



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

*Etude du comportement d'un béton à
haute performance (BHP) avec des fibres
de verre soumis à haute température*

Dirigé par :
Dr. BELAGRAA Larbi

Présenté par :
CHOUITER Youcef

Promotion: 2015/2016.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mon père, et ma mère

A mes frères et sœurs :ZIAD

A mes tantes et oncles

A ma famille

A mes très chers amis

A tout qui se donne à fond à la recherche scientifique

Et enfin à toute la promotion 2015/2016

Master Matériaux

DAHMANI SALAH

Remercient

Au mon dieu le Clément et Miséricordieux

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

Je remercie ainsi : Dr.Belagraa Larbi et Mr. Gandouz Antar.

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.*
- *Tous les gens qui nous ont aidé de près au de loin dans la réalisation de ce modeste travail*

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralité sur béton haute performance.	
I.1. Introduction :	3
I.2. Historique :	3
I.3. Applications des BHP :.....	4
I.4. Voies d'obtention des BHP :.....	6
I.4.1. Utilisation d'une nouvelle génération de superplastifiants:	6
I.4.2. L'amélioration de l'étendu granulaire :.....	11
I.5. Conclusion :.....	11
Chapitre II Généralité sur fibre de verre.	
II .1 Introduction :	15
II .2. Le béton de fibres:.....	15
II .3 Historique du béton de fibres :.....	16
II .4. Les fibres :.....	17
II .5. Les types des fibres :	17
II.5. 1. Les fibres de verre « E » et « AR » :	18
II.5. 1. Propriétés des fibres de verre :.....	18
II.5.2 : Rôle de fibre:.....	18
II .6. Applications:	19
II .6. 1. Avantage:	20
II.6. 2. Désavantages :.....	20
II.7. Conclusion :	21
CHAPITRE III : Instabilité thermique du béton.	
III.1. Introduction	21

III .2. Instabilité thermique du béton	21
III .3. Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé :	24
III.4. Propriétés thermiques :	26
III .5. Propriétés physique :	30
III .6. Propriétés mécaniques des bétons chauffés :	32
III .6.1. Résistance à la compression	32
III .6.2. Résistance à la traction	34
III .6.3 Module d'élasticité.....	36
III.6.4. Perte de masse :	39
III.7.Conclusion :	41

Chapitre IV : Matériaux et Matériels des essais.

IV. 1Introduction :	43
IV. 2.Matériaux utilisés :	43
IV. 3.Caractéristiques des matériaux :	43
IV. 3. 1. Caractéristiques du gravier :.....	43
IV. 3. 2. Caractéristique du sable	51
IV. 3. 3. Caractéristiques du ciment utilisé :	58
IV. 3. 4 :L'eau de gâchage : EN 1008	60
IV.3.5. L'adjuvant : super plastifiant Le MEDAFLOW 30.....	61
IV.3.6. L'ajout : fume de silice : Le MEDAPLAST HP : la norme NFP 18-502 :	62
IV.3.7. fibre de verre :	63
IV.4. Composition du béton :	63
IV.5.La méthode de L'Université de Sherbrooke :	64
IV.5.1.Rapport eau/liant :	65
IV.5.2.Dosage en eau :.....	65
IV.5.3.Dosage en super plastifiant :	66

IV.5.4. Dosage en gros granulat :	66
IV.5.5. Teneur en air:	66
IV.5.6. Calcul de la composition du béton :	67
IV.6. Matériels et essais :	69
IV.6.1. Essais sur béton à l'état frais :	69
IV.6.2. Essais sur béton à l'état durci :	70
IV.6.3. Essais non destructive :	72
IV.7. Conclusion	72

Chapitre V : Résultats et discussions.

V.2.2. Résultats à l'état durci :	75
V.2.3. la vitesse d'ultrason	77
V.3. Résultats obtenues près le traitement thermiques	78
V.3.1. La perte de masse :	78
V.3.2. Porosité :	79
V.3.3. Absorption d'eau :	80
V.3.4. La vitesse des ondes (Ultrason) :	81
V.3.5. Résistance résiduelle :	82
V.3.5. Module d'élasticité :	83
V.4. conclusion.....	83
V.5. Conclusion générale.....	84

Liste de tableau

Chapitre I : Généralité sur le béton BHP

Tableau I.1 : Caractéristiques de résistance et de déformation.....	4
---	---

Chapitre I : Généralité sur le fibre de verre

Tableau II.1 : Propriétés physique et mécaniques de certaines fibres	18
--	----

Tableau II .2 : Présente domaine d'application privilèges par type de fibres.....	20
---	----

Chapitre IV : Matériaux matériels et essais

Tableau IV.1: L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).....	43
--	----

Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).....	43
--	----

Tableau IV.3 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé [(3/8), (8/16)].....	45
---	----

Tableau IV.4 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15)].....	46
---	----

Tableau IV.5 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....	47
---	----

Tableau IV.6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.	48
--	----

Tableau IV.7 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.....	49
--	----

Tableau IV.8 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (8/16).....	49
--	----

Tableau IV.9 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16).	50
--	----

Tableau IV.10 : Analyse granulométrique du sable de dune OUED SOUF.	51
--	----

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du sable concassé.	51
---	----

Tableau IV.12 : Classification des sables en fonction du module de finesse.....	52
---	----

Tableau IV.13 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.	54
---	----

Tableau IV.14 : Résultats d'essais d'équivalent de sable de dune oued souf testé.....	55
---	----

Tableau IV.15 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable concassée testé.....	55
--	----

Tableau IV.16 : Caractéristiques physiques du sable de dune.....	57
--	----

Tableau IV.17 : d'absorption d'eau de sable oued souf.....	57
--	----

Tableau IV.18 : caractérisation de ciment (Fiche technique.....	59
---	----

Tableau IV.19 : Propriétés physique et mécaniques de certaines fibres.....	62
--	----

Tableau IV.20 : Composition de béton BHP (formulation).....	68
---	----

Chapitre V : Résultats et discussion

Tableau V. 1: l'affaissement des bétons testés.....	72
---	----

Tableau V. 2: la masse volumique apparente à état frais.....	73
Tableau V. 3: la masse volumique apparente à état durci.....	74
Tableau V. 4: La résistance à la compression.....	75

Liste des figures

Chapitre I : Revue générale sur les Bétons à Hautes Performance

Figure I.1. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C.....	7
Figure I. 2. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation.....	8
Figure. I. 3. Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la Floculation.....	9
Figure. I. 4. Les super plastifiants empêchent la floculation.....	10
Figure I. 5. Granulométrie des matières fines.....	12

Chapitre II : Généralité Sur Fibre de verre

Figure II.1: photo fibre de verre.....	17
Figure II 2: Rôle de fibre.....	19

CHAPITRE III : Instabilité thermique du béton

Figure III-1 : Illustration du mécanisme d'éclatement.....	23
Figure III - 2 : Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température.....	25
Figure III-3 : Déformation thermique des pâtes de ciment.....	26
Figure III-4 : Influence de la vitesse de chauffage sur les déformations thermiques de la pâte de ciment.....	27
Figure III-5 : Expansion thermique des granulats.....	28
Figure III-6 : Déformation thermique des bétons de granulats silico-calcaire et calcaire par.....	28
Figure III-7 : Influence des types de granulats sur la chaleur massique de bétons.....	29
Figure III-8 : Évolution de la chaleur massique des bétons avec la température.....	30
Figure III-9 : Évolution de la porosité relative des BO et BHP.....	31
Figure III0 : Évolution comparée de la porosité des bétons de fibres de polypropylène (a) et fibre métallique.....	32
Figure III-11 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP.....	33
Figure III-12 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats.....	33
Figure III-13 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression des BO (a) et BHP (b) avec ou sans les fibres de polypropylène, métalliques, et cocktail de fibres (S-P) [40].....	34
Figure III-14 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage.....	35
Figure III-15 : Évolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion de bétons avec et sans fibres de polypropylène : (a) pour BO et (b) pour BHP.....	36

Figure III-16 : Évolution du module d'élasticité résiduel relatif.....	37
Figure III-17 : Évolution du module d'élasticité résiduel relatif de BHP avec ou sans fibres : (a) pour fibres de polypropylène et fibres métalliques (b).....	38
Figure III-18 : Influence des granulats sur le module d'élasticité résiduel relatif : test à l'ambiance (a) [43], test à chaud (b)	39
Figure III-19 : Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons	40
Figure III-20 : Comparaison de la perte de masse et de la teneur en eau initiale des bétons soumis à 600°C	40
Figure III-21 : Évolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage	41

Chapitre IV : Matériaux matériels et essais

Figure IV. 1. Les courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/16.....	44
Figure IV.2. Appareille de los Anglos.....	48
Figure IV.3. L'échantillon et les boules avant l'essai.....	48
Figure IV.4. Analyse granulométrique des granulats G3/8 et G8/16 et sable concassée et sable.....	52
Figure. IV.5 . Essai équivalent de sable.....	55
Figure IV.6. Matériel utilisé dans la masse volumique apparente.....	56
Figure. IV.7. Sac de ciment GICA.....	58
Figure. IV.8. caractéristiques de super plastifiant MEDAFLOW 30.....	60
Figure IV.9 . Caractéristiques de micro silice.	62
Figure. IV.10. photo fibre de verre.....	62
Figure IV.11. Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.....	63
Figure IV.12. Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression.....	64
Figure IV.13. Détermination du dosage en eau.	65
Figure IV.14. Dosage en gros granulat.....	65
Figure IV.15. Mesure de l'affaissement.....	69
Figure IV.16 . Presse hydraulique capacité 3000 KN.....	70
Figure IV.17. Essai d'ultrasons et ses équipements.....	71

Chapitre V : Résultats et discussion

Figure V. 1: Variation de l'affaissement en fonction du dosage en fibres de verre des BHP testés.....	72
Figure V. 2: variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage de fibre verre.....	73
Figure V. 3: variation de la masse volumique à l'état durci en fonction du dosage de fibre de verre.....	74

Figure V. 4: variation de la résistance à la compression des bétons étudiés.....	75
Figure V. 5 : variation de la vitesse d'ultrason des bétons étudiés.....	76
Figure V. 5: La variation la perte de masse en fonction de la température.....	77
Figure V. 6 : variation de la porosité à l'état durci en fonction de la température.....	78
Figure V. 7: variation de l'absorption en fonction la température.....	79
Figure V. 8: variation la vitesse en fonction de la température.....	79
Figure V. 9: variation de la résistance résiduelle à la compression en fonction de la température.....	80
Figure V. 10: variation le module d'élasticité dynamique en fonction de la température.....	81

Résumé

Les dégradations de béton par incendie qui affectent davantage les bâtiments ont soulevées la question du comportement des bétons (ordinaires ou hautes performance s) [BHP] vis-à-vis du feu. Des études théoriques et expérimentales ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé et de préciser les paramètres clés influençant le comportement au feu des bétons.

Le but de ce travail est de compléter, une étude pilote, des informations de béton existant préalablement exposé à un comportement à haute température en se concentrant sur le comportement du béton. Et pour étudier le comportement du béton à haute performance à des températures élevées, nous avons utilisé les fibres de verre de différentes longueurs et étudier l'ampleur de leur impact sur ce comportement.

Cette étude se compose de trois parties: l'étude du béton sans fibres de verre, de béton avec des longueurs de fibres (06, 12 et 18 mm) exposés à haute température, et enfin surveiller le béton endommagé à différents niveaux, le cycle de chauffage à une température de 200°C, 300°C, 400°C et 600°C sur les propriétés physiques et mécaniques a appliqué et analysé.

L'analyse des résultats des essais ont permet de caractériser les différentes propriétés physiques et mécaniques des [BHP]. Les résultats ont montré que les bétons fabriqués à partir de fibre de verre présentent un comportement moindre performance lorsqu'ils sont soumis à haute température.

Mots-Clés : Béton à haute performance [BHP], fibres de verres, longueur de fibre, température, propriétés physico- mécaniques.

ملخص

إن تضرر الخرسانة بالحريق الذي يؤثر على بنايات بكثرة قد أثارت مسألة سلوك الخرسانة (العادية أو عالية الأداء) إزاء الحريق. بعض الدراسات النظرية و التطبيقية سمحت بعض التفسيرات للظواهر التي لوحظت في سلوك الخرسانة المعرضة للحرارة و تحديد العوامل الرئيسية التي في سلوك الخرسانة المعرضة للحريق.

الهدف من هذا البحث هو تكملة, بدراسة تجريبية, للمعلومات الموجودة سابقا عن سلوك الخرسانة المعرضة لدرجة الحرارة العالية من خلال التركيز على سلوك الخرسانة. و لدراسة سلوك الخرسانة عالية الإجهاد في الحرارة العالية, استخدمنا ألياف الزجاج بأطوال مختلفة لدراسة مدى تأثيرها على هذا السلوك, تتألف هذه الدراسة من أربعة أجزاء: دراسة خرسانة بدون ألياف زجاج, خرسانة بها ألياف بأطوال (1.2,06 و 18مم). المعرضة لدرجة حرارة عالية, وأخيرا مراقبة تضرر الخرسانة على مستويات مختلفة, حيث تعرضت هذه الخرسانات لدورات تسخين-تبريد إلى غاية 22 درجة مئوية, 200 درجة مئوية 300 درجة مئوية, 400 درجة مئوية, 600 درجة مئوية وقد تم تحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمختلف الخرسانات.

تحليل نتائج الاختبارات المستخدمة سمح بوصف مختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعرضة لدرجات حرارة عالية, وأظهرت النتائج أن الخرسانة المصنوعة من ألياف الزجاج تظهر سلوكا لأبأس نوعا ما عندما تكون معرضة للحرارة.

الكلمات المفتاحية : خرسانة , حرارة, طول الألياف , الخصائص الميكانيكية , الخصائص الفيزيائية , تدهور , ألياف زجاج .

Abstract

Concrete damage by fire which affects more buildings has raised the issue of the behavior of concrete (ordinary or high performance) against the fire. Theoretical and experimental studies have allowed to have an explanation of the phenomena observed in the behavior of heated concrete and specify key parameters influencing fire behavior of concrete.

The purpose of this study is to complete, a pilot study of the existing concrete information previously exposed to a high temperature behavior by focusing on the behavior of concrete. And to study the concrete behavior of HPC, we used the glass fibers of various lengths to study the extent of their impact on the characteristics of the latter. The present study consists of three parts: the concrete studied without glass fibers, the fiber lengths \maintained (06, 12 and 18 mm) for exposed mixtures to high temperature, and finally monitoring the damaged concrete at different levels, where it was heated to 200 ° C, 300 ° C, 400 ° C and 600 ° C the physical and mechanical properties were analyzed.

The test results of the analysis can characterize the different physical and mechanical properties of concretes at high temperatures. The results showed that the concretes made from fiberglass exhibit lower performance behavior when subjected to high temperatures.

Key words: High performance concrete (HPC), glass fibers, fiber length, temperature, mechanical properties, physical properties

INTRODUCTION

GENERAL

Introduction générale

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation et de durabilité font du béton l'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiment et ouvrages de génie civil. L'utilisation des bétons à haute performance, matériau récent, a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Ces bétons sont différenciés des bétons ordinaires par leur faible porosité et leur forte densification ce qui leur offre de bonnes caractéristiques mécaniques et une meilleure durabilité.

Malgré le bon comportement des bétons ordinaires et des BHP à la température ambiante, ces bétons peuvent présenter une instabilité thermique sous diverses formes et montrent de forts endommagements de leurs structures lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie ou un accident nucléaire.

Soumis à un incendie, le béton se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus de dégradation conduit à la dégradation des propriétés physiques, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et compromettre l'évacuation des personnes et la sécurité des secours. De plus, une réparation et une rénovation coûteuses de la structure endommagée par un incendie doivent souvent être effectuées.

Plusieurs études de recherche ont été réalisées ces dernières années sur l'analyse, la compréhension et la modélisation de l'endommagement thermique du béton. Ces travaux de recherche ont permis d'améliorer la compréhension de l'évolution des propriétés physico-chimiques de la pâte de ciment. Cependant, moins d'études se sont intéressées à l'étude de l'influence de la nature des fibres sur le comportement du béton porté à haute température.

Le but du travail thèse de master qui est présenté dans ce manuscrit a pour premier objectif avant tout d'améliorer la compréhension du comportement du béton, béton à haute performance exposés à des températures élevées. Et du béton contenant des fibres de verre et leur comportement à des températures élevées. Des températures plus élevées. En fait, cette thèse contribue expérimentalement, d'autres recherches effectuées précédemment dans la littérature.

Le deuxième objectif de cette étude consiste, l'effet de la haute température sur les propriétés physiques de différentes longueurs des fibres de verres utilisés (fibre 06, fibre 12 et fibre 18 mm). Et comparer les comportements des différents bétons confectionnés avec ses fibres. Trois groupes ont été formés. Béton avec fibre de verre à 0.6 mm, béton avec fibre de verre 1.2 mm et béton avec fibre de verre 1.8 mm.

Le manuscrit est composé de cinq chapitres:

Le premier chapitre est une analyse bibliographique de béton BHP, définitions et propriétés de ce béton.

Le deuxième chapitre traite de la fibre de verre et du rôle de la fibre dans le béton BHP, (béton fibré).

Le troisième chapitre présente le phénomène d'éclatement et explique les propriétés physiques et mécaniques de béton BHP fibre à haute température.

Le quatrième chapitre présente les essais et les matériels utilisés dans cette étude.

Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats et les discussions.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des principaux résultats obtenus sur l'influence de la température sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons confectionnés par différents types de longueurs des fibres de verres.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR
LE BETON BHP

Chapitre : Revue générale sur les Bétons à Hautes Performance

I.1. Introduction :

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre (sable, gravier, cailloux), le liant qui est généralement un ciment portland, et l'eau. Ce dernier constituant joue double rôle : assure l'hydratation du ciment, et participe activement à l'ouvrabilité du béton frais, qui lui donne une rhéologie satisfaisante.

Le liant fait prise et durcit pour obtenir finalement une résistance plus ou moins élevée qui dépend de la nature propre du liant.

I.2. Historique :

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton, les études ont été axées sur la recherche des méthodes permettant d'améliorer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 60 et 100 MPa [1]. Cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes [2]. La notion de 'haute résistance' est très relative et, de toute évidence, évolutive.

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans un cas pareil, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est une incidence de second ordre [3]. Dans ce cadre, le contenu de l'expression 'béton à haute résistance' s'avère insuffisant. Les chercheurs lui préféreront l'appellation 'béton à hautes performances', qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. [4].

Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton à haute résistance' à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre représente la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté. [4]. (Figure I.1.).


Caractéristiques	Classe de résistance  Béton haute résistance													
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{ck} résistance caractéristique en compression sur cylindre (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck-cube}$ résistance caractéristique en compression sur cube (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	90	105
f_{cm} résistance moyenne en compression (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{cm} résistance moyenne en traction directe (MPa)	1.9	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
E_{cm} module d'élasticité (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} déformation au pic contrainte (% ₀)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.25	2.3	2.4	2.45	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8

Tableau I.1. Caractéristiques de résistance et de déformation suivant la norme EN 206-1 1992-1-1 :2004.

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (découverte des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches sont orientées pour l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton (optimisation de l'étendu granulaire à une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) [5].

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, se sont les Bétons à Hautes Performances (BHP) et à très Hautes Performances (BTHP).

I.3. Applications des BHP :

Le BHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel :

Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution des risque de l'alcali-réaction, meilleure résistance au gel,...etc.). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.

En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée. Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.

Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction. Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés. Un retrait total réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes,...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter la réalisation d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

La liberté accrue obtenue pour l'aménagement intérieur d'un bâtiment conduit également à l'aménagement de la surface horizontale utile. Grâce à la modification des dimensions du module d'occupation du sol, les espaces libres pourront être plus grands, ce qui donnera à l'architecte plus de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureaux.

Dans l'industrie de préfabrication, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles perspectives. Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce à la réduction du poids d'éléments réalisées

Un autre avantage du BHP par rapport au béton ordinaire est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, grâce à la haute teneur en fines.

En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est généralement évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres.

Historiquement, le BHP a été avant tout conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été à différentes reprises mis en œuvre aux Etats-Unis pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa.

Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche

I.4. Voies d'obtention des BHP :

I.4.1. Utilisation d'une nouvelle génération de superplastifiants:

I.4.1.1. Effet de l'eau excédentaire :

Durant des années, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais l'ouvrabilité nécessaire. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau (pour un rapport eau/ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage) reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit la résistance du béton [6].

Un lien direct sera observé entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau/ciment (E/C). En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas nouveau. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique [7]. L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme il est illustré par la figure I. 1.

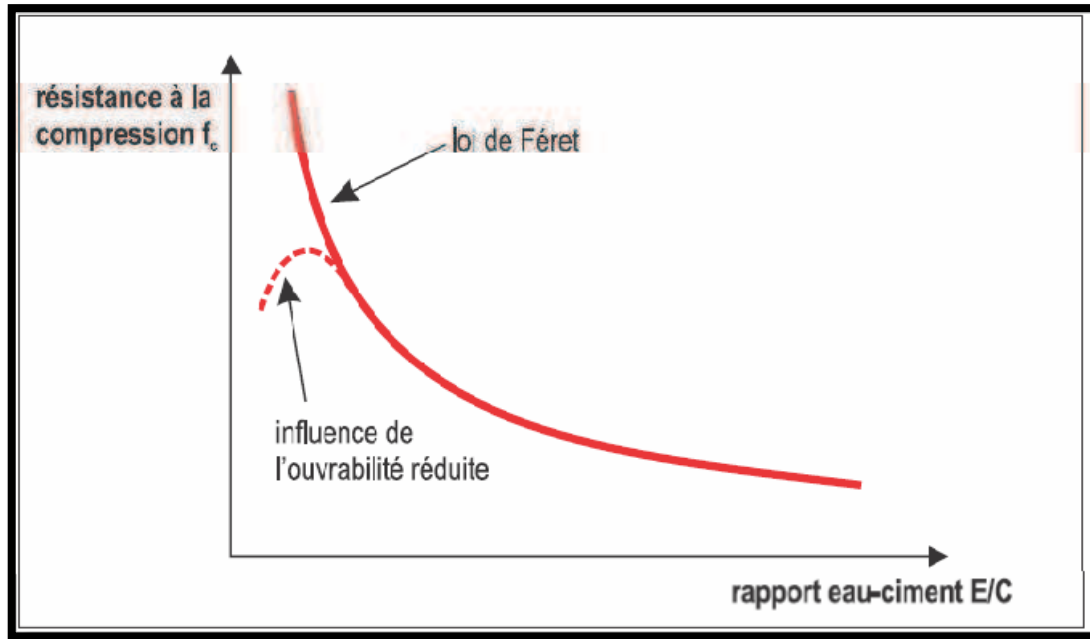


Figure I.1. Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau-ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10^{-9} à 10^{-8} m (pores de gel) sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Cependant il y a aussi des pores de plus grandes dimensions dit capillaires dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} m. Leur quote-part dépend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue. (La figure I.2) montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation [6]. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible. Mais la question qui se pose dans ce cas là est l'ouvrabilité, et par la suite comment concilier deux exigences contradictoires : réduire la quantité d'eau pour obtenir une résistance et une durabilité accrues, et ajouter de l'eau pour faciliter l'ouvrabilité ? De nombreuses années ont été consacrées à la recherche d'une réponse à cette question.

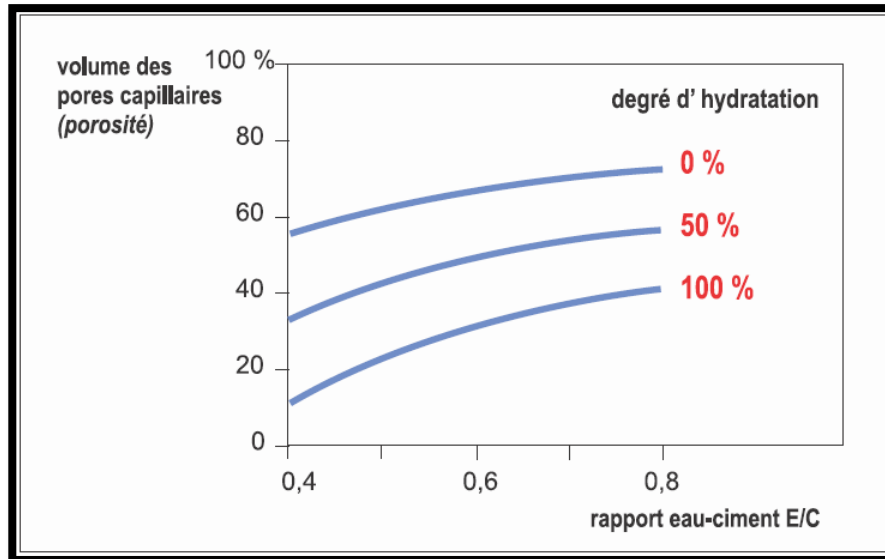


Figure I. 2. Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation.

