laitier plus un super plastifiant.

Les résultats obtenus montrent le bon comportement des mortiers à haute température environ 400°C alors que la diminution de la résistance en compression est négligeable par rapport à la résistance à la flexion qui est très influencé par la montée en température. L'effet de l'ajout de laitier sur la perte de masse n'a été visible qu'à la première température (200°C), car l'évaporation se produit à une température voisine de 100°C.

Mots clés : Mortier, Résistance mécanique, Haute température, Perte de masse, laitier granulé.

Abstract

The rise in temperature in the mortar caused a destruction of the constituent carbohydrates of the cement paste hardened. This destruction implies a subsidence of the material by degradation of its mechanical properties: stiffness and strength. The temperature rise also generates significant fluid pressure at the level of the porosity of the material which may lead to damage to it. This damage is combined with the damage generated by mechanical loading.

Prediction of the behavior at high temperatures therefore implies the knowledge of the evolution of the variations of mechanical properties.

This study focuses on the comparison of the evolution of residual resistance, flexural, mechanical compression and the loss of six formulations of mortars with different percentages of slag. It's three formulations of mortars with addition of fillers without super plasticizer, three mortars with slag formulations more a super plasticizer.

The results show the good behavior of mortars at high temperature approx. 400 ° C while the reduction in compressive strength is negligible compared to the resistance has flexion which is heavily influenced by the rise in temperature. The effect of the addition of slag on the mass loss was visible that has the first temperature (200 ° C), because the evaporation occurs at a temperature near 100 ° C.

Key words: mortar, mechanical strength, high temperature, loss of mass, granulated slag

الملخص

إن ارتفاع في درجة الحرارة على الملاط يؤدي إلى تفكيك الروابط المهدرجة المكونة لعجينة الاسمنت المتصلب. هذا التفكك يؤدي إلى تطبيق هبوط في المادة و ترهل في خصائصها الميكانيكية: الصلابة و المقاومة .

إن ارتفاع في درجة الحرارة تؤثر على المادة بضغطات في المادة السائلة على مستوى مساميتها التي تحطم هذه الأخيرة. إن التطور الجيد لهيكل المادة الخاضعة لدرجات الحرارة العالية يسمح لنا بمعارف أكثر في معرفة التغيرات الميكانيكية.

ترتكز هذه الدراسة على مقارنة تطور المقومات الآنية , الانحناء مع الشد , الضغط الميكانيكي و فقدان الوزن على ستة عينات من الملاط بنسب مختلفة لمادة خبث الأفران. الدراسة تخص ثلاثة تركيبات بخبث الأفران بدون ملدنات تقابلها ثلاثة تركيبات أخرى مع إضافة ملدن.

النتائج المتحصل عليها تظهر الهيكل الجيد للميلاط تحت تأثير درجات الحرارة العالية في حدود 400 درجة مئوية تتبع في تناقص المقاومة الميكانيكية التي تكون مهمة مقارنة بمقاومة الإنحاء. هذه الأخيرة التي تتأثر بارتفاع درجة الحرارة.

إن تأثير خبث الأفران على فقدان الكتلة ليس محسوسا إلا في درجة الحرارة 200 درجة مئوية بسبب تبخر الماء في درجة حرارة تقارب 100 درجة مئوية.

المفاتيح: الملاط , المقاومة الميكانيكية , الحرارة العالية , فقدان الوزن , خبث الأفران.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le mortier est le matériau le plus fréquemment utilisé dans le domaine de la construction. Dans ce type d'ouvrage le mortier est soumis à des sollicitations parfois extrêmes de température. La stabilité de la structure dépend alors des caractéristiques du mortier pendant et après exposition à de telles sollicitations: que deviennent les caractéristiques du mortier après son exposition à des températures élevées ?

L'évolution des propriétés des matériaux cimentaires en fonction de la température ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Généralement, ces travaux ont traité l'évolution de la résistance mécanique du mortier en fonction de la température. Peu, d'entre eux se sont intéressés à l'évolution des propriétés du mortier avec la température.

L'élévation de la température altère la résistance mécanique du béton et des mortiers du fait des désordres résultant d'une part, de la dilatation thermique, et d'autre part, de la transformation physique et chimique des granulats par un changement de la structure des minéraux. La prévision du comportement aux hautes températures implique donc la connaissance de l'évolution des variations des propriétés mécaniques et physiques.

Notre étude consiste à suivre l'évolution de la résistance d'un mortier avec différents pourcentages de laitier granulé en fonction de la température.

Objectif

Le présent travail a pour but d'étudier l'influence du laitier granulé sur l'évolution des propriétés mécaniques des mortiers à hautes températures par une approche expérimentale.

Structure du mémoire:

Notre mémoire est structuré en une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale,

Introduction générale.

1^{ère} chapitre: Etude bibliographique.

2^{ème} chapitre: Caractéristiques des matériaux utilisés.

3^{ème} chapitre: Techniques expérimentales.

4^{ème} chapitre: Résultats et interprétations.

Conclusion générale.

CHAPITRE I
Etude
Bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction

Le présent chapitre est une étude bibliographique des travaux de recherche sur le comportement de l'incorporation des fillers (laitier granulé) dans le mortier porté à une température élevée. Cette analyse portera d'une part, les mécanismes d'instabilité thermique du mortier avec les paramètres pouvant influencer cette dernière ; d'autre part, sur les différentes transformations physiques et les performances mécaniques.

I.2. Généralité

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables, leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. [1]

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être :

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs préposés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers. [1]

I.2.1. Le rôle d'utilisation de mortier :

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels :

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- sous forme d'enduits aériens.
- sous forme d'écrans étanches.

- Constituer des chapes d'usure, un pour dallages en béton.

Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux divers éléments moulés. [1]

- ✓ Etre le constituant essentiel du béton.

Consolider certains sols de fondations sous forme d'injections.

I.2.2. Les différents mortiers :

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier :

I.2.2.1. Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. [1]

I.2.2.2. Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments. [1]

I.2.2.3. Les mortiers bâtards :

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux.

Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée. [1]

I.2.2.4. Les mortiers fabriqués sur chantier :

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables

peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables. [1]

I.2.2.5. Le mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. [1]

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

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

I.2.3. Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- ouvrabilité ;
- prise ;
- résistances mécaniques ;
- retrait et gonflements, etc. [1]

I.3. Les fillers cimentaires

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du superplastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire. Les normes s'accordent pour définir comme « fines » les éléments passant à travers un tamis de 80 μ m. On adopte aussi le terme « filler » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80 μ m. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution.

I.3.1. Définition des caractéristiques des additions

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de février 2002, distingue les additions en Deux types : celles quasiment inertes (de type **I**) et celles à caractère pouzzolanique ou à Caractère hydraulique latent (de type **II**).

Comme additions de type **I** sont considérés en premier lieu les fillers dont les caractéristiques spécifiques sont déterminées par la pré-norme prEN 12620 (2000) ainsi que les pigments pour le béton conformes à la norme EN 12878.

Comme additions de type **II** sont considérées les fumées de silice conformes à la pré-norme Pr EN 13263 (1998) et les cendres volantes conformes à la norme EN 450.

Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition ((additions pour béton hydraulique)) a savoir :

- Additions de type **I** selon la norme EN 206-1
 - Les additions calcaires (NF P 18308)
 - Les additions siliceuses (NF P 18-509)
 - Les fillers (NF P 18-501)
- Additions de type **II** selon la norme EN 206-1 :
 - La fumée de silice (NF P 78-502)
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18505)
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506) [2]

I.3.2.Définition des fillers

I.3.2.1. Les laitiers de hauts fourneaux :

Le laitier de haut fourneau (LHF) est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est constitué de chaux (45 à 50 %), de silice (25 à 30 %), d'alumine (15 à 20 %) et d'environ 10% de magnésie, d'oxydes divers et de manganèse.

Le laitier peut être ajouté soit directement dans la composition du ciment (cas du ciment CEM II), soit vendu séparément et introduit dans la composition des bétons en tant qu'ajout.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts Fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [Park et al. 2005]. Shi et al (1998) avaient montré que le laitier de haut fourneau adsorbe le super plastifiant, ce qui impliquerait une demande plus importante en super plastifiant pour obtenir une même fluidité ou une même valeur du seuil de cisaillement. L'autre avantage d'une substitution du laitier est la réduction des pics de température causés par l'hydratation. Cet avantage dépend toutefois de la finesse du laitier. [3]



Figure I.1 : Laitier de haut fourneau.

I.3.2.2. Les cendres volantes :

Collectées dans les dépoussiéreurs des centrales thermiques à charbon, elles se présentent sous la forme de sphérules pleines ou creuses.

On distingue :

- * les cendres silico-alumineuses, appelées F,
- * les cendres silico-calciques et sulfocalciques, appelées C.

La phase vitreuse est composée de silice, la phase cristallisée est composée d'un grand nombre d'éléments dont les silicates et sulfates calciques hydrauliques. [2]



Figure I.2 : Cendre volante.

I.3.2.3. Les fumées de silice :

Elles sont issues de la production de silicium métallique dans les fours à arc électrique. Elles forment des sphérolites qui se regroupent en agglomérats de quelques micromètres. La surface spécifique de ces fines est très élevée (10 à 20 m²/g). [2]



Figure I.3 : Fumée de silice.

I.3.2.4. Les pouzzolanes naturelles :

Elles proviennent de dépôts sédimentaires volcaniques très riches en silice vitreuse réactive. Le terme de pouzzolane tire son origine de la ville italienne de Pozzuoli voisine de Naples car les Romains utilisèrent cette roche volcanique pour la construction de cette ville. [2]



Figure I.4 : Pouzzolane naturelle.

I.3.2.5. Les argiles calcinées :

Elles sont obtenues par cuisson de certaines argiles. Leurs propriétés liantes intéressent les pays en voie de développement qui ne possèdent pas les matières premières nécessaires à la production du ciment. Leur composition dépend de celle de l'argile ou de la latérite d'origine. [2]



Figure I.5 : Argile calcinée.

I.3.2. 6. Les fillers calcaires :

Ils sont :

- soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques,
- soit obtenus par broyage du matériau cru.

Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium. Ils peuvent contenir de l'oxyde de magnésium, il s'agit alors de calcaires dolomitiques.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :

- origine métamorphique, il s'agit de marbres
- origine sédimentaire

Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques calcite, aragonite, vaterite.[2]



Figure I.6 : Le filler calcaire.

I.3.3. Les fonctions des fillers

I.3.3.1. Dans les ciments

Les ciments dans lesquels on introduit les fillers appartiennent à une classe de résistance inférieure ou moyenne.

- Les ciments fillérisés, CPJ sont avant tout des ciments d'intérêt économique et écologique. Ils permettent l'utilisation des cendres volantes et des laitiers qui sont des sous-produits industriels. Ils peuvent contenir aussi des fillers naturels (calcaires, pouzzolanes). Leur fabrication ne doit pas entraîner de surcoût.
- Les ciments aux laitiers et aux cendres (CLC), les ciments de hauts fourneaux (CHF) et les ciments de laitier au clinker (CLK) dont la chaleur d'hydratation est faible et dont les ajouts ont des propriétés pouzzolaniques confèrent au matériau final une durabilité intéressante. Ils sont utilisés dans les milieux agressifs: constructions en eau de mer. [2]

I.3.3.2. Dans les bétons

F. de Larrard [9] et J.P. Bombled [8] montrent que les fillers sont indispensables pour la confection de bétons hauts performances. Ils agissent comme :

- correcteur de la granulométrie : Les fumées de silice et les fines calcaires sont ajoutées à la composition du béton pour rendre l'empilement granulaire plus compact. [2]
- apport d'une cohésion intergranulaire L'utilisation des fines et ultra-fines ne se fait pas sans l'emploi d'adjuvant organique. Le couple filler et adjuvant organique modifie la rhéologie du béton frais dans le sens d'une amélioration de sa maniabilité

I.3.4. La Prise en compte des additions sur la résistance en compression

Lawrence [LAW 001] a proposé un schéma de principe pour l'évaluation de l'effet physicochimique et microstructural et de l'effet chimique sur la résistance en compression des mortiers présenté sur la figure I.7. Ce schéma s'appuie sur l'étude de la contribution liante de trois additions minérales : les fillers calcaires, les fillers siliceux et les cendres volantes, et sur leur contribution à la résistance en compression à partir d'essais sur mortier. Chaque addition est introduite en substitution massique du ciment en conservant le rapport massique eau / (ciment +addition) constant. [2]

Un quartz grossier, désigné d'office sans contribution liante, est défini comme addition de référence, dont la résistance en compression (**f_{ref}**) qui sert de base de réflexion pour évaluer les effets chimique et physico-chimique des autres additions. [2]

L'effet physico-chimique (Δf_p) des additions présumées chimiquement inertes (quartz fin) est évalué comparativement aux mortiers à base de l'addition de référence. L'effet chimique (Δf_z) des cendres volantes est déterminé comparativement aux mortiers avec une addition chimiquement inerte de même finesse que les cendres volantes. [2]

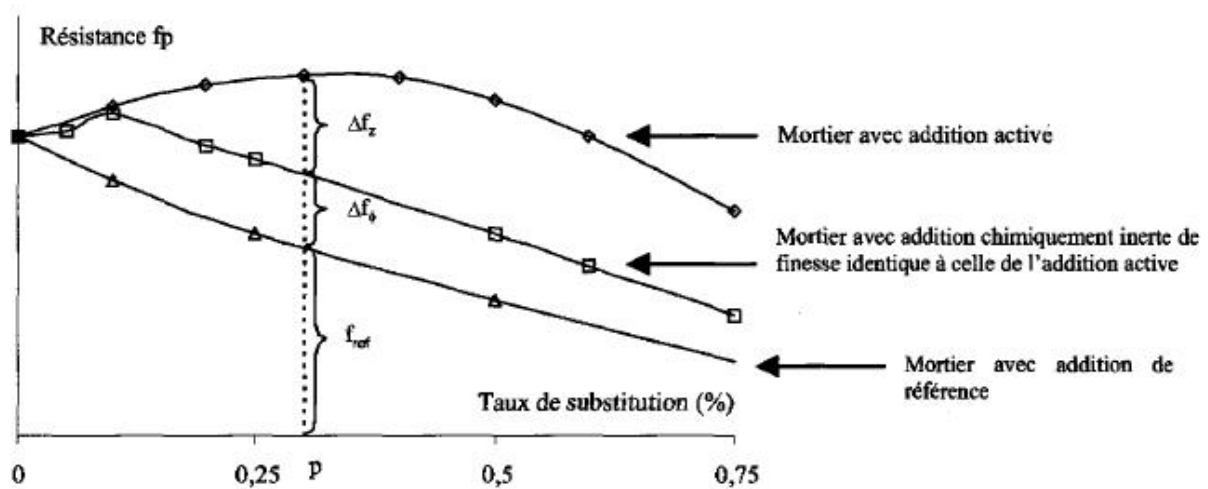


Figure I.7 : Schéma de principe du calcul des effets physico-chimique et microstructural et chimique (d'après Lawrence [LAW 001]).

