République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Universitaire Yahia FARES de Médéa
Faculté De Technique
Département de Génie Civil

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil

Option: Matériaux en Génie Civil

Thème: Etude du comportement des bétons légers à haute température

Etudié par :

Mr: AIFA Salah Eddine

Mr: GHELIAOUI Mohamed

Encadré par :

M^{m}: HERIHRI. O

Promotion Juin 2018

Remerciements

Nahmed Allah qui nous a inspiré la patience et la capacité d'achever ce travail.

Je remercie vivement mon encadreuse Pro : ***HERIHIRI OUIDED.***

Je remercie aussi les responsables du laboratoire de génie civil pour leur aide.

Notre profonde gratitude s'adresse à tout le personnel du département du Génie de la matière et l'ensemble des enseignants qui en font partie.

Et nous n'oublions certainement pas nos parents nos amis ainsi tous ceux qui nous ont aidés dans notre tâche, nous leur dirons merci.

Dédicace

Je dédié ce lapidaire travail :

À mes très chers parents qui m'ont de

ce long chemin, ma mère qui a été à mes

côtés et ma soute nu durant toute ma vie, et

mon père qui a sacrifié toute sa vie.

Merci mes parents

À mes très chers frères et soeurs.

À tous mes amis et mes collègues.

En fin, je remercie mon binôme MOHAMED qui a

Contribué bué à la réalisation de ce

Modeste travail.

SALAH EDDINE

Dédicace

Je dédie ce travail de mémoire couronnement de mes études universitaires à

ma mère et ma père sans qui rien n'aurait été possible

A toute ma famille. Et tout mes collègues

A mon copain BOUKABOUSSE IBRAHIM

Et à la fin mon binôme SALAH EDDINE et toute sa famille.

Mohamed

الملخــص

منذ أزمات الطاقة التي عرفتها سنوات السبعينات, ركزت أبحاث هائلة على إنتاج مواد بناء أكثر اقتصاد و ملائمة للبيئة من اجل تحقيق التنمية المستدامة , يقودنا هذا الاتجاه إلى استعمال مواد مركبة قائمة على مادة البوليمر التي تتميز بخصائص حرارية عالية العزل. يعتبر التحكم في سلوك هذه المادة في درجات الحرارة العالية أمرا بالغ الأهمية لان هذه المركبات قد تعطي سلوك مضطرب في درجات الحرارة العالية. إن دراسة تأثير درجات الحرارة على البنية المجهرية لمادة البوليمرتعد من أهم المراحل لمعرف الظواهرالماكروسكوبية المعقدة. لان هذه المركبات تتعرض لتغيرات فيزيوكيميائية والتي تؤثر بشكل كبير على سلوكها الميكانيكي.

إن الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الخرسانة المسلحة المخففة لكريات البوليسترين الممدد في تركيزات حجم(5% ;15% ;25% ;35% و45%) والمعرض لدرجات حرارة تتراوح ما بين 200° و400° لتصل إلى 600° درجة مئوية من اجل دراسة و معاينة الضرر الحراري الذي تتعرض إليه الخرسانة المسلحة. توضح النتائج المتحصل عليها أن فقدان الكتلة يزداد نسبيا مع زيادة نسبة البوليس ترين الممد ورفع درجة الحرارة. لمعرفة الظواهرالماكروسكوبي المعقدة ومن ناحية أخرى فان مقاومة الضغط و الكتلة الحجمية وسرعة الصوت تتناقص نسبيا عند زيادة نسبة البوليستران الممدد وكذلك عند رفع درجة حرارة التسخين.

كلمات مفتاح البحث:

مركب , البوليس ترين, درجة الحرارة المرتفعة, الخرسانة المسلحة المخففة, فقدان الكتلة, المقاومة.

Résumé

Depuis les crises de l'énergie, des années 70 des énormes recherches sont accentuées sur la production des matériaux de construction les plus économiques et écologiques afin de parvenir au développement durable, Cette tendance mène à l'utilisation des matériaux composites à base de polymère en raison de leurs hautes caractéristiques d'isolation thermique. La maitrise de son comportement aux hautes températures est primordiale car ces composites peuvent présenter un comportement critique à des températures élevées. L'analyse des effets des hautes températures sur sa microstructure est une étape importante pour la compréhension des phénomènes macroscopiques complexes car, ces composites subits des changements physico-chimiques qui influencent fortement son comportement mécaniques.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les bétons allégés par les billes de polystyrène expansé en teneurs volumique de 5% , 15%, 25%, 35%, et 45% exposés aux températures élevées allant de 200 puis 400 en fin 600°C, afin d'étudier et analyser l'endommagement thermique du béton. Les résultats obtenus montrent que la perte de masse augmente proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de PSE ainsi avec l'élévation de la température. En revanche pour la résistance à la compression, la masse volumique et la vitesse du son sont inversement proportionnelle à l'augmentation du pourcentage de PSE ainsi avec l'élévation de la température de chauffe.

Mot clés : composite, polystyrène, haute température, béton léger, perte de masse, résistance.

Abstract

Since the energy crises of the years 70, enormous research has been accentuated on the production of the most economical and ecological building materials in order to achieve sustainable development, this trend leads to the use of materials Polymer-based composites due to their high thermal insulation characteristics. The control of its behaviour at high temperatures is paramount because these composites can present a critical behavior at high temperatures. The analysis of the effects of high temperatures on its microstructure is an important step for understanding complex macroscopic phenomena because these composites undergo physical and chemical changes that strongly influence its Mechanical behavior.

The main objective of this work is to study the lightened concretes by the expanded polystyrene beads in volume concentrations of 5%, 15%, 25%, 35%, and 45% exposed to high temperatures ranging from 200 then 400 at the end of 600 °c, in order to study and analyse The thermal damage of the concrete. The results obtained show that the mass loss increases proportionately with the increase in the percentage of PEs thus with the elevation of the temperature. On the other hand for the compression resistance the density and the speed of the sound are inversely proportional to the increase of the percentage of PEs thus with the rise of the heating temperature

Key words: Composite, polystyrene, high temperature, lightweight concrete, mass loss, resistance.

Sommaire

Sommaire

Remerciement

Dédicace

ملخص.

Résume

Abstract

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Listes des symboles et des abréviations

Introduction générale……...2

I.1 Introduction……5

I.2 Généralités sur les bétons légers……5

I.2.1 Les bétons légers……..5

I.2.1.1. Le béton cellulaire……7

I.2.1.2. Le béton caverneux :…….....8

I.2.1.3 Les bétons de granulats légers……...9

I.2.2.1. Les bétons de granulats légers naturels……..12

I.2.2.2. Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique.....12

I.2.2.3. Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels
ne subissant pas de traitement spécial. ……..13

I.2.2.4. Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant
divers traitements …….....13

I.2.2 Classifications des bétons légers……13

I.2.3 composition des bétons légers ……..15

I.2.4.1 -la pâte de ciment :……..17

I.2.4.2 - Les granulats légers……..17

I.2.4.2.1-Différents types de granulats légers…….18

I.2.4.2.1.1. Granulats naturels……..18

I.2.4.2.1.2.Granulats artificiels……...18

I.2.4.3 -L'eau dans le béton léger :…….20

I.2.3.4 - l'interface pate-granulats légers……....23

I.3 . Propriétés physico-mécaniques du béton léger à température ambiante.....25

1.3.1.1. Interaction des granulats avec la matrice cimentaire…….....25

I.3.2 Maniabilité et mûrissement des bétons légers……...31

I.3.2. Comportement des bétons légers en compression……32

I.3.2.1. Influence des caractéristiques des granulats légers……...33

I.3.2.2. Influence de la composition des bétons…….....34

I.4.1 Masse volumique des bétons légers……...38

I.3.2. Porosité et perméabilité des bétons légers……40

I.3.3. Comportement des bétons légers en compression……43

I.3.4- Comportement des bétons légers en traction……47

I.3.5. Module d'élasticité……...50

I.3.6. L'éclatement et l'écaillage……53

I.3.7. Perte de masse……...54

I.3.8. les propriétés thermiques……..57

I.3.8.1. La conductivité thermique :……...58

I.3.8.2. Chaleur spécifique :……59

I.4 Conclusion…….....60

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

II.1 INTRODUCTION…….62

II.2. Matériaux utilisées…….62

II.2.1. Le ciment……...62

II.2.2 Polystyrène expansé……63

II.2.3 sable……..64

II.2.4 GRAVIER……....65

II.3 Formulations……...67

II.3.1. Méthode de Dreux-Gorisse……..67

II.3.2 Calcul de la composition de 1m^3 du béton……...67

II.3.3 Données de base……...68

II.3.4 Dosages en ciment et en eau……68

II.4 Fabrication……...69

II.4.1 Les corps d'épreuve……70

II.5 La masse volumique……70

II.6 Cure Appliquée……...70

II.7 Essai De Chauffage……70

II.7.1 Dispositif de chauffage……71

II.7.2 La méthodologie…….....71

II.8 Perte de masse……72

II.9 Essai la vitesse des ondes soniques……73

II.10 Essai de compression……...74

II.11 Désignation des bétons……..75

CHAPITRE : Résultats et interprétations

III.1.Introduction……79

III.2.Résultats et interprétations……79

III.2.1. L'effet de l'élévation de température sur la perte de masse…….…….....79

III.2.2. L'effet de l'élévation de température sur la masse volumique……..……..….....81

III.2.3. L'effet de l'élévation de température sur la vitesse
de propagation du son.....82

III.2.4. L’effet de l’élévation de température sur la résistance à la compression……..84

III.3. Observations visuels des dégradations des différents composites après le refroidissement.85

III.4. Billant……88

Conclusion générale.

Référasse bibliographie.

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Tableau I.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [M.CONTANT, 2000]……7

Tableau I.2 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [A. NEVILLE, 2000]0……14

Tableau I.3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [G. DREUX & J. FESTA ,1998]……...…14

Tableau I.4. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment [NEV00]……..36

Tableau I.5. Les phases de l'évolution des résistances en compression en fonction de la température [GAWESKA.2004]……..47

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

Tableau II.1: Caractéristiques physiques du ciment…….……62

Tableau II.2: Composition chimique du ciment.....63

Tableau II.3: Composition minéralogique du ciment CPA-CEM I 42.5 selonBogue..63

Tableau II.4: Caractéristiques physiques du sable…….....64

Tableau II.5: Analyse granulométrique du sable 65

Tableau II.6: Propriétés physique des Gravier.....66

Tableau II.7: Analyse granulométrique du Gravier 3/8 66

Tableau II.8: Analyse granulométrique Gravier 8/16 66

Tableau. II.9: composition de $1m^3$ du béton 67

Tableau. II.10: Données de base 68

Tableau. II.11: compositions des mélanges réalisé (pour 1 m^3) 69

Tableau. II.12: Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de matériaux. 72

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Tableau III.1 La perte de masse des différents composites…….....79

Tableau III.2 La masse volumique des différents composites…….81

Tableau III.3 Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques……..82

Tableau III.4 Résistance à la compression (Mpa)……84

Liste des figures

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

Figure.I.1Représentation schématique des différents types de bétons légers [M.SHINK, 2003……6

Figure:I.2 Babaylone, Irak, construit par Sumerians dans le 3ème millenium B.C…….....9

Figure I.3 Cathédrale de rue Sofia, Hagia Sofia, commissionné par l'empereur Justinian au 4ème siècle A.D. à Istanbul,Turquie…….....9

Figure : I.4 Église romain, construit en J.-C118 10

FigureI.5 Pont du Gard, built in ca. A.D. 14 10

Figure : I.6 Le grand amphitheatre romain, Colosseum, construit entre A.D. 70 et 82 10

Figure : I.7 Pyramides au Mexique, construit pendant la période maya, à l'A.D. 624-987 10

Figure: I.8 Mohenjo-Daro et Harappa, 2500 B.C..... 10

Figure : I.9 Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton .[JOHN L.CLARKE, 1993] ..... ….12

Figure. I.10 : masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différent……... 15

Figure I.11. Différents granulats légers naturels [TEO06], [UNA07], [DEM06]..... 18

Figure I.12. Différents granulats légers artificiels [WAN06], [SAR05], [MIL04] 19

Figure I.13. Four âtres haute température à 1250°C, GEM, France 19

Figure I.14. Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005]..... 21

Figure I.15. Dimensions des pores et phases solides présentes dans le béton [Tsimbrovska, 1998]……..... 22

Figure I.16. Distribution porosimétrique d'un béton en fonction du rapport E/C [Malier, 1992].. 23

Figure I.17 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO [DIAMOND.1986].. 24

Figure I.18. Microstructure de la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulat, à gauche : Béton sans fumée de silice - à droite : Béton avec fumée de silice [Stark et Wicht, 2001]. 25

Figure I.19 Zone de transition entre un granulat d'argile expansée et la pâte de ciment dans un béton Léger (grossissement x2000) [LO04-2]. 26

Figure I.20. Zone de transition entre un granulat d'argile expansée et la pâte de ciment. .....