I.4.1.2. L'action des super plastifiants :

La découverte des plastifiants et plus particulièrement des super plastifiants très puissants dans les années 1970 a constitué un véritable tournant. Ce sont des poly électrolytes ou polymères hydrosolubles. Ils peuvent être classés historiquement dans les familles suivantes :

- 1^{ère} génération : poly-naphtalène-sulfonâtes (PNS)
- 2^{ème} génération : poly-mélamine-sulfonâtes (PMS)
- 3^{ème} génération : poly carboxylates (PC), et hybrides avec chaînes sulfonâtes
- 4^{ème} génération : poly-carboxylates-polyox (PCP) et poly-phosphonates- polyox

Aucun de ces produits n'est toxique, à la dose où on les emploie typiquement, soit 0,5 à 2% du poids de ciment [7].

L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable, sans ajouter d'eau [8]. La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en flocculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces flocculats sera toutefois emprisonnée (figure. I.3). A partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

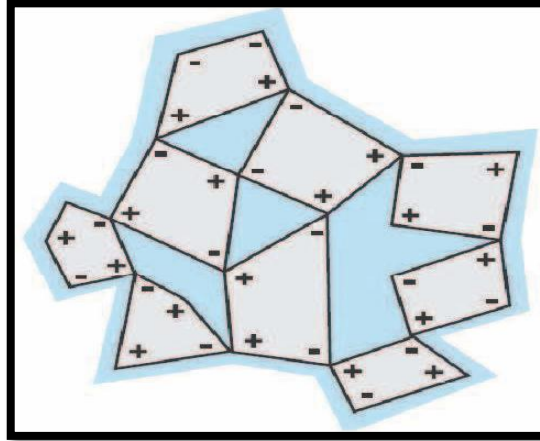


Figure. I. 3. Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation.

Les super plastifiants empêchent la formation néfaste des congglomérats (Figure. I. 4.). Leurs molécules se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage, une fois adsorbé, le super plastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du super plastifiant (sous la forme de longues chaînes) renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent leurs rapprochements réciproques. Grâce aux structures de polymères modernes 'en forme de peigne', il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un super plastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa [9].

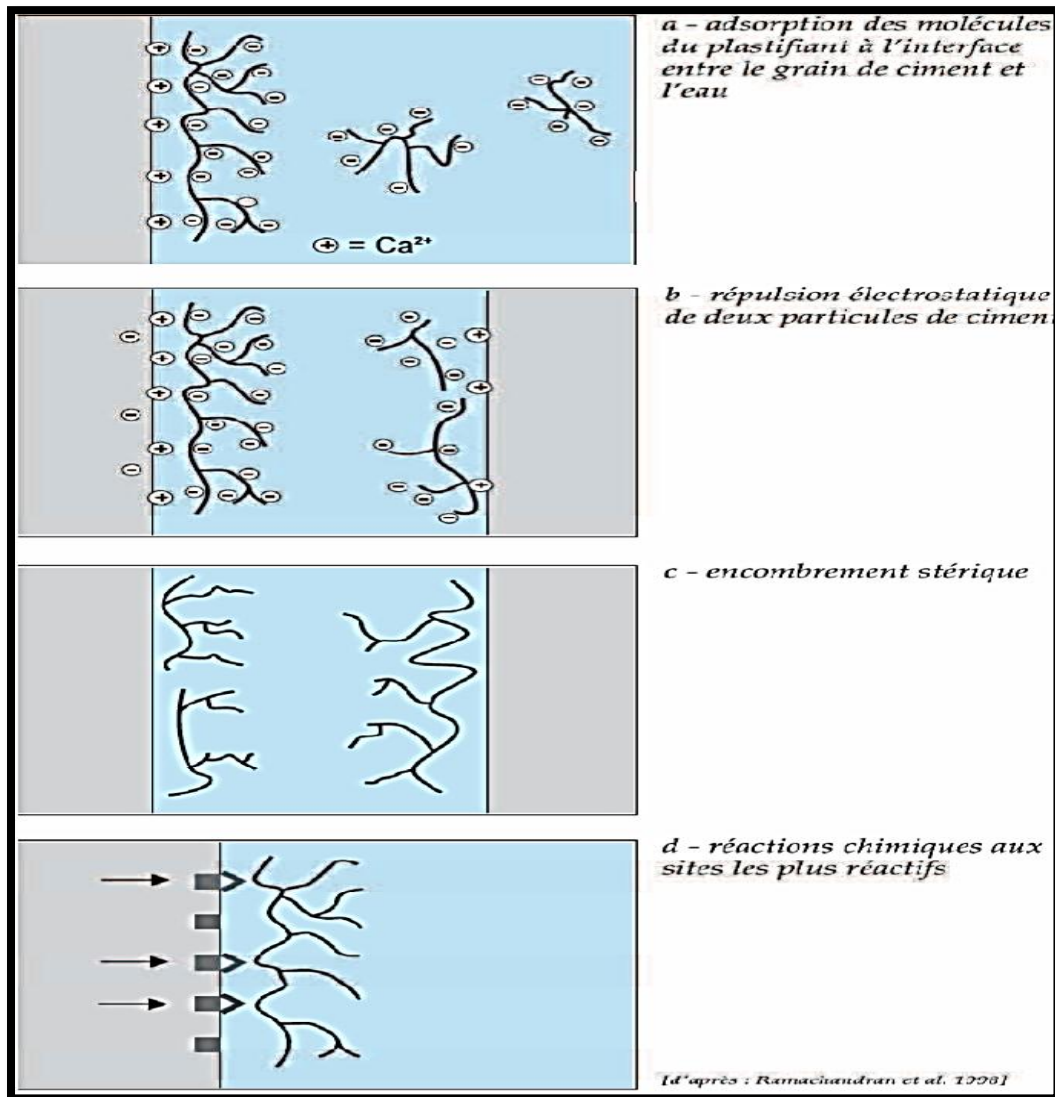


Figure. I. 4. Les super plastifiants empêchent la floculation

I.4.1.3. Interaction ou Compatibilité ciment-super plastifiant :

À l'heure actuelle la qualité des super plastifiants s'est nettement améliorée [7]. Certaines combinaisons ciment super plastifiant permettaient de fabriquer des bétons ayant un grand affaissement initial et qui est conservé dans le temps (combinaison compatible), alors que dans d'autres cas l'affaissement initial élevé obtenu avec un super plastifiant sera perdu très rapidement (combinaison incompatible). Donc une combinaison ciment super plastifiant est dite non compatible quand un béton super plastifié perd très rapidement son affaissement initial. Dans certains cas, des bétons peuvent perdre leur affaissement initial en moins de 15 min, tandis que dans d'autres cas des bétons peuvent conserver un affaissement supérieur à 200 mm pendant 1 h ou même 1 h 30, sans phénomène de ressuage, de ségrégation et sans perte de résistance à 24 heures [6].

Au fur et à mesure que le potentiel technologique et économique des super plastifiants s'est affirmé, un effort de recherche est soutenu pour essayer de mieux comprendre les mécanismes d'interaction ciment super plastifiant de façon à développer des super plastifiants

plus puissants, plus efficaces, plus économiques, qui soient compatibles avec le plus grand nombre de ciment. Cet effort de recherche a finalement abouti au développement d'une nouvelle science des adjuvants qui permet déjà de mieux contrôler les propriétés des bétons super plastifiés [8].

Les interactions ciment super plastifiant sont des processus très complexes. En effet, le ciment Portland est un matériau inorganique polyphasique, composé des phases du clinker majoritaires (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF) et de phases minoritaires (CaSO₄.xH₂O, CaO, (NaK)₂SO₄...). Il en est de même pour les adjuvants organiques souvent constitués de plusieurs composants du fait de la nature des produits ou résultants de leurs procédés de fabrication [9].

I.4.2. L'amélioration de l'étendu granulaire :

I.4.2.1. Rôle et importance des granulats dans le béton :

Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et ces propriétés rhéologiques et mécaniques a intéressé les chercheurs. Le rapport E/C est une notion de base dans la technologie du béton, mais il n'est pas suffisamment précis pour une maîtrise complète de la qualité du béton frais et durci. Plusieurs études ont montré que les granulats qui constituent le squelette, et qui représentent dans les cas usuels plus de deux tiers du volume total du béton ont des influences claires sur les performances du béton selon leurs qualités, leurs formes et leurs tailles (dimensions) et aussi le volume qu'ils occupent.

Il n'est pas nécessaire de choisir un granulats particulièrement résistant pour produire un béton usuel, par contre dans le cas des BHP ou la pâte de ciment hydraté et la zone de transition sont suffisamment fortes, les granulats peuvent devenir le maillon faible du béton. Tout le sable naturel utilisé pour fabriquer un BHP doit contenir le moins possible de particules supérieures à 5 mm, lorsque ces particules sont plutôt friables, car elles constituent alors le maillon faible du BHP. Le remplacement partiel d'un sable naturel par un sable concassé peut présenter quelques avantages surtout si le sable concassé a été fabriqué en utilisant une roche très résistante.

La forme des particules des gros granulats et aussi importante de point de vue rhéologique. Il faut essayer d'utiliser autant que possible des particules arrondis ou cubique plutôt que des particules plates et allongées. Ce dernier type de particule n'est pas recommandé, car ces particules sont mécaniquement faibles et influence négativement la maniabilité des bétons ce qui nécessite une augmentation du dosage en super plastifiant pour obtenir la maniabilité visée. Les granulats ont aussi une grande influence sur la compacité du béton qui est le facteur principale pour l'obtention des BHP.

I.4.2.2. Rôle et importance des additions minérale:

La réduction du rapport eau/ciment par l'ajout d'un super plastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte. Cette zone est très poreuse et peu

résistante. Sa largeur n'est que de 40 μm , mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton [3].

L'ajout de particules extrêmement fines (Figure I.6.) permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du super plastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomerats. Parmi ces additions minérales, on trouve les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz broyé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. Les laitiers de haut fourneau broyés comme les fumées de silice disposent de propriétés pouzzolanique qui leurs permet de se combiner avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment [10]. Leurs dimension, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte - granulat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à la maturité et par la suite au développement de la résistance.

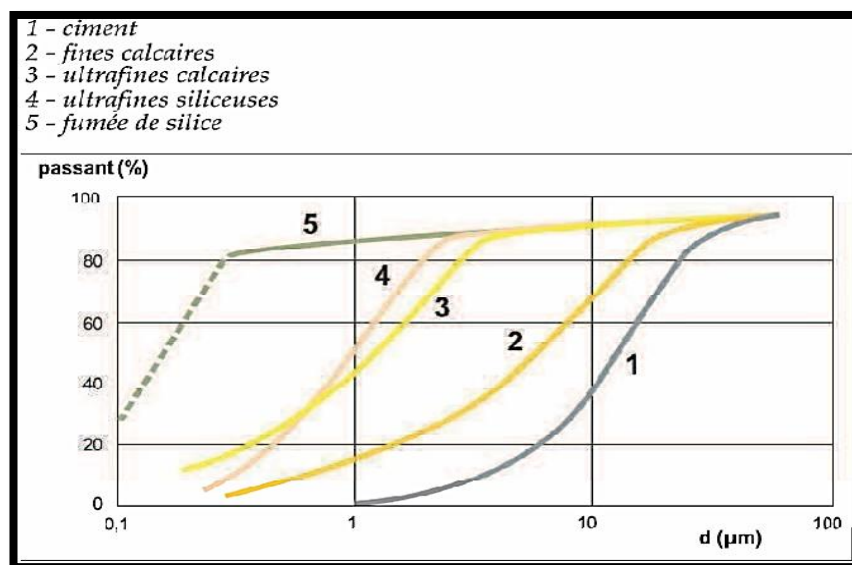


Figure I. 5. Granulométrie des matières fines.

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité.

I.4.2.2.1 Effets des additions :

On peu résumer l'effet des additions minérales sous forme de fillers sur les propriétés des BHP comme suit [11]

I.4.2.2.1.a. Effet fillers ou effet de remplissage:

Modification au niveau du squelette granulaire du mélange par une compensation du déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides.

I.4.2.2.1.b. Effet physique ou de surface :

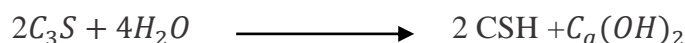
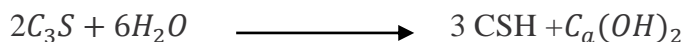
Les hydrates du ciment nouvellement formés pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrates qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus entraîne une apparente accélération d'hydratation. La germination hétérogène reposant sur les phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance augmente avec l'augmentation de la finesse des additions.

I.4.2.2.1.c. Effet chimique ou pouzzolanique :

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance au CSH secondaire. Les étapes de formation des CSH secondaires sont données ci dessous [11].

- formation de la portlandite :

**I.5. Conclusion :**

Dans cette partie de la recherche bibliographique on a présenté l'historique et les principales propriétés des BHP et son utilisation mondiale ainsi que les diverses solutions proposées pour améliorer les caractéristiques de ces matériaux. Donc on peut dire dans ce chapitre que :

- Le rapport E/C des bétons à haute performance est beaucoup plus faible (0,25 à 0,35) que celui des bétons ordinaires (0,50 à 0,70).
- Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il est très important de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit donc de

trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau de gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec le fluidifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'ettringite qui se forment dès que le ciment entre en contact avec l'eau. Malheureusement il n'existe aucun moyen théorique qui permette de prédire l'un ou l'autre de ces deux comportements.

- Le gros granulat idéal pour un béton à très haute résistance doit être très résistant à l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier, de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat/mortier, qui présente une surface favorisant l'adhérence du mortier et enfin, il ne faut pas diminuer la maniabilité du béton frais.
- On peut aussi atteindre des hautes résistances en compression en substituant une certaine fraction du ciment par des matériaux cimentaires supplémentaires. En plus a intérêt économique, cette option permet un meilleur contrôle des pertes d'affaissement puisque ces matériaux cimentaires sont beaucoup moins réactifs que le ciment portland surtout durant les premières heures qui suivent le malaxage, il sera préférable d'utiliser de la fumée de silice, mais jusqu'à 70 MPa, on peut s'en passer à la rigueur.
- La résistance du béton augmente en général avec : le module d'élasticité, et la concentration des granulats. Par contre elle diminue avec l'augmentation de la taille des agrégats. L'effet de ces propriétés est généralement négligé, par contre la surface caractéristique des agrégats qui ont une grande influence sur la résistance de l'interface pâte – agrégat ainsi que la résistance en compression du béton et plus ou moins sa résistance à la flexion.
- Le futur béton sera plus durable et sera plus développé pour satisfaire les besoins socioéconomiques réels avec le moindre impact possible sur l'environnement. Le coût d'un projet dans l'avenir devra incorporer non seulement les coûts économiques actuels

CHAPITRE III
GENERALITE SUR
FIBRE DE VERRE

Chapitre II : Généralité Sur Fibre de verre

II .1 Introduction :

Les matériaux composites sont reconnus comme étant la combinaison de deux ou plusieurs corps de nature et de composition différente, et qui, contrairement aux composés chimiques, possèdent des zones identifiables à chacun de ces corps. Ainsi, les matériaux constitutifs ne sont qu'entremêlés laissant voir une interface ou encore une zone de transition. Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions. Non seulement il peut être moulé dans des formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est également peu combustible et peu toxique. Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation, il est fragile et résiste mal à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites, renforcés de fibres dans les secteurs de l'aérospatiale et des plastiques, a offert la possibilité de pallier à ces lacunes. Ce digest décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante. Pour ce qui est des matériaux composites, ils sont constitués d'un dort fibreux protégé et supporté par matrice. Ils peuvent supporter de plus grandes contraintes que leurs matériaux constitutifs. Puisque la matrice et les fibres interagissent, redistribuant ainsi les contraintes de la charge externe ; on parle alors de synergie. La performance des bétons renforcés dépend des matériaux constitutifs, de l'orientation, de la longueur, de la forme, du pourcentage et de la composition des fibres, des propriétés mécaniques de la matrice, de l'interaction fibre-matrice et de l'utilisation prévue.

II .2. Le béton de fibres:

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom: la microfibre.

Les microfibrilles peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc.

Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue

une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferrailage en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment.

Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés

spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élanement, et la teneur en volume de fibre.

II. 3 Historique du béton de fibres :

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5:6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1^{ère} fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars- Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone. En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement. A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut-être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont Confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance.

II .4. Les fibres :

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

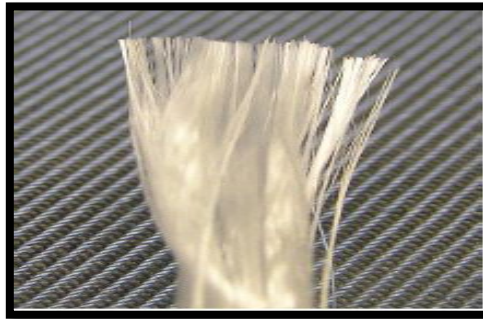


Figure II 1: photo fibre de verre [13]

II .5. Les types des fibres :

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants :

- ✓ Densité,
- ✓ Résistance tension et en compression.
- ✓ Résistance aux impacts et à la fatigue.
- ✓ Module d'élasticité.
- ✓ Conductivités thermique et électrique.
- ✓ Stabilité dimensionnelle.
- ✓ Résistance aux conditions environnementales.
- ✓ Coût.

II. Propriétés physique et mécaniques de certaines fibres :

Fibre	Diamètre en μm	Densité	Allongement de rupture en %	Module d'élasticité, en GPa	Resistance en traction, en GPa
Acier	5-500	7.8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2.6	2-3.5	80	2-3
Polypropylène	7.5	0.6	20.0	5	0.5
Particules de mica	0.01-200	2.6	-	170	0.25
Amiante	0.02-20	2.5-3.4	2.3	200	3
Carbone	7.5	1.7-2.0	0.5-1.0	300-400	2-3

Tableau II1 : Propriétés physique et mécaniques de certaines fibres.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- ✓ Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose.
- ✓ Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques.
- ✓ Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar aramide.

II.5. 1. Les fibres de verre « E » et « AR » :

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libères par l'hydratation du ciment.

Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres **AR** (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue.

II.5. 1. Propriétés des fibres de verre :

- Les caractéristiques mécaniques élevées de ces fibres ont déjà été mentionnées 3000 MPa pour la résistance à la traction.
- Il faut également souligner leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800°C) ce critère ajouté a un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.
- Les essais en cours doivent permettre d'améliorer l'évolution des caractéristiques du béton de fibres de verre lors de son vieillissement.

II.5.2 : Rôle de fibre:

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration comme il est indiqué dans la (figure II.2). Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers.

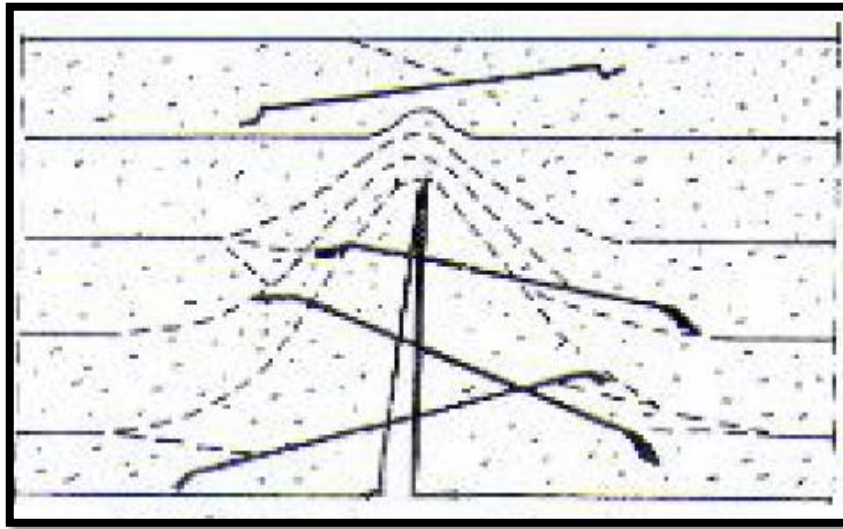


Figure II 2: Rôle de fibre.

II .6. Applications:

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication les domaines d'application sont très vastes :

- ✓ panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé
- ✓ éléments de bardage et éléments décoratifs.
- ✓ mobilier urbain.
- ✓ éléments divers : coffrets, coffrages, habillages.
- ✓ produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux.

<i>Domaines d'application privilégiés par type de fibres</i>			
<i>Type de fibres</i>	<i>Dosage courant</i>	<i>Domaine d'application privilégié</i>	<i>Exemples d'application</i>
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	<ul style="list-style-type: none"> - Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression - Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux - Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement - Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	<ul style="list-style-type: none"> - Dallage - Voussoirs de tunnels - Revêtement d'ouvrages souterrains - Mortiers projetés - Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	<ul style="list-style-type: none"> - Parements architectoniques - Panneaux de façade - Éléments décoratifs

Tableau II. 2 : Présente domaine d'application privilèges par type de fibres.

Les avantages et désavantages des fibres de verre peuvent être résumés comme suit

(MALLICK, 1988; LABONTE, 1993; BAKIS, 1993; SCHWARTZ, 1984):

II .6. 1. Avantage:

- ✓ Coût faible,
- ✓ Grande résistance en tension,
- ✓ Grande résistance aux produits chimiques,
- ✓ Excellent isolant,
- ✓ Grande ténacité,
- ✓ Excellente résistance aux impacts,
- ✓ Module d'élasticité faible (réduit perte de précontrainte),
- ✓ Bonne fiabilité.

II.6. 2. Désavantages :

- ✓ Densité élevée (par rapport aux autres fibres),
- ✓ Sensibilité à l'abrasion,
- ✓ Faible module d'élasticité (grande déformation),
- ✓ Faible résistance à la fatigue,
- ✓ Grande dureté (usure des instruments de fabrication),
- ✓ Faible résistance aux charges cycliques ;
- ✓ Corrosion possible aux alcalis et aux acides hydrologiques,
- ✓ Vieillessement à l'humidité.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur le historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les avantages et désavantages de chaque type de fibres aussi que l'influence de la présence des fibres dans les bétons renforcés par des fibres. Quelques recherches sur le béton avec fibres et leurs effets sur la résistance.

CHAPITRE III
INSTABILITE
THERMIQUE
LE PHENOMENE
D'ECCLATEMENT

CHAPITRE III : Instabilité thermique du béton

III.1. Introduction

Le présent chapitre est une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement du béton porte à une température élevée. Cette analyse portera d'une part, sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière ; d'autre part, sur les différentes transformations physiques et chimiques, les performances mécaniques, les phénomènes de transfert de chaleur et de masse du béton lorsqu'il est soumis à un traitement thermique.

III .2. Instabilité thermique du béton

III.2.1. Différentes formes d'endommagement thermique

En cas d'incendie de bâtiments, de tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes [14].

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort
- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

III .2.2. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé :

D'après [15], [16], le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

- *Le processus thermomécanique* : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée [17].

De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent [17], [18], [19], [21], tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation [22]. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [15], [16].

- Le processus thermo-hydrique : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. (La figure III-1) montre le mécanisme d'éclatement [16] lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.