Une approche expérimentale différente a été proposée par Kara-Ali [KAR 02] sur le même sujet. Elle concerne 18 additions minérales couvrant un large spectre de propriétés et porte sur l'influence des additions minérales sur le besoin en eau et les caractéristiques mécaniques des mélanges cimentaires. L'auteur a choisi de travailler à caractéristiques rhéologiques constantes afin de mettre en évidence l'effet granulaire des additions minérales sur le besoin en eau des pâtes, des coulis et des mortiers. L'introduction des additions minérales est réalisée en substitution volumique afin de pouvoir comparer la densité de l'empilement des grains solides dans les différents mélanges. La contribution liante des additions est estimée indirectement en se basant sur des modèles prédictifs de résistances en compression proposés par Bolomey et Féret, et en prenant en compte les perturbations engendrées par ces additions sur la compacité de la matrice cimentaire. [2]

Les résultats confirment ceux obtenus par Lawrence quant à l'impossibilité de définir un coefficient d'activité unique qui tienne compte des effets physico-chimique et éventuellement chimique des additions sur la résistance en compression des mortiers et des bétons. Autrement dit, la prise en compte des additions dans les modèles prédictifs pour la résistance en compression doit prendre en considération plusieurs caractéristiques des additions en plus de la nature du ciment, des principaux paramètres de formulation des bétons et de l'âge. [2]

I.4. La température :

Une haute température accélère le développement de la résistance durant les premiers jours, et cela a cause de l'hydratation rapide du ciment, les défavorables de la température sur la résistance du béton, ont été détaillés par verbeck et helmoth. ces derniers ont conclu que lorsque l'hydratation initiale est accélérée la distribution des produits d'hydratation responsables de la résistance du béton sera effectuée par la suite. il s'ensuit donc, que le béton doit être gardé a une température minimale mais suffisamment chauds pour réduire le taux de fissuration du au refroidissement ultérieur, et pour obtenir les résistance désirées a des âges spécifiques. [3]

I.4.1. Effets de la température sur la structure et les propriétés thermiques et physiques du béton :

En cours de l'échauffement du béton, on observe de nombreux phénomènes physico-chimiques et des transformations qui modifient sa microstructure. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les transformations des composants du béton : granulats et pâte de ciment au fur et à mesure de leur échauffement. Et dans la deuxième, l'évolution de l'état hydrique du matériau au cours du séchage sera analysée aussi bien que les processus de changement de phases de l'eau en gaz, l'apparition des pressions de vapeur, l'évaporation et le séchage suivis par la déshydratation. [3]

I.4.2. Evolution des composants et de la structure du béton :**I.4.2.1. Evolution de la pâte de ciment :**

D'après des études effectuées sur les bétons l'analyse d'évolution de la pâte de ciment durci pendant l'échauffement depuis la température ambiante jusqu'à 900°C, température à laquelle le matériau se décompose. Cette évolution est fortement liée à l'évaporation de l'eau et les processus de déshydratation des hydrates formant la matrice cimentaire. Les transformations qui accompagnent le processus de la déshydratation enregistrées sur la courbe issue de l'analyse thermique différentielle d'un gel CSH caractérisé par le coefficient $C/S=1$ (CaO/SiO_2) sont présentés sur le graphique suivant (Figure. I.8).

Ils sont observer deux pics caractéristiques, un pic endothermique à 140°C, dû au départ d'eau et un pic exothermique aux alentours de 840°C correspondant aux changements morphologique de la phase du gel CSH. [3]

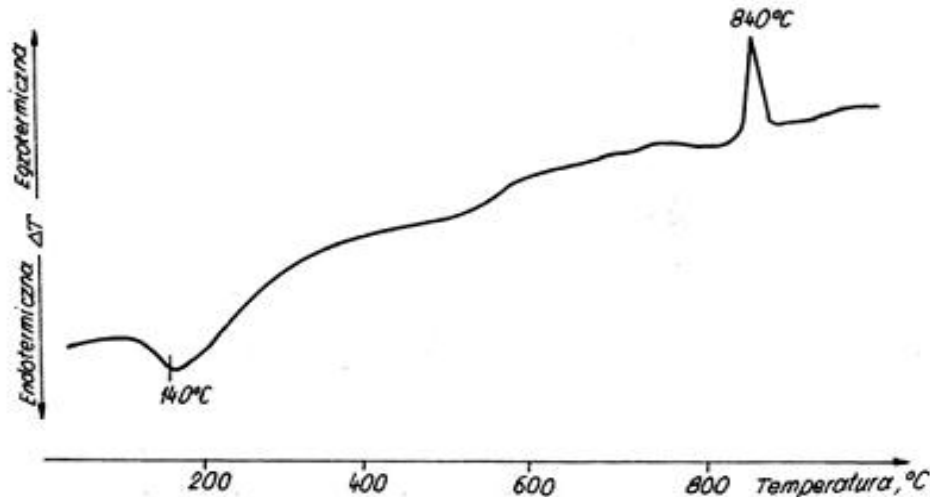


Figure I.8 : ATD (analyse thermique différentielle) du gel CSH, C/S=1 [3].

Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre et la décomposition de l'ettringite, avant la température de 100°C. On observe les premiers signes de la décomposition du gel CSH à 180°C. Selon certains auteurs sont même observés avant. Jusqu'à la température 300°C, la déshydratation est assez rapide.

Notamment dans la gamme des températures 80°C - 200°C (avant 90°C selon certaines sources) se produit la déshydratation de l'ettringite conduisant à la libération de 32 molécules d'eau. Lorsque l'on dépasse 300°C, l'eau la plus fortement liée qui participe à la constitution des hydrates, commence à s'évaporer. [3]

I.4.2.2. Evolution des granulats :


Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton aux températures ambiantes (sauf cas pathologique, comme celui d'une réaction alcali-granulat), mais aux températures élevées leur comportement est totalement différent. La montée en température provoque des changements de la structure des minéraux qui constituent la roche. Prenons les granulats siliceux fréquemment utilisés pour la fabrication du béton (minéraux: quartz, calcédoine, opale, silex). Dans la structure de ces minéraux contiennent de l'ordre de 20% d'eau combinée. Cette eau, entre 120°C - 600°C est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ de l'eau peut entraîner un clivage des granulats. Un autre phénomène concerne le quartz à 575°C. Un changement de phases avec un changement de volume de 1 à 5, 7%. [3]

Les granulats calcaires présentent un bon comportement thermique jusqu'à 700°C. Cette température est le début de la transformation de CaCO_3 en CO_2 et CaO . Le CaO libre présent dans les bétons chauffés puis refroidis réagit avec l'humidité et se transforme en Ca(OH)_2 en multipliant son volume par 2,5. Cette réaction peut expliquer la diminution de la résistance résiduelle (résistance mesurée après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de 700°C.

Les granulats constituent 60-80% du volume du béton. Les variations de leurs propriétés durant l'échauffement ont une grande influence sur les propriétés du composite.

Les propriétés d'un « bon » granulats du point de vue de l'utilisation à haute température sont:

- ❖ un faible coefficient de déformation thermique,
- ❖ l'absence de déformations résiduelles après refroidissement,
- ❖ une stabilité thermique, c'est à dire, un faible nombre de pics sur les courbes d'analyse thermique différentielle et d'analyse thermo gravimétrique ; soit peu ou pas de changements des phases,
- ❖ une structure mono minérale de la roche composante du granulats. [3]



20°	Début du départ de l'eau		
100°C	Départ de l'eau libre 80°C-150°C déshydratation de l'ettringite 150-170°C décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 171°C fusion des fibres polypropylène Début de la déshydratation du CSH	éclatement	réactions hygrothermiques
200°C	Augmentation de la pression interne Petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques) peuvent apparaître.		
300°C	Clivage des granulats silico-calcaires Température critique de l'eau (374°C)		
400°C	Décomposition de la portlandite $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$		fissuration
500°C	Changement des phases du quartz $\beta \rightarrow \alpha$ (573°C)		
600°C	Deuxième phase de la décomposition du gel CSH avec la formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques		
700°C	Décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 700°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique		
800°C			
.....			
1200°C			
1300°C	Destruction complète du béton et apparition de la phase liquide		

Figure I.9 : Transformations principales dues à la température entre la température ambiante et la température de la destruction du matériau béton. [4]

A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau.

Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage.

Comme le montre la (figure I.10), la majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600 °C. La structure des granulats siliceux contient dans ces minéraux environ de 20% d'eau combinée. Entre 120°C et 600°C, cette eau est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ de l'eau peut entraîner un clivage des granulats. Un autre phénomène concerne le quartz à 575°C : un changement de phases avec un changement de volume de 1 à 5,7 %. Le quartz présent dans les granulats siliceux SiO_4 est un édifice de tétraèdres soudés par les sommets, en chaînes. C'est une forme stable à basse température de la silice. Au-dessus de 573°C à la pression ambiante une légère rotation de liaisons entre tétraèdres, conduit à une forme cristalline de symétrie hexagonale : le quartz α . La température de transition du quartz α - β peut augmenter avec la pression.

Ainsi ces deux phénomènes qui apparaissent dans les granulats à base de quartz, peuvent provoquer l'endommagement de la structure du béton.

Les granulats calcaires présentent un bon comportement thermique jusqu'à 700 °C. Cette température est le début de la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) qui se produit entre 600°C et 900°C. Le CaO libre présent dans les bétons chauffés puis refroidis réagit avec l'humidité et se transforme en Ca(OH)_2 avec une augmentation de volume de 44%. Cette réaction peut expliquer la diminution de la résistance résiduelle (résistance mesurée après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de 700°C. [6]

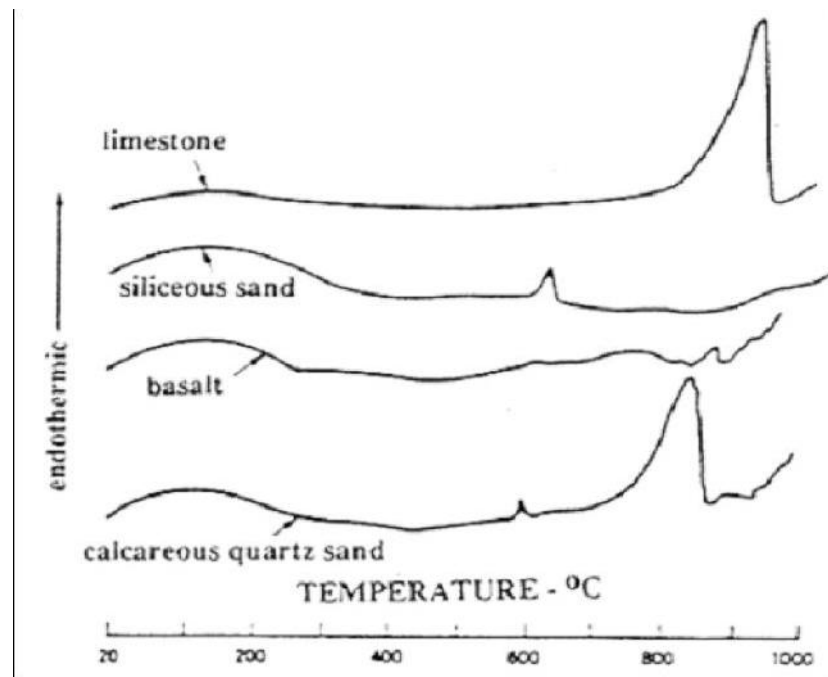


Figure I.10. Courbes ATD des différents types de granulats [6]

I.4.2.3. Perte de masse :

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. [3]

I.4.3. Effet de la température sur le comportement mécanique des bétons :

Le comportement à température ambiante des bétons est bien connu. Sous traitement thermique, la microstructure du béton subit d'importantes modifications physico-chimiques.

Ces transformations au sein du matériau influencent le comportement mécanique. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec une élévation de température. [3]

I.4.3.1. Résistance en compression :

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de haute température sur la résistance en compression du béton. Ils ont remarqué que la raison principale de cette diminution de résistance est l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation. En effet, la résistance à froid diminue sauf lorsqu'on chauffe le béton à plus de 120°C. En dessous de cette température, le chauffage ne fait varier que la résistance à chaud et le béton, une fois refroidi, reprend son comportement en compression avant chauffage. En quelque sorte, la résistance en compression

est proportionnelle au degré d'hydratation du béton. Le caractère irréversible de la réaction de déshydratation est à l'origine de cette baisse résiduelle de la résistance. [3]

I.4.3.2. Résistance en traction :

Dans la littérature, il existe peu de résultats concernant l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. Pourtant cette donnée est primordiale, la résistance en traction conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements).

On observe en général une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température. Jusqu'à 300°C, les valeurs sont assez dispersées avec des résistances relatives allant de 35% à 100%. Par contre, les valeurs fournies par l'Eurocadre représentent plutôt des valeurs moyennes. Au delà de 300°C, les résultats sont tous supérieurs aux valeurs données par l'Euro code. . [3]

I.4.3.3. Module d'élasticité :

Il est admis que la déformabilité des bétons augmente avec la température. [3]

I.4.3.4. Coefficient de dilatation thermique :

[Pimienta et Hager 2003] ont montré, à partir d'une étude réalisée sur des mortiers à base de deux types de granulats (calcaire, silico-calcaire), que la déformation thermique des mortiers formulés avec des granulats silico-calcaires est environ 2 fois supérieure à celle des mortiers de granulats calcaires. La déformation thermique des granulats siliceux est en effet supérieure à celle des granulats calcaire ce qui conduit ces auteurs à conclure que la déformation thermique des bétons dépend principalement de la nature des granulats, et de façon marginale de la pâte de ciment hydratée. [3]

I.5. Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température

Lorsque le béton est soumis à des températures en augmentation, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques, physiques et minéralogiques se produisent.

Ces différents phénomènes, qui peuvent concerner aussi bien la pâte de ciment durcie que les granulats, sont les suivants :

- **Entre 30°C et 105°C**: L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est Complètement éliminée à 105°C. Simple dilatation (coefficient de Dilatation du béton: 1.10^{-5}).