(a) Granulat à coque épaisse et dense ; (b) Granulat à coque de faible épaisseur [ZHA90-1]..... 27

Figure I.21. Largeur de la zone de transition au jeune âge 27

Figure I.22. Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulat [ELS05] 28

Figure I.23. Influence de l'absorption d'eau des granulats légers sur la porosité de la zone inter-faciale [LO08] 29

Figure I.24 : Trois mécanismes d'interaction dans la zone de transition [ZHA90-1]..... 31

Figure I.25. Représentation schématique de la connectivité d'un réseau poreux 32

Figure I.26. Évolution de la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) en fonction du dosage en ciment de bétons ayant en affaissement de 50mm et confectionnés avec différents types de granulats légers. (A) cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire ; (B) laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire ; (C) cendres volantes frittées ; (D) schiste fritté ; (E) ardoise expansée ; (F) argile expansée et sable ; (G) laitier expansé [NEV00]. 36

Figure I.27. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur dosage de ciment (a)..... 37

Figure I.27. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur densité(b). (Résultats expérimentaux de Wilson et Malhotra [WIL88], Sakar et al. [SAR92], De Larrard [LAR95], Zhang et Gjorv [ZAH91-2] et Haque et al. [HAQ04])..... 38

Figure I.28. Evolution de la masse volumique des granulats avec température [HACHEMI Samya 2015]..... 39

Figure I.29 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [Melle. KAOUANE] 40

Figure I.30 Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement. [Melle. KAOUANE]. 42

Figure 1.31. La porosité en fonction de la température [HAN 10] 42

Figure I.32. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température [Kanema et al. 2005]. 43

Figure I.33. Différents résultats de résistance à la compression obtenue d'après différents auteurs [FARES.2009]. 44

Figure I.34. Résistance à la compression à chaud [ABRAMS.1971]. 45

Figure I.35. Résistance en compression et résistance en compression relative déterminées à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures [GAWESKA.2004]. 46

Figure I.36. Différents résultats de résistance à la traction obtenue auteurs [FARES.2009]. 48

Figure I.37. Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction [BAMONTE et al.2007]. 49

Figure I.38. Evolution de la résistance à la traction du béton mesurée par essai de fendage après refroidissement [Kanema, 2007]. 50

Figure I.39. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures [GAWESKA.2004]. 51

Figure I.40. Evolution du module d'élasticité [BAMONTE.2007]. 52

Figure I.41. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs obtenus sur deux bétons fibrés et non fibrés [Hager, 2004]. 52

Figure I.42 : Illustration du mécanisme d'éclatement [Van Thai] 54

Figure I.43. (a) : perte de masse en fonction de la température selon Khoury 1985

[KHO 85]. (b) : la perte de masse en fonction de la température selon Kanema 2007 [KAN 07]. 55

Figure I.44. La perte de masse des BHP (M100C), pré-séchés et sans prétraitement, chauffés à 600°C [HAG 04]. 56

Figure I.45. Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [KHOURY.1992]. 56

Figure I.46. Perte de masse des bétons chauffés à la vitesse de 1°C/min [GAWESKA.2004]..... 57

Figure. I.47. conductivité thermique en fonction de différentes masses volumiques [K.MILLED, 2005]..... 58

Figure I.48 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température [Van Thai]……..59

Figure I.49 : Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons [Van Thai]..... 60

CHAPITRE II : Matériaux et Essais

Figure. II.1. Ciment CPA- CEMI 42.5..... ……..…62

Figure. II.2: Les billes de polystyrène PSE……..... 63

Figure. II.3: Sable d'el-baaj……..... 64

Figure. II.4: Gravier 3/8…….. ..... ……..65

Figure. II.5: Gravier 8/15…….. ..... ……65

Figure. II.6 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 et sable) –

Méthode de Dreux. G……...67

Figure. II.7*:* Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)……..... 68

Figure. II.8 : Malaxeur…… 69

Figure. II.9 : Photo La balance……..... 70

Figure. II.10 : Dispositifs de chauffage…….…..... 71

Figure II.11 : Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min)…….....72

Figure. II.12 : Photo présenté appareil les ondes sonique…….…….73

Figure .II.13 : la presse hydraulique……..74

Figure II.14.Variables étudiées…….....76

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Figure III.1 La perte de masse en fonction de la température de tous mélanges. 80

Figure III.2 La variation de la masse volumique avec l'élévation de la température

de tous mélanges…….....81

Figure III.4 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température..... 84

Figure III.5 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE à 20°C, après l'écrasement 85

Figure III.6 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE chauffés à 200°C , après l'écrasement..... 86

Figure III.7 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE chauffés à 400°C, après l'écrasement.... 87

Figure III.8 Photo L'état des éprouvettes BT et chauffés à 600°C après l'écrasement 88

Liste des Notations

Liste des Notations

CPA : Le ciment portland artificiel

SiO_2 : La silice

Al_2O_3 : L'alumine

Fe_2O_3 : L'oxyde de fer

CaO : L'oxyde De CALCIUM

MgO : oxyde manghaniziom

SO_3 : TRIOXYDE SULFUR

K_2O : L'oxyde potassium

Na_2O : l oxyde de Sodium

C_3S **:** Le silicate tricalcique impur (Alite)

C_2S : Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

C_3A : L'aluminate tricalcique (Célite)

C_4AF : L'alumina-ferrite tétra-calcique

RC : La résistance a compression

EAGR : Entreprise Nationale de Génie Rural

E/C : Eau / Ciment

RILEM : Réunion Internationale des Laboratoires

CFC : Les chlorofluorocarbures

ni HFC : Les hydrofluorocarbures

ni HCFC (hydrochlorofluorocarbones)

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis l'apparition du concept de développement durable dans le domaine de la construction et des travaux publics, un ensemble de mesures ont donc été prises pour inciter les chercheurs, à opter de nouvelles techniques et de nouveaux matériaux de construction afin de réduire les consommations et d'améliorer le confort de nos lieux de vie.

Le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences de développement durable, par son excellent rapport poids/résistance et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. Toutes ces performances changent avec l'élévation de la température, ce que nous oblige de mettre en évidence le comportement des bétons légers à des hautes températures.

I.2 Objectifs

L'objectif de ce travail est de formuler des bétons allégés par des perles de polystyrènes expansé d'une part, et d'évaluer expérimentalement l'effet des hautes températures sur les propriétés du béton de granulats légers (physiques, résistances mécaniques) d'autre part. Dans ce contexte cinq pourcentages de polystyrène expansé ont été utilisés : 5, 15, 25, 35 et 45% par le remplacement volumique des granulats naturels. Puis, une étude de l'effet des hautes températures (200°C, 400°C et 600°C) sur ces composites formulés afin d'améliorer la compréhension du comportement des bétons de polystyrène expansé exposés à des températures élevés.

I.3 Structure du mémoire

Ce mémoire est constitué de trois chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature sur les bétons légers et étudie principalement les propriétés physiques et mécaniques de béton de granulats légers; Leurs comportement lors de l'exposition à des températures élevées.

Le Chapitre 2 présente les données expérimentales sur les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, le programme des essais réalisés, la méthode de formulation et explique brièvement les essais sur béton frais et béton durci.

Le Chapitre 3 présente les résultats et la discussion des résultats des essais effectués sur les bétons de polystyrène expansé.

Chapitre 01:
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Le béton malgré ça complexité et le matériau le plus nécessaire pour la construction des ouvrages et plusieurs d'autres domaine. Il se compose de granulats (sable, gravier et une pate de ciment (ciment, eau). Il est considérer comme homogène. L'homogénéité conditionne l'uniformité des propriétés physiques et chimiques du béton (résistance, porosité)

Nous abordons dans ce chapitre un type de béton qui est le béton léger. Nous allons parler de généralités sur le béton léger, propriétés physico-mécaniques du béton léger à température ambiante et propriétés physico-mécaniques du béton léger soumis aux hautes températures.

I.2 Généralités sur les bétons légers

I.2.1 Les bétons légers

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m3, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m3 [**A. NEVILLE, 2000]**.

D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m3. Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m3 **[M. CONTANT, 2000].**

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allégement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs **masses volumiques** et **ces résistances variées**. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. Pour développer un béton léger, ont doit prendre en considération deux aspects :

1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
2) la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplacent une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- soit dans les granulats ;
- soit dans la pâte de ciment ;
- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

1- les bétons cellulaires ;

2- les bétons sans fines (caverneux) ;

3- les bétons de granulats légers (argile expansé ……;

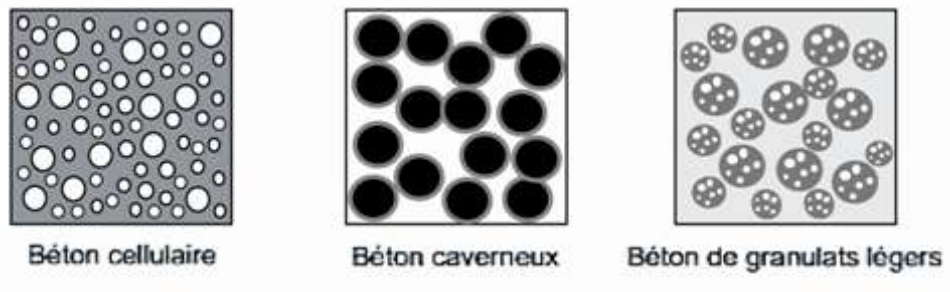


Figure : I.1 Représentation schématique des différents types de bétons légers [**M.SHINK, 2003]**

I.2.1.1. Le béton cellulaire

Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il ya plus de 150 ans. A cette époque, Zernike étudie des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [**SFBC, 2005**].

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi Ces agents, la Poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier.

Tableau I.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [**M. CONTANT** , 2000]

Masse volumique sèche	**Résistance en compression**	**Résistance en flexion**	**Module d'élasticité**	**Conductivité thermique**
kg/m^3	MPa	MPa	GPa	$Jm/m^2sC°$
450	3.	0.65	1.6	0.1
525	4.	0.75	2.0	0.1
600	4.	0.85	2.4	0.1
675	6.	1.00	2.5	0.1
750	7.	1.25	2.7	0.2

Les résistances et le module d'élasticité augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (voir tableau I.1). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il est à noter que la résistance en flexion peut être améliorée par l'ajout d'armature ou de microfibres, celles-ci reprennent les efforts de flexion, et aide à contrôler la microfissuration lors de l'application d'une charge. [**M. CONTANT, 2000**].

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau moulable, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustín et al. (1990) démontrent comme étant des propriétés à rechercher pour

l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie. [**M.SHINK , 2003**]. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai. [**M. CONTANT, 2000**]

I.2.1.2. Le béton caverneux :

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton (Connon, 1973). Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3 mm. Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [**M. CONTANT, 2000**]. Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée; ils sont drainant [**M. SHINK , 2003**]. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats.

Le béton caverneux est un des types de béton léger obtenu quand on ne met pas de granulats fins dans le mélange. Ce béton ne compte que du ciment, de l'eau et de gros granulats. Il existe donc de gros vides au sein de la masse qui sont responsables de sa faible résistance. Toutefois la minuscule dimension de ces vides empêche tout mouvement capillaire de l'eau. La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie.

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 Mpa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire (Malhotra, 1989). Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [**A. NEVILLE, 2000**]. Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien davantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et

dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [**M. CONTANT, 2000**]

I.2.1.3 Les bétons de granulats légers

Le béton de granulat léger, BGL, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc.…Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3ème millénium A.C. (fig. I.2).Les Grecs et les Romains ont employé la ponce dans la construction des bâtiments. Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la cathédrale de Sainte Sofie « ou le Hagia Sofia », à Istanbul, Turquie, construite par deux ingénieurs, Isidore de de Miletus et Anthemius de Tralles, commissionné par l'empereur Justinian au 4ème siècle A.D., (fig. I.3) ; le temple romain, Panthéon, qui a été érigé en années A.D. 118 à 128 ; l'aqueduc prestigieux, Pont du Gard, ca établi. A.D.14 ;et le grand amphitheatre romain, Colosseum, construit entre A.D. 70 et 82 (figs. I.4, I.5, et I.6).En plus de la construction des bâtiments, les Romains ont utilisé les agrégats naturels légers et les vases creux à argile pour leur "opus Caementitium" afin de réduire le poids. Ceci a été également employé dans la construction des pyramides pendant la période maya au Mexique (fig. I.7).**[** traduction, **JOHN L.CLARKE, 1993]**

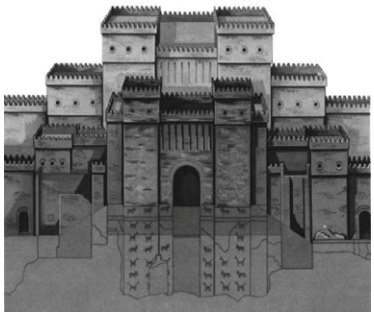


Figure I.2 Babylone, Irak, construit par Sumerians dans le 3ème millenium B.C.



Figure I.3 Cathédrale de rue Sofia, Hagia Sofia, commissionné par l'empereur Justinian au 4ème siècle A.D. à Istanbul, Turquie.



Figure : I.4 Église romain, construit en J.-C118

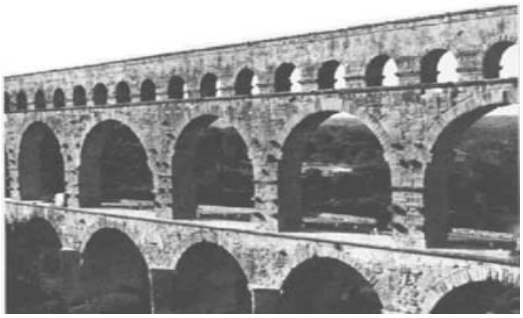


Figure I.5 : Pont du Gard, built in ca. A.D. 14.



Figure : I.6 Le grand amphitheatre romain, Colosseum, construit entre A.D. 70 et 82.



Figure : I.7 Pyramides au Mexique, construit pendant la période maya, à l'A.D. 624-987



Figure: I.8 Mohenjo-Daro et Harappa, 2500 B.C.

Des briques poreuses d'argile ont été produites longtemps avant l'époque créthienne, Pendant la civilisation de Vallée Indus à peu près 2500 av. J.-C. Ceux-ci ont été employés dans la construction de deux villes, Mohenjo-Daro et Harappa (**Figure**I.8). On le postule que ces briques poreuses ont été écrasées et ont employé en tant que agrégats de poids léger dans la maçonnerie. Bien qu'il soit difficile d'évaluer l'origine du BGL, ce ne serait pas une exagération pour dire que ses racines ont lieu de la période antique. Avec l'augmentation de la demande de BGL et de l'indisponibilité des agrégats, la technologie pour produire les agrégats légers a été développée. En Allemagne, au 19ème siècle, des morceaux poreux d'argile ont été produits par évaporation rapide de l'eau. Kukenthal de Brunswick a obtenu un brevet en 1880. L'utilisation industrielle des agrégats légers normaux en Allemagne a été commencée en 1845 par Ferdinand Nebel à partir de Koblenz qui a produit des blocs de maçonnerie à partir de la rénovation, avec la chaux brûlée comme reliure. En Islande, la ponce a été employée dans des industries du bâtiment locales depuis 1928. [Traduction, **JOHN L.CLARKE, 1993**].

Le béton est traditionnellement connu comme une lourde et froide matière grise ayant de bonne résistance mécanique. Néanmoins, On sait généralement que le béton n'est pas nécessairement les blocs lourds et tranchants justes de gris. Il peut acquérir n'importe quelles formes, couleur, densité, et résistance. La faible densité de la matière engendre une bonne isolation thermique et permet à la réduction de poids des structures. Aussi, l'épaisseur des toitures et des murs extérieurs peut être réduites. Par conséquence, Si on garde la même épaisseur, un degré plus élevé d'isolation thermique sera réalisé. La densité, par exemple, peut s'étendre de 300 à 3000 kg/m3 ; la conductivité thermique de 0.1 à 3 W/mK ;et la résistance de 1 à 100 MPa ou même plus. La densité est la plupart du temps commandé par le type d'agrégat utilisé. La force dépend également partiellement du type d'agrégats utilisés pour faire le béton. Une gamme de densité et de force de béton est indiquée dans fig. I.9. Les agrégats légers sont l'ingrédient de base pour la fabrication de BGL. [traduction, **JOHN L.CLARKE, 1993**].