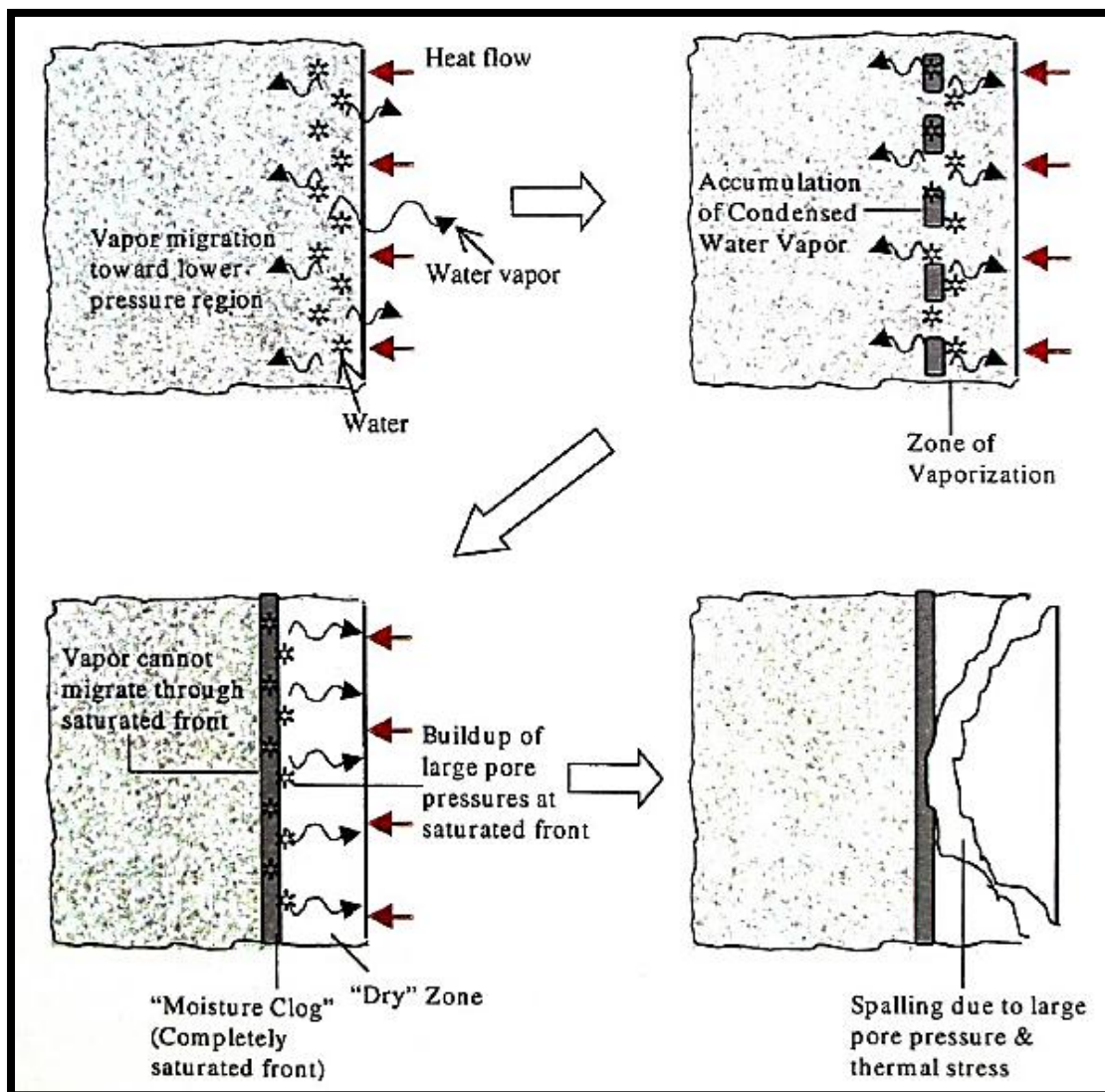


Figure III-1 : Illustration du mécanisme d'éclatement [15]

III .2.3 Paramètres favorisant l'instabilité thermique

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton. Une des causes principales de l'instabilité thermique du béton est la pression de vapeur dans les pores [23].

- *Teneur en eau :*

Elle joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur. Des travaux de recherche de [24], [25], montrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement. Li et al. [51] ont montré, dans le cadre de travaux de l'influence de teneur en eau sur l'endommagement de BHP, une faible fissuration sur des échantillons de teneur en eau inférieure à 2.6%.

- *Propriétés physico-mécaniques du matériau* (densité, perméabilité, résistances) :

Les travaux de [26], [23], [27], [16] montrent qu'un BHP caractérisé par un faible rapport Eau/Liant est plus sensible à l'éclatement. La faible perméabilité du BHP rend difficile le transfert de fluide engendrant de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température.

- ***Vitesse de chauffage :***

Plus elle est élevée, plus le risque d'instabilité thermique du béton est important. L'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton. Des travaux de recherche de [28] sur l'instabilité thermique du BHP ont montré qu'à la vitesse de chauffage de 1°C/min, des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont éclaté à une température du surface voisine de 300 — 350°C. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement.

III .3. Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé :

Le béton est un matériau composite formé de liant (ciment), de granulats (gravier, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. L'eau dans le béton existe sous diverses formes. Elle joue un double rôle d'hydratation et d'ouvrabilité du mélange. Elle se présente sous forme d'eau libre (ou capillaire) d'eau adsorbée, d'eau chimiquement liée. Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle de chacun des composants du béton dans la phase de montée et /ou de baisse en température. Lorsque le béton est exposé à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques.

III .3.1. Matrice cimentaire :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions chimiques et de processus d'hydratation. Ce processus conduit à la formation de l'hydrosilicate de calcium (C-S-H), de l'ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$), de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le C-S-H confère au ciment hydraté sa résistance. L'eau joue un rôle important dans la matrice cimentaire. Avec l'augmentation de la température, elle se dilate puis s'évapore en entraînant une déshydratation des hydrates formés. Alonso et Fernandez [30] ont mené des travaux sur le processus de déshydratation et de réhydratation de pâte cimentaire soumise à différents cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de 1°C/min. (La figure III-2) montre l'évolution des composants de la matrice en phases de chauffage (a) et de refroidissement (b).

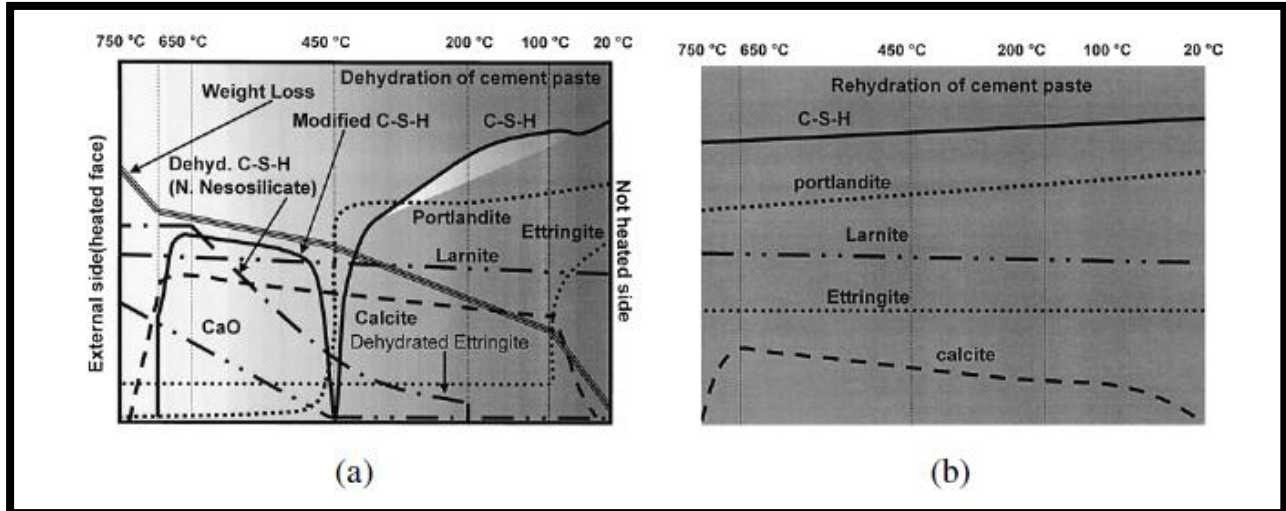


Figure III - 2 : Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température [30]

Les principales transformations de la matrice cimentaire décrites par plusieurs auteurs [29], [30], [32], [28], [21] avec l'augmentation de la température sont :

20 - 120°C : le départ de l'eau libre s'opère de façon marquée vers 100°C. Autour de 120°C, l'eau libre s'échappe complètement [28], [21]. À 100°C, l'ettringite se décompose complètement [30], [32].

130 - 170°C : la réaction endothermique de décomposition du gypse s'observe [33]. La destruction du C-S-H observée avant 100°C se poursuit jusqu'à 400°C [32] ou à 450° [30].

450 - 550 °C : La décomposition de la portlandite en chaux se produit et relâche de l'eau : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ [29], [30], [32], [39].

600 - 700°C : la seconde décomposition des C-S-H et la formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ s'opère [39].

Le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose en chaux et en gaz carbonique à partir de la température de 600°C [31], [30], [39].

Durant la phase de refroidissement, Alonso et Fernandez [30] ont montré un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H. De plus, une nouvelle formation du portlandite est observée (figure III-2-b).

III .3.2 Granulats :

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% de son volume. Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels (origine minérale sans transformation autre que mécanique) artificiels (origine minérale et transformés) ou recyclés. Les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats réactifs (calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. Les granulats neutres (siliceux) ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent donc de faibles liaisons.

En principe inertes dans le béton à la température ambiante sauf cas de pathologie comme les

réactions alcali-granulats, les granulats ont un comportement différent aux températures élevées. Ce comportement dépend de leur nature minéralogique et de leur composition chimique.

III.4. Propriétés thermiques :

III .4.1 Déformation thermique du béton :

Le béton est composé d'une matrice cimentaire et de granulats. L'étude de la déformation thermique du béton nécessite de connaître comment se déforme chacun de ses composants.

III .4.1.1. Déformation thermique de la pâte cimentaire :

L'analyse de la déformation thermique de la pâte de ciment montre que celle-ci se décompose en une phase d'expansion et une phase de retrait. Les travaux menés par [22] sur la déformation thermique de différentes pâtes de ciment (figure III-3) ont montré que le comportement n'est pas lié à la nature de la pâte. L'expansion thermique est observée jusqu'à la température 150°C pour les trois pâtes utilisées. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements et à la dilatation volumique des moléculaires d'eau ainsi qu'à la réduction des forces capillaires de l'eau du fait que la température augmente, Dettling 1964, rapporté par [34] ; Bazant et Kaplan 1996, rapporté par [35]. Au-delà de la température de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait qui devient très important au-delà de la température de 300°C. Le retrait est lié au départ de l'eau contenue dans le matériau.

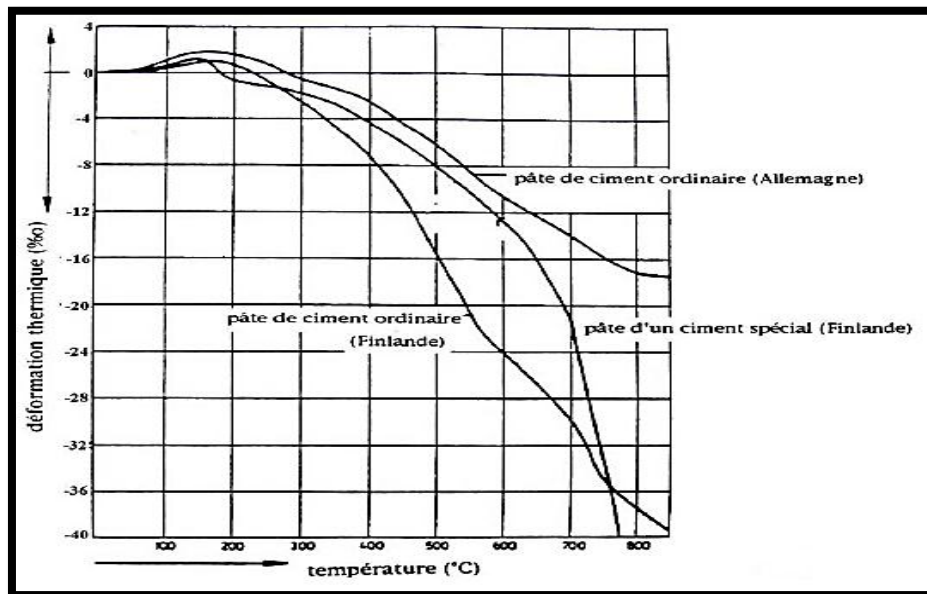


Figure III-3 : Déformation thermique des pâtes de ciment [22].

La figure III-4 présente l'influence de la vitesse de montée en température sur la déformation thermique de la pâte de ciment [37]. Il y a une température à laquelle la dilatation thermique de la pâte de ciment atteint un pic. Au-delà de ce seuil de température, la pâte de ciment se rétracte. Cette

température dépend de la vitesse d'échauffement. Pour une vitesse de chauffage de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, cette température se situe autour de 125°C . Elle atteint environ de 180°C pour une vitesse de chauffage $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

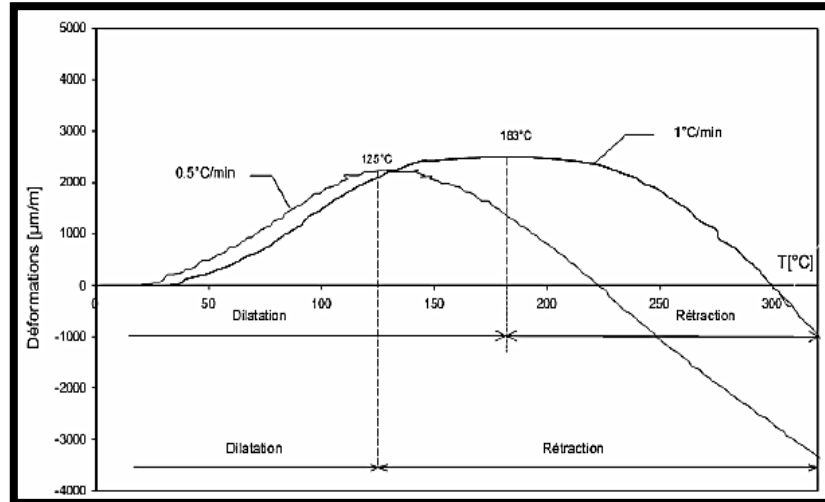


Figure III-4 : Influence de la vitesse de chauffage sur les déformations thermiques de la pâte de ciment [36].

III .4.1.2 Déformation thermique des granulats

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. Au cours du chauffage, les granulats se dilatent. Cette expansion thermique dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le granulat calcaire a un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui du granulat de nature siliceuse mais plus haute que le granulat de basalte [18], [20], [21].

La figure III-5 présente les évolutions de l'expansion thermique de différents granulats (des granulats contenant principalement des minéraux quartzites : gneiss, granite, granodiorite ; granulat de basalte). Tous les granulats se dilatent avec la montée de la température. Durant la phase de refroidissement, leur expansion thermique est irréversible. Les granulats contenant principalement des minéraux quartzites présentent une accélération rapide d'expansion thermique après 570°C . Ce phénomène a été attribué à la transformation de structure du quartz α en quartz β entraînant un gonflement [21]. Schneider constate qu'avec le granulat de basalte, grâce à sa structure cristalline fine par rapport à la structure cristalline plus importante du granulat quartzite, sa déformation thermique est plus faible.

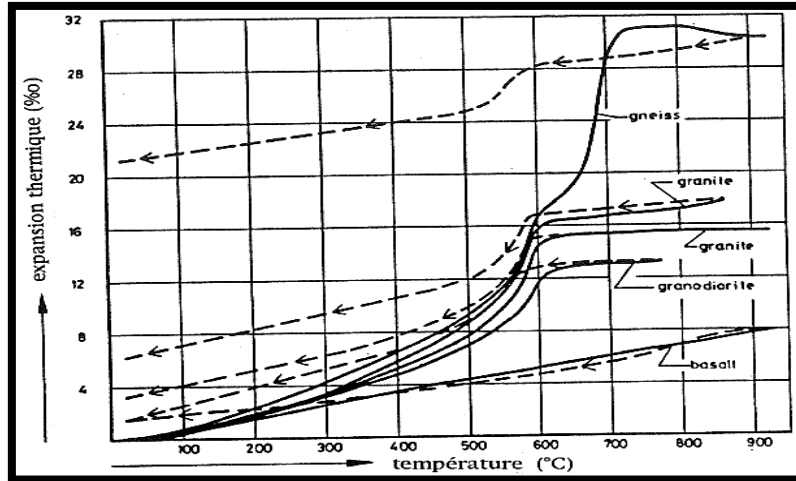


Figure III-5 : Expansion thermique des granulats [22]

III .4.1.3. Déformation thermique du béton

Le béton est composé majoritairement de granulats. Les travaux de [37] sur une étude comparée de déformation thermique de la pâte de ciment par rapport à celle du béton contenant des granulats d'origines diverses, montrent que la déformation thermique du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. La dilatation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéairement dépendante de la température. D'autres études menées par [36] (figure III-6) et [35] sur les bétons de granulats calcaire et silico-calcaire ont montré une forte dilatation thermique des bétons de granulat silico-calcaire au-delà de la température 300°C. Autour de 600°C, il y a une accélération de la dilatation thermique des bétons de granulat calcaire liée à la transformation du quartz du sable. Néanmoins, la dilatation thermique du béton de granulat silico-calcaire est approximativement 2.5 fois plus élevée que celle des bétons de granulat calcaire. Le granulat silico-calcaire possède un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui du granulat calcaire.

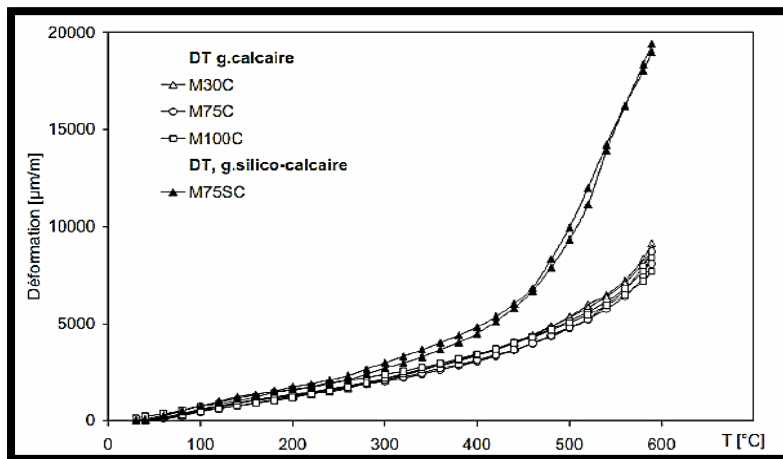


Figure III-6 : Déformation thermique des bétons de granulats silico-calcaire et calcaire par [36] .

III.4.1.4. Chaleur spécifique (massique) :

La chaleur spécifique est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Par conséquent, durant le chauffage, la chaleur spécifique du béton va être fortement modifiée par les différentes transformations physiques chimiques, plus particulièrement le départ de l'eau libre (séchage du matériau), la déshydratation des C-S-H, et les dés hydroxylation du portland ite.

La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la montée de la température. Cette variation est liée aux différentes réactions endothermiques [38], [39], [21]. En effet, la chaleur massique du béton à haute température est gouvernée significativement par la nature du granulat existant dans la composition du béton. Une augmentation de la chaleur massique du béton contenant les granulats siliceux se produit autour de 500°C liée à la transformation du quartzite [38] (figure III-7-a). L'influence des granulats calcaires sur la chaleur massique du béton est négligeable pour une température inférieure à 600°C - 800°C [38], [39]. Cependant, au-delà de cette température, la chaleur massique du béton calcaire s'accroît immédiatement et est liée à la consommation de chaleur sous forme latente pour la décarbonatation du calcaire. La chaleur latente nécessaire pour élever la même température du béton de granulat calcaire est dix fois plus élevée que celle du béton de granulat siliceux lorsque la température est supérieure à 600°C [38].

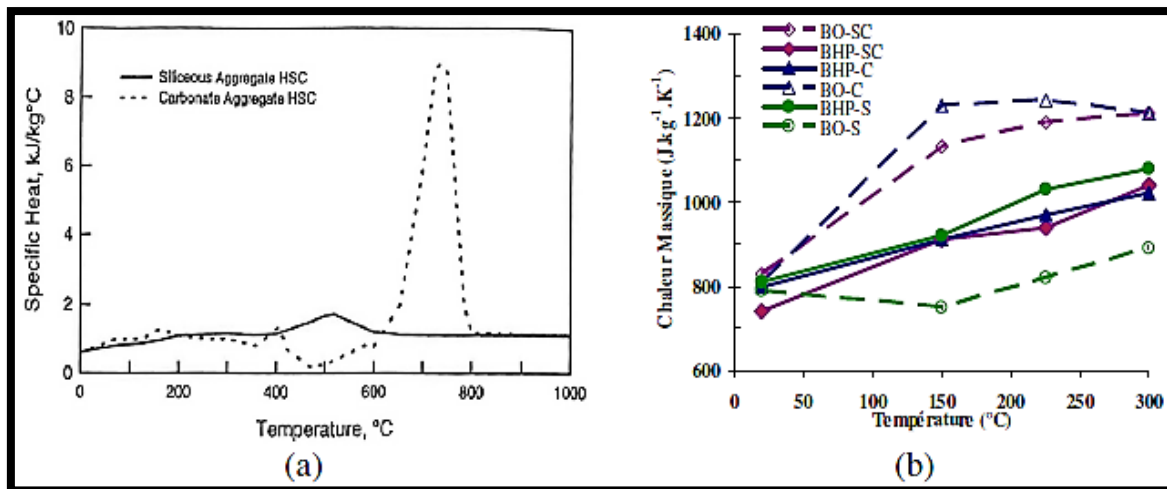


Figure III-7 : Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons :

(a)- [38], (b)- [43]

L'eau joue un rôle important dans l'évolution de la chaleur massique du béton. Schneider [39] note que la présence de l'eau influence la chaleur massique du béton à des températures inférieures à 200°C. Le béton saturé présente une chaleur massique deux fois plus élevée que celle du béton séché. L'observation de [Ming 2011] montre l'influence de l'eau sur l'augmentation de la chaleur massique du béton BO (E/C=0.6) contenant les granulats calcaires ou silico-calcaires dans un domaine de température 20°C - 300°C par rapport aux bétons BHP (E/C=0.3) (figure III-7-b). D'un point de vue réglementaire (Eurocode2), l'effet de séchage est pris en compte et un pic de chaleur

spécifique entre les températures 100°C et 200°C est proposé dépendant de la teneur en eau du béton (figure III-8).

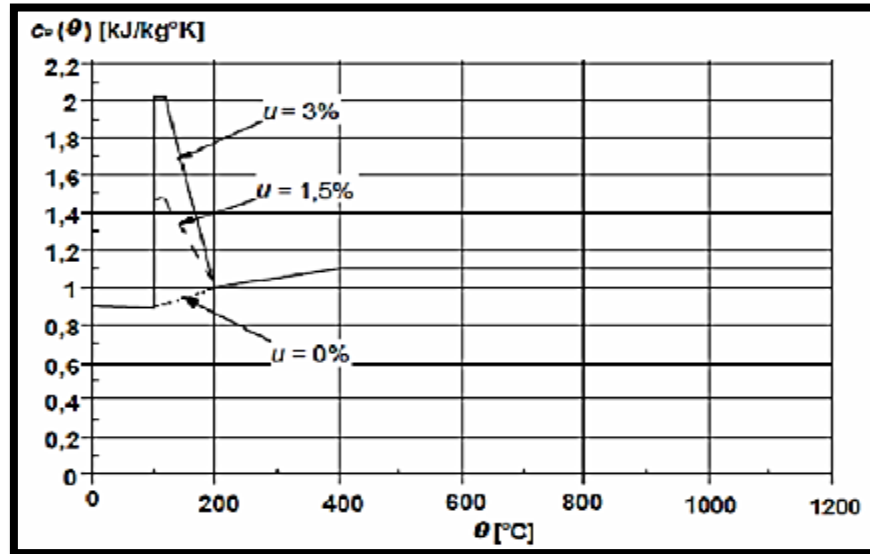


Figure III-8 : Évolution de la chaleur massique des bétons avec la température
(Eurocode 2)

III .5. Propriétés physique :

III .5.1. Porosité :

La mesure de la porosité à l'eau ou au mercure de bétons chauffés a fait l'objet de plusieurs études. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec la température pour le béton ordinaire ou le béton à hautes performances en présence ou non de fibres [40], [35], [36],[15],[28]. Pour des bétons ordinaires et des bétons à hautes performances sans fibres, [40] a observé une croissance relative du même ordre de grandeur de 16% jusqu'à la température de 300°C pour tous les bétons testés. Au delà de 300°C, la porosité relative du BO augmente de 34% tandis que celle du BHP est de 20% (figure III-9). L'auteur attribue cette forte croissance de la porosité à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation différentielle pâte-granulat puisqu'une grande partie de l'eau liée s'est échappée.