- **Entre 130 et 170°C**: l'eau d'hydratation de l'hydroxyde de calcium est libéré et La pâte de ciment durcie se contracte Les granulats se dilatent

- **Autour de 180°C** et jusqu'à On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de environ 300°C: ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.

- **Environ 250 et 370°C**: On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de Décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).

- **Entre 450 et 550°C**: L'hydroxyde de calcium se décompose selon la réaction :

$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage local.

- **Autour de 570°C**: Changement de phase spontanée du quartz, accompagnée d'un Gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.

- **Entre 600 et 700°C**: Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de C_2S . C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.

- **Entre 700 et 900 °C**: Il y a décomposition du carbonate de calcium CaCO_3 . Le calcaire se Décompose autour de 800°C en $\text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement Endothermique qui libère du gaz carbonique.

- **Au dessus de 1300-1400 °C**: Début de la fusion de la pâte et de ciment des agrégats. Le béton se présente sous forme de masse fondue. [6]

I.5.1.Évolution des composants et de la structure du béton au cours de l'échauffement.

La capacité d'un béton de résister au feu est une caractéristique très importante car elle permet aux structures de rester en place et d'assurer la stabilité des constructions. Les structures peuvent ainsi rester stables pendant une durée suffisante pour permettre l'intervention des secours et l'évacuation des occupants.

Le béton est un matériau à très faible en conductivité thermique : durant un incendie, la température à la surface du béton est bien plus grande que celle dans son cœur. Cela entraîne des gradients de températures et des modifications significatives à sa microstructure qui se traduisent par un affaiblissement des qualités mécaniques du matériau et dégradations de la durabilité des structures. . [6]

I.5.2. Evolution de la pâte de ciment au cours du chauffage :

L'exposition du béton à une température élevée provoque des dégradations mécanique, physique et chimique progressives de ses composants. Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes.

Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de mettre en évidence les réactions physicochimiques au sein du matériau. Sur les courbes d'ATD de la (Figure I.8), nous pouvons observer deux pics caractéristiques, un pic endothermique à 140 °C, dû au départ d'eau et un pic exothermique aux alentours de 840 °C correspondant aux changements morphologiques de la phase du gel CSH.

Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau. Entre 30°C et 120°C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer. On observe la décomposition totale de l'ettringite, avant la température de 100°C, alors que les premiers signes de la décomposition du gel CSH apparaissent à 180°C et avant même cette température. La déshydratation est assez rapide jusqu'à la température de 300°C. Lorsqu'on dépasse 300°C, l'eau la plus fortement liée qui participe à la constitution des hydrates, commence à s'évaporer. Entre 450 et 550 °C, on observe les premiers signes de la décomposition de la portlandite :



La deuxième étape de la décomposition des hydrates est observée à partir de 700 °C, avec une vitesse plus lente et la formation de -C2S. Le calcaire se décompose autour de 800 °C en:



Avec un dégagement de chaleur et la libération du gaz carbonique. A des températures au-dessus de 1300 °C, certains constituants fondent, ce qui provoque la destruction complète du matériau.

Certains travaux montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable. Ensuite à partir de 180°C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium f3-C2S, f3-CS et en eau, tandis que se forme l'hydroxyde de calcium. Un phénomène d'hydratation additionnelle a été observé entre 200°C et 300°C à l'aide de la diffraction aux rayons X. Cette réaction se traduit par une diminution des phases 3-C2S et 3-C3S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de Ca(OH)_2 . . [6]

I.5.3. Evolution de l'interface pâte - granulats à haute température

Dans les bétons, l'interface pâte-granulats est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre, cette zone est moins riche en gel de CSH.

A haute température, cette partie se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120°C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène, plus la différence entre les coefficients de dilatation thermique des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type de granulat et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par Diederichs et al [7] en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats. [6]

I.6. Conclusion :

La synthèse, tirée de la bibliographie, des observations concernant l'effet de la température sur le béton, a démontré que les propriétés physiques et mécaniques de béton sont influencées par les hautes températures, ceci est fortement conditionné par l'évolution de la microstructure, au départ de l'eau et aux changements physico-chimiques.

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux utilisés

Chapitre II : Caractéristiques des matériaux utilisés

II.1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du mortier.

La caractérisation des matériaux a été réalisée expérimentalement au laboratoire de Génie civil à l'université de M'silla. Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région de M'sila.

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable fin de région de Boussaâda (OUED MAITAR).
- Le sable concassé de la carrière (COSIDER).
- Le ciment Mâtine de la cimenterie Lafarge de Hammam Dhalâa wilaya de M'SILA.
- Eau de gâchage (eau distillée).
- Les adjuvants : le MEDAPLAST **SP40** de Granitex. (Superplastifiant).
- Les ajouts : laitiers granulés d'Al Hadjar (Annaba).

II.2. Sable d'Oued (Boussaâda)

II.2.1. Origine du sable :

Le sable de base utilisé provient d'Oued maitar (BOUSSADA)

II.2.2. Caractéristiques physiques du sable utilise :

II .2.2.1. La Masse spécifique (absolue) du Sable NF P18- 555 :

C'est la masse de l'unité de volume absolu de corps, c'est à dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume vide.

La masse volumique absolue du sable est calculé d'après la formule:

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

<i>N° d'essai</i>	<i>M(g)</i>	<i>V₂ (cm³)</i>	<i>V₁ (cm³)</i>	<i>ρ_{abs} (g /cm³)</i>	<i>ρ_{moy} (g/cm³)</i>
01	156	359	300	2,64	2.61
02	156	362	300	2,51	
03	156	358	300	2,68	

Tableau II.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.

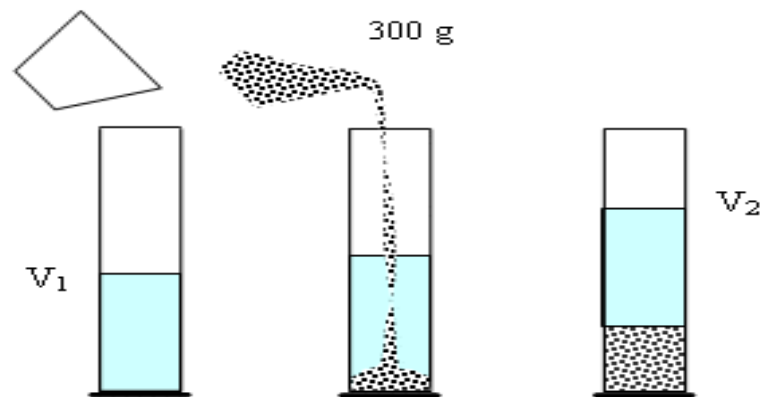


Figure II .1 : Méthode de l'éprouvette.

II.2.2.2. Masse volumique apparente: NF P 18-554:

1-À l'état lâche:

C'est La masse du matériau par unité de volume V comprise le volume des vides existant entre les grains ; Est donnée par formule suivant :

Volume de récipient $V_r = 1000\text{cm}^3$.

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

<i>N° d'essai</i>	M₁(g)	M₂(g)	ρ_{app}(g /cm³)	ρ moy (g/cm³)
01	285.5	1713.3	1.427	1.435
02	285.5	1720.5	1.435	
03	285.5	1730.5	1.445	

Tableau II.2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.

2- À l'état compact:

La masse volumique à l'état compact est la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restants entre les grains, Elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Même procédure que celle à l'état lâche. Après remplissage du récipient (après tassement) on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles. On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et l'on pèse. Soit M₂ le poids de l'ensemble (sable+ récipient) la masse volumique à l'état compact est donnée par la formule suivante:

D' où:

M₁:masse du récipient à vide.

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

N° d'essai	M₁(g)	M₂(g)	ρ_{app} (g/cm³)	ρ_{moy} (g/cm³)
01	285.5	1983.6	1.698	1.711
02	285.5	2004.3	1.718	
03	285.5	2004	1.718	

Tableau II.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact.

II.2.2.3. Equivalant de sable : NF-18-598 :**But:**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable, c'est-à-dire la quantité de particules fines et éléments fins présents dans le sable.

Principe de l'essai:

L'essai consiste à laver l'échantillon de sable puis déterminer la quantité d'éléments fins (argile, limons et impuretés) contenues dans cet échantillon, par rapport à la quantité d'éléments sableux. C'est le rapport multiple par cent (100) de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée, nous avons:

-L'équivalent de sable piston : mesure au piston (E.S.P)

-L'équivalent de sable visuel : (E.S.V)

L'essai est réalisé à 20°C sur une fraction de sable passant par un tamis de 5mm.

A. Equivalent de sable visuel (E.S.V):

- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- mesure également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et fond de l'éprouvette

$$ESV = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \cdot 100(\%)$$

Où $h_2 < h_1$.

h_1 : la hauteur du sable + éléments fins.

B. Equivalent de sable piston (E.S.P) :

-Introduire le piston dans l'éprouvette et descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

-Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$E.S.P = \left(\frac{h_2'}{h_1} \right) \cdot 100 (\%)$$

<i>N° d'essai</i>	<i>h₁</i> (cm)	<i>h₂</i> (cm)	ESV(%)	<i>h₂'</i> (cm)	ESP(%)
01	12.3	8.7	70.73	8.2	66.66
02	11.7	8.5	72.64	8.6	73.5
03	13.1	8.8	67.17	8.1	61.83

Tableau II.4 : Equivalent du sable de Boussaâda.

On a :

ESV_{moy}	70.18%	65% ≤ ESV < 75%
ESP_{moy}	67.33%	60% ≤ ESP < 70%

Pour le sable de Boussaâda : sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.

II .2.2.4. Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20 à 25%** de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0 à 3%**, on l'appelle sec.

La teneur en eau du sable est :

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 (\%)$$

D'où :

- M_h : Poids du sable humide en (g).
- M_s : Poids du sable sec en (g).

<i>N° d'essai</i>	<i>M_h</i> (g)	<i>M_s</i> (g)	<i>W</i> (%)	<i>W_{moy}</i> (%)
1	500	499	0,2	0,26
2	500	499	0,2	
3	500	498	0,4	

Tableau II.5 : Teneur en eau du sable de Boussaâda.

II .2.2.5. Analyse granulométrique : [NF P 18-304]

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

- ♦ Tamisage ;
- ♦ Sédimentation.

La granularité est exprimée par une série des tamis. La Courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau. Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- ♦ En abscisse, le logarithme de la dimension de Ouvertures des tamis en valeurs croissantes
- ♦ En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau
- ♦ total de la fraction du sable dont les grains ont un Diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse Correspondante (passant). On constate que la Courbe granulométrique est un élément Fondamental de la classification du matériau.

II .2.2.6. Module de finesse(EN 196-6) :

Le module de finesse (M_f) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \frac{\sum R_i}{100}$$

Quantité de sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2.0
Très fin	1.0 à 1.5

Tableau II .6 : Classement de sable.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2	14	14	4.66	95.34
1.6	3.8	17.8	5.93	94.07
1	5.88	23.68	7.89	92.11
0.5	14.4	38.08	11.02	88.98
0.16	168.6	206.68	68.89	31.11
0.08	84.8	291.48	97.16	2.84
Fond	8.5	299.98	99.99	0.01

Tableau II .7 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.

♦ Donc, dans notre cas $M_f = 2.999$

Pour le sable de Boussaâda : $M_f > 2,5$: C'est un sable gros

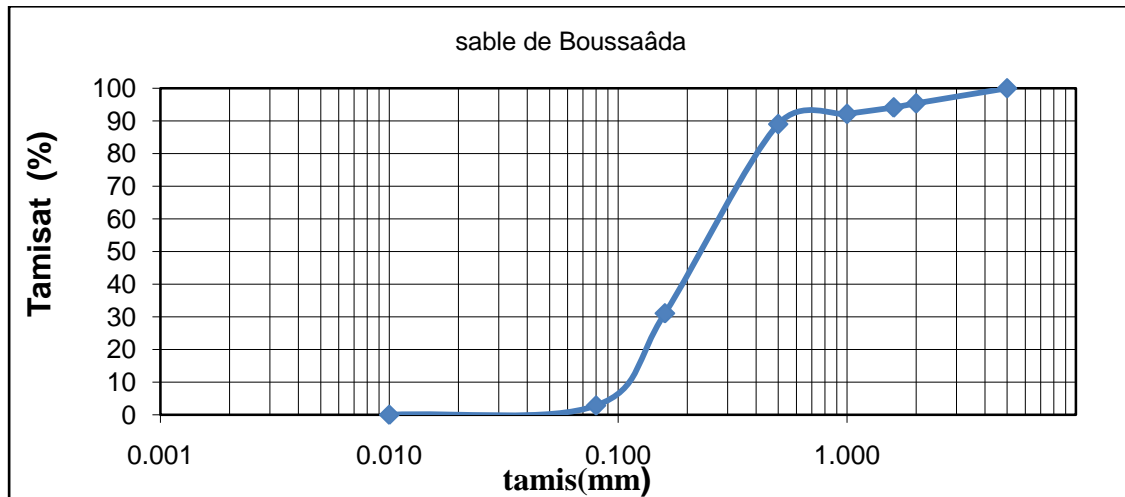


Figure II.2 : La courbe granulométrique de sable de dune.

II.2.2.7. Les Caractéristiques chimiques du sable utilisé :

La composition chimique du sable est donnée par le tableau (II .8)

Constituants		Teneur (%)
Elément	Symbole	
Silice	SiO ₂	87,95
Chaux	CaO	6,12
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0,69
Alumine	Al ₂ O ₃	0,98
Oxyde de magnésium	MgO	0,19
Oxyde de soufre	SO ₃	0,04
Oxyde de potassium	K ₂ O	0,35
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0,01
Perte au feu	P.F	7,06

Tableau II .8 : Composition chimique du sable de Boussaâda.

Le sable utilisé est un sable très pur à haute teneur en silice.

II .3. Sable concassé :**II .3.1. Origine du sable :**

Le sable de base de notre recherche provient de carrière située à **25Km** de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière **COSIDER**).

II .3.2. Caractéristiques physiques du sable concassé :**II .3.2.1. La Masse spécifique (absolue) du Sable NF P18- 555 :**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable d'oued.

Résultats obtenus :

<i>N° d'essai</i>	<i>M(g)</i>	<i>V₂ (cm³)</i>	<i>V₁ (cm³)</i>	<i>ρ_{abs} (g /cm³)</i>	<i>ρ_{moy} (g/cm³)</i>
01	156	357	300	2.73	2.73
02	156	358	300	2.68	
03	156	356	300	2.78	

Tableau II.9 : Masse volumique absolue du sable concassé.**II .3.2.2. Masse volumique apparente: NF P 18-554:****1-À l'état lâche:**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable d'oued .

Volume de récipient $V_r=1000\text{cm}^3$.