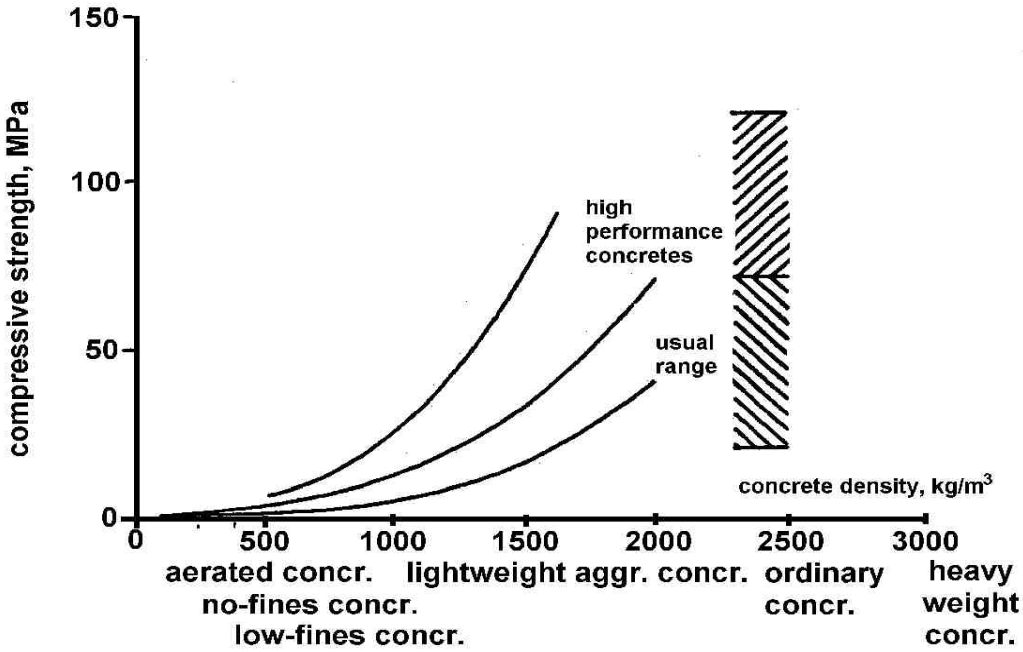


Figure : I.9 Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton .[**JOHN L.CLARKE**, 1993]

Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Il existe en effet de nombreuse variété de bétons de granulats légers que l'on peut classer de différentes façons. Cormon propose une classification basée sur l'origine des granulats et on peut ainsi distinguer quatre grands groupes.[**B.BENKHALFA, 1988**] :

I.2.2.1 Les bétons de granulats légers naturels

Il s'agit des bétons fabriqués avec de la ponce ou de la pouzzolane matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse qui permettent par concassage des granulats légers. Ces matériaux sont relativement peu connus en Algérie, leur emploi reste donc sans domaine d'application, mais il n'est pas exclu, que dans l'avenir, certaines de leurs propriétés les rendent plus avantageux pour certaines réalisations.

I.2.2.2 Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique :

Ce sont les bétons fabriqués avec des granulats d'argile, de schiste, d'ardoise, et de perlite expansés on de vermiculite exfoliée. La perlite expansée s'obtient par traitement thermique de verres volcaniques de structure perlitique contenant une certaine quantité d'eau

(rhyolite perlitique par exemple). Ce granulat n'est pas produit en Algérie, mais principalement aux USA et en URSS. La vermiculite est un minéral phyhitaux comportant à l'état naturel deux couches de molécules d'eau entre deux feuillets élémentaire. Le traitement par la chaleur provoque l'écartement des différentes lamelles et l'on appelle ce phénomène l'exfoliation. Il faut enfin noter que ces deux types de granulat sont extrêmement légers (masse volcanique apparente inférieur à 150 Kg/m3) et son donc principalement employés pour réaliser des bétons isolants mais non porteurs.

I.2.2.3 Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial

Il s'agit des bétons réalisés avec du mâchefer, sous production produit de la combustion du charbon ou des ordures ménagères. Ce matériau est en très nette régression et on l'utilise que pour la fabrication de parpaings.

I.2.2.4 Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux

On peut utilise que pour fabriquer des granulats légers de très nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau : d'EL-HADJAR que l'on expansé sur les lieux de production. Les cendres volantes que l'on peut fritter, on le verre que l'on peut également expansé. [**B. BENKHALFA,1988**] Pour être complet, il faut en outre signaler que l'on classe également parmi les bétons légers des matériaux réalisés à partir de débris végétaux. Enfin, on réalise aussi des bétons de granulats légers en utilisant des liants organiques (résines synthétiques et mousses plastiques) à la place de liants hydrauliques.

I.2.2 Classifications des bétons légers

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. il s'agit :

— de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs} ;

— de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, Fonction de leur masse en Kg/m3. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

Tableau I.2 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [**A. NEVILLE , 2000**]

Classe de densité	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Kg/m^3	901 à 1000	1001 à 1200	1201 à 1400	1401 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

La nouvelle version de la norme EN 206 classe les bétons suivant les fourchettes de masse volumiques indiquées dans le tableau ci- dessous :

Tableau I.3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

Classe de masses volumiques	**LC 1,0**	**LC1,2**	**LC1,4**	**LC1,6**	**LC1,8**	**LC2,0**
Kg/m^3	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R -87[13.141] classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m^3) en trois catégories :

1- le béton léger de structure : 1350 – 1900 kg/m^3

Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

2- le béton léger de faible masse volumique : 300 – 800 kg/m^3

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m^3 n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_C < 7$ MPa

3. le béton de résistance moyenne se situe entre les deux :

Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa

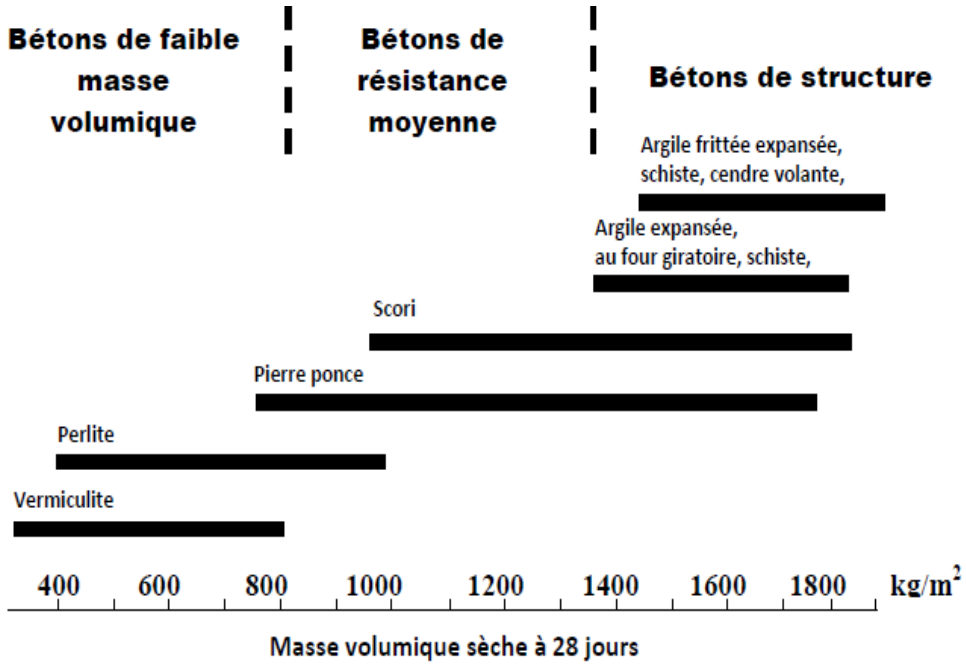


Figure. I.10 : masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents

Types de granulats légers à 28 jours [**A. NEVILLE, 2000**]

I.2.3 composition des bétons légers

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la **composition** (bétons caverneux) ou sur l'emploi de **granulats allégés** (des billes de schiste expansé, d'argile expansée ou de polystyrène, voire des particules de liège ou de bois remplacent les gravillons habituels). **Des adjuvants** comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du **béton cellulaire.**

D'une façon générale, le principe de la détermination des proportions du mélange pour confectionner des bétons de granulats légers est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels ; toutefois un paramètre nouveau, la densité souhaitée, appareil dans l'énoncé du problème et c'est pourquoi nous avants étudié une méthode de composition prenant en compte ce paramètre. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

Le calcul des quantités de granulats s'effectue en volume absolu, mais le dosage pondéral nécessite la connaissance de la masse spécifique des granulats prémouillés qui, en

général, n'est pas connue avec une très grande précision. Ces granulats présentent presque tous, en effet, une tendance très marquée à l'absorption d'eau. Par exemple, pour un granulat d'argile expansée 10/20 mm l'absorption en poids est indiquée en valeurs moyennes, dans le tableau I.1. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**] ; Par imbibition sous vide, l'absorption peut dépasser 75% pour les plus gros granulats. Cette tendance est due à la porosité << ouverte des granulats et elle est moins marquée lorsque ceux-ci sont superficiellement comme « vitrifiés ». C'est-à-dire, présentent une surface lisse peu « ouverte ». [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**] De plus, selon le degré d'imbibition le foisonnement peut prendre une valeur importante surtout pour les éléments fins comme les sables concassés de granulats légers. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**].

Il en résulte essentiellement deux conséquences :

☐ Le dosage pondéral des granulats est délicat et peut être source d'erreur selon le degré d'imbibition ; il est préférable, en générale, de prévoir un dosage volumétrique à moins de pouvoir contrôler efficacement le pourcentage d'eau absorbée et d'en tenir compte en majorant d'autant le poids des granulats supposés secs dans la formule de dosage.

☐ L'absorption importante qui se manifeste des le début du gâchage diminue progressivement et rapidement le dosage en eau inter granulaire et de ce fait la plasticité du béton. Il est donc conseillé d'humidifier préalablement ces matériaux de façon a ralentir cette absorption d'eau et de stabiliser à peu prés la plasticité du matériau au moins pendant sa période d'emploi que l'on s'efforcer de rendre aussi courte que possible : certains professionnels préconisent. Pour l'argile expansée un premouillage entrainant une absorption d'eau de l'ordre de 10 à 15% en poids. D'autres sont partisans d'employer des granulats saturés égouttés. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

Cependant. Ces matériaux sont trop différents de l'un à l'autre pour qu'une règle commune puisse leur être appliquée et une fois rapidement déterminée une formule de dosage approximativement valable. L'expérimentation par des essais d'étude prend alors une part encore plus importante et nécessaire que pour les bétons classiques de granulats denses**.** [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

Absorption d'eau en poids par immersion pour un granulat léger (eau totale retenue absorbée et adsorbée). Ces valeurs sont données à titre indicatif car elles varient sensiblement d'un granulat à l'autre et selon que le granulat est plus au moins égoutté. [**G. DREUX & J. FESTA ,1998**]

I.2.4.1 la pâte de ciment :

Le béton, sous sa forme générale, est constitué d'une matrice (pâte de ciment) qui relie les granulats entre eux (sable, gravillons et/ou graviers). Cette pâte résulte de l'hydratation du liant utilisé, le ciment Portland anhydre étant le plus utilisé. Ce dernier est composé de clinker, de gypse et d'ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, fillers…).

Les constituants principaux du clinker, qui représente à lui seul plus de 90 % du ciment Portland, sont les suivants :

60 à 65% - **C3S** = Ca.SiO3 - silicate tricalcique

20 à 25% - **C2S** = 2CaO.SiO2 - silicate bicalcique

8 à 12% - **C3A**= 3CaO.Al2O3 - aluminate tricalcique

8 à 10% - **C4AF**=4CaO.Al2O3.Fe2O3 - alumino-ferrite tétracalcique

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est–à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. On appelle hydratation l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et ciment. La prise est un passage entre l'état de suspension à celui du solide.

Les principaux hydrates simples formés sont les suivants: silicate de calcium hydraté CSH, portlandite $Ca(OH)_2$ (ou hydroxyde de calcium), aluminates de calcium hydraté, ettringite, etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :

C_3S (silicate tricalcique)

$+ H_2O \rightarrow$ CSH (silicate de calcium hydraté) + Ca(OH)2 (portlandite)

C_2S (silicate bicalcique)

Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Ca(OH)2 formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50-70 % de CSH et 25-27 % de Ca(OH)2. Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante. Ceci est favorable à l'augmentation de la résistance. **[BOUROUIS MOHAMED, 2013]**

I.2.4.2 Les granulats légers

Le granulat léger est le composant nécessaire qui constitue le béton, il occupe 60% à 80% du volume total. Il existe trois matériaux primordiaux qui sont l'argile, l'ardoise et le

schiste expansé dans la fabrication des granulats légers et qui sont l'origine de l'expansion imposée à la matière première, on peut obtenir cette expansion dans une température élevée (100°c à 1400°c).

L'argile et le schiste expansés ont trois composés majoritaires : la silice **(SiO_2)** l'alumine **(Al_2O_3)** et l'hématite **(Fe_2O_3)**.

Les granulats doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. Leur utilisation dans le béton est motivée par le faible coût volumique.

Les granulats légers peuvent être utilisés comme granulats fins pour la mise en œuvre de la cure interne, alors que les gros granulats sont employés pour des bétons légers de structure.

I.2.4.2.1 Différents types de granulats légers

Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine : naturelle ou artificielle

I.2.4.2.1.1 Granulats naturels

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour d es utilisations locales. La Figure I-11 présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (Oil Palm Shell) **[TEO06]**, la diatomite **[UNA07]** et le laitier volcanique **[DEM06]**.



Pierre ponce OPS Diatomite Laitier volcanique

Figure I.11. Différents granulats légers naturels [TEO06], [UNA07], [DEM06]

I.2.4.2.1.2 Granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan **[WAN06]** et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie **[GEN05]** ; soit à partir de sous -produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expansé) **[LAU05], [SAR05], [MIL04],** (Figure I-12).



Laitier refroidi à l'air / Laitier expansé / Argile expansée



Schiste expansé / Cendre volante / Polystyrène expansé

Figure I.12. Différents granulats légers artificiels [WAN06], [SAR05], [MIL04]

Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau. Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ), (Figure I-13). L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses. Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m3.