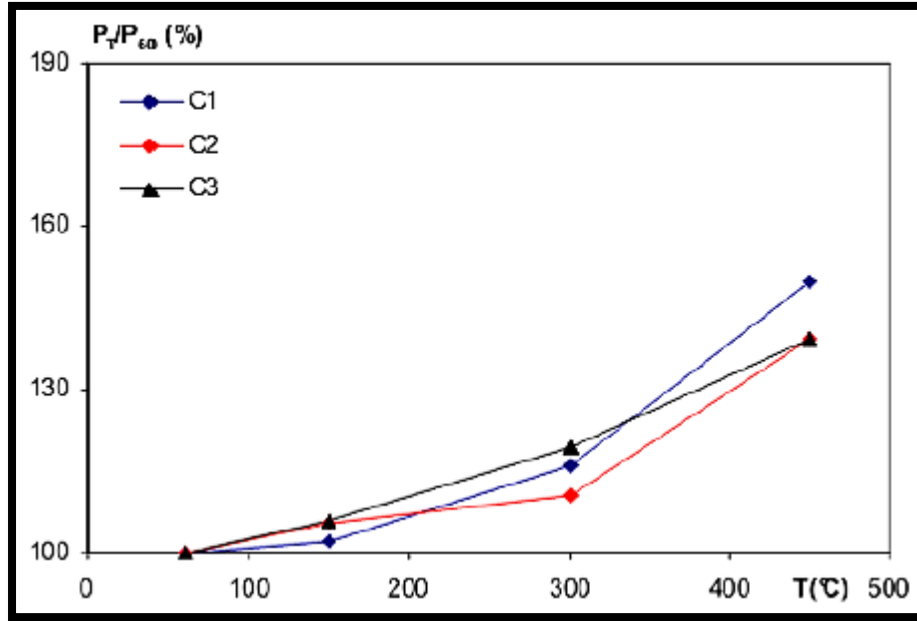


Figure III-9 : Évolution de la porosité relative des BO et BHP [40].

Des travaux de recherche sur l'influence de la nature et de la proportion des fibres dans le béton chauffé ont été réalisés par [40]. Un béton ordinaire, un béton à hautes performances, trois proportions des fibres de polypropylène (1 ; 1.5 ; 2 kg/m³) et trois proportions des fibres métalliques (20 ; 30 ; 40 kg/m³) sont utilisées dans cette étude. L'auteur remarque une croissance rapide de la porosité des bétons contenant des fibres de polypropylène entre le chauffage à 150°C et le chauffage à 300°C par rapport aux bétons sans fibres. La porosité supplémentaire est liée à la proportion de fibres. L'impact des fibres de polypropylène est lié à la composition du béton. Plus le rapport E/C est faible, plus l'endommagement est important. En présence des fibres métalliques, l'accroissement rapide de la porosité ne s'observe pas au delà du chauffage à 300°C. À 450°C, l'augmentation de la porosité des bétons de fibres métalliques est plus importante que celle des bétons sans fibres. Ce phénomène est lié à l'affaiblissement de la liaison pâte de ciment-fibres consécutive à la déshydratation des C-S-H. De plus, les micropores existants entre fibres et matrice prennent des tailles plus importantes (figure III-10).

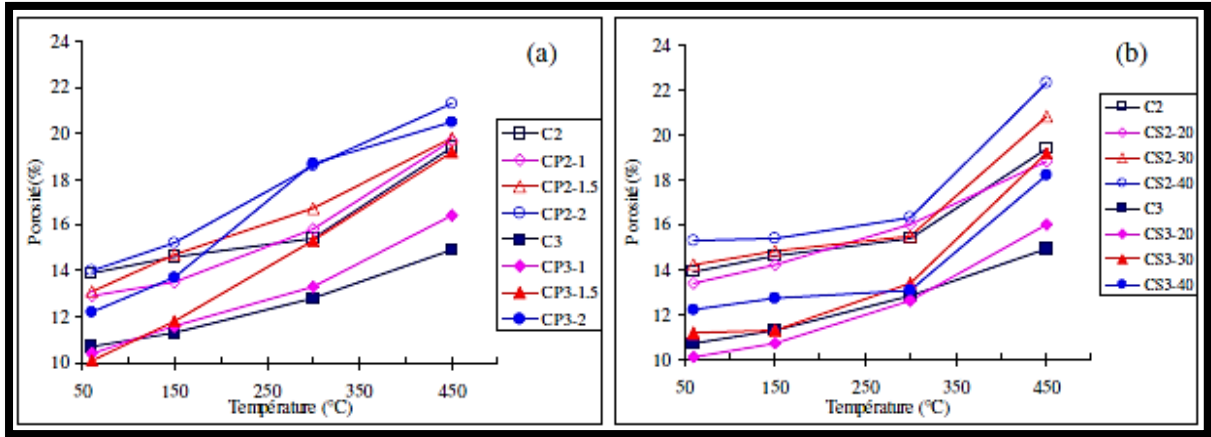


Figure III-10 : Évolution comparée de la porosité des bétons de fibres de polypropylène (a)
Et de fibres métalliques (b) [40]

III .6. Propriétés mécaniques des bétons chauffés :

En général, la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module élastique en compression diminuent avec l'augmentation de la température. Des transformations chimiques se produisent au cours du chauffage induisant une dégradation de la structure du béton [23], [41].

III .6.1. Résistance à la compression

La figure III-11 montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons auto plaçant [42], de bétons ordinaire et à hautes performances [43], [40],[35]. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température. L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines.

- *Le premier domaine*, de la température ambiante à 300°C - 400°C, est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. La baisse de résistance est observée autour de 100°C — 150°C suivant les auteurs. Cette légère baisse de résistance est liée au départ de l'eau qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuillets du gel de C-S-H. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion. Jusqu'à la température de 300°C - 400°C, un gain de résistance est remarqué et peut être retardé avec les BHP compte tenu de leur faible perméabilité qui ralentit le départ de l'eau [44], [41]. Le départ de l'eau peut entraîner une augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface [45], [41].

-*Le second domaine*, au delà de la température 300°C - 400°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques [39].

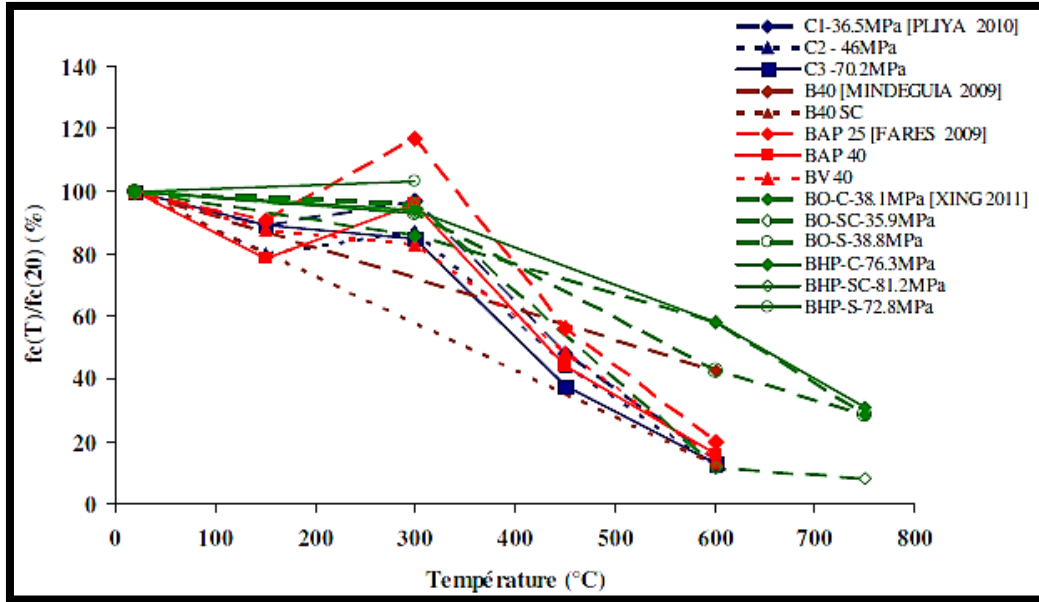


Figure III-11 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [43], [40], [42],[35]

L'étude de l'influence de la nature des granulats a fait l'objet de plusieurs études [43],[35], [39]. [43] a étudié l'influence de granulats calcaire, de silex (silico-calcaire) et siliceux dans les bétons ordinaires (figure I-12 -a) et dans les bétons à hautes performances (figure I-12 -b). Xing a constaté une très faible résistance résiduelle des bétons de granulat de silex à partir du chauffage à 600°C. Cette faible résistance des bétons de granulat de silex est à 3 à 5 fois plus faible que celle des bétons de granulat calcaire et béton de granulat siliceux. La diminution de la résistance résiduelle à la compression de béton de granulat calcaire est plus faible que celle du béton de granulat siliceux [39].

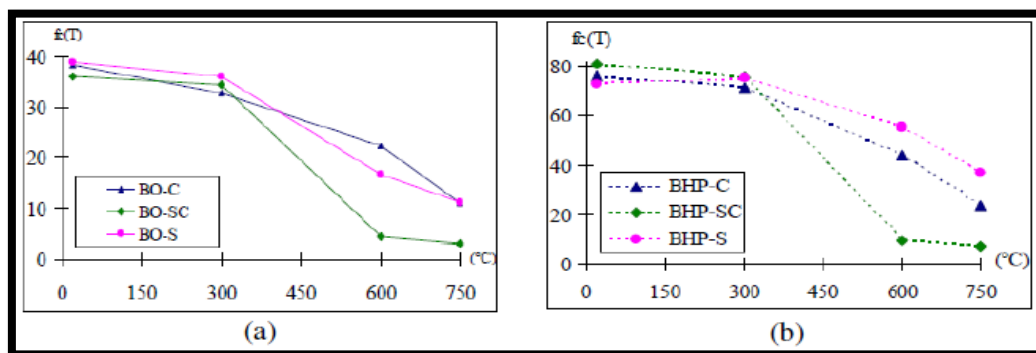


Figure III-12 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats [43].

Des études ont été menées aussi sur l'ajout des fibres de polypropylène, métalliques ou de cocktail de fibres dans le béton porté à une température élevée. La présence de fibres de

polypropylène dans le béton améliore sa stabilité thermique. Le polypropylène fond, se vaporise en générant un canal qui facilite le transport de masse. La présence de fibres de polypropylène entraîne une porosité supplémentaire du matériau lors du chauffage [40], [15]. Sur les performances mécaniques, les avis divergent selon les auteurs. Les auteurs [40], [46], [50] ont remarqué une baisse de résistance résiduelle tandis que les autres auteurs [47], [48],

[49] ont observé le phénomène contraire. Il faut toutefois noter que la teneur hydrique, la vitesse de chauffage ainsi que les conditions expérimentales ne sont pas identiques. En présence de fibres métalliques ou de cocktail de fibres, une amélioration de la résistance résiduelle à la compression a été remarquée à travers la littérature [40], [46], [49], [50] (figure III-13).

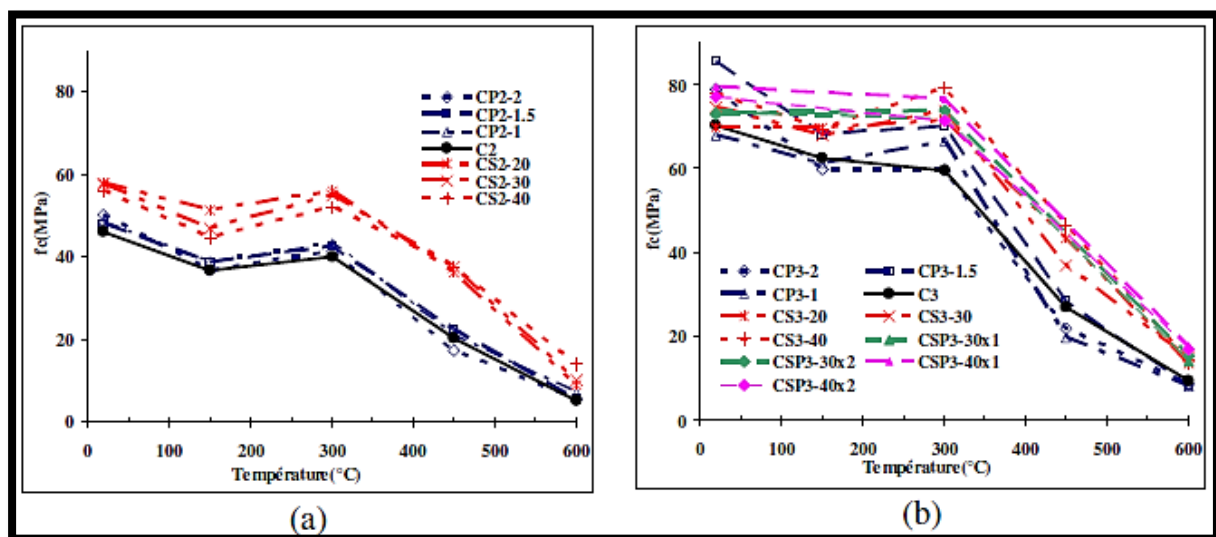


Figure III-13 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression des BO (a) et BHP (b) avec ou sans les fibres de polypropylène, métalliques, et cocktail de fibres (S-P) [40].

Les résultats de [46] et [49] permettent de mettre en évidence l'impact des fibres de carbone sur la résistance résiduelle des bétons BHP. À la température de 800°C, la résistance résiduelle est d'environ 32% par rapport à la résistance initiale pour un BHP contenant 0.6% de fibres de carbone [49].

III .6.2. Résistance à la traction

La figure I-19-(a) montre les résultats d'essais de résistance résiduelle à la traction par fendage de bétons ordinaires et de bétons à hautes performances de [28], [51], [26] et [47]. La résistance résiduelle à la traction diminue avec la température. Une légère baisse s'observe jusqu'à la température de 350°C, puis une chute de résistance plus importante [47], [26], [51], [28]. Les bétons à faible rapport E/C présentent une baisse plus significative de résistance que les bétons à rapport E/C élevé dès la température 150°C [26].

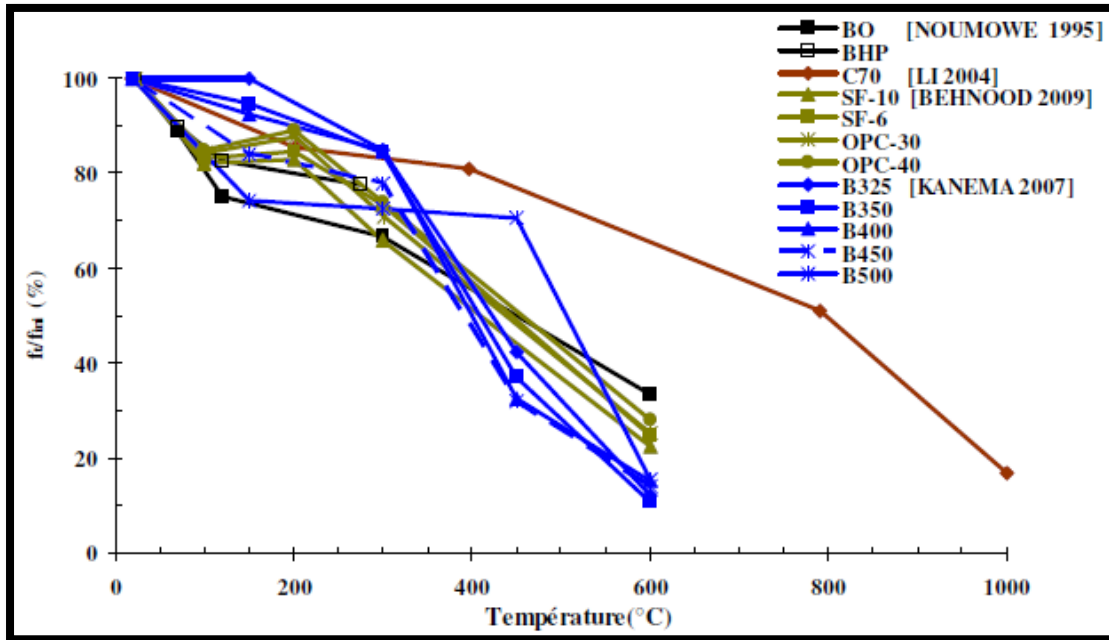


Figure III-14 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage [47],[26],[51], [28].

Comme en compression, l'influence de la nature des granulats sur l'évolution de la résistance résiduelle à la traction est remarquée par [43] (figure III-15). L'auteur note une plus grande accélération de la perte de résistance entre 300 et 600°C des bétons de granulats siliceux et de granulats de silex. La perte de résistance des bétons de granulats siliceux, de silex et calcaire est respectivement de 87%, 71% et 48% à 600°C. Au-delà de cette température, la perte de résistance des bétons de granulats calcaires devient plus importante et cela liée à la décarbonatation [40], a étudié l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton suivant la classe de béton. Des bétons ordinaires ($E/C=0.45$) et des bétons à hautes performances ($E/C=0.3$) ont été confectionnés et chauffés suivant différents cycles de chauffage-refroidissement. Pliya a remarqué un impact élevé des fibres de polypropylène sur la résistance à la traction des bétons ordinaires entre les températures 150°C et 450°C (figure I-21 -a). L'auteur attribue cette amélioration de résistance à la fusion du polypropylène qui remplit les pores du béton et se resolidifie durant la phase de refroidissement. Les forces de contact et les liaisons entre les différents grains s'améliorent ainsi. Avec le béton à hautes performances, du fait de sa forte densité, les fibres fondues diffusent moins dans la matrice cimentaire. Cette faible propagation du polypropylène fondu, couplée à une fissuration induite par l'augmentation de volume du polypropylène avec la température explique le fait que la résistance résiduelle à la traction par flexion des bétons BHP ne s'améliore pas. Après le chauffage à 600°C, les résistances résiduelles à la traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes.

Noumowé [28], [46], [47] ont aussi souligné un effet négligeable de la présence des fibres de polypropylène sur la résistance résiduelle des bétons BHP (figure III-16-b).

Par contre, Haniche, Chen et Liu [49] ont constaté un gain de résistance à la traction par flexion de BHP en présence de fibres de polypropylène après 300°C ou 400°C (figure III-16–b).

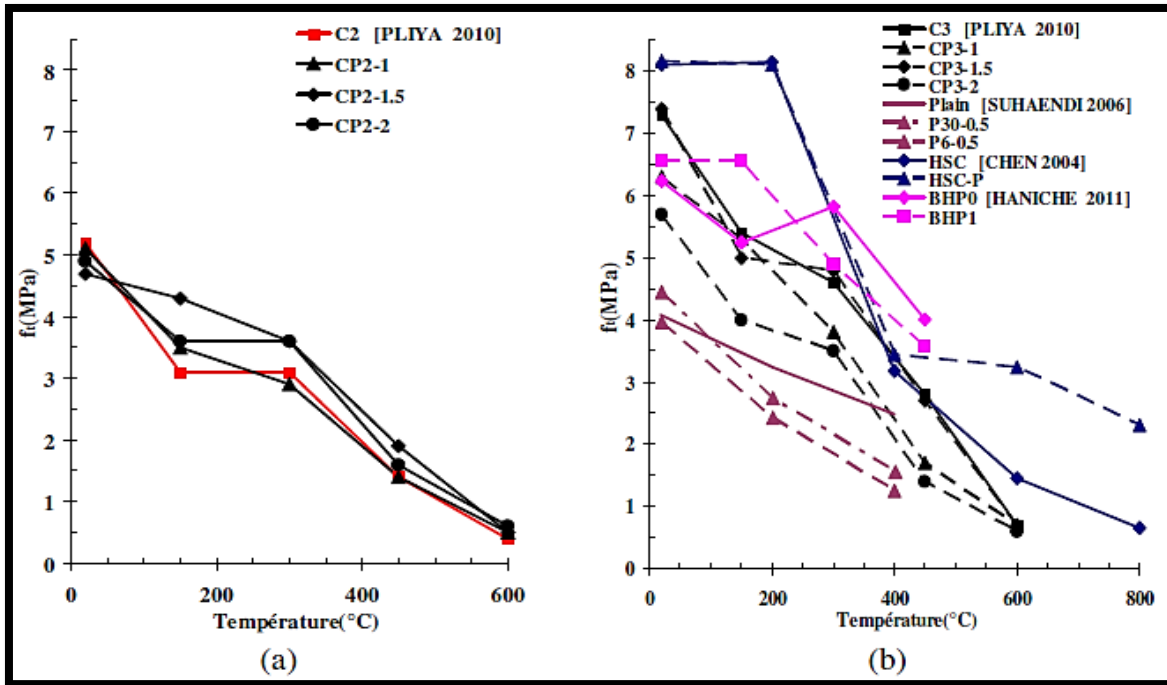


Figure III-16 : Évolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion de bétons avec et sans fibres de polypropylène : (a) pour BO et (b) pour BHP, [40],[46], [49].

En présence de fibres métalliques, on observe une influence positive de celles-ci sur la résistance résiduelle à la traction du béton. Comme pour le béton avec et sans fibres de polypropylène, cette résistance diminue avec l'augmentation de la température. Mais, la réduction de la résistance résiduelle à la traction varie lentement pour le béton avec les fibres métalliques [40], [46], [49]. L'effet des fibres de carbone sur la résistance résiduelle à la traction est le même que celui des fibres métalliques. L'ajout de fibres métalliques ou de carbone, non seulement améliore la capacité résistante à la traction pour le béton exposé à haute température, mais encore limite l'ouverture des fissures [49].

III .6.3 Module d'élasticité

Contrairement aux mesures de résistances à la compression et à la traction, il existe très peu de données dans la littérature sur l'évolution du module d'élasticité du béton porté à une température élevée. La figure III-17 regroupe les évolutions de module d'élasticité résiduel de différents bétons, [40], [42], [26], [28]. D'une manière générale, le module d'élasticité résiduel diminue d'une manière progressive et identique en fonction de la température et quel que soit le rapport E/C. Le type de béton n'influe donc pas sur l'évolution du module d'élasticité [40], [26], [36]. Kenema a observé une rigidité presque nulle (2%) à la suite d'un chauffage à 600°C. La forte baisse de rigidité du béton chauffé est liée aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire, de la déformation des granulats avec l'interface pâte - granulats et l'augmentation du volume poreux [40],

[36], [28].

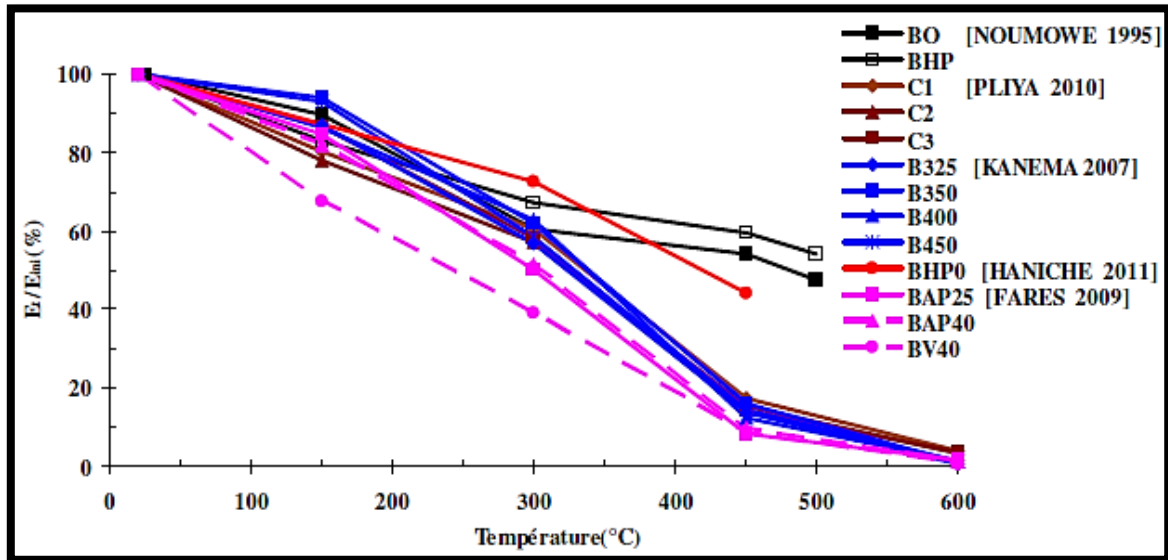


Figure III-17 : Évolution du module d'élasticité résiduel relatif, [40], [42], [26], [28]

L'ajout de fibres de polypropylène semble mener à une baisse du module d'élasticité résiduel du béton à haute résistance au cours du chauffage [46]. Le module d'élasticité résiduel du béton à haute résistance diminue avec le dosage de fibres de polypropylène utilisé [46] et une diminution significative (33%) avec le dosage de 1,8 kg/m³ en fibres à 200°C est notée par. Des tests réalisés à chaud par [36] montrent le même phénomène pour des bétons contenant 0,9 kg/m³ et 1.75kg/m³ de polypropylène. Cependant, il y a de légers gains sur les modules d'élasticité pour des bétons BHP de fibres de polypropylène après un chauffage à 300°C. Au-delà de cette température, les modules d'élasticité résiduels des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont voisins [40] (figure III-18-a). Avec les fibres métalliques, un effet bénéfique est constaté jusqu'à la température 300°C - 400°C [40], [46]. Au-delà de cette température, la différence entre le béton sans fibres et le béton de fibres n'existe plus quasiment, quel que soit le dosage [40] (figure I-18-b). Les résultats concernant le module d'élasticité mesuré à chaud par [49] aboutissent à la même évolution pour des bétons BHP avec des fibres métalliques. Une perte de module du béton dosé à 0.54% de fibres métalliques est plus grande que celle du béton sans fibres [49].