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

<i>N° d'essai</i>	<i>M₁(g)</i>	<i>M₂(g)</i>	<i>ρ_{app}(g /cm³)</i>	<i>ρ_{moy}(g/cm³)</i>
01	285.5	1760.8	1.475	1.478
02	285.5	1765.9	1.480	
03	285.5	1766.1	1.480	

Tableau II.10 : Masse volumique apparente du sable concassé à l'état lâche.**2- À l'état compact:**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable d'oued.

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

<i>N° d'essai</i>	<i>M₁(g)</i>	<i>M₂(g)</i>	<i>ρ_{app} (g/cm³)</i>	<i>ρ_{moy} (g/cm³)</i>
01	285.5	1951.5	1.666	1.690
02	285.5	1978.1	1.692	
03	285.5	1999.2	1.713	

Tableau II.11 : Masse volumique apparente du sable concassé à l'état compact.

II .3.2.3. Equivalant du sable : NF-18-598 :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour l'équivalent du sable d'oued.

<i>N° d'essai</i>	<i>h₁ (cm)</i>	<i>h₂ (cm)</i>	<i>ESV(%)</i>	<i>h₂' (cm)</i>	<i>ESP(%)</i>
01	9.7	9	92.78	9.3	95.87
02	10.4	8.7	83.65	9.3	89.42
03	10.2	8.9	87.25	9.3	97.05

Tableau II.12 : Equivalent du sable concassé.

On a :

ESV moy	87.89%	>85%
ESP moy	94.11%	>80%

Pour le sable concassé : C'est un Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

II.3.2.4.Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20 à 25%** de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0 à 3%**, on l'appelle sec.

La teneur en eau du sable est :

<i>N° d'essai</i>	<i>M_h (g)</i>	<i>M_s (g)</i>	<i>W (%)</i>	<i>W_{moy} (%)</i>
1	500	499	0,2	0,26
2	500	499	0,2	
3	500	498	0,4	

Tableau II.13 : Teneur en eau du sable concassé.

II .3.2.5. Analyse granulométrique : [NF P 18-304]

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour l'analyse granulométrique du sable d'oued

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2	53.2	53.2	17.5	82.5
1.6	29.4	82.6	27.5	72.5
1	52.1	134.7	44.9	55.1
0.5	63.3	198	66	34
0.16	82	280	93.33	6.67
0.08	11.9	291.9	97.3	2.7
Fond	7.9	299.8	99.93	0.07

Tableau II.14 : Analyse granulométrique du sable concasse.

II .3.2.6. Module de finesse(EN 196-6) :

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous permet de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \frac{\sum R_i}{100}$$

Avec :

Ri : refus cumulé en pour cent (%).

Quantité de sable	Modèle de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2.0
Très fin	1.0 à 1.5

Tableau II.15 : Classement de sable.

♦ Donc, dans notre cas $M_f = 4.46$

Pour le sable concasse : $M_f > 2,5$: C'est un sable gros

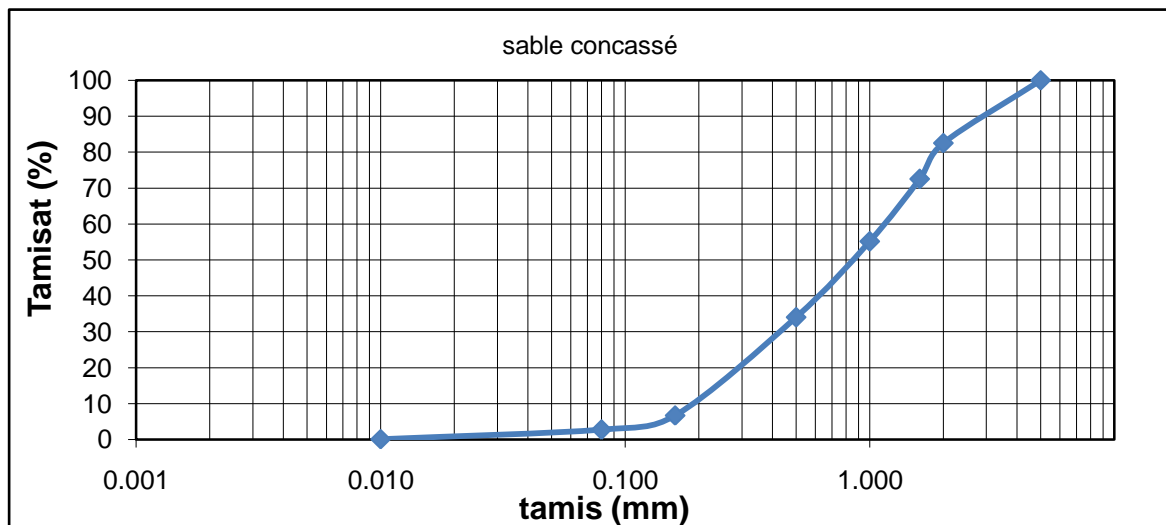


Figure II.3 : La courbe granulométrique de sable concassé.

II.4. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment CPJ CEM II /A 42.5 disponible sur le marché
Fabriqué par la cimenterie HAMAM DALAA wilaya de M'SILA.

Les résultats des essais de la masse volumique apparente et absolue du ciment utilisé

Sont :

La masse volumique apparente : $\rho_a = 2120 \text{ Kg/m}^3$

La masse volumique absolue : $\rho_s = 3030 \text{ Kg/m}^3$

II .4.1. Composition chimique de CPJ utilisé:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	chlorures	Perte au feu	Surface spécifique
17.51	4.58	60	2.8	1.92	2.9	0.59	0.11	0.02	9.20	4170

Tableau II.16: composition chimique de CPJ utilisé (LAFARGE M'sila).

II.4.2. Caractéristique mécanique et physique du ciment utilisé :

Les caractéristiques du CPJ utilisé sont regroupées dans le tableau suivant :

		Unités	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm ³	3,03
Consistance normale		%	29
La finesse (Blaine)		cm ³ /g	4170
Le Chatelier	A froid	mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	min	170
	Fin		252
Résistance à la compression	2 jours	MPa	18
	7jours		32
	28 Ours	MPa	Plan de 42,5

Tableau II.17 : Caractéristique mécanique et physique du ciment utilisé (Lafarge M'sila).

II .5. Les ajouts :

Le laitier granulé : le laitier utilisé dans notre étude est d'Al Hadjar (Annaba)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cao	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	chlorures	Perte au feu	Surface spécifique
38.66	8.62	43.97	1.69	5.35	0.92	0.62	0.12	0.03	0.77	4200

Tableau II .18 : Les compositions chimique de laitier granulé utilisé.

II .6. Les adjuvants :

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils modifient en les améliorant les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés (en faible proportion: < 5 % du poids de ciment). Tous les adjuvants font l'objet de la norme de définition et des exigences NF EN 934-2 ainsi que d'une marque de qualité NF Adjuvants. Dans notre étude on a utilisé les super-plastifiants MEDAPLATS SP 40 de Granitex.

MEDAPLATS SP 40 est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité, en plus de sa fonction principe de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton

II .6.1. Caractéristiques :

Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Marron	8,0 – 8,5	1,19	1g /L	40%

Tableau II .19 : Caractéristiques de MEDAPLATS SP 40.

II .6.2. Dosage :

La page de dosage recommandée est : 1.5% du poids de ciment, Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

II.7. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est l'eau distille

CHAPITRE III

Techniques

Expérimentales

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.1. Introduction :

Le but de notre travail est l'étude de l'effet de laitier granulé sur les propriétés des mortiers à haute températures, ce chapitre est consacré à la recherche expérimentale des résultats obtenus du programme d'essais sont présente une discussion de ces résultats.

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques mécaniques de six compositions de mortier à savoir :

- Composition 1 : mortier formulé avec 15% de laitier granulé;
- Composition 2 : mortier formulé avec 20% de laitier granulé;
- Composition 3 : mortier formulé avec 25% de laitier granulé;
- Composition 4 : mortier formulé avec 15% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant ;
- Composition 5 : mortier formulé avec 20% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant ;
- Composition 6 : mortier formulé avec 25% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant.

III.2. Composition du mortier :

- Pourcentage de laitier granulé (de 15% à 20% et 25%)
- le dosage du super plastifiant (1.5%)

Avec :

SD : sable de dune

SC : sable concacé

	Ciment(g)	Sable(g) (1/3)SD+(2/3)SC	Laitier granulé	Super plastifiant	Rapport E/C
Composition1	450	1350	15%	0 %	0.53
Composition2	450	1350	20%	0 %	0.53
Composition3	450	1350	25%	0 %	0.53

Tableau III.1 : Les compositions des mortiers sans super plastifiant

	Ciment(g)	Sable(g) (1/3)SD+(2/3)SC	Laitier granulé	Super plastifiant	Rapport E/C
Composition4	450	1350	15%	1.5 %	0.49
Composition5	450	1350	20%	1.5 %	0.49
Composition6	450	1350	25%	1.5 %	0.49

Tableau III.2: Les compositions des mortiers avec super plastifiant.

III.3. La confection des éprouvettes :

Pour la préparation des éprouvettes, nous avons procédé de la façon suivante :

➤Préparer une série des moules des dimensions 4×4×16 cm (Figure III.1 a) convenables, avec la quantité du mortier ;



Figure III.1 a : Les moules des mortiers.

- Huiler les moules et vérifier leurs serrages ;
- Placer les moules sur une table vibrante ;
- Remplir les moules par le mortier, l'exécuter en deux couches ;
- Compacter le mortier à l'aide d'une table vibrante (Figure III.2), en appliquant 120 secondes. Il faut qu'elle soit bien arasée à l'aide d'une règle métallique et placée lentement sur la face du moule ;
- Conserver les moules dans la chambre d'humidité jusqu'au démoulage (Figure III.3) ;
- Démouler les moules après 24 heures de leur confection.



Figure III.1 b: Malaxeur.



Figure III.2 : Table vibrante.



Figure III.3 : Armoire d'humidité.

III.4. Conservation des éprouvettes :

Après **24** h de la confection des éprouvettes et après le décoffrage on les conserve dans : l'eau de robinet.

Le temps de conservation dans l'eau est 2 jours, 7 jours et 28 jours.

Après la conservation dans l'eau dans la chambre de conservation pendant le temps nécessaire.

Finalement les éprouvettes ont été exposées à une température élevée variant de 20°C, 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de la montée en température de 10°C/min (Figure III.4). Le procédé expérimental appliqué repose sur chargement thermique puis mécanique.



Figure III.4 : Le four (Heraeus).

III.5. A l'état frais des mortiers :

III.5.1. Définition :

Le béton est un matériau de construction formé par un mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable, il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon sa formulation, sa mise en œuvre et ses traitements de surface, ses performances et son aspect peuvent considérablement varier.



Figure III.5 : Mesure de la fluidité du mortier.

III.6 : A l'état durci de mortiers :**III.6.1. Essai de compression (NF P 18-406)****➤ But de l'essai :**

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;
- granulométrie et nature du sable;
- énergie de malaxage et mise en œuvre;
- protection les tous premiers jours.

❖ Objectif de l'essai :

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

❖ Principe de l'essai :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

❖ Equipement nécessaire :

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessous. Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %.

Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes 4×4×16").

Une table vibrante permettant d'appliqué 120 second aux moles.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé

Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la (Figure III.6).

❖ Conduite de l'essai

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

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule $4 \times 4 \times 16$. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 120 secondes dans la table vibrante. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20 \text{ C}^\circ \pm 1 \text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous :

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	~28 j
Précision	$\pm 15 \text{ min}$	$\pm 30 \text{ min}$	$\pm 45 \text{ min}$	$\pm 2 \text{ h}$	$\pm 8 \text{ h}$

III.6.1.1. Expression des résultats :

On retient pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et on calcule la résistance (R) par la relation suivante :

$$R = F/S$$

Où : F : est la charge maximale (en KN).

S : est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carrée.

R : la résistance à la compression exprimée en MPa.



Figure III.6 : Appareil de flexion et de compression (Toni Technic).

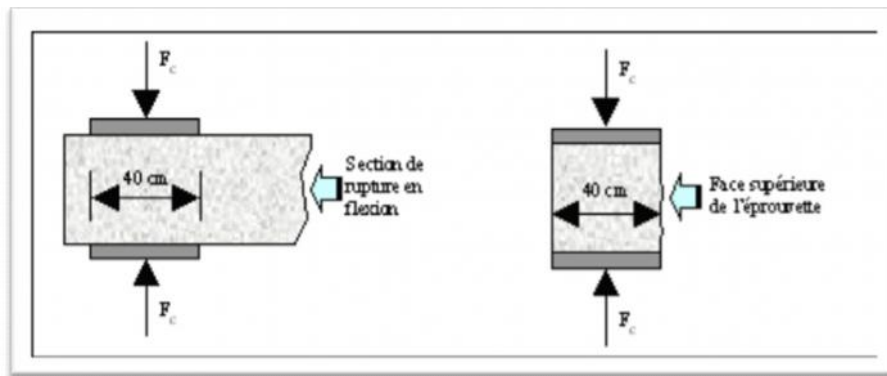


Figure III.7 : Dispositif de rupture en compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront écrasés en compression comme indiqué sur la figure III.7. Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_C est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$R_c (MPa) = \frac{F_c (N)}{1600}$$

III.6.2. Résistances à la traction (NF P 18- 408) :

L'essai le plus courant est l'essai de traction par flexion. Il s'effectue en général sur des éprouvettes prismatiques d'élancement 4, reposant sur deux appuis, sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges).

❖ Principe de l'essai:

Cet essai consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique, de côté **a** et de longueur **4a**.

❖ Equipement nécessaire:

Une machine d'essai de flexion de dimensions appropriées à l'éprouvette à tester répondant aux prescriptions des normes en vigueur.

❖ Conduite de l'essai:

Ce test a été réalisé sur des éprouvettes de mortier de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm à des âges 2, 7 et 28 jours.

L'éprouvette était placée symétriquement entre les éléments de l'appareil de la flexion (Figure III.8). Deux de ces éléments servaient d'appuis, le troisième était destiné à appliquer un moment fléchissant au milieu de l'éprouvette. Après rupture de cette dernière les valeurs sont lues directement sur la règle de l'appareil d'essai ; la charge de rupture (en N), la contrainte de traction (en N/cm^2) et la contrainte de flexion (en N/cm^2). Les deux morceaux obtenus étaient marqués et testés en compression.