Figure I.13. Four âtres haute température à 1250°C, GEM, France

Les laitiers qui constituent la base d'une autre catégorie de granulats artificiels comprennent les laitiers de haut fourneau, les laitiers d'aciérie et autres laitiers métallurgiques. Les laitiers métallurgiques sont uniquement utilisés comme matériau de remblai pour les routes et comme granulats pour le béton bitumineux. Seuls les laitiers de haut fourneau sont utilisés pour des bétons de structure. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il est refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact, connu sous le nom de « laitier refroidi à l'air ». Il peut également être refroidi rapidement et traité au moyen de jet d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de « laitier expansé ». Le laitier expansé doit alors être concassé pour former des granulats. Un autre procédé permet de fabriquer du « laitier expansé bouleté ». Le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes. Celles-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface. Leur masse volumique en vrac est de l'ordre de 850 kg/m 3.

Les cendres volantes qui peuvent également être à la base de granulats légers sont mélangées avec de l'eau et transformées en boulette soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion **[JO06], [GES06-1], [GES06-2].** On a découvert que l'addition d'une faible quantité d'alca lis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Par la suite, les boulettes sont frittées dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150°C à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes fusionnent et forment un aggloméré. Ces nodules frittés de forme arrondie, de bonne résistance et possédant une absorption d'eau modérée constituent de bons granulats. Leur masse volumique en vrac est comprise entre 1000 et 1200 kg/m3.

I.2.4.3 L'eau dans le béton léger :

L'eau est une composante essentielle pour la formation de chaque matériau cimentaire. Elle a essentiellement deux fonctions, une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment, et une fonction physique qui permet, lors du gâchage, d'accroitre la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau. L'eau, présente dans la pâte de ciment, se trouve sous plusieurs formes.

L'Eau libre et capillaire

Elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces superficielles. Cette forme d'eau est séparée de la

phase gazeuse par des ménisques, elle est la première à s'évacuer ou à s'évaporer lors d'un séchage.

L'Eau adsorbée

Cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action des formes d'attraction de type Van Der Waals suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides. Sur la face externe des lamelles de CSH, l'eau est librement adsorbée jusqu'à une épaisseur de 5 molécules. La molécule d'eau a un diamètre d'environ 2.6 Å, ce qui donne une épaisseur de la couche d'adsorption de 13 Å, donc il faudrait que l'espace inter-lamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace est en moyenne de 17 Å, l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption empêchée. Dans ces zones, l'eau fortement adsorbée est sous une forte pression de l'ordre de 130 Mpa, dite pression de disjonction. Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau et elle est capable de transmettre localement les contraintes **[Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].**

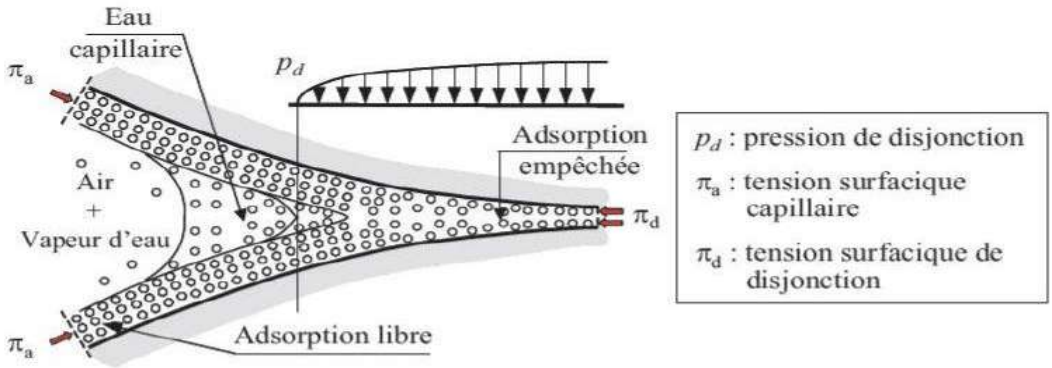


Figure I.14. Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

L'Eau chimiquement liée

Cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les nouveaux éléments tels que le silicate de calcium hydraté et la portlandite. C'est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates.

Structure poreuse du béton

La pâte de ciment présente une porosité à différentes échelles d'observation qui varie d'un béton à un autre de façon significative. La structure poreuse, la connectivité, la distribution et la taille des pores jouent un rôle très important non seulement sur la résistance

mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur.

Deux familles de taille de pores sont à considérer :

- **Les pores capillaires *:*** ils représentent les espaces inter granulaires et sont directement liés au rapport Eau/Ciment. Le volume d'eau fourni pour la fabrication du béton, en raison de maniabilité, est supérieur au volume nécessaire pour l'hydratation. Par conséquent, cet excédent d'eau s'évacue par séchage au cours du temps et laisse des pores capillaires disponibles pour la circulation de gaz
- **Les pores des hydrates *:*** ces pores sont généralement des caractéristiques intrinsèques aux hydrates, leur dimension et leur nombre ne dépendent pas du rapport E/C.

Le réseau poreux bu béton est également constitué de :

- **Vides d'air *:*** ces vides constituent le premier squelette des réseaux poreux (diamètre de l'ordre de micromètre), leur présence dans le béton est due au malaxage.
- **Fissures *:*** de quelques dizaines de micromètres (microfissures) jusqu'aux millimètres (macro-fissures). Ces fissures peuvent avoir des origines très différentes (retraits, sollicitations mécaniques, dilatation, etc.).

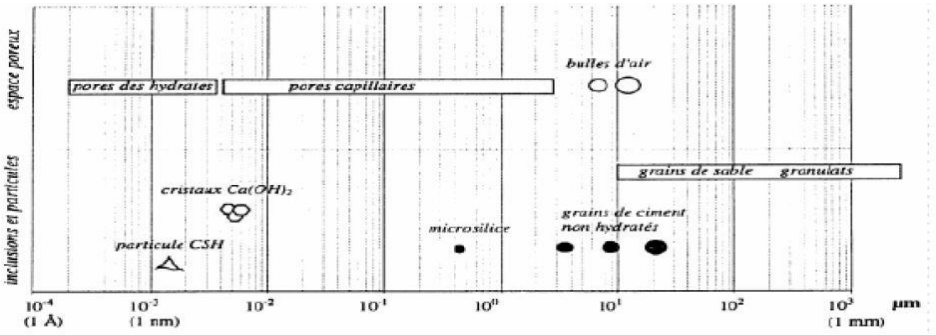


Figure I.15. Dimensions des pores et phases solides présentes dans le béton [Tsimbrovska, 1998].

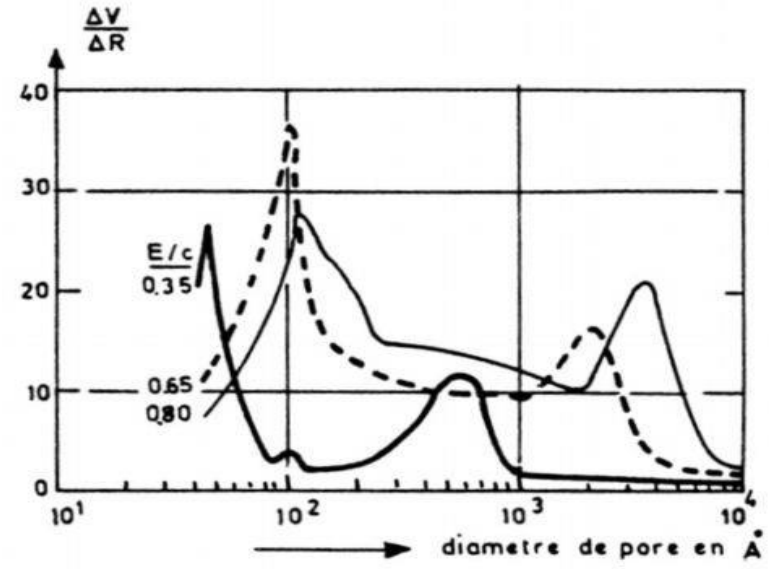


Figure I.16. Distribution porosimétrique d'un béton en fonction du rapport E/C [Malier, 1992].

I.2.3.4 l'interface pate-granulats légers

L'interface pâte granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice. Il existe des modèles de la zone de transition proposés par Monteiro **[MONTEIRO.1986]**, Zimbelman **[ZIMBELMAN.1987]**. Nous présentons sur la figure I.17 le modèle de Diamond [DIAMOND 1986]. On observe, autour des granulats, une zone de pâte hydratée particulière. Sa première couche, plus proche de la surface des granulats, très compacte est composée de cristaux de portlandien orientés perpendiculairement aux granulats **[DIAMOND.1986].**

La deuxième couche d'épaisseur 0,5 μm, est composée de feuillets de CSH. Après la deuxième couche de Ca(OH)2, nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécaniqueque la matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent à travers la matrice. La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. Les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des Réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion **[PIASTA.1994]**. La réaction entre le CaCO3 provenant des granulats calcaires et les Aluminates tricalciques et les alumino-ferrites tètera calciques engendrent une formation

des monocarbo-aluminates de calcium C3A.CaCO3.H11. Ainsi, la zone de transition entre les Granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du matériau béton réalisée avec les granulats de cette nature a Été observée **[MALIER.1992]**, contrairement aux granulats du type quartz, qui sont neutres Par rapport à la pâte de ciment. Par ailleurs les liaisons entre la pâte et granulats concassés Sont plus fortes qu'avec des granulats roulés **[MALIER.1992].**

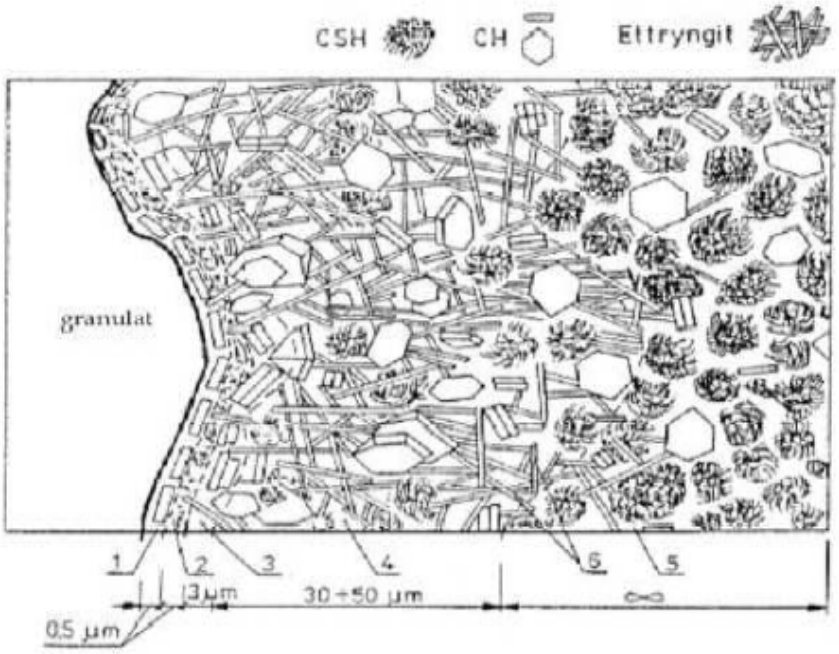


Figure I.17 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO **[DIAMOND.1986]**.

1- couche continue de Ca(OH) 2, 2- couche de CSH, 3- couche de Ca(OH) 2, 4- zone poreuse, 5- pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6- ettringite

Pour les bétons à haute performance, modifiés par l'ajout de fumée de silice, nous pouvons obtenir une réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone. En comparant avec le BO, où l'auréole de transition est d'environ 50 µm, son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 µm. Certaines sources [AITCIN.2003], [STARK.2001] signalent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (Figure I.18) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques. La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/C. Lorsque E/C augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.

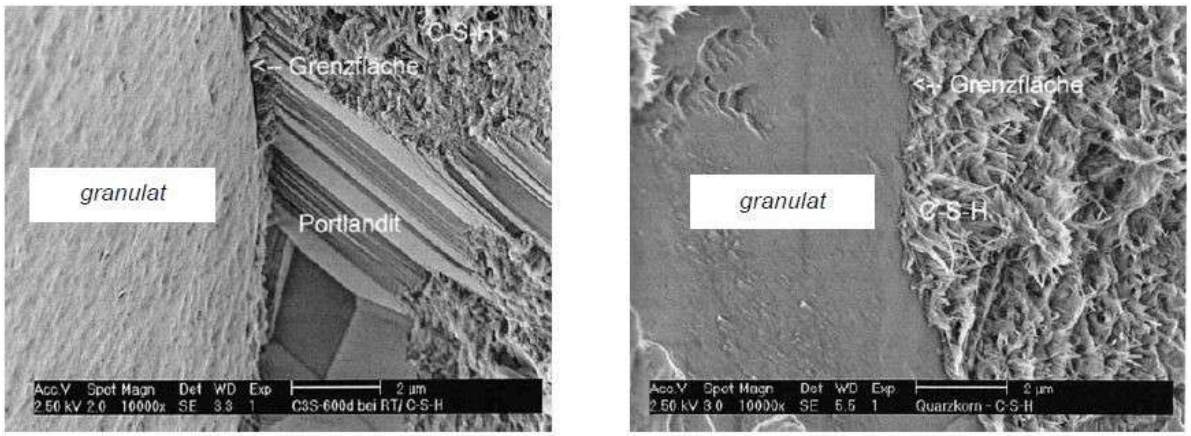


Figure I.18. Microstructure de la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulat, à gauche : Béton sans fumée de silice - à droite : Béton avec fumée de silice **[Stark et Wicht, 2001].**

La qualité de la zone de transition dépend aussi de la nature des granulats. Dans le cas de granulats calcaires (réactifs et très poreux), suite aux réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et l'augmentation des forces d'adhésion, l'auréole est faiblement poreuse et sa résistance mécanique est élevée. Cependant, les granulats siliceux (peu poreux) forment, avec la pâte de ciment, une interface fortement poreuse et moins résistance que la pâte de ciment. Par ailleurs, les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats concassés sont plus rigides qu'avec des granulats roulés **[Nyry et al, 2014].**

I.3 Propriétés physico-mécaniques du béton léger à température ambiante

I.3.1 Propriétés physiques des bétons légers

Nous nous intéressons maintenant aux propriétés physiques des bétons de granulats légers et plus spécifiquement aux propriétés de la liaison pâte/granulat léger, à la masse volumique, alla maniabilités au mûrissement des bétons.