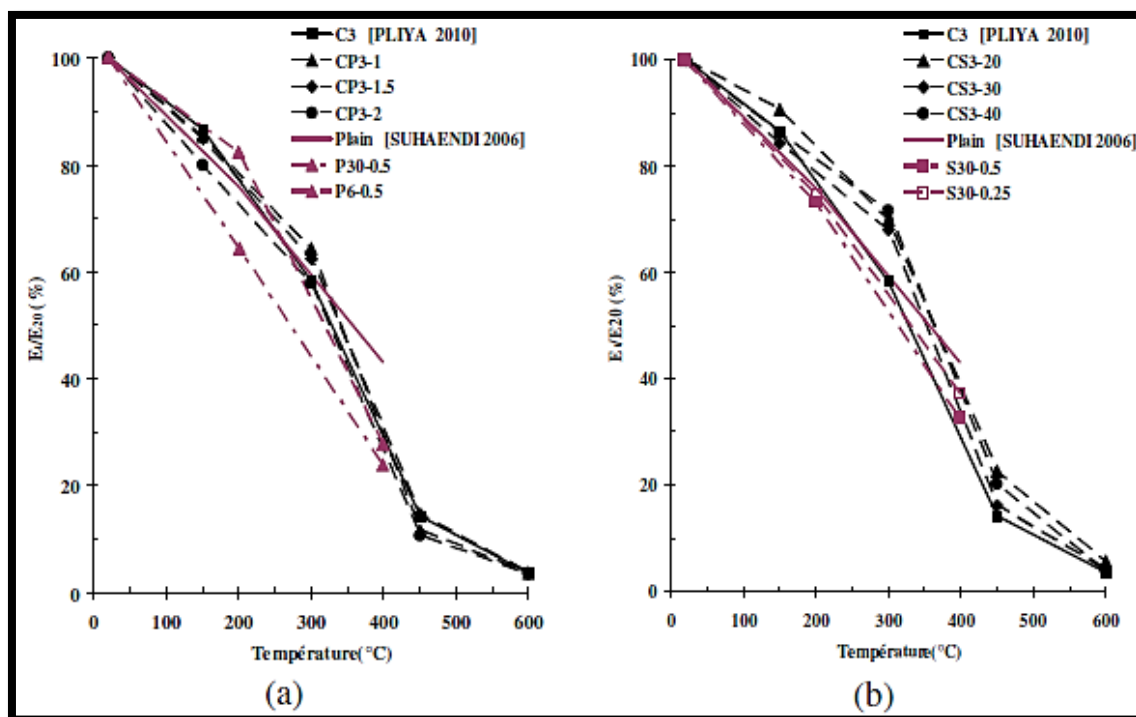


Figure III-18 : Évolution du module d'élasticité résiduel relatif de BHP avec ou sans fibres : (a) pour fibres de polypropylène et fibres métalliques (b) [40], [46].

L'influence de la nature des granulats sur l'évolution du module d'élasticité a été présentée dans la littérature [43], [35], [21]. Schneider constate que le module d'élasticité dépend significativement du type de granulats. Le béton calcaire présente une décroissance du module élastique plus faible que le béton de quartzite. Ce phénomène est aussi observé sur le béton ordinaire contenant de granulats calcaires par rapport à ceux contenant des granulats siliceux et silico-calcaires [43] (figure III-19-a). À 600°C, le module d'élasticité du béton de granulat silico-calcaire a une rigidité presque nulle [43], [35]. Néanmoins, il n'y a pas de différence de module d'élasticité entre les bétons à hautes performances contenant de granulats calcaires et siliceux [43]. Pour des tests réalisés à chaud, les granulats calcaires et siliceux n'influencent pas sur la variation des modules d'élasticité du béton à hautes performances [Cheng et al. 2004] (figure III-19-b).

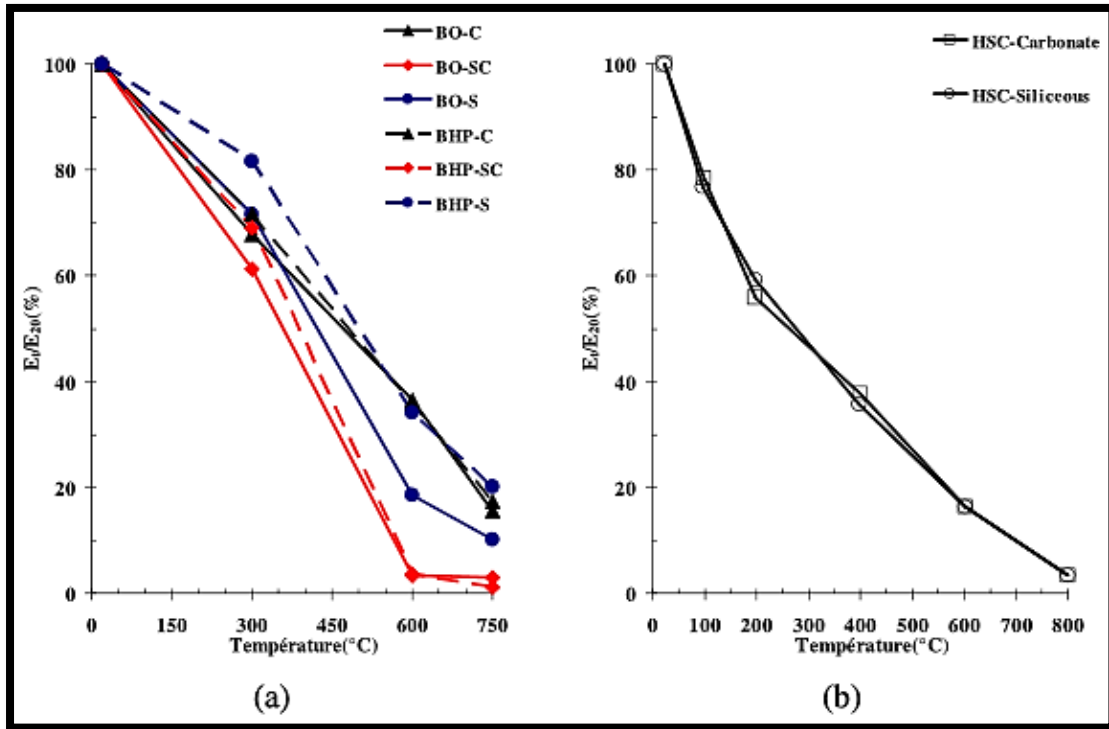


Figure III-19 : Influence des granulats sur le module d'élasticité résiduel relatif : test à l'ambiance (a) [43], test à chaud (b)

III.6.4. Perte de masse :

Le processus de perte de masse se produit lorsque la température augmente. Le départ de l'eau est la principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C [15].

La figure III-20 montre les résultats expérimentaux de perte de masse en fonction de la température obtenus par [36]. Généralement, ce processus se déroule en trois étapes liées à la perte d'eau dans le béton [43],[40],[26], [48],[36], [23],[28] :

- *De la température ambiante jusqu'à 100 - 150°C*, il y a une faible perte de masse due au départ de l'eau libre contenue dans le béton.
- *Entre 150 et 300°C*, la perte de masse augmente rapidement. Ceci est lié au départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates C-S-H et à la décomposition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Jusqu'à 300°C, le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale [26].
- *Au-delà de la température 300°C*, il y a une faible perte de masse correspondant à la dés-hydroxylation de la portlandite (450-550°C), à la décomposition des silanols (SiOH), du silice (400-570°C) [43], et à la décarbonatation du calcaire CaCO_3 (600-800°C) [43], [48],[19]

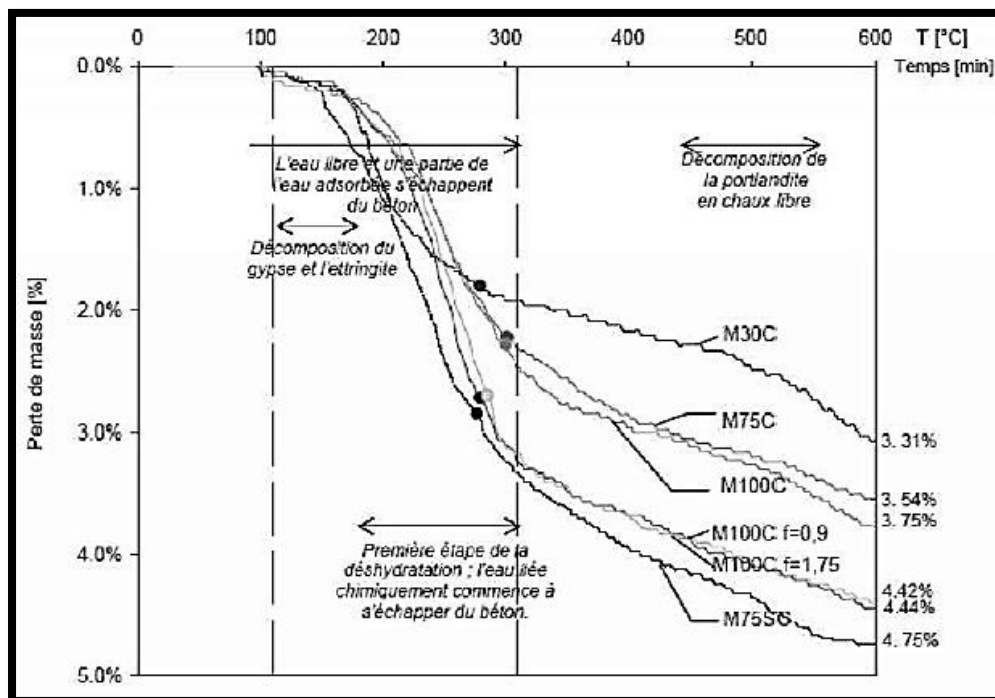


Figure III-20 : Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [36]

Des études menées par plusieurs auteurs montrent que la perte de masse du BHP est toujours inférieure à celle du BO. Ceci est lié à la quantité d'eau initiale contenue dans le mélange du béton [26]. En effet, avec un chauffage à 1°C/min et un palier de température constante à 600°C d'une durée de 1h, la perte de masse mesurée par, [26] est approximativement celle de la teneur en eau initiale. Avec un chauffage rapide et en l'absence d'un palier de temps pour 600°C, le béton n'est pas totalement séché. La perte de masse mesurée par, [15] est inférieure à la teneur en eau initiale (figure III-21).

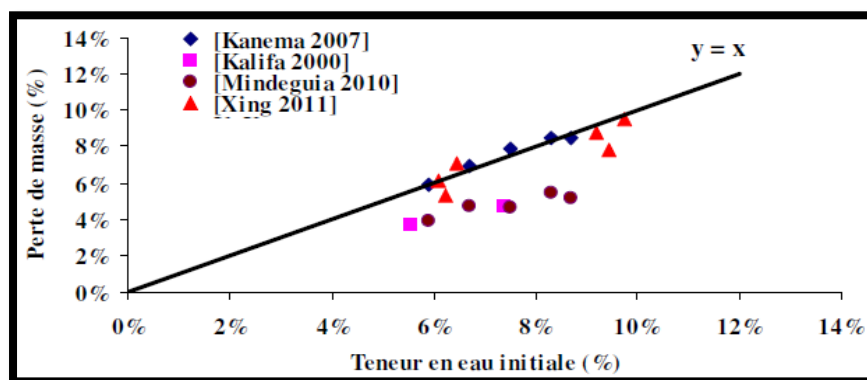


Figure III-21 : Comparaison de la perte de masse et de la teneur en eau initiale des bétons soumis à 600°C [43], [26], [15].

L'effet de la vitesse de chauffage a été étudié par [26] (figure III-22). L'auteur remarque que lorsque la vitesse de chauffage est lente, la quantité d'eau évacuée est plus grande à chaque température entre 100 et 300°C.

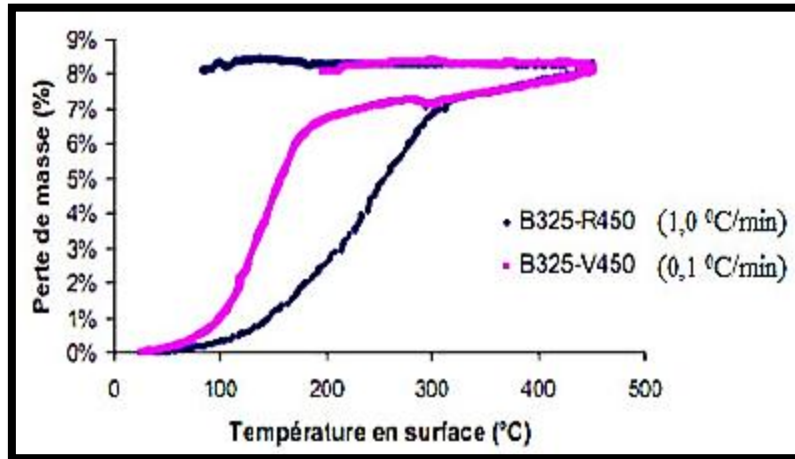


Figure III-22 : Évolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage [26].

L'influence de la perte de masse suivant la nature des granulats est liée au coefficient d'absorption des granulats [43]. L'auteur constate que, étant très peu poreux, les granulats de quartzite perdent peu d'eau lors du chauffage. Par contre, la plus grande perte de masse des bétons de granulat silico-calcaire provient du départ d'eau absorbée par les carbonates poreux présents dans ce granulat et du départ d'eau des silex après 450°C.

III.7. Conclusion :

Lorsque le béton est soumis à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés mécaniques.

L'eau, présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, s'échappe progressivement et représente la principale cause de perte de masse du béton. L'évolution de la perte de masse est regroupée en trois domaines : de 20 – 150°C, on observe une faible perte de l'ordre de 3% ; entre 150 - 300°C une perte rapide puis au-delà de 300°C, un ralentissement de perte de masse.

Les diverses transformations physico-chimiques que subit le béton chauffé sont : la déshydratation des C-S-H (une première entre 150 – 300°C et une seconde au-delà de la température 600°C), la dés hydroxylation de la portlandite (vers 570°C) qui conduit à la formation de la chaux qui, durant la phase de refroidissement, réagit avec l'eau contenue dans l'air occasionnant ainsi un volume important de portlandite.

CHAPITRE IV
MATERIAUX ET
MATERIEL
UTILISE.

Chapitre IV : Matériaux matériels et essais

IV. 1 Introduction :

Dans toute étude sur les bétons ou autres matériaux, la présentation et la caractérisation des différents matériaux et matériels utilisés est une tâche indispensable pour que le travail soit valable, strict et dans les normes.

Dans ce chapitre, on va présenter les différents matériaux (gravier, sable, ciment et fibres de verre) utilisés dans cette étude, afin de déterminer les caractéristiques nécessaires qui nous permettront de procéder aux formulations de béton (caractéristiques physiques et mécaniques) et on décrira les calculs de formulation des bétons étudiés, ensuite on va décrire aussi les différents essais destructifs et non destructifs avec leurs procédures et normes.

IV. 2. Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed BOUDHIAF M'Silla.

IV. 3. Caractéristiques des matériaux :

IV. 3. 1. Caractéristiques du gravier :

Le gravier utilisé pour la confection du béton est un gravier disponible au niveau de notre université. Les fractions utilisées sont : (3/8), (8/16)

IV. 3. 1. 1. Analyse granulométrique du gravier concassé : EN 933-5

◆ But de l'essai

L'analyse granulométrique d'un échantillon a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages des différents grains constituant l'échantillon testé.

◆ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

◆ Critères que doit l'échantillon comblé :

La quantité utilisée doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée répond au critère suivant :

$$M \geq 0,2 D_{\max.}$$

D_{max} : Diamètre maximal du gros granulat en (mm).

M : La masse de l'échantillon en (kg).

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 02 fois durant 07 minutes à chaque fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Dimension des tamis en (mm)	Essais		Refus En (g)	Refus cumulé En (g)	Refus cumulé En %	Tamisât cumulé En %
8	78	83	80.5	80.5	5.03	94.97
6.3	594	530	562	642.5	40.15	59.85
5	265	318	291.5	934	58.37	41.63
4	402	407	404.5	1338.5	83.65	16.35
3.15	167	221	194	1532.5	95.78	4.22
2.5	62	9	34.5	1567	97.93	2.07
fond	33	32	32.5	1599.5	99.96	0.04

Tableau IV.1: L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).

Dimension des tamis en (mm)	Essais		Refus En (g)	Refus cumulé En (g)	Refus cumulé En %	Tamisât cumulé En %
16	235	156	195.5	195.5	6.1	93.9
12.5	787	791	789	984.5	30.76	69.24
10	1240	1200	1220	2204.5	68.89	31.11
8	687	776	731.5	2936	91.75	8.25
6.3	243	269	256	3192	99.75	0.25
5	5	6	5.5	3197.5	99.92	0.08
fond	3	2	2.5	3200	100	00.00

Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/16).

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisés sont tracés ci-dessous, ainsi que la courbe du mélange.

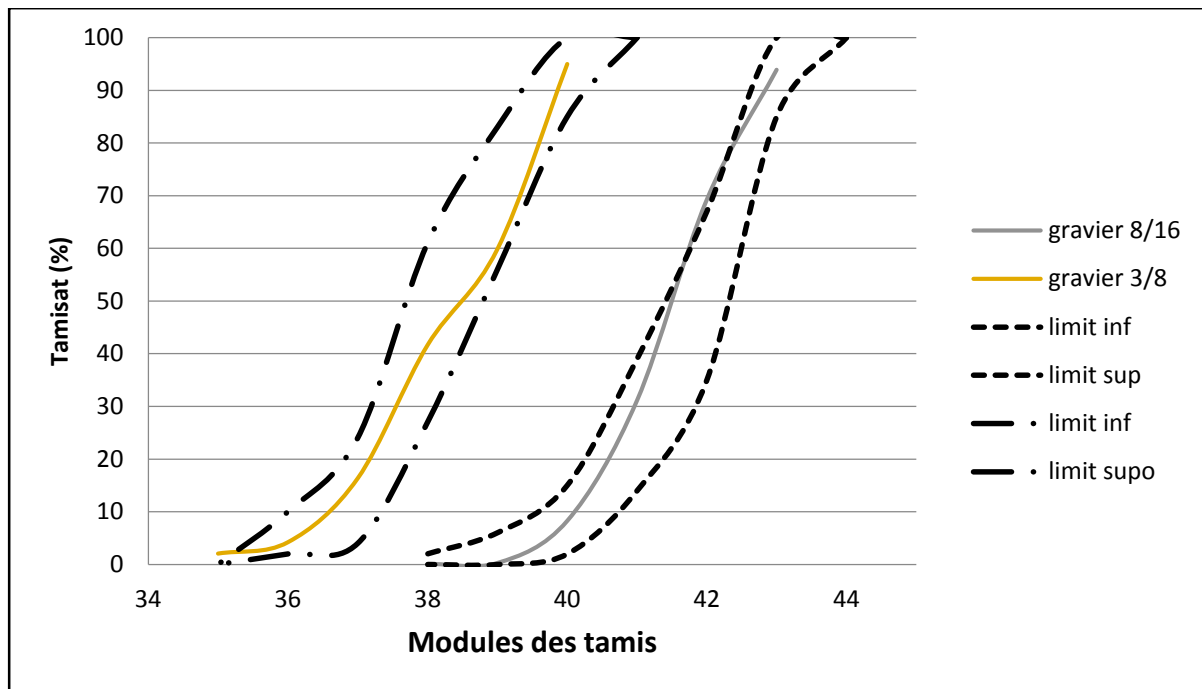


Figure I.V : 1 : Les courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/16.

VI. 3. 1. 2. Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparent).

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu ou volume réel).

Les masses volumiques s'expriment en fonction des unités courantes des masses et des volumes :

$$\text{t/m}^3, \text{kg/dm}^3, \text{g/cm}^3.$$

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité.

VI. 3. 1. 2. 1. La masse volumique apparente (γ) : EN 1097-6

◆ Principe :

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

◆ Mode opératoire :

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1 ,
- ✓ Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- ✓ Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- ✓ Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- ✓ Araser à la règle,
- ✓ Peser le contenu et noter M_2 .
- ✓ L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Il résulte que :

$$\gamma = (M_2 - M_1)/V \dots\dots(IV.1)$$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Matériaux	M1 (kg)	V 1(l)	M2 (kg)	app γ	moy γ (kg/l)
3/8	2.921	7	12.934	1.430	1.427
			12.900	1.425	
8/16	3.489	10	17.416	1.392	1.396
			17.500	1.401	

Tableau IV.3 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé [(3/8), (8/16)].

◆ **Principe :**

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

◆ **Mode opératoire :**

- ◆ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (400 ml),
- ✓ Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air,
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 ,
- ✓ Le volume absolu ou réel est $V = V_2 - V_1$ (IV.2)
- ✓ La masse volumique réelle est: $\rho = M / (V_2 - V_1)$ (IV.3)

L'opération se fait 02 fois et en prendre la moyenne. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Matériaux	M1 (kg)	V 1(ml)	V2 (ml)	app γ	moy γ (kg/l)
3/8	0.3	400	520	2.5	2.52
			518	2.54	
16/8	0.3	400	520	2.5	2.51
			519	2.52	

Tableau IV.4: La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15)].

VI. 3. 1. 3.La porosité : EN 1097-6

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \dots \dots (IV.4)$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P (\%) = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho}\right) \times 100 \dots\dots(IV.5)$$

VI. 3. 1.4. La compacité : EN 1097-6

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \dots\dots(IV.6)$$

Aussi : $C(\%) = 1 - P \dots\dots(IV.7)$

VI. 3. 1. 5.L'indice des vides : EN 1097-6

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots(IV.8)$$

Aussi : $e(\%) = \frac{1-C}{C} \dots\dots(IV.9)$

Les grandeurs de la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats sont rapportés sur le tableau suivant :

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides e(%)
(3/8)	44	66	52
(8/16)	45	55	81

Tableau IV.5 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

VI. 3. 1. 6.La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : EN 1097- 2

◆ **But de l'essai :**

Estimé la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats.

Principe de l'essai :

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. À la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm.

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5).

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'acier dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 - 10	9	3960	à
10 - 14	11	4840	-150
10 - 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à
25 - 50	12	5280	-150

Tableau IV.6 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.



Figure IV: .2: Appareille de los Anglos.



Figure IV: .3: L'échantillon et les boules avant l'essai.

♦ **Mode opératoire :**

- ✓ Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- ✓ Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr /min à 33 tr/min.
- ✓ Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.
- ✓ Laver le refus au tamis de 1.6 mm. Égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- ✓ Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

$$P = 5000 - \text{refus} \dots \dots \text{(IV.10)}$$

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :

$$L_A = 100 (P/5000) \dots \dots \text{(IV.11)}$$

P : est le passant à 1.6mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Tableau IV.7: Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A .

Les résultats obtenus sont inscrire dans le tableau ci-dessous :

Fraction granulaire	L_A (%)
(8/16)	17.8

Tableau IV.8 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier (8/16).

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

VI. 3. 1. 7. Degré d'absorption d'eau : EN 1097-6

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimées (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100 \dots\dots(IV.12)$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Fraction	$M_H(g)$	$M_S(g)$	A (%)	A (%) _{moy}
(3/8)	1007	1000	0.7	0.6
	1005	1000	0.5	
(8/16)	1003	1000	0.3	0.55
	1008	1000	0.8	

1 Tableau IV.9 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/16).

VI. 3. 2. Caractéristique du sable :

Nous avons utilisé dans ce projet de fin d'étude un sable local de dune d'origine siliceux vient d'OUED SOUF d'où ses caractéristiques sont les suivant :

VI. 3. 2. 1. Analyse granulométrique : EN 933-1

◆ But de l'essai :

Permettre la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

◆ Principe de l'essai :

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

◆ Mode opératoire :

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3minutes dans le cas des sables.

En prépare 02 échantillons de sable de dune de 2kg de masse, et en répète l'essai 02 fois et en prendre la moyenne.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF sont regroupés dans le tableau (10) ci-dessous :

Sable

Dimension des tamis en (mm)	Essais		Refus En (g)	Refus cumulé En (g)	Refus cumulé En %	Tamisât cumulé En %
	1	2				
5	1	2	1.5	1.5	0.15	99.85
2.5	9	11	10	11.5	1.15	98.85
1.25	64	71	67.5	79	7.9	92.1
0.63	276	281	278.5	357.5	35.75	64.25
0.315	482	477	479.5	837	83.7	16.3
0.16	140	134	137	974	97.4	2.6
0.08	24	22	23	997	99.7	0.3
fon	1	0	0.5	997.5	99.75	0.25

Tableau IV.10 : Analyse granulométrique du sable de dune OUED SOUF.