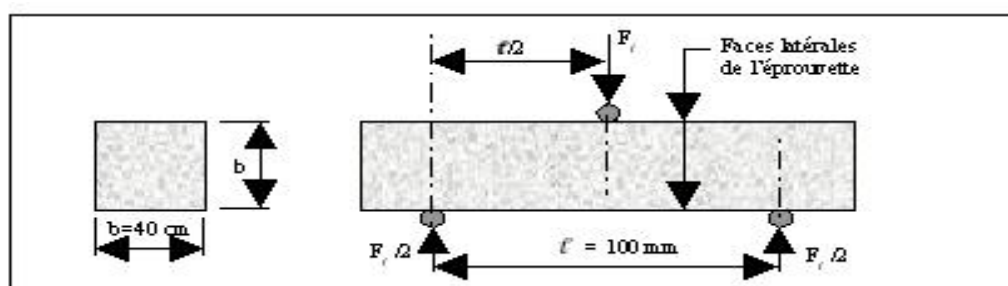


Figure III.8 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

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

$$R_f = \frac{1.5 l F_f}{b^3}$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_f (\text{MPa}) = 0.234 F_f (\text{N}).$$

III.6.3. Estimation de perte de masse :

Les éprouvettes conservées dans l'eau ont été pesées d'abord, ensuite elles sont exposées aux fortes températures 20°C , 200°C , 400°C , 600°C .

Les taux de diminution de la masse des éprouvettes est déterminé à partir :

$$T(\%) = (m \times 100) / m_1$$

$$m = m_1 - m_2$$

T: taux de perte de masse.

m_1 : poids avant expositions à la température.

m_2 : poids après expositions à la température.

CHAPITRE IV

Resultats

Et

Interpretations

Chapitre IV: Résultats et interprétations**IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre nous présentons les différents essais effectués sur les matériaux utilisés pour la formulation du mortier avec laitier granulé, ainsi que les essais réalisés sur le mortier confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état durci.

Avec:

- Composition 1 : mortier formulé avec 15% de laitier granulé;
- Composition 2 : mortier formulé avec 20% de laitier granulé;
- Composition 3 : mortier formulé avec 25% de laitier granulé;
- Composition 4 : mortier formulé avec 15% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant ;
- Composition 5 : mortier formulé avec 20% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant ;
- Composition 6 : mortier formulé avec 25% de laitier granulé et 1.5% de super plastifiant.

IV.2. Résultat des essais a l'état frais

Les Résultat des essais à l'état frais sont représentés au tableau suivant :

- **L'affaissement**

Compositions des mortiers	L'affaissement (cm)
Composition 1	4
Composition 2	4
Composition 3	4
Composition 4	4
Composition 5	4
Composition 6	4

Tableau IV.1 : L'affaissement des mortiers.

IV.3. Résultats des essais à l'état durci

IV.3.1. Résistance mécanique à la compression :

Les figures suivantes présentent les résultats de la résistance à la compression en fonction de température.

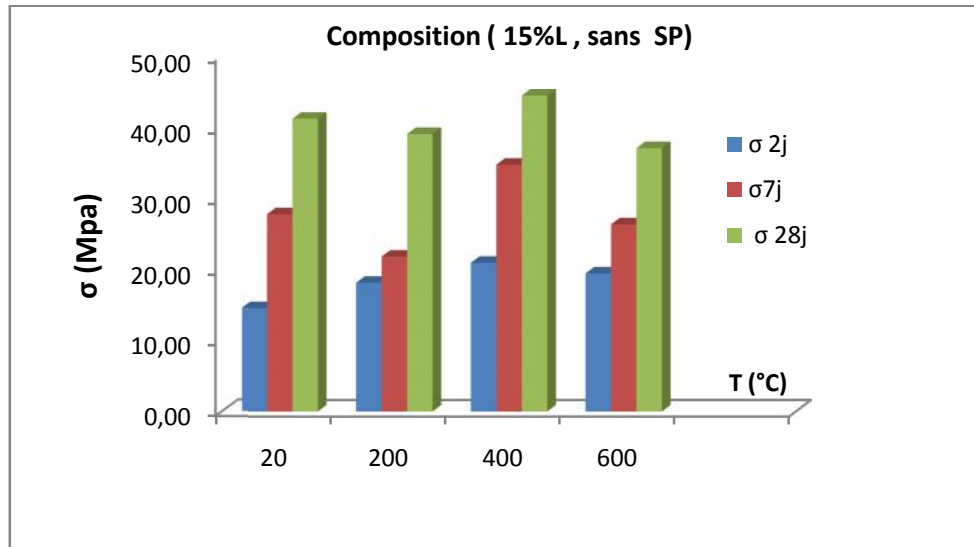


Figure IV.1: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 1)

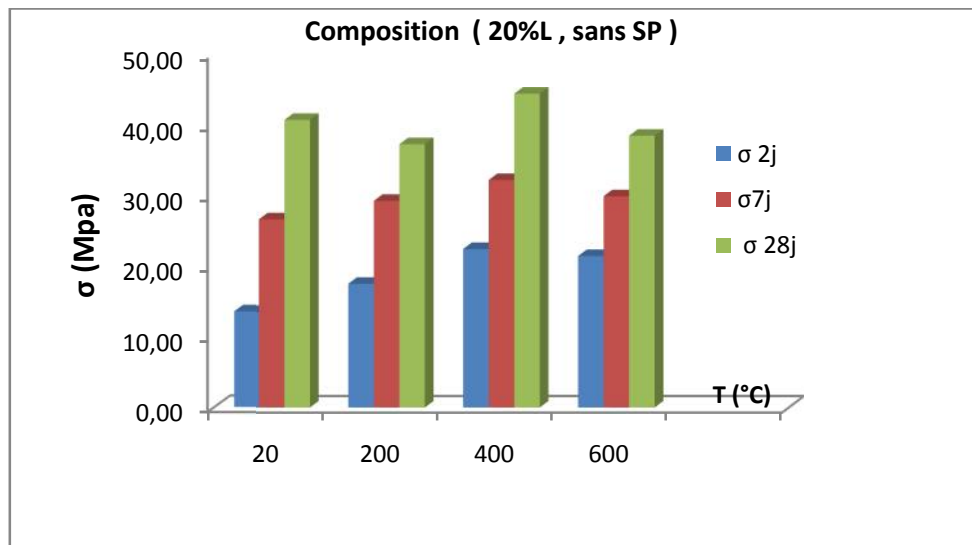


Figure IV.2: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 2)

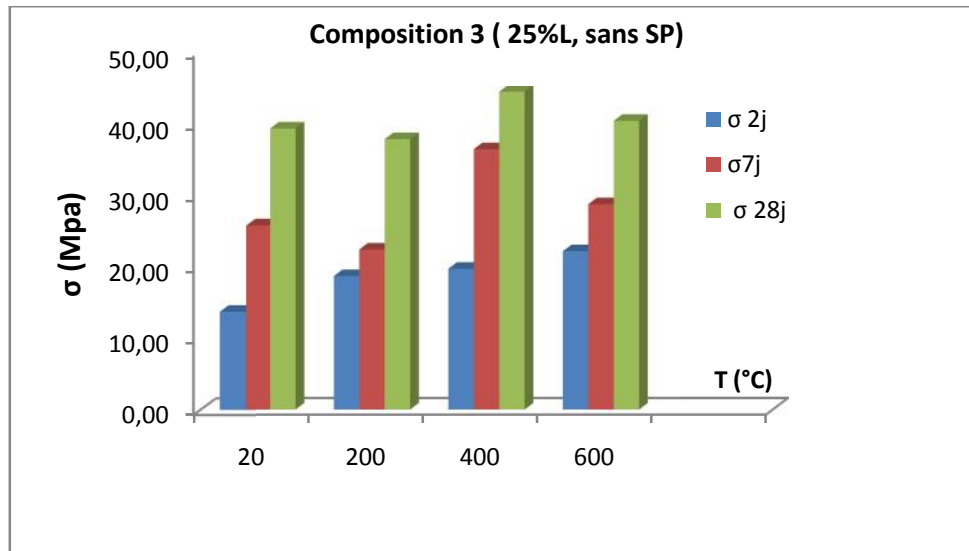


Figure IV.3: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 3)

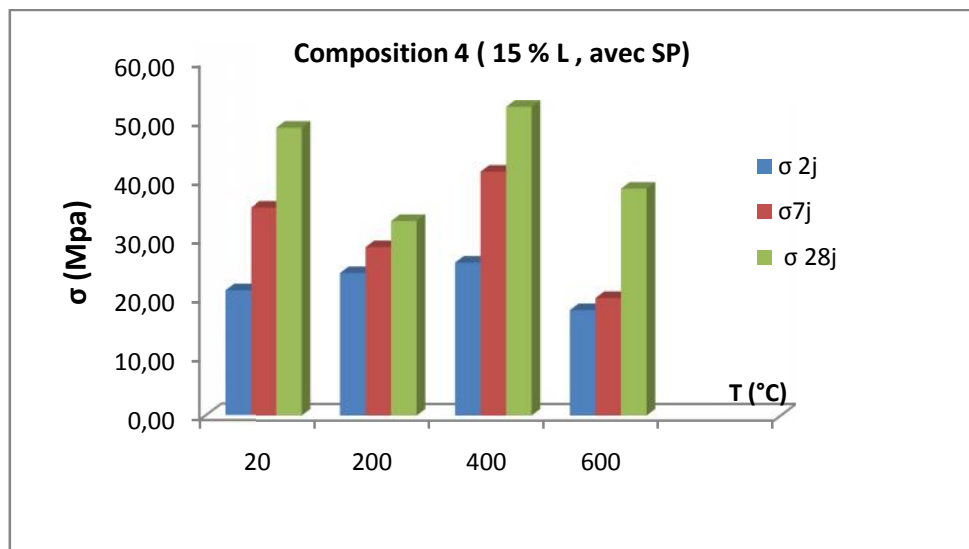


Figure IV.4: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 4)

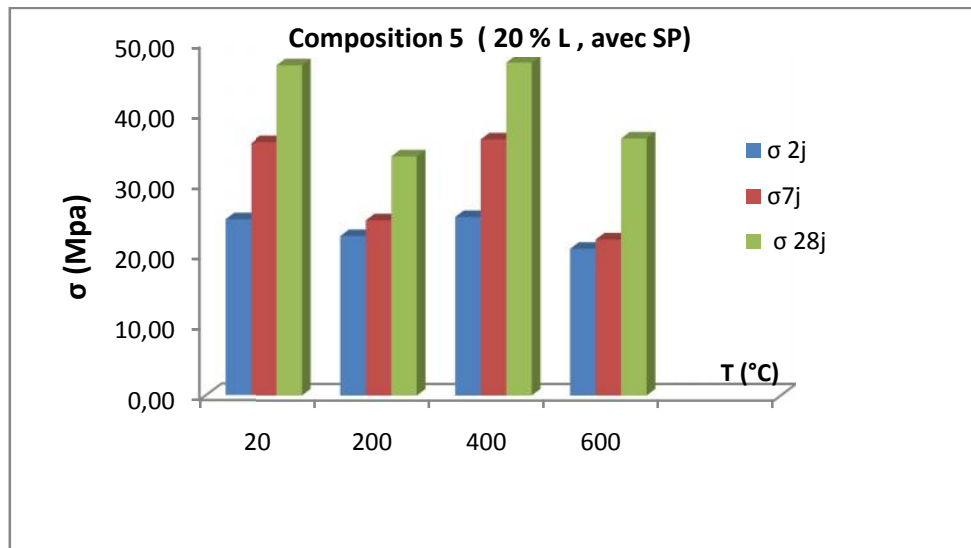


Figure IV.5: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 5)

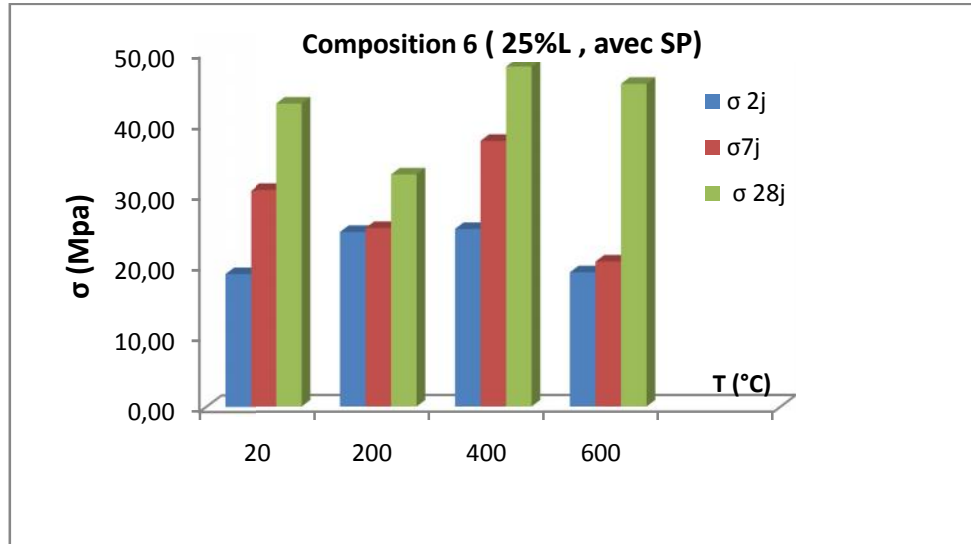


Figure IV.6: Résistance mécanique en fonction de la température (Composition 6)

IV.3.2. Résultats de la résistance mécanique des mortiers à la flexion

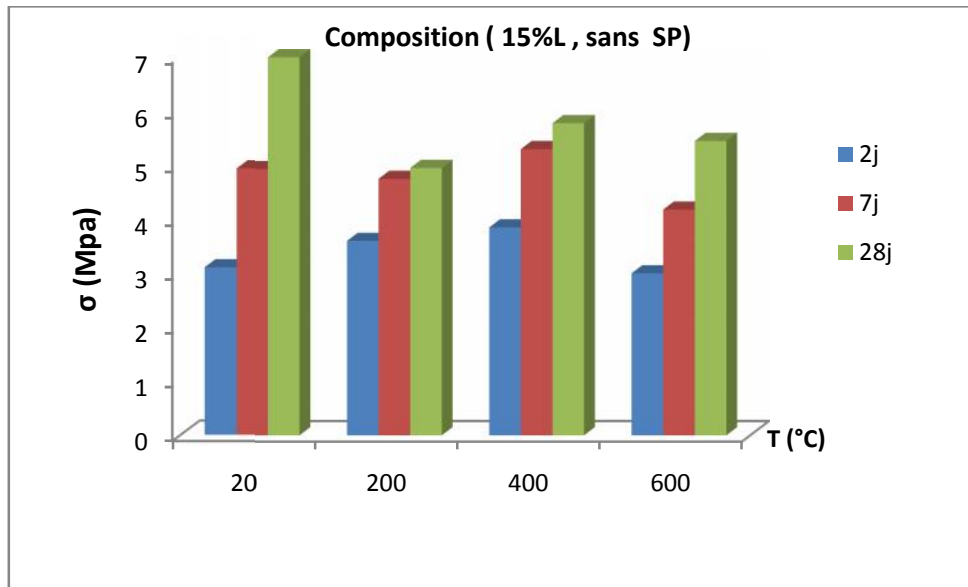


Figure IV.7: Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 1)