1.3.1.1 Interaction des granulats avec la matrice cimentaire

Dans le cas de granulats classiques, des études physico -chimiques ont permis de mettre en évidence l'existence d'une auréole de transition au niveau de la liaison de la pâte de ciment et des granulats. Cette zone de transition, qui influence le comportement des bétons, se caractérise par une première couche très compacte et de texture très fine fixée au granulat et une deuxième couche très poreuse, de cohésion faible avec une orientation préférentielle des cristaux bien formés sur des distances importantes. La seconde couche, en raison de sa faible résistance mécanique due à la présence de cristaux de grandes dimensions facilement

clivables et par suite de sa forte porosité, constitue le point faible des bétons s ou mis à des actions mécaniques **[BAR82]**. En effet, dans le cas des granulats classiques, à cause des effets de parois localisés, une certaine quantité d'eau de ressuage s'accumule à la surface des gros granulats. Par conséquent, le rapport eau sur ciment plu s élevé à l'interface explique la plus grande porosité de cette zone dont la taille varie, d'après les auteurs, entre 50 et 100 μm pour les graviers **[LO04-1]**.

En ce qui concerne les granulats légers, leur plus forte porosité réduit l'effet de paroi, et la zone de transition diffère des granulats normaux. La zone inter-faciale mise en évidence par différents auteurs **([LO04 -2], [ZHA90-1])** est de faible épaisseur et est caractérisée par des liaisons mécaniques et chimiques entre la pâte et les granulats. Ainsi Lo et Cui [LO04-2] observent pour des granulats d'argile expansée une zone interfaciale très étroite de 5 à 10 μm d'épaisseur où l'on distingue un réseau plus poreux composé d'aiguilles d'ettringite. La Figure I-19 présente une micrographie de la zone de transition entre le granulat et la pâte de ciment observée au Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

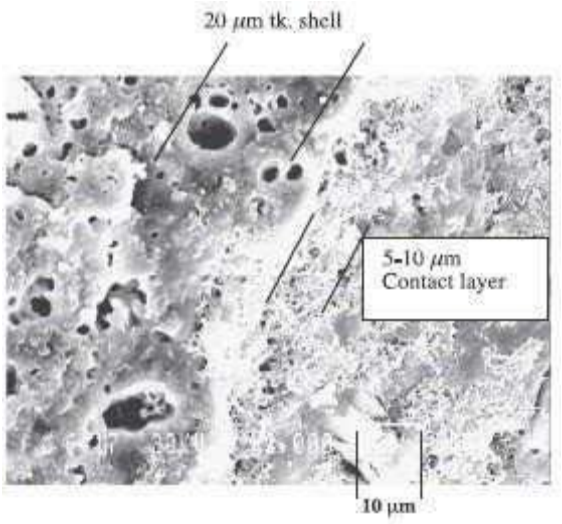
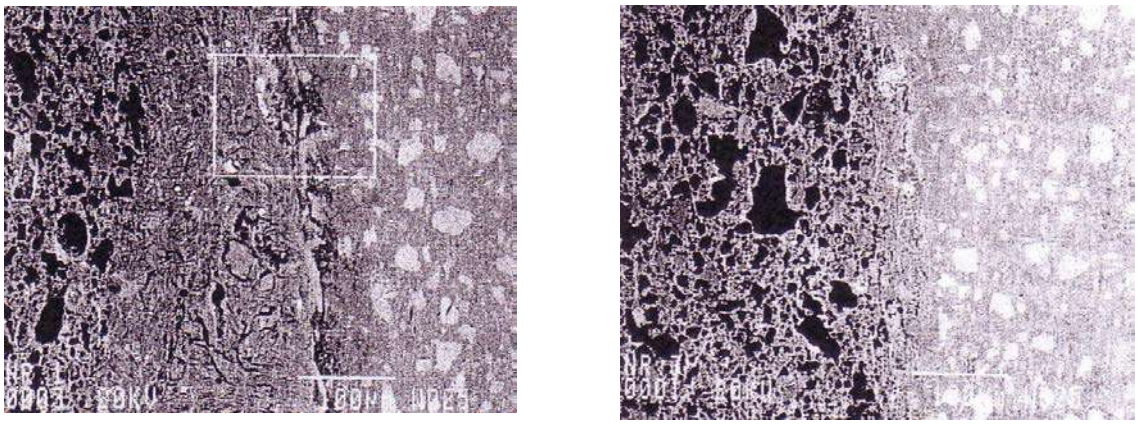


Figure I.19 Zone de transition entre un granulat d'argile expansée et la pâte de ciment dans un béton Léger (grossissement x2000) **[LO04-2].**

L'épaisseur et la porosité de la zone de transition dépendent des échanges d'eau à l'interface pâte -granulat, c'est-à-dire des capacités d'absorption des granulats. Les granulats possédant une enveloppe extérieure de coque épaisse et dense présentent une zone de transition se rapprochant de celle des granulats normaux avec de larges cristaux de portlandite et des aiguilles d'ettringite **[ZHA90-1]**, (Figure I-20). Les études de Sarkar et al. Confirment ces résultats **[SAR92].**



(a) (b)

Figure I.20. Zone de transition entre un granulat d'argile expansée et la pâte de ciment.
(a) Granulat à coque épaisse et dense ; (b) Granulat à coque de faible épaisseur **[ZHA90-1].**

En mesurant un rapport calcium/silice par analyse chimique (EDX), plus élevé que celui de la matrice (au jeune âge), caractérisant une zone riche en porlandite, Wasserman et Bentur ont montré que la largeur de la zone de transition diminue linéairement lorsque l'absorption augmente **[WAS96]**, (Figure I-21).

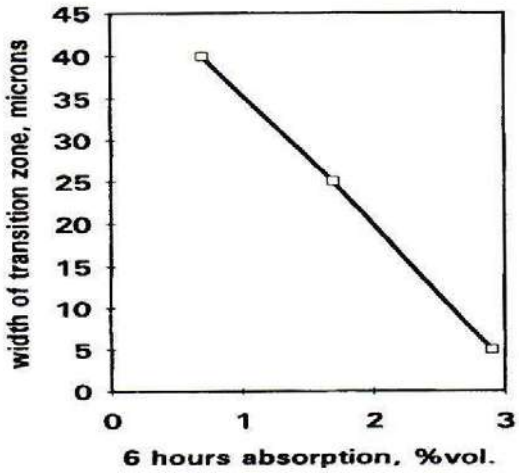


Figure I.21. Largeur de la zone de transition au jeune âge

Des mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique, que nous nous proposons d'examiner maintenant, expliquent cette meilleure qualité d'interface. Plus les granulats absorbent de l'eau, moins l'eau s'accumule dans la matrice fraîche à proximité du granulat. En conséquence, la zone de transition devient moins poreuse et plus dense. Ainsi, pour des granulats légers d'égale résistance, le béton le plus résistant est obtenu avec les granulats possédant la plus forte absorption. L'absorption d'eau dépend toutefois du degré de saturation initiale des granulats. Ainsi ce processus physique d'absorption d'eau est

responsable au jeune âge (1 jour) d'une amélioration de 25% de la résistance des bétons pour une augmentation de la capacité d'absorption des granulats de 200% **[WAS96].**

Fagerland et Khokhrin affirment que la zone de transition peut être plus dense que la matrice, et donc plus résistante (cités par **[ZHA90-1]).** Le rôle de filtre joué par les granulats légers diminue le rapport E/C au voisinage des granulats par rapport au reste de la matrice. Fagerland et Khokhrin relève une valeur de micro -dureté de 9 à 15 MPa sur une distance de 60 µm autour du granulat et de 6 à 8 MPa au -delà. Elsharief et al complètent ces études en quantifiant la porosité autour des granulats à l'aide d'analyse d'images obtenues par BSE (électron s rétrodiffusés) **[ELS05],** (Figure I-22).

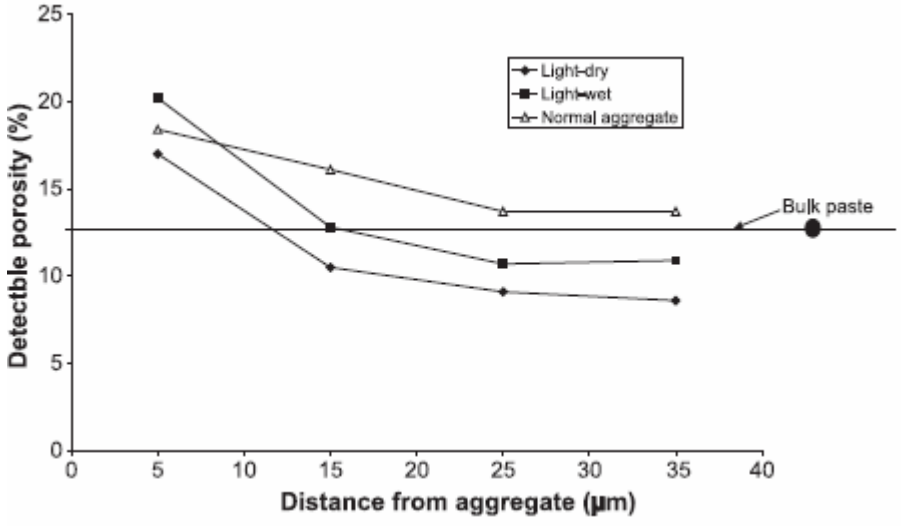


Figure I.22. Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulat **[ELS05]**

Deux zones se distinguent sur cette figure : la zone la plus proche du granulat présent une porosité plus importante que celle du reste de la matrice sur environ 10 µm ; au-delà et jusqu'à environ 50 µm la porosité est à l'inverse plus faible. La quantité d'eau de ressuage est plus élevée à la surface du granulat et diminue lorsque la distance au granulat augmente.

L'absorption d'eau par les granulats va créer un déplacement d'eau de la pâte vers ces derniers. La quantité d'eau par rapport à celle de la pâte reste en excès sur les 10 premiers microns de l'interface mais, au -delà sur une dis tance d'au moins 40 µm le rapport E/C devient plus faible que le rapport E/C de gâchage. La pâte située entre 10 et 50 µm du granulat est donc plus dense que le reste de pâte. La diminution de porosité dépend des capacités d'absorption des granulats. Les granulats immergés 24h avant gâchage absorbent encore de l'eau et présentent le même processus physique que les granulats secs avec toutefois une plus faible intensité.

Les travaux de Lo et al. **[LO08]** n'ont à l'inverse pas mis en évidence de zone plus dense que la matrice à proximité du granulat. A partir d'analyse d'images prises au microscope optique, ils quantifient la porosité à l'interface sur une largeur de 30 et 50 μm pour 3 granulats d'argile expansée, possédant des coefficients d'absorption à 1h de 8,9% (type I) ; 9,6% (type II) et 11% (type III). Pour trois bétons testés de E/C différents 0,4 ; 0,44 et 0,48, la porosité à l'interface (30 et 50 μm) est le double de celle de la pâte de ciment, (Figure I-23).

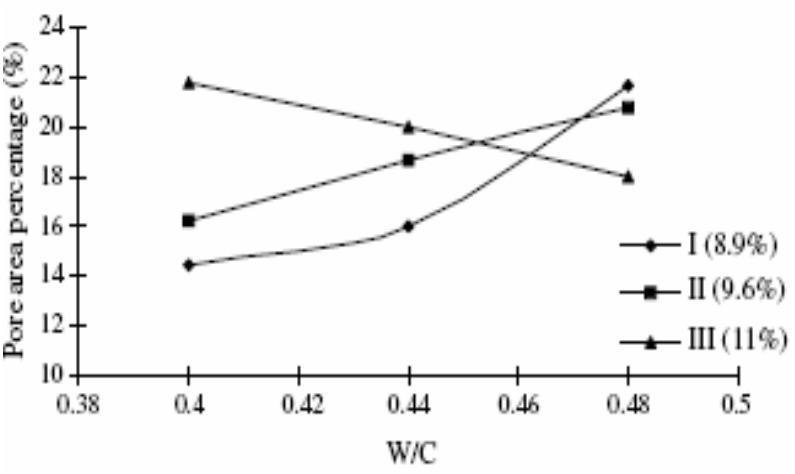
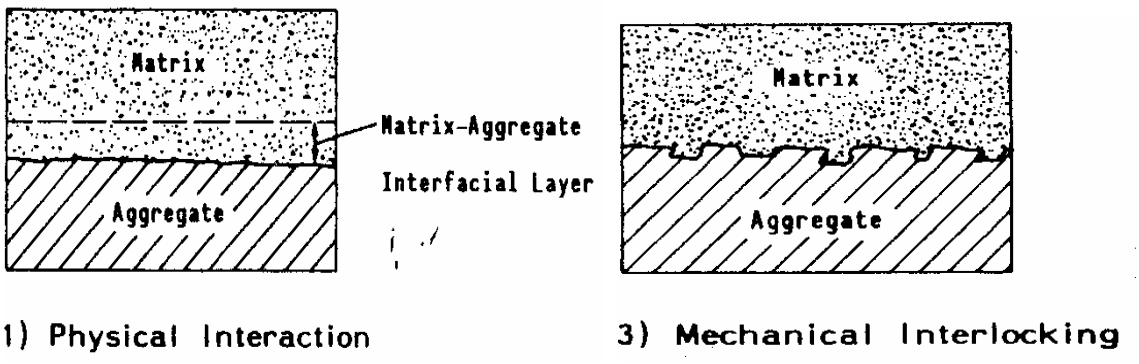


Figure I.23. Influence de l'absorption d'eau des granulats légers sur la porosité de la zone inter-faciale **[LO08]**

La Figure I-23 montre que pour de faible rapport E/C (0,4), la porosité dans la zone de transition est plus élevée pour le granulat le plus absorbant, la tendance s'inversant lorsque E/C augmente. Les auteurs supposent qu'un déficit d'hydratation des grains de ciment explique la plus forte porosité observée pour le granulat le plus absorbant. Tous les auteurs soulignent la difficulté d'obtenir des résultats globalement représentatifs d'un type de granulat du fait des variations locales d'épaisseur et de densité que présente l'enveloppe extérieure d'un grain. La variabilité des résultats dans la littérature peut aussi s'expliquer par les âges différents auxquels sont réalisées les mesures ou les observations de la porosité. En effet, la densité de la pâte augmente avec l'âge aussi longtemps que les grains non hydratés continuent à former des produits d'hydratation. Cette hydratation tend à réduire la dimension et le volume des vides, spécialement dans la zone de transition. Ainsi, l'eau absorbée par les granulats au moment du malaxage devient disponible avec le temps pour hydrater les grains de ciment qui ne l'étaient pas encore complètement, diminuant ainsi la porosité à l'interface matrice / granulat **[NEV00].** Outre le processus physique d'absorption d'eau, un processus

chimique apparaît à long terme au delà de 28 j ours. Wasserman et Bentur **[WAS96]** ont observé deux types de phénomènes : la réaction pouzzolanique entre le granulat et la solution alcaline qui pénètre dans les pores du granulat (formation de C-S-H) et le phénomène « d'imprégnation » entraînant un dépôt de portlandite (CH) dans les pores de surface des granulats. Plus les granulats ont une capacité d'absorption élevée et une porosité de surface importante plus ce dernier phénomène est important. Ces phénomènes chimiques contribuent à augmenter la densité de la zone de transition et par conséquent à améliorer la résistance en compression à long terme des bétons de granulats légers (à base de cendres volantes frittées par exemple) **[WAS97].** Sarkar et al. **[SAR92]** et Zhang et Gjorv **[ZHA90-2]** indiquent quant à eux que l'influence de la réaction pouzzolanique des granulats légers (argile expansée, cendre volantes) n'est que très limitée et peut être négligée. Cette faible réactivité des granulats s'explique par les températures très élevées (>1200°) auxquelles ils ont été soumis durant leur fabrication provoquant la recristallisation de la silice et de l'alumine et la disparition des phases amorphes.