Sable concassée:

Dimension des tamis en (mm)	Essais		Refus En (g)	Refus cumulé En (g)	Refus cumulé En %	Tamisât cumulé En %
	0.73	2.01				
5	0.73	2.01	1.37	1.37	0.137	99.86
2.5	151.29	122.96	137.12	138.49	13.84	89.16
1.25	392.81	318.04	355.42	493.91	49.39	50.61
0.63	210.46	236.03	223.24	717.15	71.71	28.29
0.315	149.54	206.6	178.07	895.22	89.52	10.48
0.125	88.17	86.09	87.13	982.35	98.23	1.77
0.08	7.01	4.23	5.62	987.97	98.79	1.21
Fon	1.84	22	11.92	999.89	99.98	0.02

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du sable concassé.

Analyse granulométrique des granulats G3/8 et G8/16 et sable concassée et sable Oued souf.

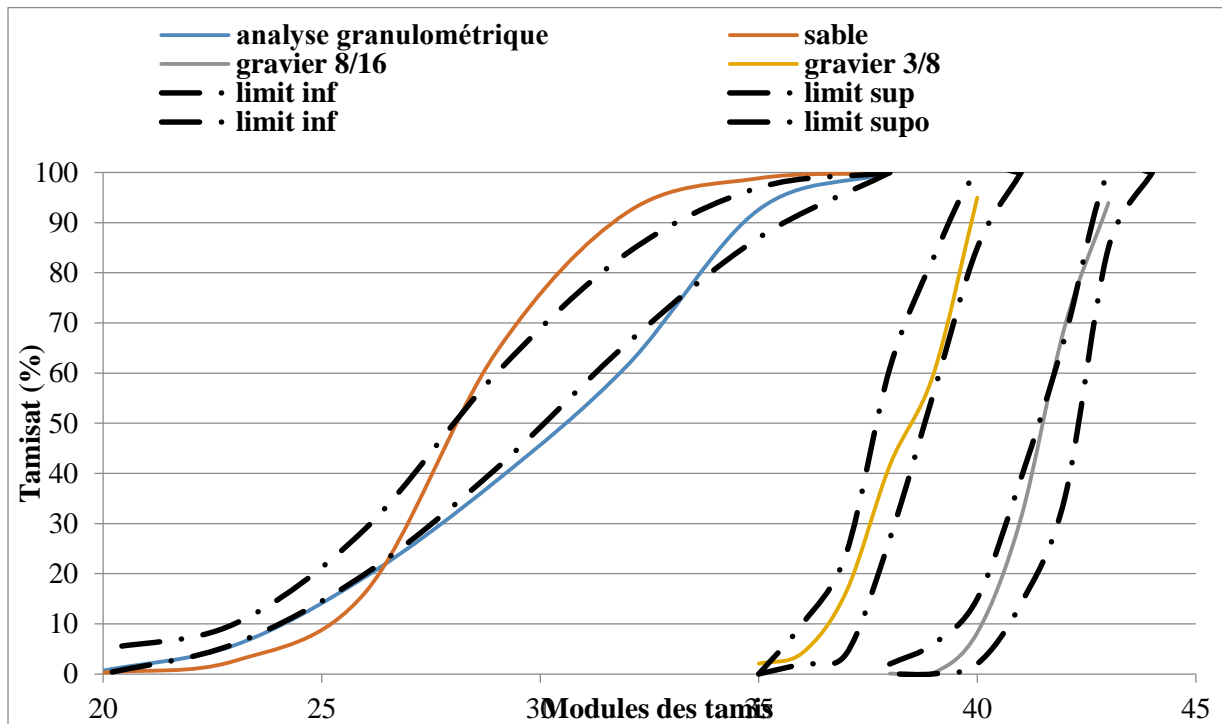


Figure IV.4 : Analyse granulométrique des granulats G3/8 et G8/16 et sable concassée et sable Oued souf.

VI. 3. 2. 2. Module de finesse : EN 12620

Le module de finesse est égal au 1/100^e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm.[17]

$$Mf = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis}\{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, en trouve que la norme Française donne la classification suivante :

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Tableau IV.12 : Classification des sables en fonction du module de finesse.

En a obtenue pour notre sable testé un module de finesse MF=2.26 ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.

Le sable testé est un **sable fin** : $2 < MF < 2.5$ Convient à un béton de moindre résistance mais facile de mettre en place.

En a obtenue pour notre sable testé un module de finesse **MF=2.26** et sable concassée **MF=2.82**, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.

Le sable de dune testé est un **sable Moyen** : $2 < MF < 2.5$ et sable concassée un sable gros : **MF>2.5** Convient à un béton de moindre résistance mais facile de mettre en place.

Les normes préconisent pour un bon sable à béton, un module de finesse de l'ordre de 2,2 à 2,8. En utilisant la méthode théorique, en prenant un sable de dune avec un module de finesse **MF = 2.26** qu'on va corriger avec le sable alluvionnaire dont le module de finesse **MF= 2.82** suivant les formules suivantes, on peut obtenir un mélange dont le module de finesse fixé au préalable à **MF = 2,5**.

Les proportions des deux sables seront les suivantes :

$$SD = \frac{(Mf - Mf2)}{Mf1 - Mf2} = 40\% \text{ et } SC = \frac{(Mf - Mf1)}{Mf2 - Mf1} = 60\%$$

Avec : **SD est le sable de dune.** / **SC est le sable concassé.**

VI. 3. 2. 3. Propreté « équivalent de sable » : EN 933-8

◆ But de l'essai :

L'essai permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm.

Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

◆ Mode opératoire :

- ✓ Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au premier repère.
- ✓ À l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et toper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libéré les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
- ✓ Laisser reposer pendant 10 min.
- ✓ Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontal en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vente au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.

- ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- ✓ Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- ✓ Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\% \dots\dots (IV.13)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

- ✓ Introduire el piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\% \dots\dots (IV.14)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

◆ **Interprétation des résultats :**

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité de sable
$E_s < 65$	$E_s < 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
$65 < E_s < 75$	$65 < E_s < 80$	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq E_s \leq 85$	$70 \leq E_s \leq 80$	Sable propre : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
$E_s \geq 85$	$E_s > 85$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau IV.13 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp} . [34]

En a répété l'essai 03 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau (13) ci-dessous :

	H1	H2	Esv %	Esv moy	h'2	Esp %	Esp moy
Échantillon 1	8.75	8.5	97.14	97.54	8.6	98.28	96.80
Échantillon 2	8.8	8.6	97.72		8.5	96.59	
Échantillon 3	9	8.8	97.77		8.6	95.55	

Tableau IV.14 : Résultats d'essais d'équivalent de sable de dune oued souf testé.

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv=97.54(%)
Esp= 96.80(%)

} Le sable est considéré Sable très propre.

	H1	H2	Esv %	Esv moy	h'2	Esp %	Esp moy
Échantillon 1	9.7	9.3	95.87	95.98	9.5	97.93	95.32
Échantillon 2	10.4	9.9	95.19		9.8	94.23	
Échantillon 3	9.7	9.4	96.90		9.1	93.81	

Tableau IV.15 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable concassée testé.

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv=95.98(%)
Esp= 95.32(%)

} Le sable est considéré Sable très propre.



Figure. IV.5 : Essai équivalent de sable.

VI. 3.2.4. Caractéristiques physiques du sable :

Il est nécessaire de déterminer tous les caractéristiques physiques pour le sable de dune . Pour cela, une série des essais a été effectuée afin de bien caractérisé notre sable.

VI. 3. 2. 4. 1. Masse volumique apparent : EN 1097-6

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisée un récipient de capacité 1 ℓ.

On remplit l'entonnoir avec du sable sec.

On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V_r \dots (IV.15)$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1\ell$).



Figure IV.6: Matériel utilisé dans la masse volumique apparente.

La porosité : $P(\%) = [1 - (\gamma/\rho)] \times 100\% \dots \dots (IV.16)$

La compacité : $C(\%) = 1 - P \dots \dots (IV.17)$

L'indice des vides : $e(\%) = p / (1-p) \dots \dots (IV.18)$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau(14) ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Les commentaires concernant les propriétés physiques, mentionnés dans le tableau, sont tirés d'après une étude de caractérisation du sable, les rapports et projets de recherches réalisées au sein du département de génie civil, université : Mohamed Boudiaf, M'silla.

Propriété	Valeurs	Commentaire
Provenance	OUEDI SOUF	Ce site se trouve dans un lieu accessible pour tous les utilisateurs.
Classe	0/5	Le sable est tamisé in situ.
Nature minéralogique	Siliceux	La silice représente plus de 90% d'après l'analyse chimique.
Masse volumique apparente	1,558	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique absolue	2,514	Un sable performance pour l'utilisation ordinaire.
Compacité	61,98%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Porosité	38,02%	Le sable est peu poreux.
Indice des vides	33,65%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Degré d'absorption	4.27%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.

Tableau IV.16 : Caractéristiques physiques du sable de dune.

L'Absorption :

$$M_h - M_s / M_h$$

	Abs	Etot	Eh
sable	4.27	0	-4.27

Tableau IV.17 : d'absorption d'eau de sable oued souf.

VI. 3. 3. Caractéristiques du ciment utilisé :

VI. 3. 3. 1. Présentation du ciment GICA :

Le ciment CEMI 42,5 est un ciment pour travaux dans les milieux fortement agressifs. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

C'est un ciment conforme à la norme NA 443 :



Figure. IV.7 : Sac de ciment GICA.

VI. 3. 3. 2 .Domaines d'utilisation :

Le ciment CEM I 42, 5 de La SCAEK

Convient pour :

Les bétons armés et non armés,

Préfabriqués ou précontraints, étuvées auto étuvés ;

Les bétons prêts à l'emploi ;

Le génie Civil (ouvrages et routes) ;

Les travaux de construction. /Les produits dérivés de ciment ;

(Logements, locaux commerciaux et Industriels) ;

Les mortiers pour chapes et crépis pour les milieux fortement agressifs.

VI. 3. 3. 3 Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment CPA CEM I 42,5 ES (CRS).

FICHE TECHNIQUE: CPA CEM I 42,5 ES (CRS)						
Conformément a la norme NA 443 édition 2002						
<u>Compositions Chimiques</u>			<u>Essais Physiques</u>		Garantie	Mesures
Éléments		Mesure	P,S	(g/Cm3)		3.16
SiO ₂ -T (NA 233)	%	21.79	SSB (NA 231)	cm ² /g		3388
AL ₂ O ₃	%	4.29	Temps de Prise Min (NA 232)	Début	≥ 60	206
Fe ₂ O ₃	%	5		Fin		307
Cao-T	%	64.37	Expansion mm (NA 229)	A,chaud	≤10	0.8
SO ₃ (NA 237)	≤3,5%	2.11	Refus %	90μ		4.82
K ₂ O	%	0.24	Consistence Normale (NA 229)	%		24.35
Na ₂ O	%	/	Retrait à 28 j (NA 440)	μm/m	≤1000	/
Cl (NA 5038=	≤0,1%	0				
P,A,F (NA 237)	≤3%	0.87				
CaO Libre	%	0.61				
R,Insoluble (NA 236)		0.86				
<u>COMPOSITION POTENTIELLES DU CLINKER</u>			<u>CARACTERISTIQUES MECANIQUES</u>			
C3S	%	63.26	R, FLEXION Mpa	02 jours		3.6
C2S	%	14.43		07 jours		6.3
C3A	≤5,0%	2.49		28 jours		8.3
C4AF	%	15.9	R, COMPRESSION MPa	02 jours	Li ≥12,5	16.4
				07 jours		36.2
				28 jours	Li ≥42,5	55.2

Tableau IV.18 : caractérisation de ciment (Fiche technique)

VI. 3. 4 :L'eau de gâchage : EN 1008

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université.

IV.3.5. L'adjuvant : super plastifiant Le MEDAFLOW 30

Conforme la norme EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de p décarboxylases d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant. Il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

Propriétés :

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- ✓ Obtention d'un rapport E/C très faible.
- ✓ Amélioration considérable de la fluidité.
- ✓ Une très bonne maniabilité.
- ✓ Éviter la ségrégation.
- ✓ Faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- ✓ Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme.
- ✓ Diminuer la porosité.
- ✓ Augmenter la durabilité.
- ✓ Diminuer le retrait et le risque de fissuration.

Mode D'emploi :

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite. **DOSAGE**

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés. **CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

CARACTÉRISTIQUES	
• Aspect	Liquide
• Couleur	Brun clair
• pH	6 – 6,5
• Densité	1,07 ± 0,01
• Teneur en chlore	< 0,1 g/l
• Extrait sec	30%

Figure. IV.8 : caractéristiques de super plastifiant MEDAFLOW 30.

Domaines d'application :

- ✓ Béton a haute performances.
- ✓ Béton auto-plaçant.
- ✓ Béton pompés.
- ✓ Béton précontraints.
- ✓ Béton architecturaux.

IV.3.6. L'ajout : fume de silice : Le MEDAPLAST HP : la norme NFP 18-502 :

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- ✓ d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées.
- ✓ d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.

Domaine d'application :

- ✓ Bétons à hautes performances
- ✓ Autoroutes, pistes d'aéroport
- ✓ Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- ✓ Bétons très sollicités
- ✓ Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- ✓ Bétons soumis à des milieux agressifs
- ✓ Sols industriels
- ✓ Silos

PROPRIÉTÉS :

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

Sur béton frais :

- ✓ Améliorer la cohésion
- ✓ Éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- ✓ augmenter les résistances mécaniques
- ✓ Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- ✓ Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- ✓ Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- ✓ Augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (MEDAPLAST SP, SP40) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

CARACTÉRISTIQUES	
• Aspect	Poudre
• Densité	0,5
• Composants :	
SiO ₂	> 85(%)
SO ₃	< 2,5 (%)
Cl-	< 0,2 (%)
• surface spécifique.....	> 15 (m ² /gr)
• Humidité par étuve à 105°C	< 1 (%)
• Taille des particules	< 0,1 (microns)

Figure IV.9: Caractéristiques de micro silice.

IV.3.7. fibre de verre :

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

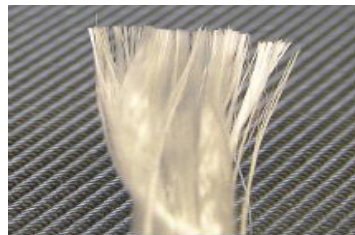


Figure. IV.10. photo fibre de verre.

Fibre	Diamètre en μm	Densité	Allongement de rupture en %	Module d'élasticité, en GPa	Résistance en traction, en GPa
Acier	5-500	7.8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2.6	2-3.5	80	2-3
Polypropylène	7.5	0.6	20.0	5	0.5

Tableau II.19: Propriétés physique et mécanique de certaines fibres.

IV.4. Composition du béton :

◆ But :

Déterminer les proportions de ciment, d'eau, de granulats et sable éventuels devant entrer dans la composition d'un béton dont on exige certaines performances.

IV.5. La méthode de L'Université de Sherbrooke :

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné ; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton.

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous figure IV.

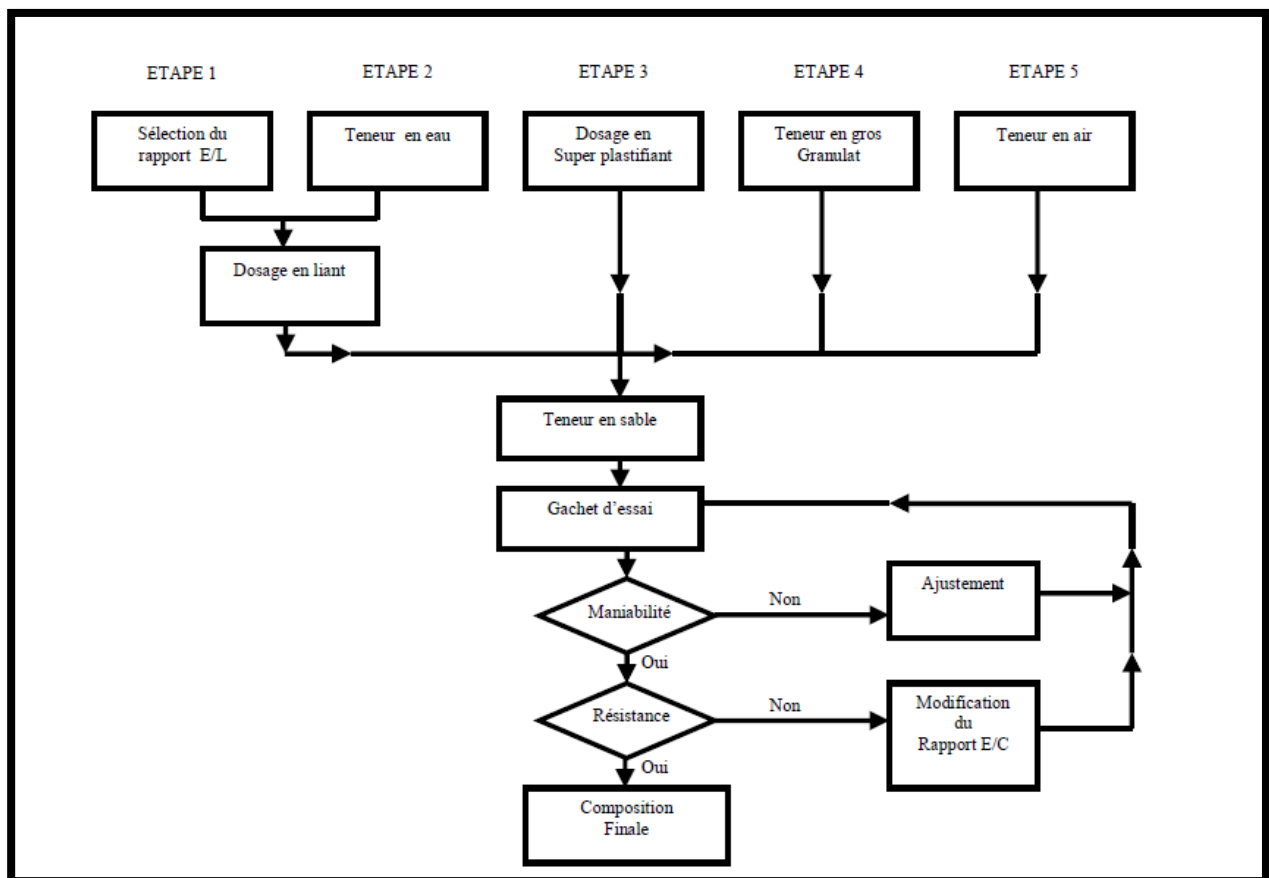


Figure IV.11 : organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

- ✓ le rapport eau / liant.
- ✓ le dosage en eau.
- ✓ le dosage en super plastifiant.
- ✓ le dosage en gros granulat.
- ✓ la teneur en air.

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présentes sur une seule feuille de calcul (voir page 42).

V.5.1. Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la **figure IV.10** pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la **figure IV.10**. donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau.

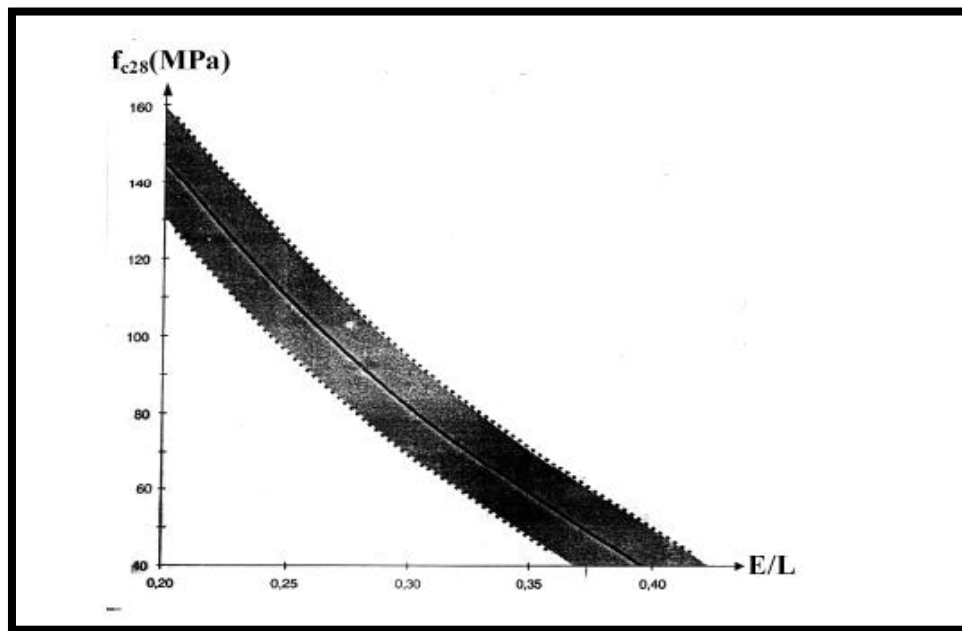


Figure IV.12 : relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression.

V.5.2. Dosage en eau :

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs : la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience (Rougeron et Aitcin, 1994). La figure IV.11 : présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5L/m³ à toutes les valeurs présentées à la figure V-29. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³. [11]

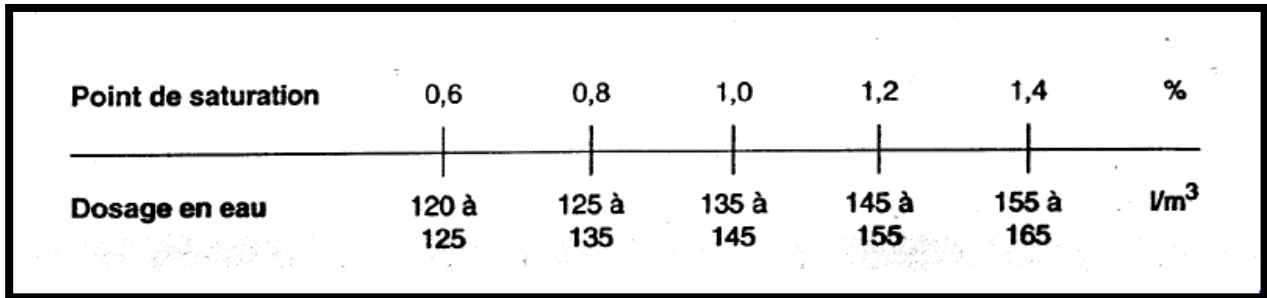


Figure IV.13: Détermination du dosage en eau.

V.5.3. Dosage en super plastifiant :

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

V.5.4. Dosage en gros granulat :

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure II-12 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³.

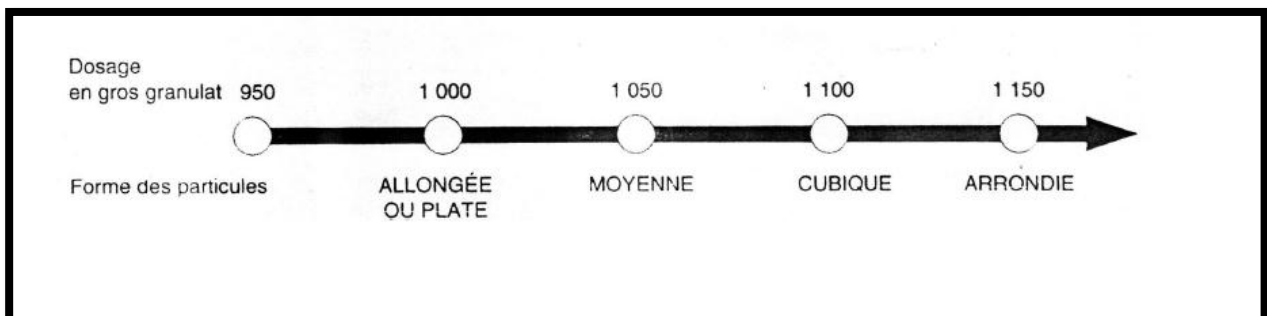


Figure IV.14 : Dosage en gros granulat.

V.5.5. Teneur en air:

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP.

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé.

Composition d'un béton a haute performance :

IV.5.6. Calcule de la composition du béton :

La méthode de formulation l'université Sherbrooke :

GACHEE :

$f_{c28} = 60$ MPa.