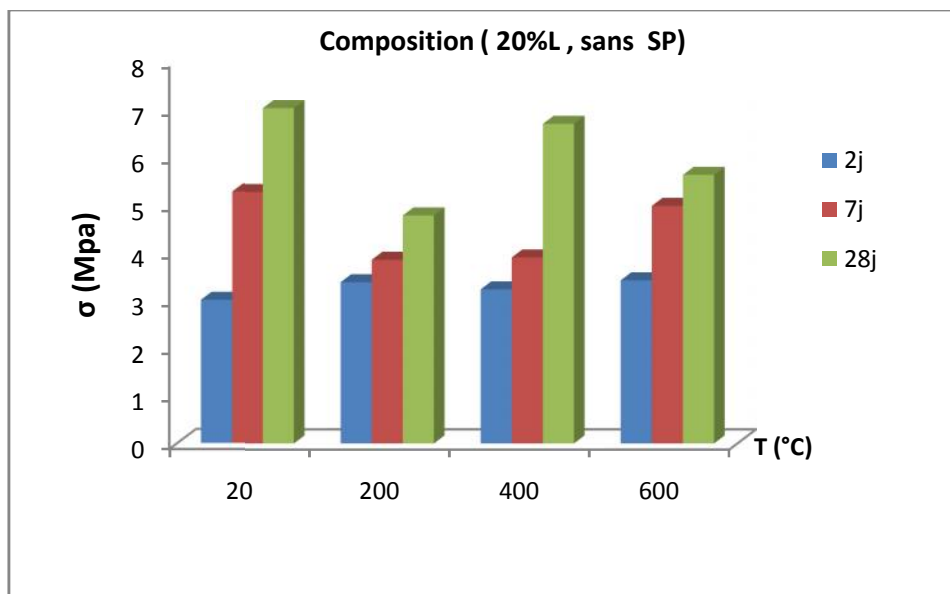


Figure IV.8: Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 2)

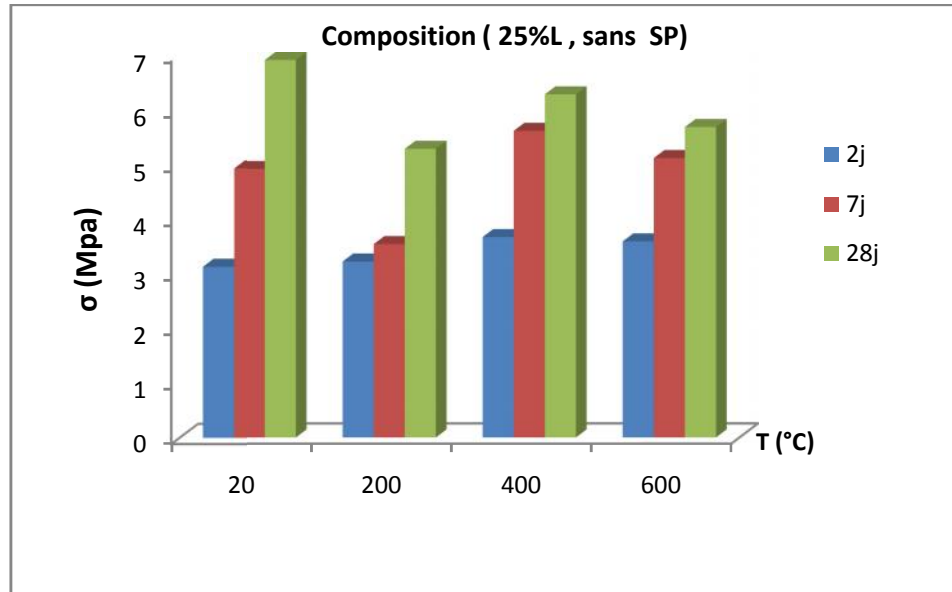


Figure IV.9: Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 3)

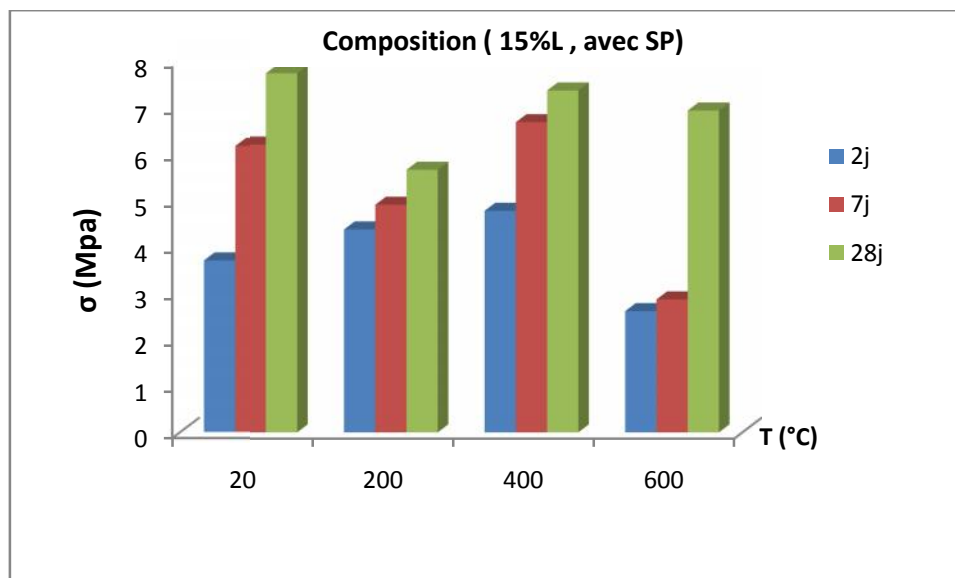


Figure IV.10: Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 4)

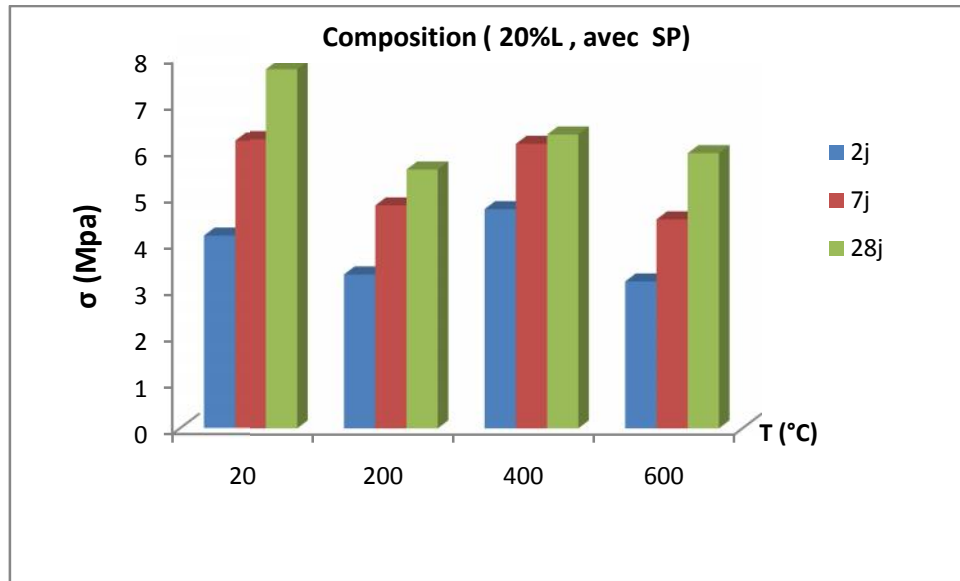


Figure IV.11: Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 5)

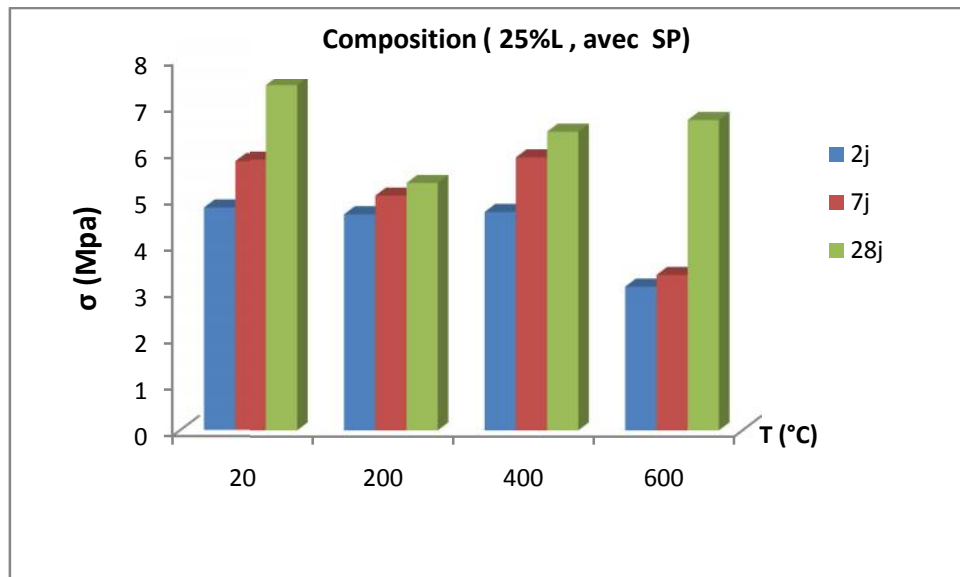


Figure IV.12 Résistance a la flexion en fonction de la température (Composition 6)

IV.4. La perte de masse

Les figures représentent les résultats de la perte de masse en fonction de la température.

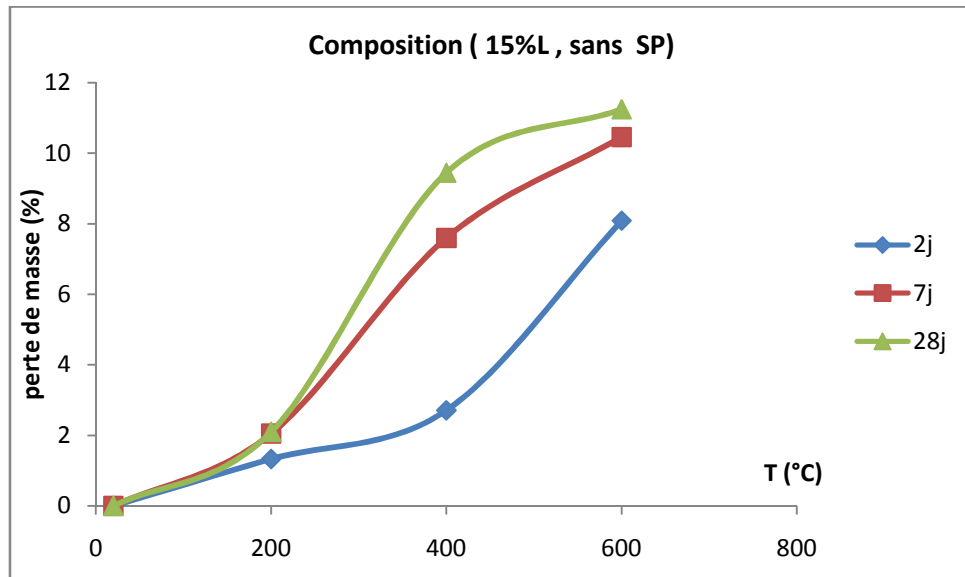


Figure IV.13: Perte de masse en fonction de la température (Composition 1)

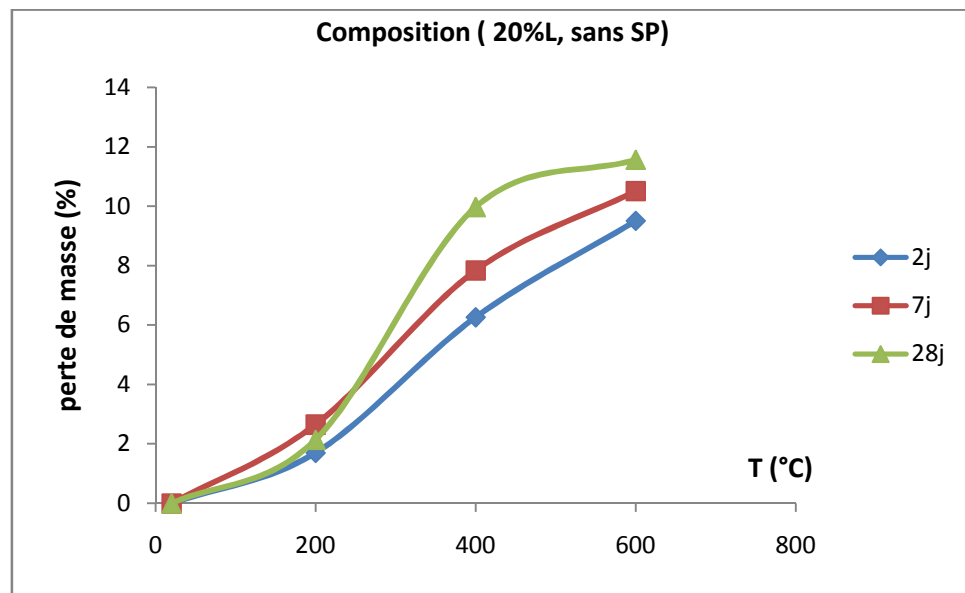


Figure IV.14: Perte de masse en fonction de la température (Composition 2)