Enfin, un troisième mécanisme peut être avancé pour expliquer la qualité de l'interface dans les bétons de granulats légers. La pâte de ciment peut en effet venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers. Il se produit alors un ancrage mécanique qui améliore l'adhérence des granulats à la pâte d e ciment **[ZHA90-1], [SAR92], [LO04-1], [HUS03].** L'imbrication mécanique des deux matériaux dépend de la rugosité des granulats, de la structure de l'enveloppe externe des granulats. Selon Wasserman et Bentur [WAS96], cet ancrage mécanique ressemble au phénomène d'imprégnation entraînant le dépôt de portlandite (CH) précédemment décrit. La Figure I-24 schématise ces 3 mécanismes d'interaction dans la zone de transition.



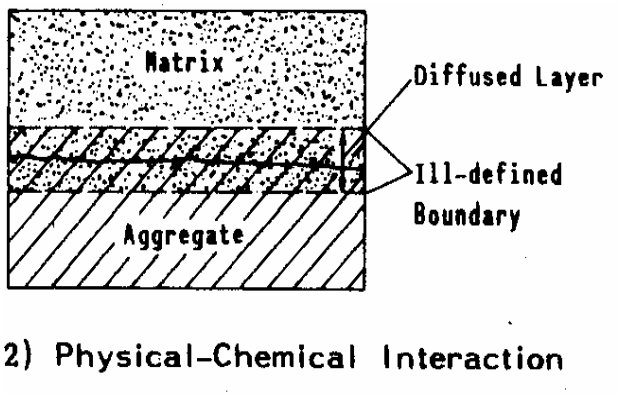


Figure I.24 : Trois mécanismes d'interaction dans la zone de transition **[ZHA90-1]**

I.3.2 Maniabilité et mûrissement des bétons légers

La grande capacité d'absorption des granulats légers a une influence importante sur la maniabilité, la résistance et le mûrissement du béton. Cette influence dépend de l'état du granulat utilisé saturé et séchée surface ou bien sec.

Pour les granulats légers saturés séchés en surface, on n'observe pratiquement aucune influence sur la maniabilité. L'eau absorbée n'est par conséquent pas à prendre en compte dans le rapport eau/ciment du béton. Par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Cette situation pourrait être désignée par l'expression « mûrissement humide interne » **[ZHU04], [BEN99],** ce qui fait que les bétons de granulats légers sont moins sensibles à un mûrissement humide incorrect qu'un béton ordinaire **[AL98], [WEB97].**

En revanche dans le cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation s e développent et, à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée **[NEV00].**

La tortuosité et la connectivité

La tortuosité τ d'un milieu caractérise les obstacles au cheminement de fluides dans la structure poreuse, elle est exprimée d'après Quénard et al **[QUE 91]** par le carré du rapport de la distance parcourue par le fluide sur la distance effective du déplacement L.

$$\tau = \left(\frac{Le}{L}\right)^2$$

Avec Le : Longueur effective du déplacement du fluide, c'est à dire longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon.

L : longueur parcourue par le fluide ou longueur de l'échantillon poreux dans la direction de l'écoulement.

La connectivité d'un milieu poreux est un paramètre microscopique, elle caractérise le degré de connexion au sein de lui-même. Selon Fischmeister, la connectivité C peut être définie comme le plus grand nombre de branche de réseau pouvant être coupées sans créer de parties indépendantes (sans déconnecter de pores ou de nœud du reste de réseau [Dul 79]. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$C = b - n + 1$$

Où : C : représente la connectivité du matériau.

b : représente le nombre des branches (pores, bras, cavité).

n : représente le nombre des nœuds connectés aux branches

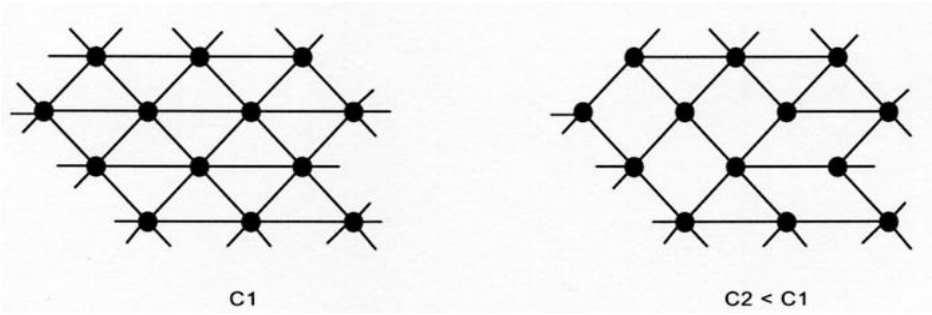


Figure I.25. Représentation schématique de la connectivité d'un réseau poreux

I.3.2 Comportement des bétons légers en compression

A la différence du béton traditionnel, la rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent le plus grand nombre possible de granulats légers. La rupture des éprouvettes est ainsi caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats **[ARN86],**

[NEV00]. Les principaux facteurs ayant une influence sur la résistance en compression des bétons de granulats légers sont de s caractéristiques des granulats et la composition du béton.

I.3.2.1 Influence des caractéristiques des granulats légers

Pour le béton traditionnel, le rapport E/C gouverne les caractéristiques mécaniques du béton. Pour le béton léger, la résistance à la compression du béton est aussi influencée par les caractéristiques des granulats légers. Examinons d'abord l'influence de la masse volumique des granulats. Selon **[ARN86]** et **[DUZ05],** la résistance du béton est proportionnelle directement avec la masse volumique des granulats légers. Toutefois, Holm et Ries **[HOL00]** aboutissent à la conclusion inverse en substituant des granulats normaux par des granulats légers dans des proportions de 25%, 50%, 75%, 100% en volume. La masse volumique des bétons ainsi formés, diminue successivement de 5%, 11%, 15%, 21%, variant de 2300 kg/m3 à 1800 k g/m3, mais, la résistance à compression à 28 jours ne varie pas, et reste autour de 40 MPa. Ce phénomène est aussi observé par le groupe de travail Euro Light Con **[EUR00].** Pour un béton de résistance faible à moyenne, ce phénomène peut être expliqué par l'amélioration de l'interface pâte/granulats qui compense la plus faible résistance des granulats légers. Pour les bétons de forte résistance, la masse volumique des granulats légers, et par conséquent leur résistance, constituent une limitation à l'augmentation de la résistance du béton avec l'amélioration de la résistance de la matrice. D'après les simulations numériques de Larrard **[LAR95],** c'est seulement pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa que l'emploi de granulats légers diminue la résistance du béton.

La taille des grains est également un facteur influençant la résistance à la compression du béton léger. La limite imposée par la résistance des gros granulats sur la résistance du béton léger peut être contrecarrée par l'utilisation de granulats de dimension plus petite. En effet, la fragmentation des gros granulats se produit à travers les plus gros pores, qui sont ainsi éliminés. On peut constater l'influence positive sur la résistance du béton de cette diminution de la dimension maximale **[NEV00].** Ce phénomène est aussi vérifié par les travaux de Miled et al. **[MIL07]** et de Ganesh Babu et Saradhi Badu **[GAN03]** sur le béton de polystyrène, surtout pour les bétons à faible pourcentage de granulats, tandis qu'il est négligeable pour des fractions volumiques importantes. Le plafond de résistance peut être augmenté sensiblement en réduisant la taille maximale des granulats. Cet effet est plus évident pour les granulats les moins résistants **[ACI03].**

Certains auteurs évaluent la résistance en compression des bétons légers à partir de la résistance des grains. En effet, la résistance du béton léger diminue avec celle des granulats

légers **[LO04-3], [LO07].** On peut donc s'attendre à ce qu'il existe une relation assez directe entre la résistance du béto n léger et celle des grains constitutifs. Ainsi, Arnould et Virlogeux proposent la relation empirique suivante **[ARN86]** :

$$f_{c28} = 18 + 6 f_g$$

Où $f_{C\ 28}$ désigne la résistance moyenne du béton àla compression à28 jours exprimée en MPa, et f_g la résistance des grains, déterminée par l'essai au fil.

Pour les bétons de granulats légers réalisés avec des granulats pré-mouillés dont l'humidité interne correspond à un temps d'immersion de 2 heures, la relation, pour une formulation particulière de béton, est donnée par **[ARN86]:**

$$f_{c28} = 18 + 4 f_g + (1 + \frac{w_2}{20})$$

où w_2 est le pourcentage d'eau absorbée par les granulats légers au bout de 2 heures d'immersion. Cette formule prend en compte l'effet bénéfique du pouvoir absorbant des granulats sur l'adhérence pâte – granulat. Les auteurs précisent que ces relations n'ont été obtenues qu'à l'aide d'une seule formulation de béton et ne peuvent être généralisées qu'avec beaucoup de prudence.

Lo et al. Soulignent le rôle d e la porosité des granulats légers qui améliore la liaison pâte granulats **[LO07].** Les grains les plus résistants présentent en général une coque plus dense et par conséquent un moindre pouvoir absorbant. La résistance du béton découle ainsi de deux caractéristiques antinomiques du granulat, qui jouent dans un sens ou l'autre selon le rapport E/C de la matrice.

Au vu de ces résultats, il semble que les seuls critères de masse volumique et de résistance ne soient pas suffisants pour expliquer l'influence des granulats sur la résistance du béton.

I.3.2.2 Influence de la composition des bétons

La composition du béton, à travers le rapport eau sur ciment, le rapport volumique Granulat/Sable, la teneur en ciment et la résistance du ciment influencent par ailleurs la résistance des bétons de granulats légers.

La quantité d'eau gâchage est contrôlée par le rapport eau sur ciment. La résistance du béton en compression est d'autant plus élevée que le rapport de E/C est petit, c'est-à-dire que

la quantité d'eau de gâchage est faible **[MOR76], [CHI03].** Selon Arnould et Virlogeux **[ARN86],** une réduction de 15 litres (par m3) de la quantité d'eau de gâchage conduit à une augmentation de 5 à 10% de la résistance à la compression. Cependant, une trop faible quantité d'eau risque de ne pas pouvoir hydrater complètement le ciment, et peut entraîner une chute de résistance du béton. L'eau absorbée dans les granulats légers n'est pas immédiatement disponible pour le ciment et ne doit pas être prise en compte dans l'eau de gâchage. Son influence sur la résistance en compression n'est pas clairement établie. Si les granulats sont saturés, on peut supposer que le sens de migration de l'eau peut s'opposer à la pénétration de la pâte dans les pores des granulats légers et de réduire les liaisons entre le mortier et les granulats, donc la résistance du béton. Mais on peut aussi considérer que lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durcie, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires rendant possibles une hydratation supplémentaire et donc une amélioration de la résistance **[LO04-3].** Ce mûrissement humide interne est d'autant plus efficace que le rapport E/C est faible ou que le béton contient de la fumée de silice. Les faibles rayons des capillaires de ces bétons « haute performance » expliquent l'intensité plus élevée des forces de succion **[JOZ05].** De même, l'eau absorbée par les granulats légers permet de limiter efficacement le retrait du béton **[BEN01], [ZHU04], [BEN99], [KOH99].**

L'influence du rapport volumique Granulat/Sable (G/S) sur la résistance à la compression de bétons légers est également notée. Lorsque le rapport du volume absolu de granulats légers G au volume absolu de sable naturel S'augmente, la masse volumique du béton diminue, et la résistance à la compression diminue aussi. Pour les bétons légers structuraux, le rapport volumique G/S est de l'ordre de 1,5 à 1,8. Il peut quelquefois atteindre 1,90, mais cela conduit alors à des bétons relativement fragiles **[ARN86].**

La résistance à la compression du béton augmente par ailleurs avec le dosage en ciment. Morin note qu'au delà d'une certaine augmentation de la quantité de ciment, la résistance augmente moins rapidement et semble tendre vers une limite **[MOR76].** De même Neville trouve qu'au delà de 60/70 MPa, l'augmentation du dosage en ciment n'entraîne plus d'amélioration notable de la résistance **[NEV00].** Sahin et al. Indiquent qu'en moyenne, une augmentation de 10% du ciment donnera approximativement une augmentation de 5% de la résistance **[SAH03].** Cette propriété s'observe sur la courbe expérimentale présentée à la Figure I-26 qui montre l'évolution de la résistance à la compression de différents bétons en fonction de leur teneur en ciment. Wilson et Malhotra ont observé un résultat analogue sur un

béton haute performance avec des granulats de schiste expansé **[WIL88].** L'augmentation de la résistance à la compression au delà de 70 MPa peut être plus difficile en raison des limitations de résistance du granulat de schiste expansée du type de ciment utilisé.

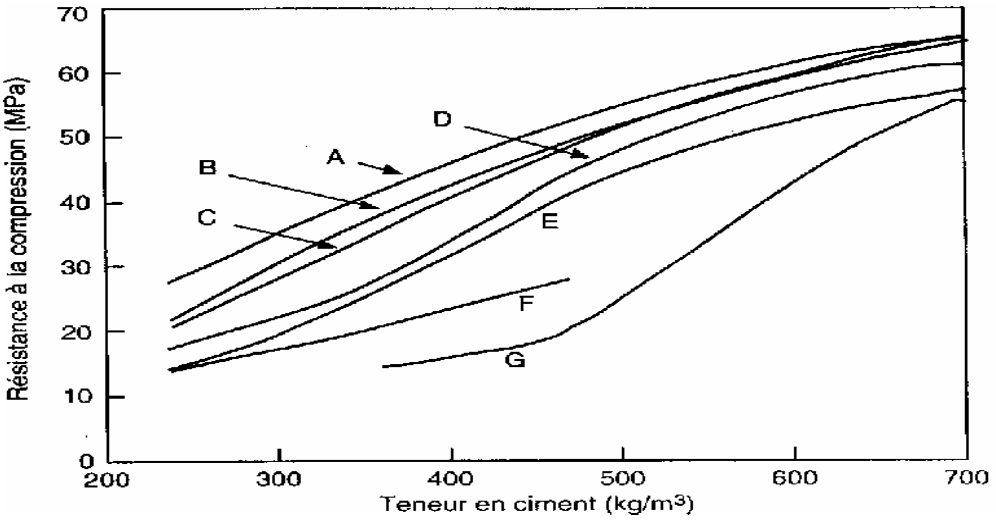


Figure I.26. Évolution de la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) en fonction du dosage en ciment de bétons ayant en affaissement de 50mm et confectionnés avec différents types de granulats légers. (A) cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire ; (B) laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire ; (C) cendres volantes frittées ; (D) schiste fritté ; (E) ardoise expansée ; (F) argile expansée et sable ; (G) laitier expansé **[NEV00].**

De façon générale, pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale. Le Tableau I-4 illustre cette remarque.