	G_s	%
Ciment	3.16	92%
Fume de silice	2.43	8%

	%			
Granulat	Gsss	Eabs	Etot	Eh
Gros		0.6	0	-0.6
Fin		4.27	0	-4.27

$$E_h - E_{tot} = E_{abs}$$

$$M = M_{SSS} (1 + E_h)$$

$E/L = 0.35$

$SP = 1.2\%$

$Eau = 150 \text{ l/m}^3$

Dosage Granulats. Gros = 100 kg/m^3

Teneur en air = 1.5%

$E/L = 0.35 \dots$

$150/L = 0.35 \implies L = 150/0.35$

$L = 428.57 \text{ kg/m}^3$

$L = 429 \text{ kg/m}^3$

$E = 150 \text{ kg/m}^3$

Ciment:

100 \longrightarrow 429

92 \longrightarrow x

$x = 395 \text{ kg/m}^3 \implies \mathbf{c = 395 \text{ kg/m}^3}$

Fume de silice:

$$\implies 429-395 = 34 \text{ kg/m}^3$$

$$F.s = 34 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{sol} = c \cdot d / 100 = 429(1.2) / 100 = 5.15 \text{ g}$$

$$V_{liq} = M_{sol} \cdot 100 / s \cdot G_{sup} = (5.15) \cdot (100) / (30) \cdot (1.07) = 16.04 \text{ l}$$

$$V_E = V_{liq} \cdot G_{sup} \cdot (100-s) / 100 = (16.04) \cdot (1.07) \cdot (100-30) / 100 = 12.01 \text{ l}$$

$$V_E = 12.01 \text{ L}$$

$$V_{sol} = V_{liq} - V_E = 16.04 - 12.01 = 4.03 \text{ l}$$

$$=== 1000 - 726.35 = 273.65$$

Densité (Gsup)	Teneur en solides (s) (%)	Msol =c*d/100	V liq= Msol*100/s*Gsup	VE = V liq*Gsup *(100-s)/100	Vsol= V liq-VE
1.07	1.2	5.15	16.04	12.01	4.03

Msol : 5.15 , Densité gravier = 2.51, densité = 1.07

E/L = 0.35 = L= 428.5 kg/m³ F.S = 8 %

M_G = M_x (1-w) M_G = 1043.7 Kg.

Matériaux		Teneur Kg/m ³	Volume L/m ³	Dosage état SSS kg/m ³	Correction D'humidité L/m ³	Composition		
						1 m ³	Gâchée d'essais	
Eau	E/L=0.35	150	150	150		175.25	4.20	
ciment		429	34.28	14.00	34.28		34.28	0.835
Fumée de silice			394.22	125	429		394.22	8.00
Gros granulat		1050	418.32	1050	+6.3	1043.7	18.78 6.26	
Granulat fin			273.65	716.96	+30.96	686.00	Sc=9.87 S=6.58	
Air	Pourcentage 1.5	15	0					
SP	1.2	4.03	5.15	-12.01	16.04	0.384		
totale								

Tableau IV. 20: Composition de béton BHP (formulation).

Le volume d'un gâché avec une majoration de 20% égal à $(0.1^3 \times 20 \times 1.2)$.

$$V_{tot} = 0.024 \text{ m}^3$$

IV.6. Matériels et essais :

IV.6.1. Essais sur béton à l'état frais :

Après avoir calculé théoriquement les compositions des différentes classes du béton, on va passer à la confection des éprouvettes de chaque classe et les effectuer les essais nécessaires commencent par celle à l'état frais.

a. Malaxage : EN 12390-2

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- ✓ Gros éléments,
- ✓ Liant,
- ✓ Sable,
- ✓ Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min,
- ✓ Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 min,

- ✓ Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré.

b. Affaissement au cône d'Abrams (slump test) : EN 12350-2

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il réalise à l'ordre suivant :

- ✓ Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égaies.
- ✓ Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\Phi = 16\text{mm}$.
- ✓ Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule.
- ✓ Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre



Figure IV.15 : Mesure de l'affaissement.

IV.6.2.Essais sur béton à l'état durci :

Le béton est considéré comme un solide monolithique après achèvement de la prise c'est un matériau perpétuelle évolution ceci pour plusieurs raison parmi lesquelles :

- ◆ La poursuite des réactions d'hydratation du ciment pendant plusieurs années notamment, la cohésion et les dimensions du matériau.
- ◆ Les variations du milieu ambiant engendrent des changements lents dans la structure du béton durci.

a. Durcissement du béton :

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progression du ciment.

Il bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le passe ceci peut expliquer par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décrois elle-même avec le temps.

b. Mode de conservation de béton : EN 12390-2

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton.

Les éprouvettes cubiques sont conservées dans l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}$. [35]

c. Résistance à la compression (essai d'écrasement) : EN 12390-4

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

Presse hydraulique :

La presse utilisée répond aux normes EN 12390-4, elle comporte deux parties :

- ✓ Unité de commande constituée de :
 - ◆ Un cadran pour valeur maximal de charge ;
 - ◆ Interrupteur principal ;
 - ◆ Commande de réglage de la vitesse ;
 - ◆ Clapet de charge-décharge.

- ✓ Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Figure IV.16 : Presse hydraulique capacité 3000 KN.

d. Description générale de l'essai : EN 12390-4

L'essai lui-même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bons résultats. On observera en particulier :

- ◆ Un bon centrage de l'éprouvette.
- ◆ Une vitesse de chargement donnée.
- ◆ On met la presse en marche de nouveau avec la même vitesse (0.5 KN/s) jusqu'à la rupture, on décharge et on note la charge de rupture F et la résistance R_c .

On calcule la résistance avec cette formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad \text{..(IV.33)}$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2).

IV.6.3. Essais non destructive :

a. Essais d'auscultation sonore : EN 12504-4

◆ Principe:

Il s'agit d'évaluer la résistance du béton à partir de la vitesse de propagation d'ondes. Il est en effet reconnu et prouvé qu'il existe un rapport étroit entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à l'intérieur de matériaux homogènes, et la qualité de ceux-ci .

La vitesse est le quotient entre la distance séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps de propagation de l'onde.



Figure IV.17 : Essai d'ultrasons et ses équipements.

b.4- Expression des résultats :

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est $M_2 - M_1$.

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A_{bs} = (M_2 - M_1) / M_1 \quad \dots (IV.34)$$

A_{bs} : taux d'absorption.

M_1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M_2 : masse d'éprouvette saturée d'eau.

V.7. Conclusion :

Ce chapitre est destiné pour la caractérisation des matériaux utilisé dans la composition des bétons étudiés, et les essais effectués à l'état frais et durci. Les matériaux utilisés dans ce travail sont acceptables.

CHAPITRE V
RESULTAS ET
DISCUSSION.

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats obtenus durant la période de réalisation de ce projet de fin d'étude.

Afin de répondre aux problématiques posées, un programme expérimental a été envisagé. Quatre différents mélanges ont été préparés ; un BHP témoin sans fibres de verre (F.V) et 3 autres BHP avec des différents des longueurs de (F.P) varie de 6, 12 et 18mm avec un dosage fixe à 2 Kg/m³.

Des essais à l'état frais ont été réalisés pour déterminer l'effet des fibres (F.V) sur le comportement des BHP. Après avoir conservé les bétons dans l'eau à 28 jours, des essais physiques et mécaniques avant et après traitement thermique ont été effectués pour mieux comprendre le comportement des BHP armés de fibres (F.V) et voire l'influence de la longueur des fibres (F.V) sur le comportement des BHP.

Les mélanges testés sont présentés sous les appellations suivantes :

BHPT : béton haute performance sans fibre de verre.

BHP_{0,6} : béton haute performance avec fibre de verre de longueur 6 mm.

BHP_{1,2} : béton haute performance avec fibre de verre de longueur 12 mm.

BHP_{1,8} : béton haute performance avec fibre de verre de longueur 18 mm.

V.2. Résultats obtenues avant le traitement thermiques :

V.2.1. Résultats à l'état frais :

V2.1.1. L'affaissement :

Des essais d'affaissements au cône d'Abrams ont été effectués pour voir l'influence du pourcentage des fibres de verre sur le comportement rhéologique (affaissements) des bétons.

L'ensemble des résultats obtenu sont regroupés dans le tableau suivant :

Type de béton	Affaissement (cm)
BHPT	20
BHP₆	16
BHP₁₂	17.5
BHP₁₈	18

Tableau V. 1: l'affaissement des bétons testés.

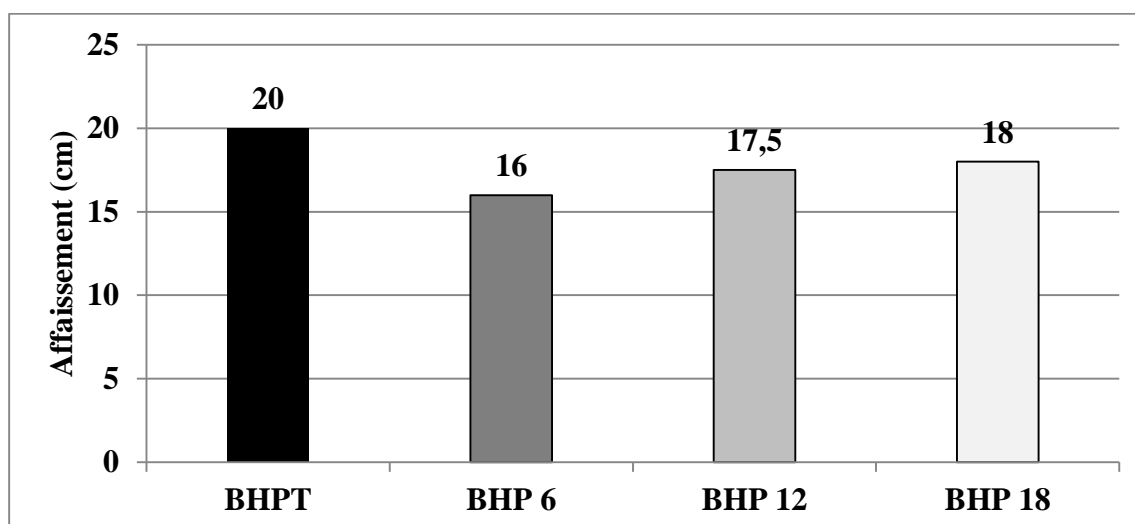


Figure V. 1: Variation de l'affaissement en fonction du dosage en fibres de verre des BHP testés.

La figure V.1 représente la variation de l'affaissement en fonction du dosage en fibres de verre des BHP testés.

En remarque que l'ajout des fibres affect l'affaissement de béton ; en remarque aussi que l'affaissement proportionnelle avec la longueur des fibres, d'où de on constate un écart d'ordre **20, 12.5 et 10%** entre béton témoin et **BHP₆, BHP₁₂ et BHP₁₈** respectivement.

On peut expliquer cette diminution de l'affaissement par l'effet des fibres qui forment des obstacles sous formes de réseaux qui rend l'écoulement des particules de béton difficile et donc provoquent une chute de l'affaissement ; plus la longueur des fibres et petite plus ils occupent un volume important dans la matrice du béton et construire un réseau dense qui bloc l'écoulement des particules de béton. Le cas contraire pour les fibres à grands longueurs. Cet explication est convient seulement à un pourcentage fixe on fibre.

V.2.1.2. La masse volumique apparente

Après avoir complété le malaxage du béton et le remplissage des moules des pesés de ces derniers ont été effectués pour déterminer la masse volumique apparente à l'état frais.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Type de béton	La masse volumique (t/m ³)
BHPT	2,967
BHP₆	2,523
BHP₁₂	2,567
BHP₁₈	2,493

Tableau V. 2: la masse volumique apparente à état frais.

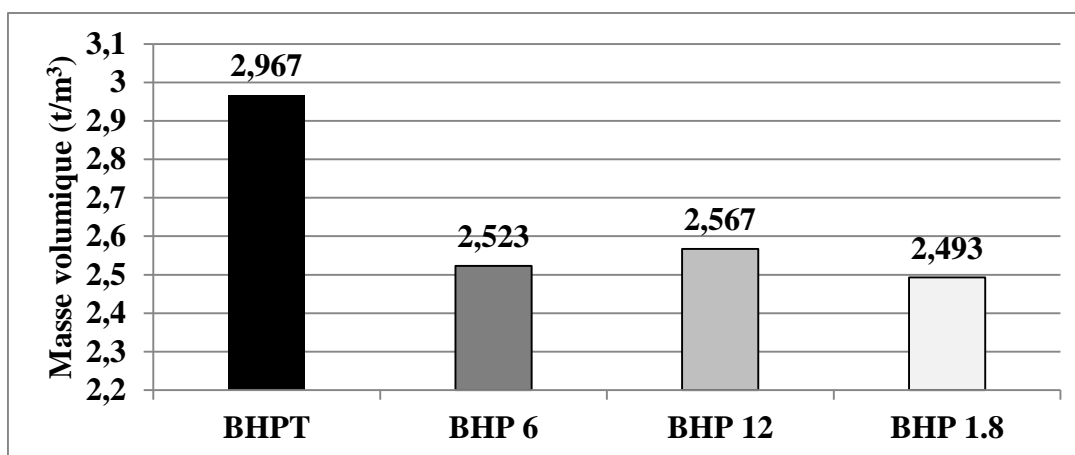


Figure V. 2: variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage de fibre verre.

La figure V.2.représente variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage de fibre verre.

On remarque que la masse volumique diminuée avec l'incorporation des fibres verre dans les bétons d'une façon similaire pour tous les bétons et à importe quel longueur. Un écart d'ordre 14.96, 13.48 et 15.97%entre béton témoin et BHP₆, BHP₁₂ et BHP₁₈respectivement.

On peut expliquer cette diminution de la masse volumique par le remplacement d'une quantité du béton (généralement de masse volumique d'ordre 2.5 (t/m³)) par les fibres de verre à faible masse volumique.

V.2.2: Résultats à l'état durci :

V.2.2.1 : La masse volumique apparente à l'état durci:

Type de béton	La masse volumique (t/m ³)
BHPT	2.468
BHP _{0,6}	2.423
BHP _{1,2}	2.451
BHP _{1,8}	2.440

Tableau V. 3: la masse volumique apparente à état durci.

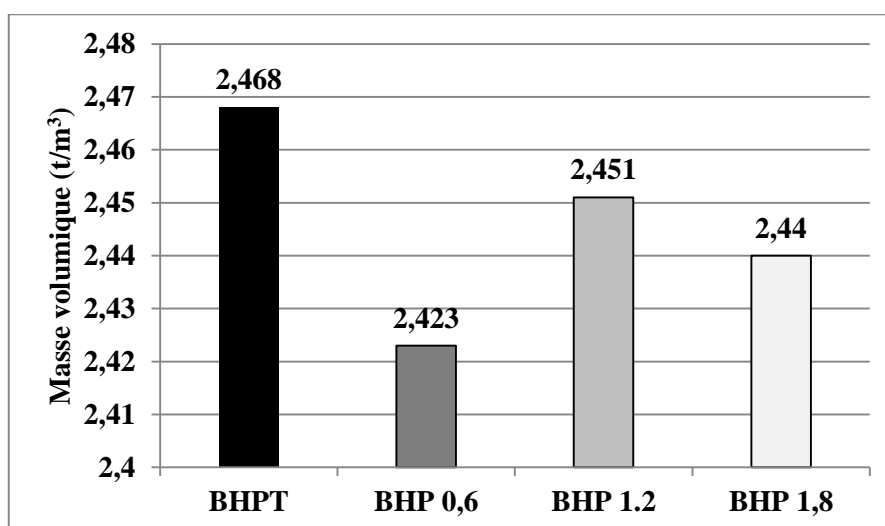


Figure V. 3: variation de la masse volumique à l'état durci en fonction du dosage de fibre de verre.

La figure V.3 représente variation de la masse volumique à l'état durci en fonction du dosage de fibre verre.

On remarque que la masse volumique diminuée avec l'incorporation des fibres de verre, Des écarts d'ordre 1.82, 0.68, 1.13% entre béton témoin et BHP_{0,6}, BHP_{1,2} et BHP_{1,8} respectivement.

On peut expliquer cette diminution de la masse volumique par le remplacement d'une quantité du béton (généralement de masse volumique d'ordre 2.5 (t/m³)) par les fibres. On ne peut pas liée la variation de la masse volumique du béton fibrés à la longueur de fibre pour un même dosage, car les conditions climatiques et les conditions de conservation des éprouvettes, affectent les processus d'hydratation de ciment et provoque des perturbations dans les résultats obtenus.

V.2.2.2: Résistance à la compression:

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)
BHPT	62.24
BHP_{0.6}	49.1
BHP_{1.2}	46.53
BHP_{1.8}	45.8

Tableau V. 4: La résistance à la compression.

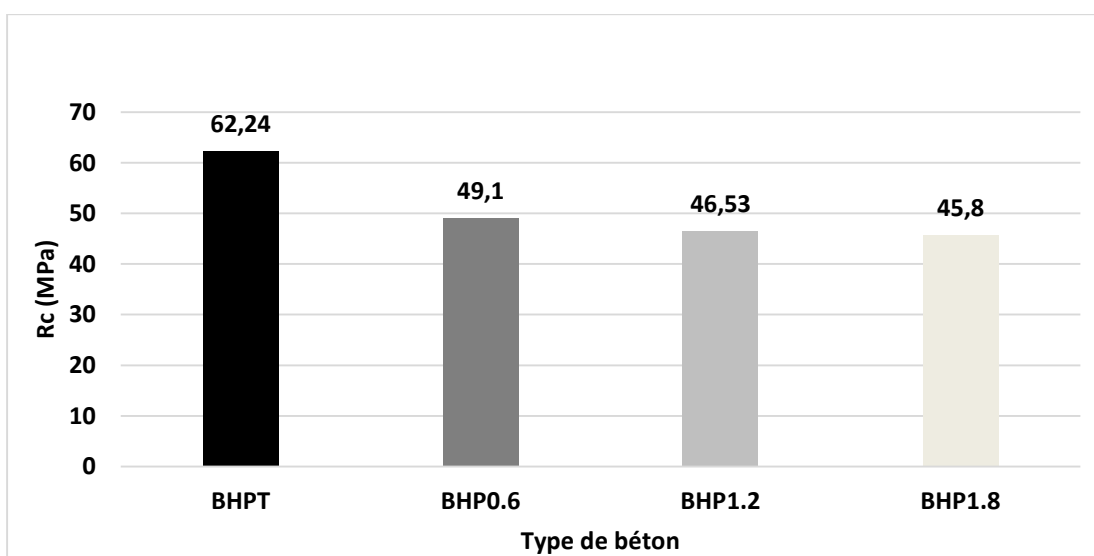


Figure V. 4: variation de la résistance à la compression des bétons étudiés.

On remarque que la résistance à la compression diminue avec l'incorporation des fibres de verre ; on remarque aussi que cette diminution est proportionnelle avec la longueur des fibres, d'où on illustre des écarts entre le béton témoin et les bétons **BHP_{0.6}**, **BHP_{1.2}** et **BHP_{1.8}** d'ordre **21.11**, **25.24** et **26.70%** respectivement.

Les bétons **BHP_{0.6}** donnent des résultats meilleurs par rapport au béton **BHP_{1.2}** et **BHP_{1.8}**. Ce résultat peut être justifié par la bonne dispersion des fibres de verre à 6 mm de longueur dans la matrice de ciment par rapport aux bétons **BHP_{1.2}** et **BHP_{1.8}**, les fibres courtes ont construit un réseau qui va retarder ou empêcher le développement des fissures. Mais généralement les bétons avec fibres donnent des résistances à la compression plus faibles par rapport aux bétons non fibrés.

V.2.3. la vitesse d'ultrason :

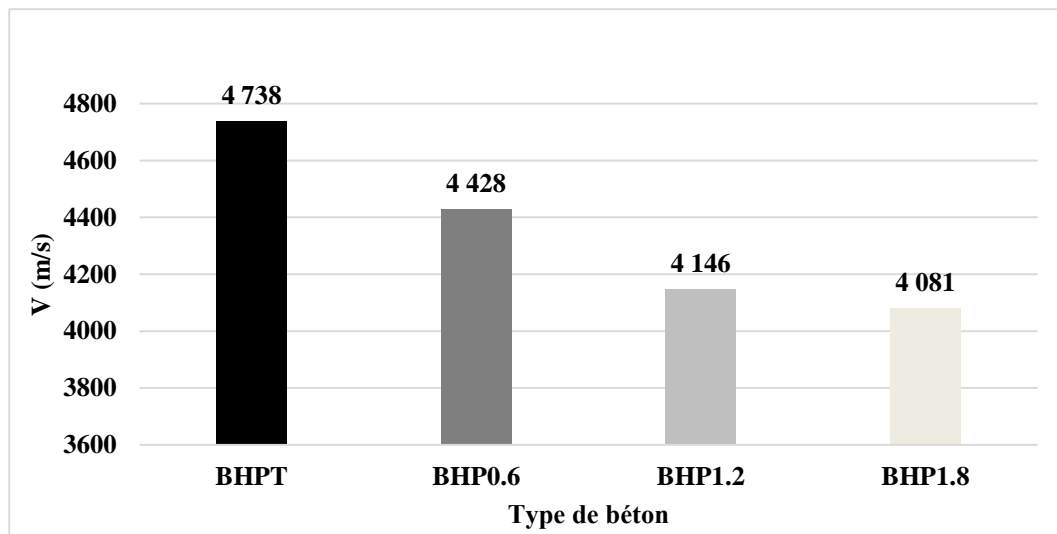


Figure V. 5 : variation de la vitesse d'ultrason des bétons étudiés.

On remarque que la vitesse diminue avec la variation de la longueur des fibres de verre, plus l'élançement est grand plus la vitesse est diminuée, on constate des variations d'ordre 6.54, 12.49 et 13.86 % béton témoin et BHP₆, BHP₁₂ et BHP₁₈ respectivement.

L'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire engendre plus d'hétérogénéité dans le béton ce qui fait ralentir et disperse les ondes d'ultrason.

V.3. Résultats obtenus près le traitement thermiques :

V.3.1. La perte de masse :

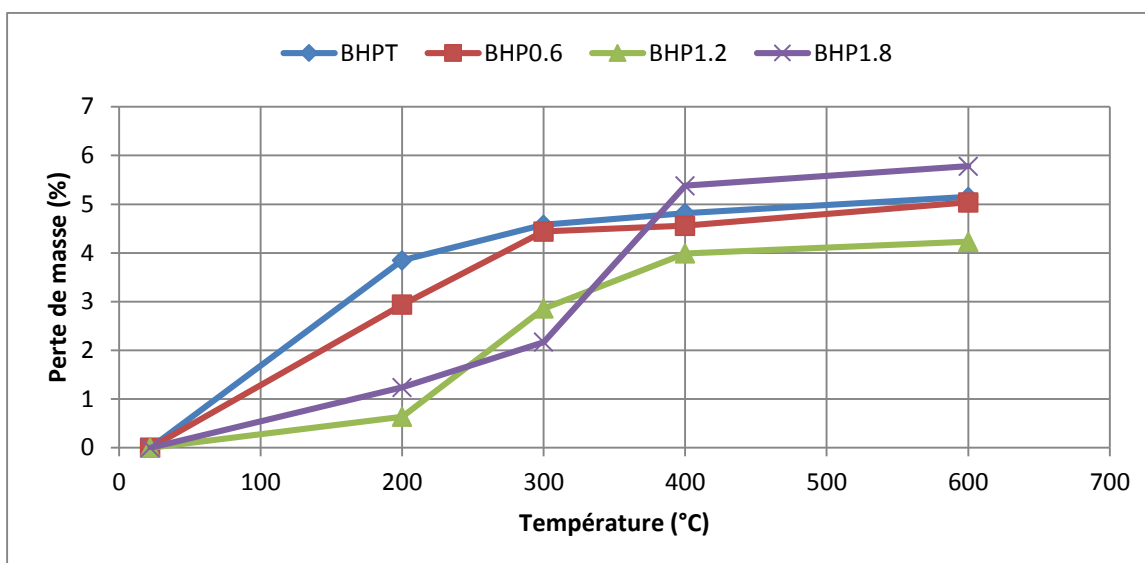


Figure V. 5: La variation la perte de masse en fonction de la température

La figure V.8 : représente de la perte de masse en fonction de la température.

On remarque l'augmentation la perte de masse, et la perte de masse commence à partir des températures supérieures à 100°C. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Les courbes obtenues montrent que la cinétique de la perte de masse augmente brusquement entre 150 et 300°C. Celle-ci correspond au départ de l'eau libre et de l'eau liée chimiquement.