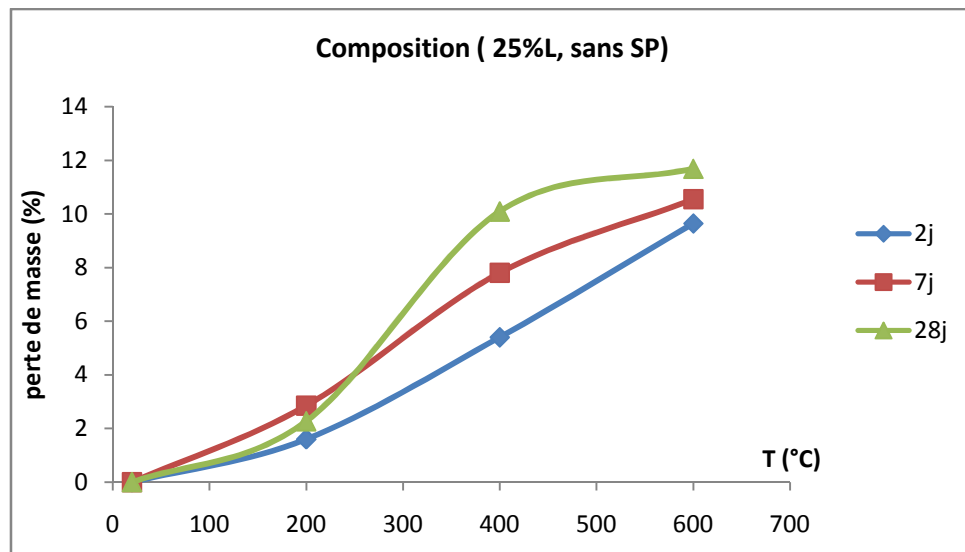


Figure IV.15: Perte de masse en fonction de la température (Composition 3)

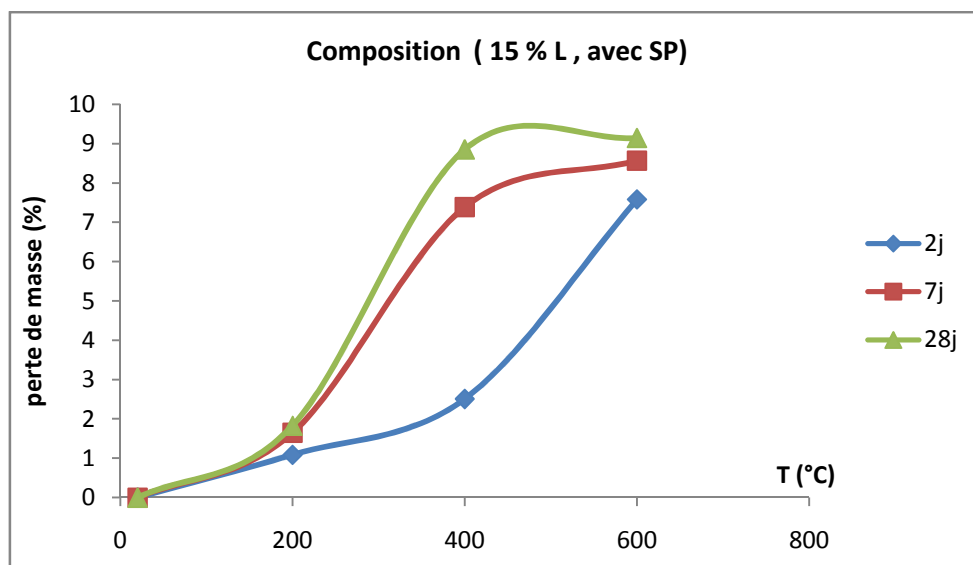


Figure IV.16: Perte de masse en fonction de la température (Composition 4)

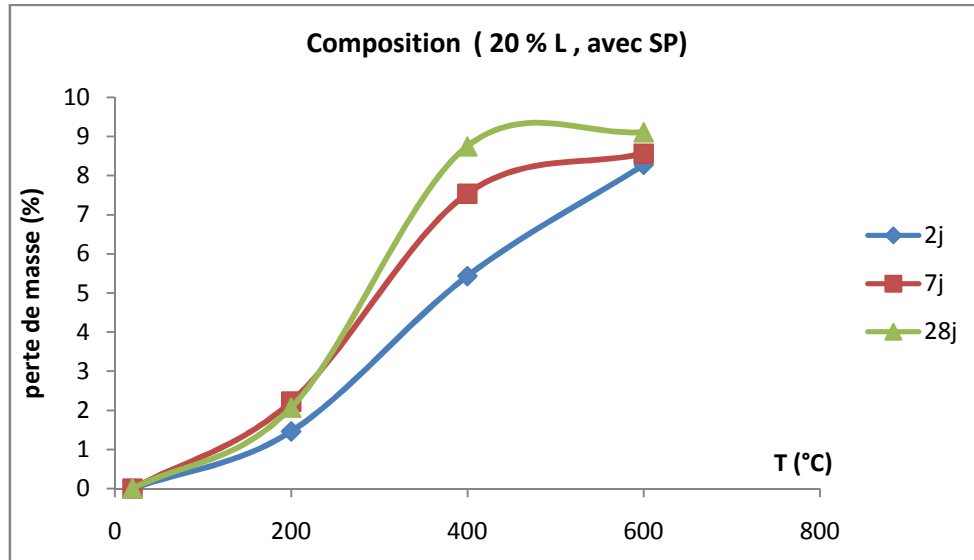


Figure IV.17: Perte de masse en fonction de la température (Composition 5)

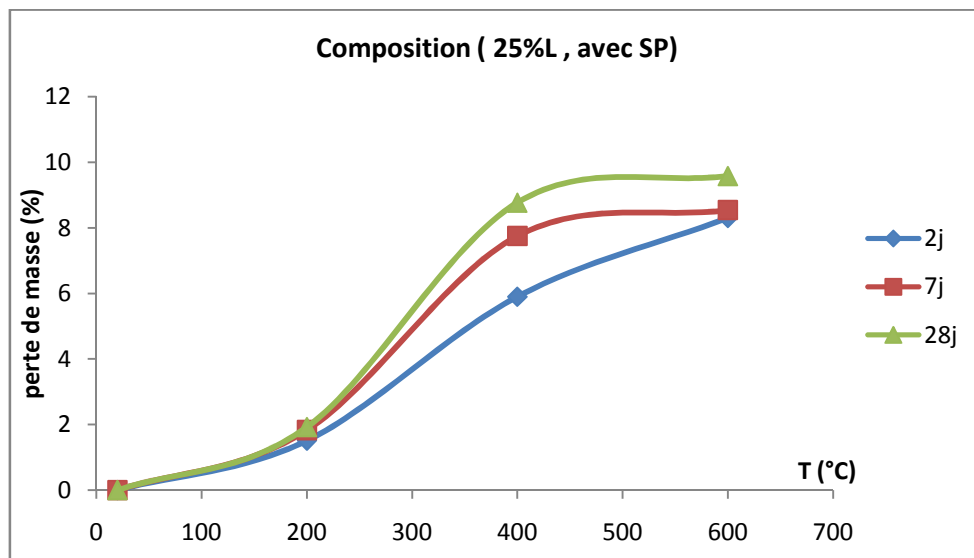


Figure IV.18: Perte de masse en fonction de la température (Composition 6)

IV.5. Perte de masse et la résistance mécanique en fonction de la température

Les figures suivantes représentent les résultats de la résistance mécanique, la perte de masse en fonction de la température.

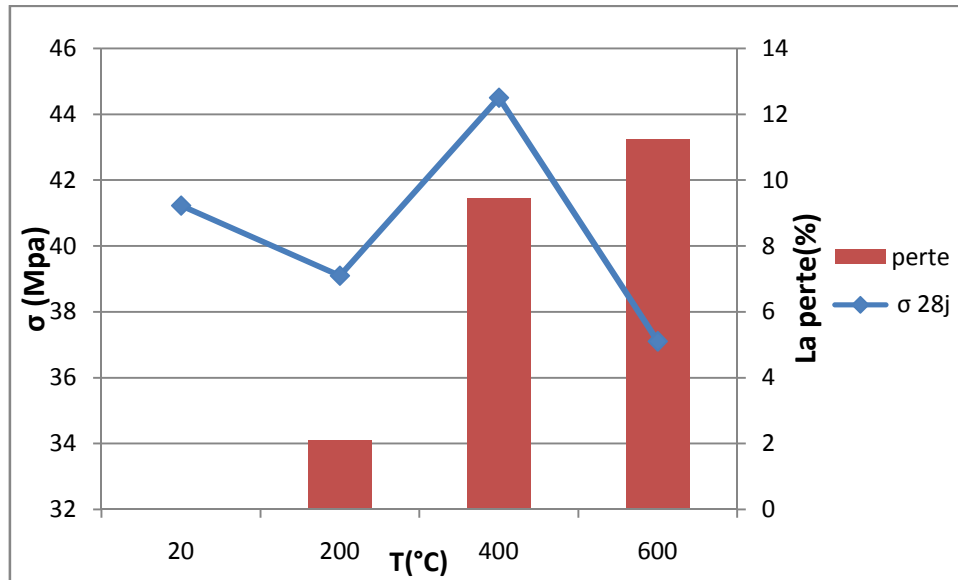


Figure IV.19: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition1)

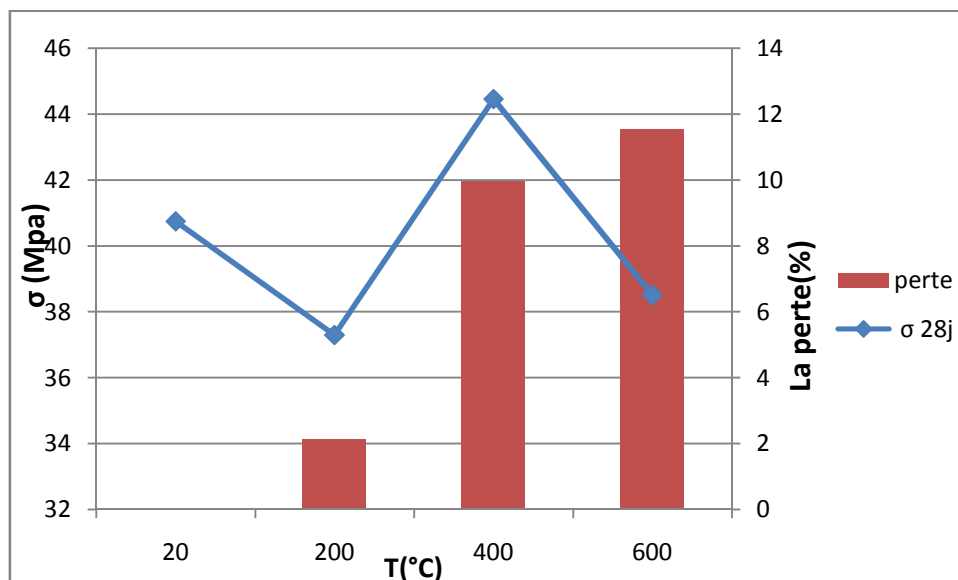


Figure IV.20: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température (Composition2)

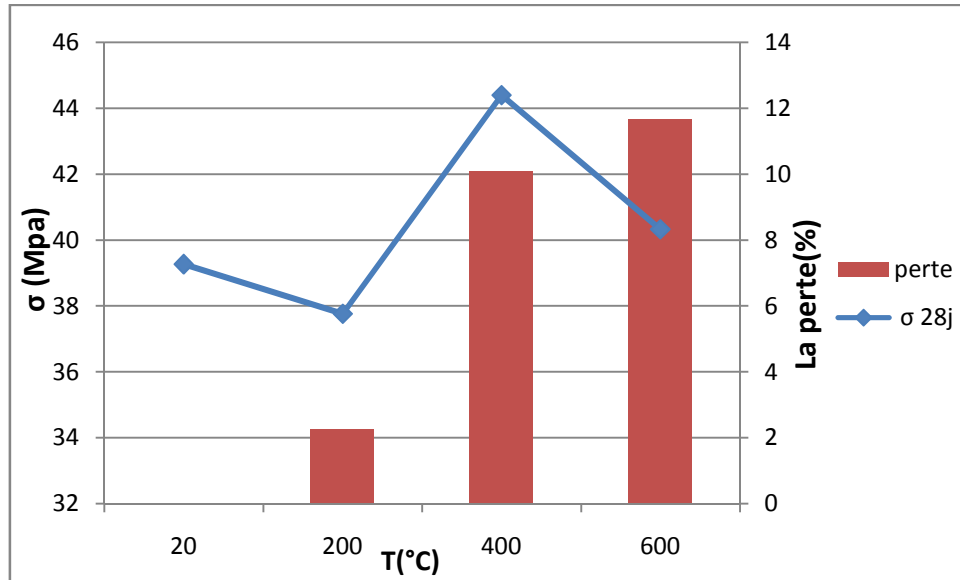


Figure IV.21: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température
(Composition3)

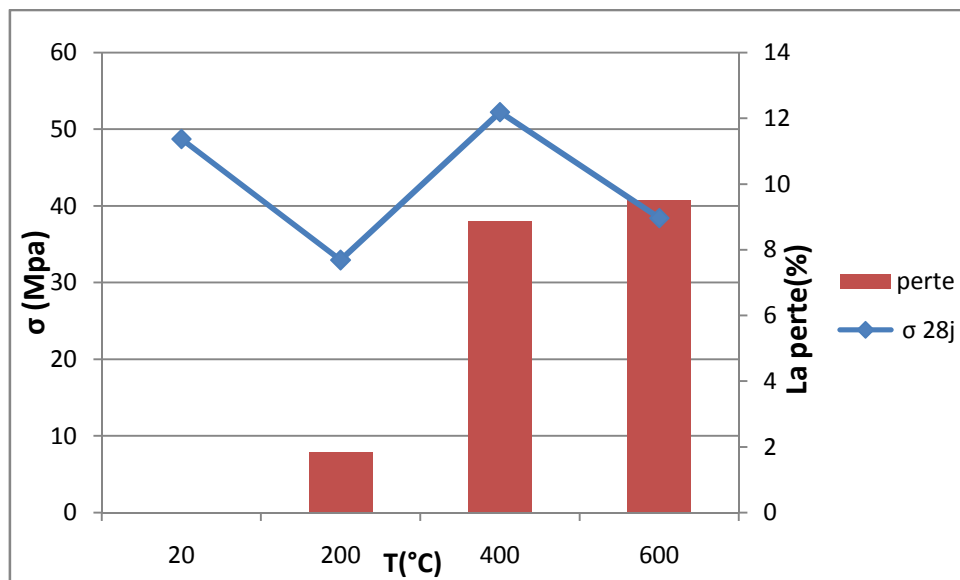


Figure IV.22: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température
(Composition4)