Tableau I.4. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment **[NEV00]**

Résistance moyenne à la compression sur cylindre normalisé (MPa)	**Dosage en ciment**	
	Avec granulats fins légers (kg/m^3)	**Avec granulats fins de densité normale (kg/m^3)**
17	240-300	240-300
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-500

Par ajout de fumée de silice à hauteur de 10% de la quantité de ciment, Zhang et Gjorv ont réussi à obtenir une résistance en compression à 28 jours variant entre 57 et 104 MPa correspondant à une masse volumique des bétons de 1595 à 1880 kg/m 3 **[ZHA91-2].** Si une forte résistance au jeune âge est exigée, l'utilisation de fumée de silice devient nécessaire.

Selon les essais de Sarkar, Chandra et Bermsson **[SAR92],** la fumée de silice semble avoir peu d'effet sur la résistance au jeune âge du béton fabriqué avec des granulats ayant une surface externe rugueuse, mais pour le béton fabriqué avec des granulats ayant une surface lisse, l'influence positive de la fumée de silice est évidente. Ganesh Babu et Saradhi Babu **[GAN03]** indiquent aussi que la résistance en compression au jeune âge des bétons de granulats de polystyrène expansé est améliorée avec l'addition de fumée de silice en complément du ciment. En revanche, la résistance à 90 jours reste constante.

Plusieurs auteurs ont rapportés que lorsque le dosage de ciment varie entre 260 et 640 kg/m3 et la densité sèche du béton varie entre 1.44 à 1.99, la résistance à la compression à 28 jours se situe entre 20 et 100 MPa.

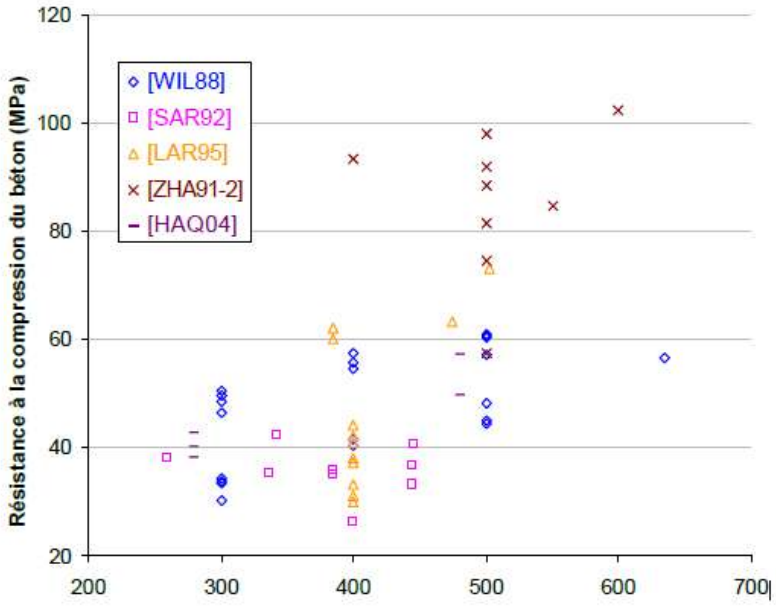
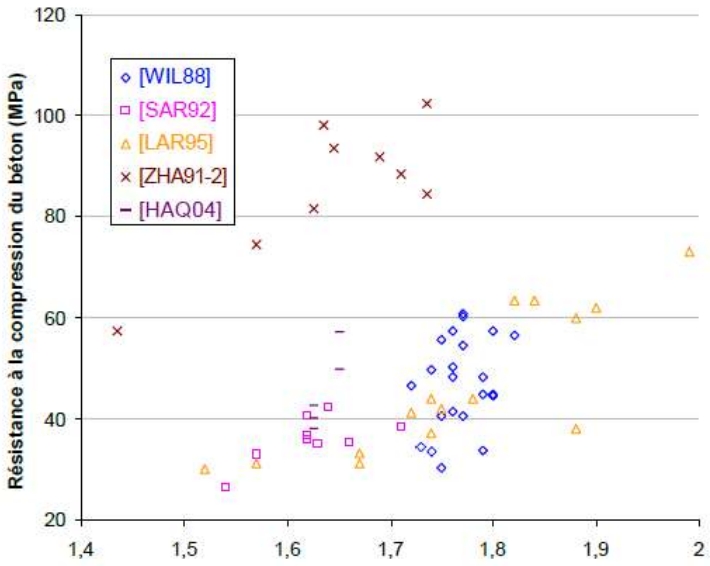


Figure I.27. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur dosage de ciment (a)

Ainsi, ces auteurs ont relié la résistance du béton léger à sa masse volumique sèche comme l'indique la figure I.27 (b).



Densité du béton (b)

Figure I.27. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur densité(b). (Résultats expérimentaux de Wilson et Malhotra **[WIL88],** Sakar et al. [SAR92], De Larrard **[LAR95],** Zhang et Gjorv **[ZAH91-2]** et Haque et al. **[HAQ04])**

I.4. Propriétés Physico -Mécaniques du béton léger soumis aux hautes Températures

I.4.1 Masse volumique des bétons légers

L'expression « masse volumique » nécessite une définition particulière lorsqu'elle est employée pour un béton de granulats légers. En effet, trois masses volumiques différentes peuvent être définies : la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état séché à l'air et la masse volumique à l'état séché au four. La masse volumique du béton fraîchement malaxé peut facilement être déterminée comme la masse volumique à l'état frais. Cependant, au cours du séchage à l'air ambiant, l'humidité est perdue jusqu'à l'obtention d'un quasi - équilibre : le béton a alors une masse volumique à l'état séché à l'air. Si le béton est séché à 105°C, il a atteint la masse volumique à l'état séché au four. Des différences semblables se retrouvent également dans le cas des bétons ordinaires, mais les différences entre les trois masses volumiques sont plus grandes dans le cas d'un béton léger, du fait de l'importance de la quantité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ses variations lors du durcissement et de la vie de l'ouvrage.

Ainsi, la masse volumique sèche ρ_{bs} du béton léger est la masse volumique qu'aurait le béton léger si toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment s'évaporait. Elle peut être déduite de la masse volumique à l'état frais par la relation suivante :

$$\rho_{bs} = \rho_0 - E_{V0}$$

Où ρ_0 désigne la masse volumique réelle d u béton frais et E_{V0} la quantité d'eau évaporable du béton. Cette dernière quantité peut être caractérisée par une relation suivante **[ARN86]** :

$$E_{V0} = E + E_a - 0.25C$$

Où E désigne la quantité d'eau de gâchage, E_a la quantité d'eau absorbée par les granulats légers, et C la quantité de ciment. Neville note que l'écart entre la masse volumique sèche ρ_{bs} et la masse volumique du béton frais ρ_0 varie entre 150-250 kg/m3 **[NEV00].**

La masse volumique à l'état séché à l'étuve peut être prise égale en première approximation à la masse volumique sèche. Des recherches nord -américaines montrent en effet que quelque soit l'humidité initiale dans l es granulats, la masse volumique à l'état séché à l'air est de 50 kg/m^3 de supérieure à la masse volumique à l'état séché à l'étuve **[ACI03].**

D'après Arnould et Virlogeux la prise de poids d'un béton léger immergé ne dépasse pas 40 kg/m^3 et est de 30 kg/m^3 pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement ce gain de poids par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant au moins en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et en début de prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers **[ARN86]. La figure I.28** donne l'évolution de la masse volumique des granulats calcaires et des granulats de brique concassée à la température ambiante et après chauffage jusqu'à 700°C.

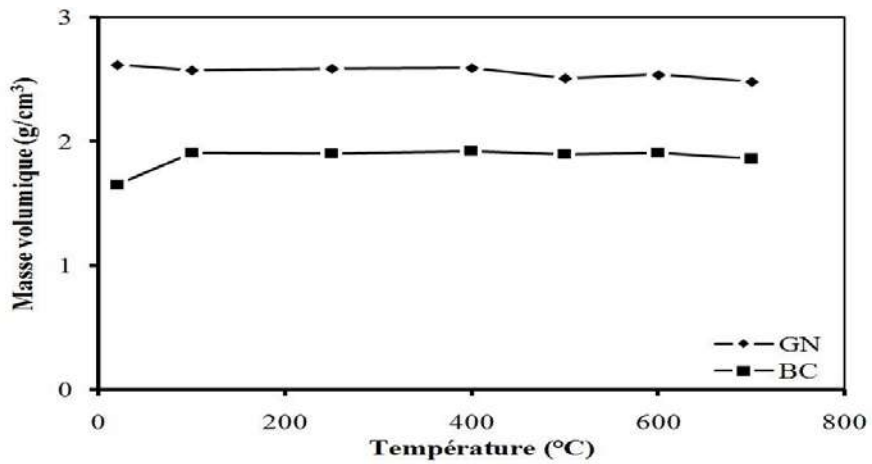


Figure I.28. Evolution de la masse volumique des granulats avec température **[HACHEMI Samya 2015].**

La masse volumique des granulats calcaires diminue un peu entre 100°C et 700°C. Cette diminution est d'environ 2% à 100°C et d'environ 5% à 700°C. Les granulats de brique concassée ne présentent qu'une légère augmentation de la masse volumique lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à 700°C. L'échauffement jusqu'à 100°C des granulats de brique concassée conduit à une augmentation de la masse volumique de 16%, elle reste quasiment constante jusqu'à 700°C. **[HACHEMI Samya 2015]**

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure I.2 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite. **[Melle. KAOUANE]**

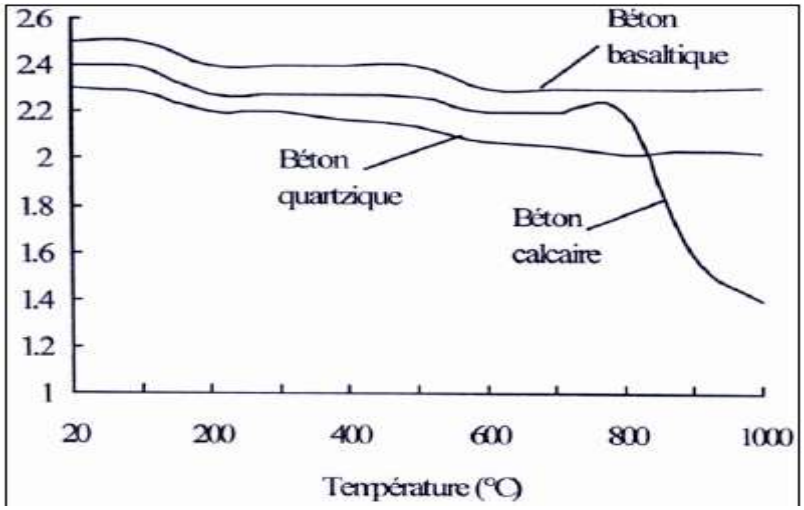


Figure I.29 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. **[Melle. KAOUANE]**

I.3.2 Porosité et perméabilité des bétons légers

Porosité

La porosité des granulats est une caractéristique importante qui influence directement leur propriété hygrométrique et par voie de conséquence la maniabilité du béton. Les granulats légers ont des porosités totales très importantes, entre 25% et 75% de leur volume apparent. Cette porosité varie proportionnellement avec la taille des grains. Plus la taille des grains

augmente, plus la porosité est importante. La taille de pore varie considérablement de moins de 4 nm jusqu'à plus de 1 mm. **[Yang KE]**

La forme des pores est plutôt irrégulière. On distingue deux types de pores : les pores ouverts et les pores fermés. Les pores ouverts forment un système poreux continu dans le matériau. Les pores fermés sont isolés et ne sont pas reliés ensemble. Seul le système de pore ouvert peut contribuer au transport de la matière dans le matériau **[ZHU04].** Plus les pores sont interconnectés, plus l'absorption d'eau est élevée. Le pourcentage des pores ouverts dans l'ensemble des pores est très variable selon les natures de granulats légers. Ainsi, pour les granulats légers utilisés dans les travaux de Zhang et Gjorv **[ZHA91 -1],** la plupart des pores sont ouverts, les pourcentages de pores ouverts étant tous supérieurs à 80%. Mais, pour les granulats légers utilisés par Faust et Beck **[FAU99],** ces pourcentages varient entre 14% et 90%.

Certains types de granulats comme l'argile expansée ont une enveloppe externe dense entre 0,1 et 0,3 mm d'épaisseur, moins poreuse que l'intérieur. Lors de la cuisson des nodules d'argile, quand la température de fusion est atteinte, il se forme en effet une pellicule vitrifiée à la surface des nodules. Sur les cendres volantes frittées, aucune différence de structure n'a par contre été observée entre la périphérie et l'intérieur du granulat **[ZHA91-1].**

Le béton est un matériau poreux bi phasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La Figure I.30 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par la méthode la saturation d'eau. **[Melle. KAOUANE]**

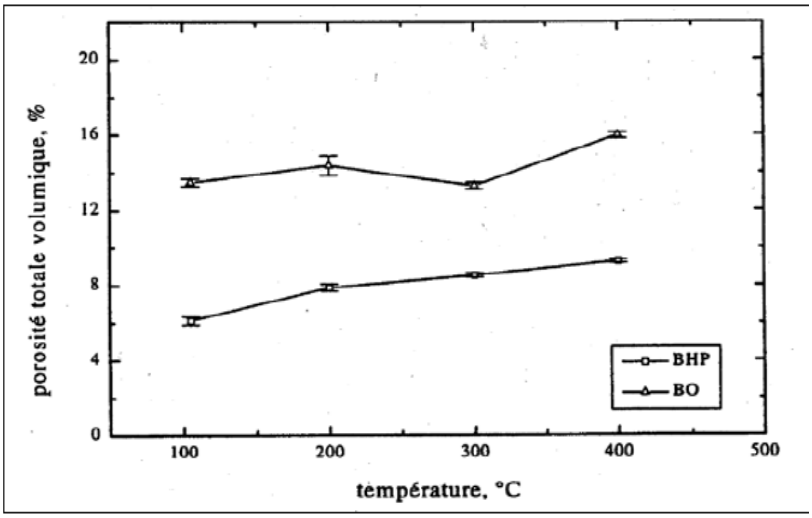


Figure I.30 Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement. **[Melle. KAOUANE].**

Hanaa et al **[HAN 10]** ont présenté une comparaison entre les mesures de la porosité des bétons auto-compactant, en utilisant deux méthodes : L'analyse d'image permet de quantifier la porosité en introduisant une résine dans le béton et la méthode expérimentale pour mesurer la porosité à l'eau. Les résultats obtenus ont montré une porosité légèrement élevée en utilisant la méthode expérimentale (mesure de la porosité à l'eau) comme le montre la Figure I.31. La différence entre les deux résultats est liée à la meilleure accessibilité des pores de petite taille par de l'eau par rapport à la résine utilisée dans le cas de l'analyse d'image.