V.3.2.Porosité :

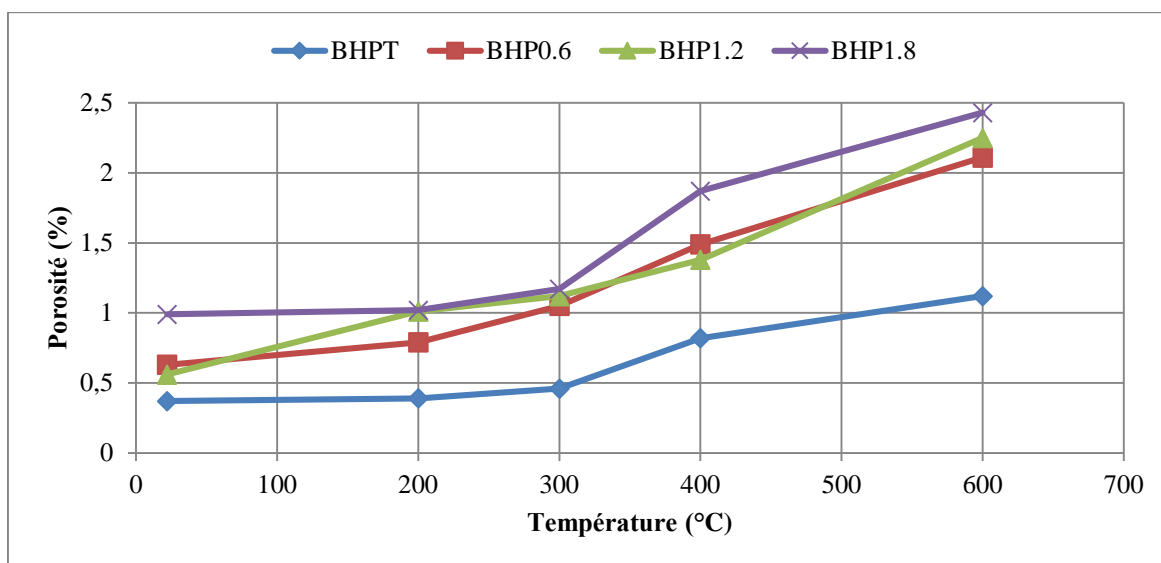


Figure V. 6 : variation de la porosité à l'état durci en fonction de la température.

La figure V.3 représente variation de la porosité à l'état durci en fonction de la température.

Les résultats ont montrés une augmentation de la porosité avec la température pour tous les bétons en présence ou non de fibres. Nous pouvons observer que la porosité totale augmente très peu entre la température ambiante et des températures de l'ordre de 200 à 300°C. Ceci confirme le fait qu'à ces températures l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. On observe une croissance relative de la porosité après 300°C pour tous les bétons testés. Cette croissance de la porosité est probablement due à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation différentielle pâte-granat et à la grande partie de l'eau liée qui s'échappe du béton.

V.3.3. Absorption d'eau :

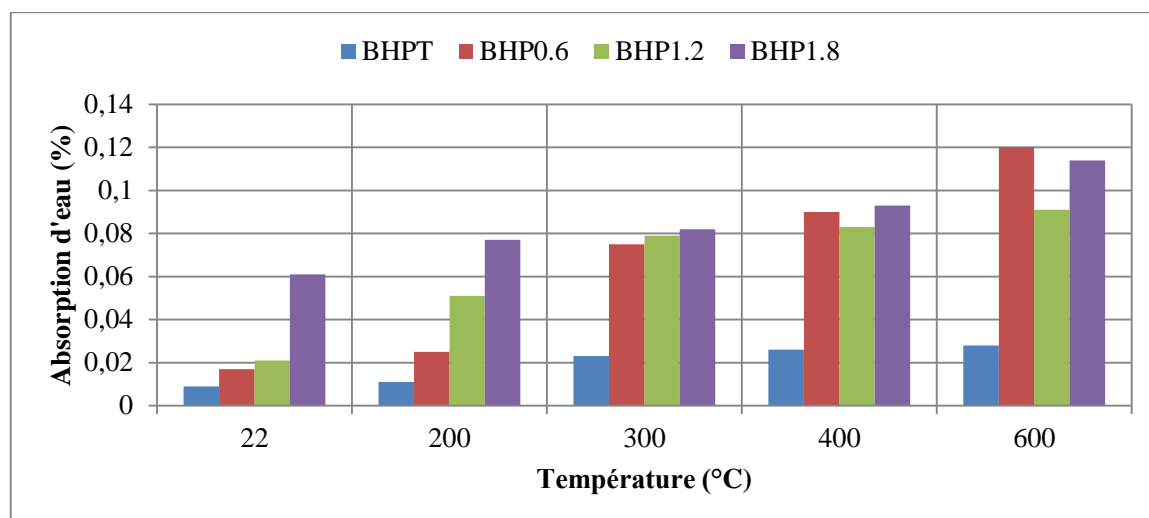


Figure V. 7: variation de l'absorption en fonction la température.

La figure V.4 représente la variation du taux d'absorption en fonction de la température.

Relativement à la porosité on remarque que les bétons les plus poreux sont aussi les plus absorbant. Le taux d'absorption augmente aussi avec l'augmentation de la température, cela est dû à la modification de la microstructure du béton et la création des fissures. On remarque aussi que la longueur des fibres influence sur la capacité d'absorption d'eau ; les fibres les plus longues absorbent beaucoup d'eau. Ceci peut être expliqué par les micro-Canaux créés par la dégradation des fibres par la température.

V.3.4. La vitesse des ondes (Ultrason) :

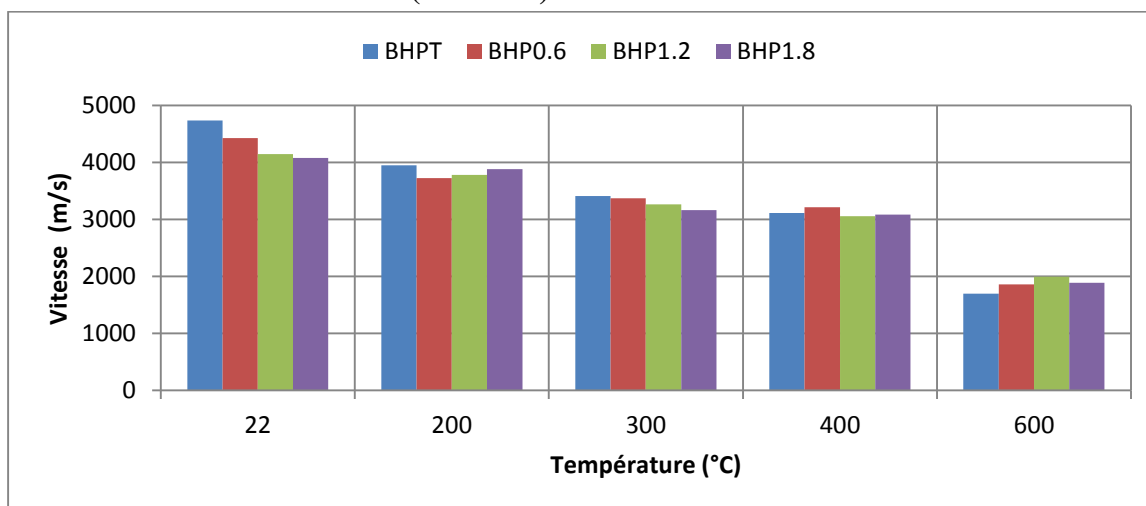


Figure V. 8: variation la vitesse en fonction de la température.

La figure V.9: représente la variation de vitesse en fonction de la température.

On remarque une diminution la vitesse avec l'augmentation de température, et avec variation de la longueur des fibres de verre. Cette diminution est due à la déshydratation de la pâte de ciment et l'évaporation l'eau libre entre 200° jusqu'à 600°, ce qui favorise la croissance de la porosité et l'augmentation de la distribution des pores dans matériau, et donc la diminution de la vitesse d'ultrason. La longueur des fibres de verre n'a pas un effet remarquable sur le phénomène.

V.3.5. Résistance résiduelle :

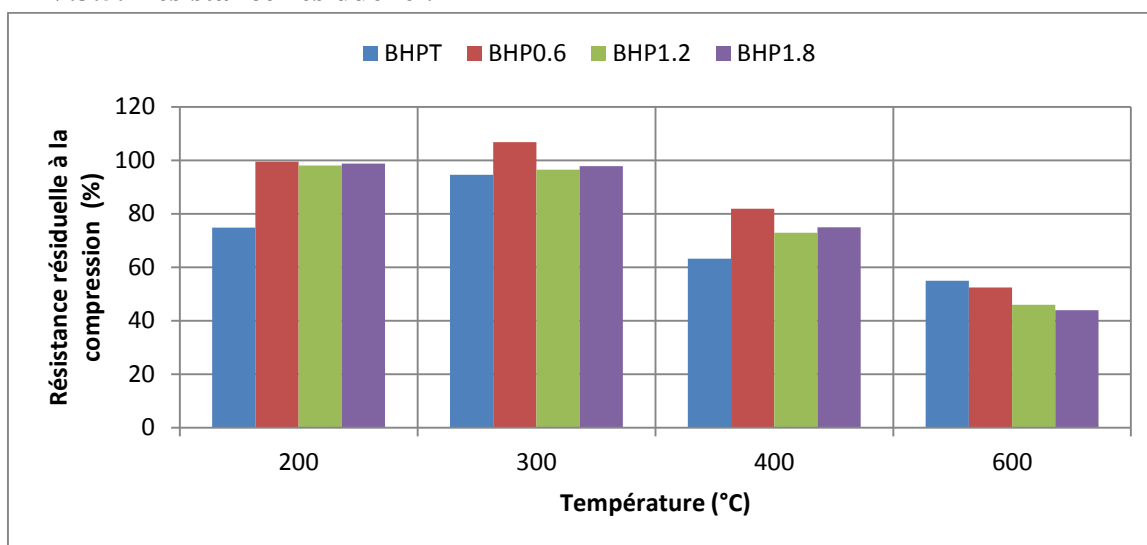


Figure V. 9: variation de la résistance résiduelle à la compression en fonction de la température.

La figure V.10 : représente la résistance résiduelle à la compression en fonction de la température.

On remarque une légère diminution de la résistance à la compression pour tous les bétons entre 200 et 300°C. La diminution de la résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation des hydrates.

Après 300°C, la diminution devienne remarquable pour tous les bétons, cela est attribué à la déshydrations du gel de CSH et le développement des fissures dans la matrice cimentaire à cause de l'incompatibilité entre les déformations de la pâte de ciment (se contracte) et les agrégats (se délattent). La longueur des fibres de verre n'a pas une influence remarquable sur le phénomène.

V.3.5. Module d'élasticité :

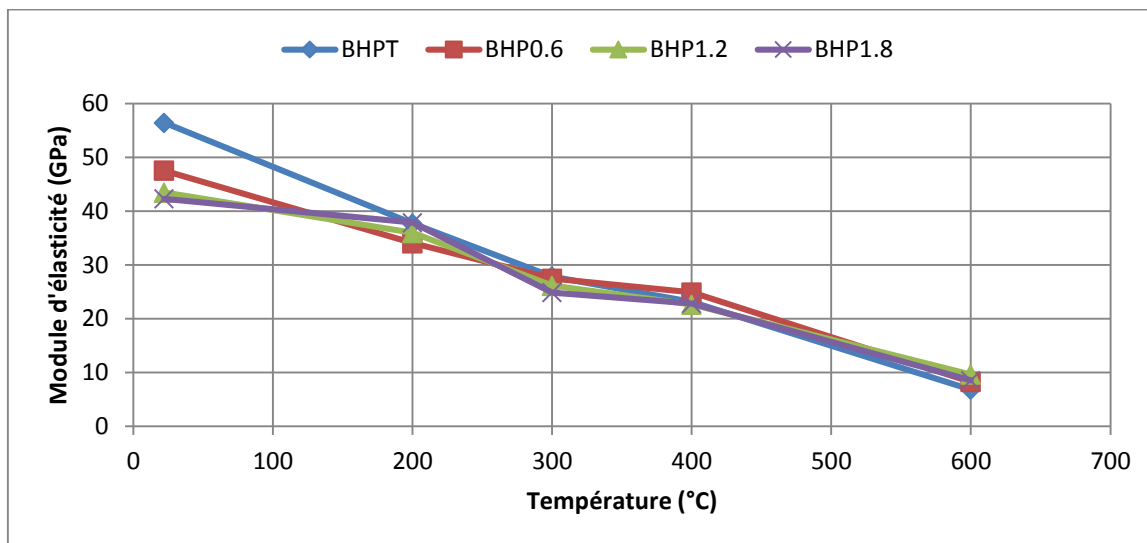


Figure V. 10: variation le module d'élasticité dynamique en fonction de la température.

La figure V.11 : représenté la variation le module d'élasticité dynamique en fonction de la température.

On remarque une diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la température, le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et de la nature des granulats d'autre part. On remarque que tous les bétons ont la même cinétique de dégradation avec la température.

V.4. Conclusion :

Ce chapitre présente une analyse comparative des propriétés physiques et mécaniques de différents bétons à l'état initial et après exposition à des hautes températures 200°C, 300°C, 400°C et 600°C.

Les résultats de pesées des éprouvettes avant et après le chauffage à différentes températures montrent une diminution de la masse des bétons fibrés de différentes longueurs avec l'augmentation de la température.

La porosité à l'eau des bétons fibrés augmente avec l'augmentation de la température. Les bétons contenant les fibres de verre ont une porosité plus forte que le béton témoin. L'augmentation de la température dégrade les propriétés mécaniques des bétons.

Une relation proportionnelle est constatée entre la porosité et la perte de masse. Une relation inversement proportionnelle est constatée entre la vitesse des ondes soniques et la porosité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

Le premier objectif de la présente étude était d'apporter, de façon expérimentale, une contribution aux nombreuses recherches entreprises pour une meilleure compréhension du comportement à hautes performances portés à une température élevée. Le deuxième but de ce travail était d'analyser l'influence des fibres de verres sur le comportement des bétons soumis à haute température.

L'étude bibliographique a permis d'avoir une vision sur les principaux phénomènes physiques et chimiques intervenant dans le béton lors d'exposition à haute température. La dégradation des propriétés physiques et mécaniques du béton est étroitement associée à la déshydratation de la pâte de ciment et les transformations cristallines et la décarbonatation des granulats ce qui justifie les objectifs de cette étude.

L'analyse du comportement de béton fibré à haute température a été réalisée sur le béton à fibre de verre. ces bétons (BHPT, BHP0.6, BHP1.2 et BHP1.8) ont été soumis à plusieurs cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante 20°C jusqu'à 600°C. Les résultats obtenus nous ont montré que le béton fibré restent intacts jusqu'à 400°C. Au-delà de 600°C, le béton fibré commence à présenter des désordres. Ils se décomposent et se fissurent et leur surface a blanchi. Montrent aucun endommagement visible à l'œil nu ou changement de couleur.

References:

- [1]. SHAH S.P.; AHMAD S.H. "High performance concretes and applications"
Edward
Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994.
- [2]. Aitcin C P, "Developments in the application of high-performance
concretes
Construction and building materials", Vol. 9, No. 1, 1995.
- [3]. FEVRE C. (Ed.), « Projet National BHP 2000 – Les bétons à hautes performances
Guides pratiques (3 tomes) », Paris : IREX, 2002, 2003.
- [4]. DE SHUTTER ; « le béton à hautes performances ». Bulletin publié par :
FEBELCEM- fédération de l'industrie Belge – (juillet 2007)
- [5]. MALIER, Y., « les bétons à hautes performances -caractérisation,
durabilité, applications », presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [6]. FERNON V. et coll., "Interaction Between Portland Cement Hydrates
and
Polynaphtalene sulfonates". SP 173-12.
- [7]. RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICŒUR S., SPIRATOS N.,
"Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete", CANMET, Ottawa, Canada,
1998 .
- [8]. KIM B.-G., JIANG S., JOLICŒUR C., AÏTCIN P.-C., "The Adsorption Behavior
of PNS Superplasticizer and its Relation to Fluidity of Cement Paste", Cement and Concrete
Research, 30, 2000.
- [9]. UCHIKAWA H., HANEHARA S., SAWAK D., "The Role of Steric Repulsive
Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared with Organic Admixtures",
Cement and Concrete Research, 27, 1, 1997.
- [10]. "Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-
performance concrete", ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005.
- [11]. BEHIM; Cours de matériaux "structuration et hydratation des ciments", Cours
du Première année Post Graduation Génie Civil Option Matériaux et durabilité, université
d'Annaba 2006 / 2007.
- [12]. James Barton et Claude Guillemet " Le verre science et technique. James Barton
- [13]. Verre online web site .

- [14] Arupfire. "HSE : Fire resistance of concrete enclosures - Work Package 1: data collection - Work Package 2: spalling categories", 0001 Report Work Package 1 and 2, London, 2005.
- [15] P. Kalifa, F.-D. Menneteau et D. Quenard. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n°12, p. 1915-1927, 2000.
- [16] G. R. Consolazio, M. C. Mcvay et J. W. Rish. "Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature", *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997.
- [17] Z. P. Bazant et M. F. Kaplan. "Concrete at high temperatures : material properties and mathematical models", Harlow, *Ed. Longman*, 1996.
- [18] G. A. Khoury. "Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 156, n°1-2, p. 313-321, 1995.
- [19] G. A. Khoury. "Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment", *Magazine of Concrete Research*, vol. 44, n°161, p. 291-309, 1992.
- [20] G. A. Khoury, B. N. Grainger et P. J. E. Sullivan. "Transient Thermal Strain of Concrete: Literature Review, Condition Within Specimen and Behaviour of Individual Constituent.", *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, n°132, p. 131-144, 1985.
- [21] U. Schneider, U. Diederichs et C. Ehm. "Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 67, n°2, p. 245-258, 1982.
- [22] U. Diederichs, U. M. Jumpanen et V. Penttala. "Behaviour of high strength concrete at high temperatures", Report n°92, Helsinki, University of Technology, Department of structural engineering, 1989.
- [23] L. T. Phan et N. J. Carino. "Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures", Report NISTIR 6726, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2001.
- [24] F. Robert, H. Colina et G. Debicki. "La durabilité des bétons face aux incendies", Paris, *Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, 2008.
- [25] K. D. Hertz. "Limits of spalling of fire-exposed concrete", *Fire Safety Journal*, vol. 38, n°2, p. 103-116, 2003.
- [26] M. Kanema. "Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", *Thèse de Doctorat*, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [27] Y. Anderberg. "Spalling phenomena of HPC and OC", *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 69-73, 1997.
- [28] A. Noumowé. "Effet de hautes températures (20-600⁰C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", *Thèse de Doctorat*, Génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.

- [29] B. Toumi. "Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton", *Thèse de doctorat*, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [30] C. Alonso et L. Fernandez. "Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments", *Journal of Materials Science*, vol. 39, n°9, p. 3015-3024, 2004.
- [31] B. Toumi. "Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton", *Thèse de doctorat*, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [32] M. Castellote, C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas et J.
- [33] A. Carles-Gibergues et M. Pigeon. "La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse", Paris, *Ed. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, 1992.
- [34] A. Menou. "Étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: Approche multi échelles de l'endommagement thermique", *Thèse de Doctorat*, Mécanique des solides, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [35] J.-C. Mindeguia. "Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons.", *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [36] G. I. Hager "Comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques", *Thèse de doctorat*, Structures et Matériaux, École Nationale des Ponts et Chaussées et l'École Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [37] J. Piasta. "Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste", *Materials and Structures*, vol. 17, n°6, p. 415-420, 1984.
- [38] V. K. R. Kodur et M. A. Sultan. "Thermal properties of high strength concrete at elevated temperatures", *CANMET/ACI/JCI Fourth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Tokushima, Japan, p. 467- 480, 1998.
- [39] U. Schneider. "Concrete at high temperatures — A general review", *Fire Safety Journal*, vol. 13, p. 55-68, 1988.
- [40] P. Pliya. "Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée", *Thèse de Doctorat*, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2010.
- [41] C. Castillo. "Effect of transient high temperature on high strength concrete", *Master of Science*, Rice University, 1987
- [42] H. Fares. "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée", *Thèse de doctorat*, Génie civil, Université de Cergy- Pontoise, 2009.
- [43] Z. Xing. "Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température", *Thèse de Doctorat*, Génie Civil,

Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[44] P. Pimienta. "Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances", Paris, *Ed. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 2005.

[45] W. P. S. Dias, G. A. Khoury et P. J. E. Sullivan. "Mechanical Properties of Hardened Cement Paste Exposed to Temperatures up to 700°C (1292°F)", *ACI Materials Journal*, vol. 87, n°2, p. 160-166, 1990.

[46] S. L. Suhaendi et T. Horiguchi. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n°9, p. 1672-1678, 2006.

[47] A. Behnood et M. Ghandehari. "Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures", *Fire Safety Journal*, vol. 44, n°8, p. 1015-1022, 2009.

[48] J. Xiao et H. Falkner. "On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, vol. 41, n°2, p. 115-121, 2006.

[49] B. Chen et J. Liu. "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°6, p. 1065-1069, 2004.

[50] C. S. Poon, Z. H. Shui et L. Lam. "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°12, p. 2215-2222, 2004.

[51] M. Li, C. Qian et W. Sun. "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°6, p. 1001-1005, 2004

ملخص

إن تضرر الخرسانة بالحريق الذي يؤثر على البنايات بكثرة قد أثار مسألة سلوك الخرسانة (العادية أو عالية الأداء) إزاء الحريق. بعض الدراسات النظرية و التطبيقية سمحت بعض التفسيرات للظواهر التي لوحظت في سلوك الخرسانة المعرضة للحرارة و تحديد العوامل الرئيسية التي في سلوك الخرسانة المعرضة للحريق.

الهدف من هذا البحث هو تكملة دراسة تجريبية للمعلومات الموجودة سابقا عن سلوك الخرسانة المعرضة لدرجة الحرارة العالية من خلال التركيز على سلوك الخرسانة. و لدراسة سلوك الخرسانة عالية الإجهاد في الحرارة العالية، استخدمنا ألياف الزجاج بأطوال مختلفة لدراسة مدى تأثيرها على هذا السلوك، تتألف هذه الدراسة من أربعة أجزاء: دراسة خرسانة بدون ألياف زجاج، خرسانة بها ألياف بأطوال (1.2,06 و 18مم). المعرضة لدرجة حرارة عالية، وأخيرا مراقبة تضرر الخرسانة على مستويات مختلفة، حيث تعرضت هذه الخرسانات لدورات تسخين-تبريد إلى غاية 22 درجة مئوية، 200 درجة مئوية، 300 درجة مئوية، 400 درجة مئوية، 600 درجة مئوية وقد تم تحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمختلف الخرسانات.

تحليل نتائج الاختبارات المستخدمة سمح بوصف مختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعرضة لدرجات حرارة عالية، وأظهرت النتائج أن الخرسانة المصنوعة من ألياف الزجاج تظهر سلوكا لأبسط نوعا ما عندما تكون معرضة للحرارة.

الكلمات المفتاحية: خرسانة، حرارة، طول الألياف، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، تدهور، ألياف زجاج.

Résumé

Les dégradations de béton par incendie qui affectent davantage les bâtiments ont soulevées la question du comportement des bétons (ordinaires ou hautes performance s) [BHP] vis-à-vis du feu. Des études théoriques et expérimentales ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé et de préciser les paramètres clés influençant le comportement au feu des bétons.

Le but de ce travail est de compléter, une étude pilote, des informations de béton existant préalablement exposé à un comportement à haute température en se concentrant sur le comportement du béton. Et pour étudier le comportement du béton à haute performance à des températures élevées, nous avons utilisé les fibres de verre de différentes longueurs et étudier l'ampleur de leur impact sur ce comportement.

Cette étude se compose de trois parties: l'étude du béton sans fibres de verre, de béton avec des longueurs de fibres (06, 12 et 18 mm) exposés à haute température, et enfin surveiller le béton endommagé à différents niveaux, le cycle de chauffage à une température de 200°C, 300°C, 400°C et 600°C sur les propriétés physiques et mécaniques a appliqué et analysé.

L'analyse des résultats des essais ont permet de caractériser les différentes propriétés physiques et mécaniques des [BHP]. Les résultats ont montré que les bétons fabriqués à partir de fibre de verre présentent un comportement moindre performance lorsqu'ils sont soumis à haute température.

Mots-Clés : Béton à haute performance [BHP], fibres de verres, longueur de fibre, température, propriétés physico- mécaniques.

Abstract

Concrete damage by fire which affects more buildings has raised the issue of the behavior of concrete (ordinary or high performance) against the fire. Theoretical and experimental studies have allowed to have an explanation of the phenomena observed in the behavior of heated concrete and specify key parameters influencing fire behavior of concrete.

The purpose of this study is to complete, a pilot study of the existing concrete information previously exposed to a high temperature behavior by focusing on the behavior of concrete. And to study the concrete behavior of HPC, we used the glass fibers of various lengths to study the extent of their impact on the characteristics of the latter. The present study consists of three parts: the concrete studied without glass fibers, the fiber lengths maintained (06, 12 and 18 mm) for exposed mixtures to high temperature, and finally monitoring the damaged concrete at different levels, where it was heated to 200 ° C, 300 ° C, 400 ° C and 600 ° C the physical and mechanical properties were analyzed.

The test results of the analysis can characterize the different physical and mechanical properties of concretes at high temperatures. The results showed that the concretes made from fiberglass exhibit lower performance behavior when subjected to high temperatures.

Key words: High performance concrete (HPC), glass fibers, fiber length, temperature, mechanical properties, physical properties.