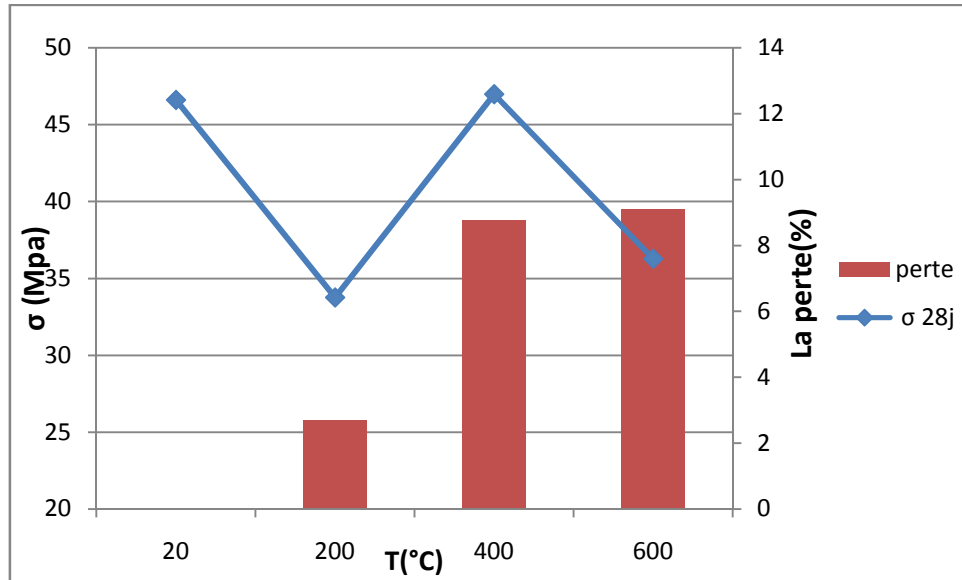


Figure IV.23: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température
(Composition5)

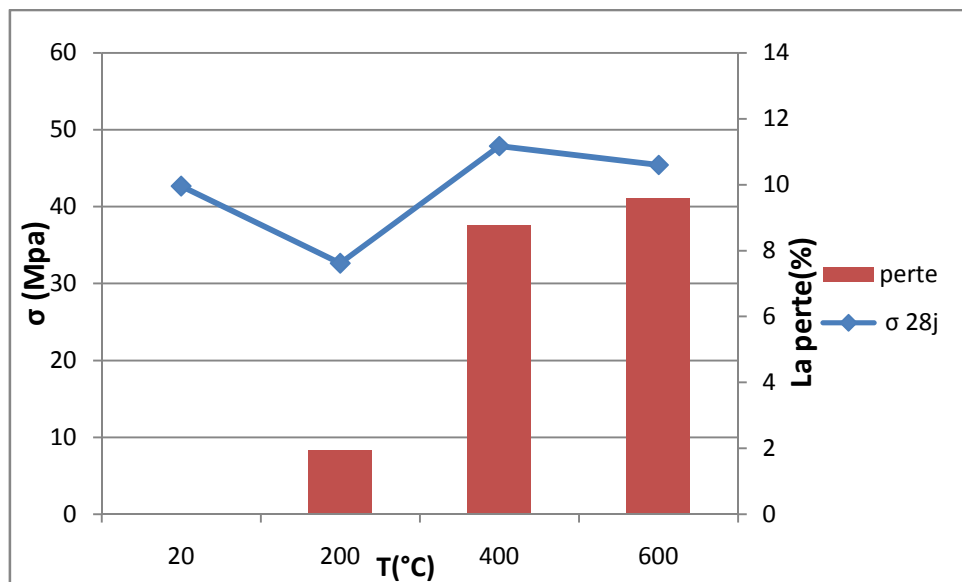


Figure IV.24: Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température
(Composition6)

IV.6. L'interprétation des résultats**IV.6.1. La résistance a la compression :**

On remarque qu'à 400 °C les compositions (1, 2,3) des mortiers présentent un pic de résistance. Au delà de ce pic la résistance chute à 600°C comme le montre les figures (IV. 1), (IV.2) et (IV.3).

D'après les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6) on remarque quand on ajoute le superplastifiant (compositions (4), (5) et (6)) on a une augmentation de la résistance mécanique a 20°C et avec une valeur maximal à 400°C.

L'analyse des résultats des figures (IV.1), (IV. 2), (IV.3), (IV.4), (IV.5) et (IV.6) montre que la résistance mécanique à 2j et 7j augmente simultanément avec l'augmentation à 28j quelque soit la température.

On constate aussi une dégradation du matériau en fonction de l'augmentation de la température jusqu'à 600°C sans éclatement pour les différents pourcentages de laitier.

IV.6.2. La résistance à flexion :

On observe une diminution de la résistance à la flexion avec l'augmentation de la température par rapport a 20°C. En comparaison avec la compression on peut dire que la résistance à la flexion est plus influencé par la montée de la température comme le montre les figures (IV.7), (IV, 8), (IV.9), (IV.10), (IV.11) et (IV.12).

IV.6.3. La perte de masse :

On remarque que la perte augmente progressivement avec l'augmentation de la température jusqu'à 600°C avec une valeur maximale environ 12% dans les compositions (1, 2,3) voir les Figures (IV.13), (IV.14), et (IV.15).

Dans les compositions (4,5,6) on remarque une augmentation de perte de masse progressivement avec l'augmentation de la température jusqu'à 10% à 600°C comme le montre les figure (IV.16), (IV.17) et (IV.18).

IV.6.4. Perte de masse et résistance à la compression en fonction de la température :

D'après les figures de **IV.19 à IV.24** on peut dire que :

- La perte de masse est maximal a 600°C quelque soit la formulation.
- L'augmentation de la perte de masse est accompagnée avec une chute de résistance mécanique.
- Par contre, on remarque que les résistances à la compression chutent à 200°C par rapport à 20°C et 400°C pour toutes les formulations.
- On obtient les meilleurs résistances à 400°C quelque soit la formulation.
- La composition (4) donne des valeurs minimales en perte et des valeurs maximales des résistances en compression.
- La composition (3) présente une perte de masse importante.

IV.7. Conclusion :

En conclusion on peut dire que le comportement à température ambiante des mortiers est bien connu. Par contre sous traitement thermique, la microstructure de béton subit d'importantes modifications physico-chimiques.

Le mortier formulé avec 15% de laitier granulé présente la perte la plus faible à 200°C, ce qui implique que la quantité d'eau liée aux grains est plus importante que dans les autres cas ainsi que la quantité d'eau nécessaire à la réaction. Le départ de l'eau libre et celle physiquement absorbée se situe à 105°C comme le souligne [5]. Aux températures 400°C et 600°C, les pertes de masse des différents mortiers sont voisines. Entre 400 et 600°C ; la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se décompose en chaux libre et il est noté la formation d'un réseau des microfissures connectées. La variation de la perte de masse des mortiers entre 200°C et 400°C est plus considérable qu'entre 400°C et 600°C. Au delà de 200°C et jusqu'à 400°C, la porosité totale croie progressivement et le réseau poreux interconnecté devient plus grossier comme le note Khalifa [10]. Une perte de l'eau libre à 200°C, une perte de l'eau chimiquement liée entre 200°C et 400°C et une perte liée aux dégradations des granulats entre 400 et 600°C.

CONCLUSION GENERALE

L'élévation de la température entraîne une déshydratation des composés hydratés de la pâte de ciment durcie. On a une formation d'eau libre dans les réseaux poreux du matériau susceptible de s'évaporer et donc de générer une perte de masse pour un échantillon donné.

L'effet de la température élevée sur la perte de masse n'a été visible qu'à la première température (200°C), car l'évaporation se produit à une température voisine de (100°C). Cette déshydratation provoque des modifications microstructurales qui influent sur les résistances mécaniques. On a pu noter qu'à 200°C, les valeurs des résistances en flexion sont plus faibles que celles à la température ambiante. En compression toutes les formulations de mortier présentent une augmentation de la résistance à 400°C comparativement à celle à 200°C.

Au-delà de 400°C, toutes les compositions subissent des chutes de la résistance. A 600°C la chute des résistances continue, on note toutefois un regain de la résistance par rapport à celle à 200°C cela pourrait s'expliquer par une rigidification de la matrice et une accélération de l'hydratation.

- Aux températures 400°C et 600°C, les pertes de masse des différents mortiers sont voisines.
- La variation de la perte de masse des mortiers entre 200°C et 400°C est plus considérable qu'entre 400°C et 600°C. Au-delà de 200°C et jusqu'à 400°C, la porosité totale croît progressivement.
- Toutes les compositions des mortiers présentent un pic de résistance à 400°C dans toutes les formulations.
- On constate une dégradation progressive du matériau en fonction de l'augmentation de la température jusqu'à 600°C sans éclatement pour les différents pourcentages de laitier granulé.
- Les phénomènes de perte de masse au cours de l'augmentation de la température s'expliquent par la perte progressive de l'eau contenue dans le mortier : une perte de l'eau libre à 200°C, une perte de l'eau chimiquement liée entre 200°C et 400°C et une perte liée aux dégradations des granulats entre 400°C et 600°C.
- Avec l'ajout de superplastifiant le matériau devient plus stable en fonction de la température.
- Nous recommandons de poursuivre ce travail par des études avec des pourcentages inférieurs de 15% de laitier granulé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] : **Mounir Bellem** « Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers » **mémoire de master**, université de M'sila, juin 2013.

[2] : **SOPHIE Housson** « étude physique chimique et mécanique des interactions ciment-filler. Application aux mortiers » .thèse de l'institut national polytechnique de grenoble et de l'école nationale supérieure des mines de **Saint-Etienne** (spécialité : Génie des procédés).

[3] : **ABDALLAH HASSAN HAROUN** « Influence de la nature du sable sur le comportement d'un BHP a température élevées » mémoire de master **ABDALLAH HASSAN HAROUN M'sila**. 2012/2013

[4] : **MENNAI AMOR** « contribution a l'étude rhéologique d'un béton à hautes performances (BHP) local » mémoire de **SKIKDA**.

[5] : **Feraille-fresnet A**, « le rôle de l'eau dans le comportement a haute température des béton » thèse de doctorat, ENPC **Paris**, 2000.

[6] : **TOUMI Belkacem** « étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton » thèse de doctorat **TOUMI Belkacem CONSTANTINE** 2009.

[7] : **CASTELLOTEAM, ALONSOA.C, ANDRADEA.C, TURRILLASA.X, CAMPOC.J**
« Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied byneutron diffraction » **cement and concrete research** **341633-1644, 2004**.

[8] : **(J.P.) BOMBLED** « Rhéologie du béton frais : influence des ajouts de fillers au ciment ». 8th Congrès Int. De Chimie des Ciments, RIO DE JANEIRO., IV, 190-196, Sept 1986.

[9] : **(F.) De LARRARD**. « Formulation et propriétés des bétons à très hautes Performances ». Thèse. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, rapport de Recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1987.

[10] : **KHALIFA P. et Tsimbroška M** « Comportement des BHP a haute température : état de la question et résultats expérimentaux », Cahier du CSTB, vol.394, n°3078,1998.

RESUME

L'élévation de la température dans le mortier entraîne une destruction des hydrates constitutifs de la pâte de ciment durcie. Cette destruction implique un affaissement du matériau par dégradation de ses propriétés mécaniques : rigidité et résistance. L'élévation de la température génère également des pressions de fluides importantes au niveau de la porosité du matériau pouvant conduire à l'endommagement de celui-ci. Cet endommagement se conjugue à l'endommagement généré par le chargement mécanique. La prévision du comportement aux hautes températures implique donc la connaissance de l'évolution des variations des propriétés mécaniques.

Cette étude s'articule sur la comparaison de l'évolution des résistances résiduelles, en flexion, en compression mécanique et la perte de charge de six formulations des mortiers avec des pourcentages différents de laitier. Il s'agit de trois formulations des mortiers avec ajout de fillers sans super plastifiant, trois formulations des mortiers avec laitier plus un super plastifiant.

Les résultats obtenus montrent le bon comportement des mortiers à haute température environ 400°C alors que la diminution de la résistance en compression est négligeable par rapport à la résistance à la flexion qui est très influencée par la montée en température. L'effet de l'ajout de laitier sur la perte de masse n'a été visible qu'à la première température (200°C), car l'évaporation se produit à une température voisine de 100°C.

Mots clés : Mortier, Résistance mécanique, Haute température, Perte de masse, laitier granulé.

Abstract

The rise in temperature in the mortar caused a destruction of the constituent carbohydrates of the cement paste hardened. This destruction implies a subsidence of the material by degradation of its mechanical properties: stiffness and strength. The temperature rise also generates significant fluid pressure at the level of the porosity of the material which may lead to damage to it. This damage is combined with the damage generated by mechanical loading.

Prediction of the behavior at high temperatures therefore implies the knowledge of the evolution of the variations of mechanical properties.

This study focuses on the comparison of the evolution of residual resistance, flexural, mechanical compression and the loss of six formulations of mortars with different percentages of slag. It's three formulations of mortars with addition of fillers without super plasticizer, three mortars with slag formulations more a super plasticizer.

The results show the good behavior of mortars at high temperature approx. 400 ° C while the reduction in compressive strength is negligible compared to the resistance has flexion which is heavily influenced by the rise in temperature. The effect of the addition of slag on the mass loss was visible that has the first temperature (200 ° C), because the evaporation occurs at a temperature near 100 ° C.

Key words: mortar, mechanical strength, high temperature, loss of mass, granulated slag

المخلص

إن ارتفاع في درجة الحرارة على الملاط يؤدي الى تفكيك الروابط المهددة المكونة لعجينة الاسمنت المتصلب. هذا التفكك يؤدي الى تطبيق هبوط في المادة و ترهل في خصائصها الميكانيكية: الصلابة و المقاومة .

إن ارتفاع في درجة الحرارة تؤثر على المادة بضغطات في المادة السائلة على مستوى مساميتها التي تحطم هذه الأخيرة. إن التطور الجيد لهيكل المادة الخاضعة لدرجات الحرارة العالية يسمح لنا بمعارف أكثر في معرفة التغيرات الميكانيكية.

ترتكز هذه الدراسة على مقارنة تطور المقومات الانحناء مع الشد , الضغط الميكانيكي و فقدان الوزن على ستة عينات من الملاط بنسب مختلفة لمادة خبث الأفران. الدراسة تخص ثلاثة تركيبات بخبث الأفران بدون ملدنات تقابلها ثلاثة تركيبات أخرى مع إضافة ملدن.

النتائج المتحصل عليها تظهر الهيكل الجيد للملاط تحت تأثير درجات الحرارة العالية في حدود 400 درجة مئوية تنبع في تناقص المقاومة الميكانيكية التي تكون مهمة مقارنة بمقاومة الانحناء. هذه الأخيرة التي تتأثر بارتفاع درجة الحرارة.

إن تأثير خبث الأفران على فقدان الكتلة ليس محسوسا إلا في درجة الحرارة 200 درجة مئوية بسبب تبخر الماء في درجة حرارة تقارب 100 درجة مئوية.

المفاتيح: الملاط , المقاومة الميكانيكية , الحرارة العالية , فقدان الوزن , خبث الأفران.