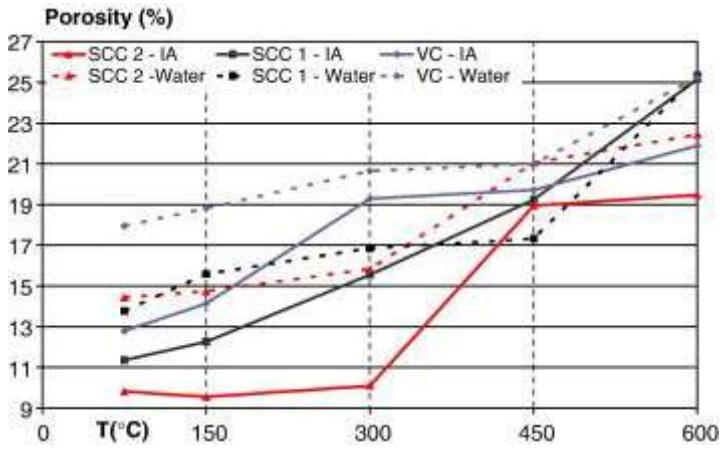


Figure 1.31. La porosité en fonction de la température **[HAN 10]**

Perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu a se laissé traverser par un fluide sous un gradient de pression **[Kanema et al., 2005]**. Bien que cette perméabilité dépend fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructivité du réseau poreux liée à la taille des

pores, la perméabilité du béton dépend également de ses constituants **[Choinska, 2006]**. Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement lié à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition.

Certains résultats expérimentaux, Kanema [**Kanema et al., 2005]**, Choinska **[Choinska, 2006],** Andrade [**Andrade et al., 2003]**, Noumewé **[Noumowe et al., 2009]**, Fares **[Fares et al., 2009]**, ont montré que la perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C.

La figure I.32 présente la variation de la perméabilité intrinsèque résiduelle du béton en fonction de la température obtenue par Kanema **[Kanema et al., 2005]**. Ils constatent que la perméabilité des bétons diminue à 150°C pour augmenter de manière exponentielle pour des températures supérieures. Ils attribuent la baisse de la perméabilité intrinsèque résiduelle à 150°C à la présence d'eau sous forme liquide dans les pores. L'augmentation de la perméabilité constatée entre 150 et 300°C est attribuée à un élargissement des pores capillaires tandis que celle observée entre 300 et 450°C est due à une détérioration de la matrice cimentaire.

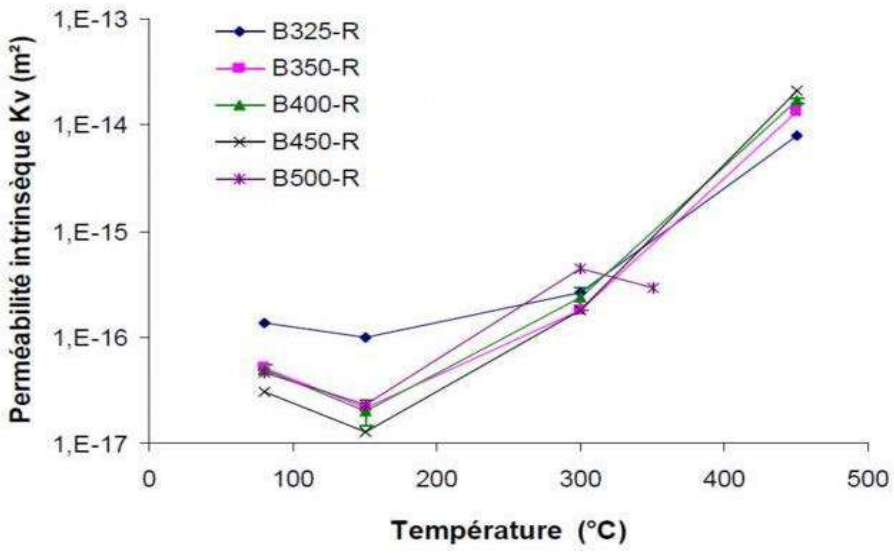


Figure I.32. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température **[Kanema et al. 2005].**

I.3.3 Comportement des bétons légers en compression

Plusieurs facteurs combinés peuvent influencer la résistance du béton. En effet, on peut observer une importante dispersion des résultats pour un chauffage à 150°C. Les bétons

peuvent présenter un gain de résistance de l'ordre de 20% ou une perte de résistance allant jusqu'à 30%.

La principale raison de la diminution de la résistance est tout d'abord l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation (retrait de la matrice provoqué par la phase de séchage et de déshydratation) **[DEJONG.2007].** A cela il faut ajouter l'augmentation de la microfissuration et de la porosité, l'influence de la nature de la pâte et des granulats et les déformations différentielles entre la pâte et les granulats **[GAWESKA.2004].**

La figure I.33 regroupe les valeurs de la résistance à la compression en fonction de la température de chauffage de différents auteurs (quel que soit le type de béton : BAP, BV avec ou sans addition minérale). On observe pour la plupart des bétons une diminution de la résistance avec l'augmentation de température, Ou les résultats sont comparés avec la réglementation **[EUROCODE et DTU].** L'enveloppe globale des résultats se situe en dehors des limites préconisées par ces normes.

Entre 100 et 200°C, l'évolution de la résistance est complexe : on observe soit des gains ou soit des pertes de résistance. Mais, pour la plupart des bétons, la tendance est à la perte de résistance. Puis, entre 250 et 350°C, l'évolution de la résistance à la compression est également délicate à analyser : on constate soit une augmentation, soit une diminution de la résistance. Au delà de 350°C, le comportement à haute température des bétons est plus net : la résistance diminue.

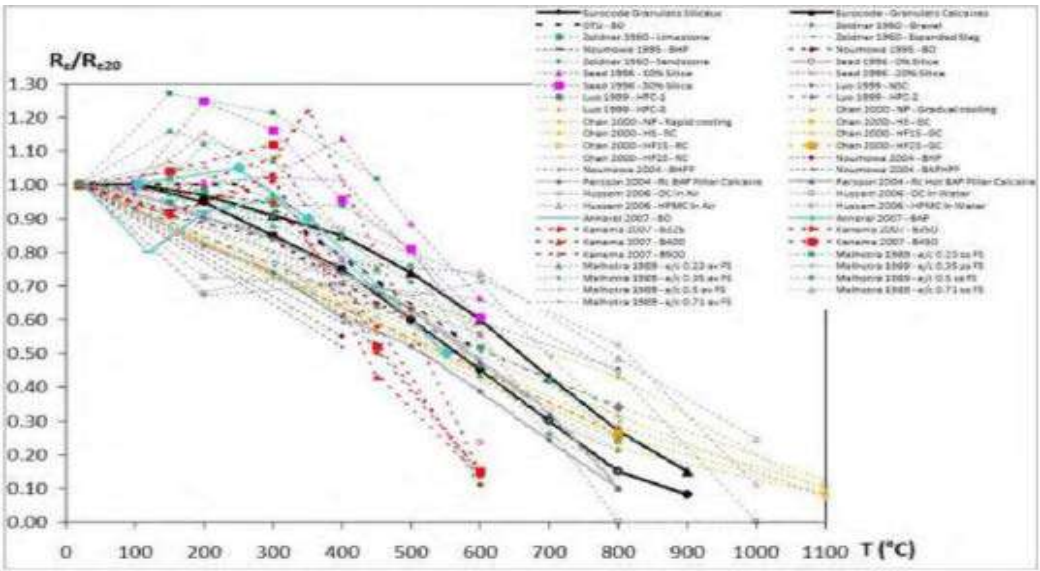


Figure I.33. Différents résultats de résistance à la compression obtenue d'après différents auteurs **[FARES.2009].**

Khoury **[KHOURY.1992]** attribue la baisse de résistance entre 100 et 200°C à la réduction des forces de cohésion de type Van der Waals comprises entre les feuillets de CSH. Cela réduit l'énergie de surface des gels développant éventuellement des groupes silanols Si-OH.HO-Si qui présentent des forces de liaison faibles.

Les décompositions chimiques et la perte de l'eau liée causent d'importants changements dans la microstructure de la pâte de ciment. D'après Dias et al. **[DIAS.1990],** le départ de l'eau entraîne une réhydratation de la pâte due à la migration de l'eau dans les pores. Pour Khoury **[KHOURY.1992],** le départ d'une partie de l'eau liée génère la formation de liaisons plus courtes et plus fortes d'éléments de siloxane (Si-O-Si) avec probablement des énergies de surface plus importantes qui contribuent au retrait et à l'augmentation de résistance.

Au delà de 350°C, la résistance en compression chute très rapidement. Cela est expliqué par la décomposition des hydrates de ciment comme la portlandite, les CSH et enfin la transformation allotropique du quartz qui fragilise les granulats **[FELICETTI.2000].** Mais, également, l'apparition des fissures permet d'expliquer cette diminution **[NOUMOWE.1995].** D'autres études montrent que l'utilisation de différents granulats conduit à des performances différentes. Abrams **[ABRAMS.1971]** rapporte que des bétons réalisés à partir de granulats légers et de carbonates présentent des résistances à chaud plus élevées que des bétons réalisés à partir de granulats siliceux suite à un chauffage à 600°C (Voir figure I.34).

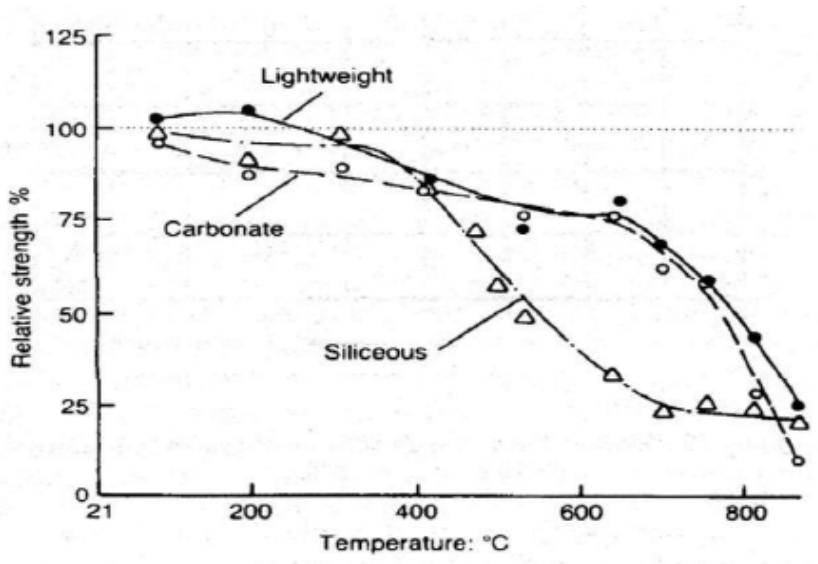


Figure I.34. Résistance à la compression à chaud **[ABRAMS.1971].**

Avec l'augmentation de la température le matériau devient de plus en plus déformable. Notamment à 600°C, la force appliquée en compression fait se refermer des fissures d'origine thermique tout en augmentant les valeurs de la déformation au moment de rupture.

Les valeurs de la résistance en compression et les courbes de la résistance en compression relative à la valeur observée à 20°C obtenues par Gaweska **[GAWESKA.2004]** sont regroupées sur la Figure I.35.

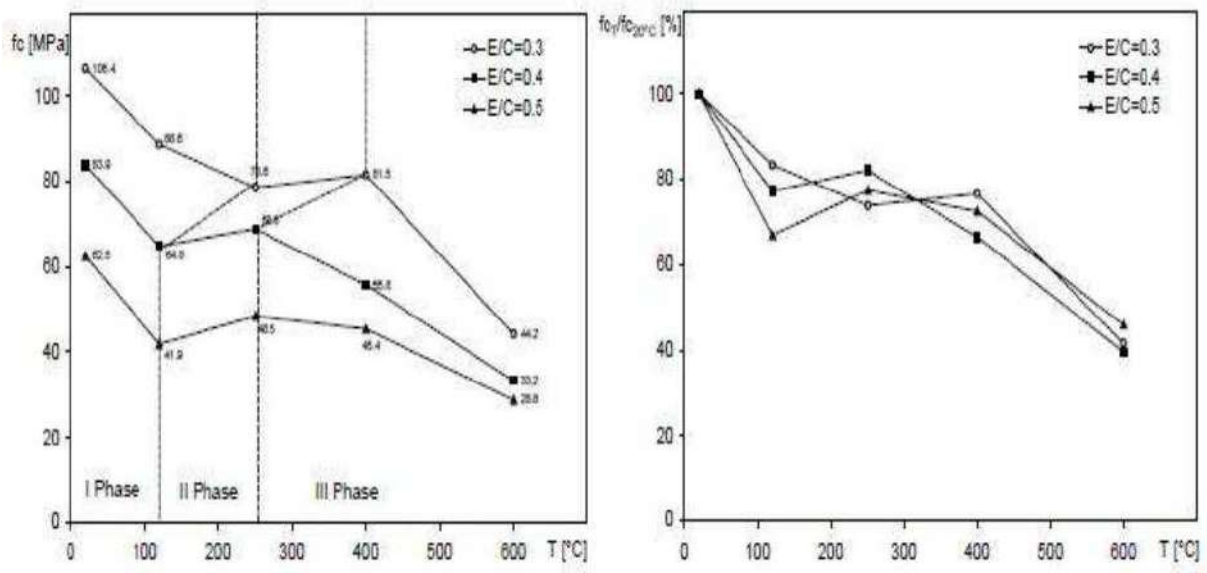


Figure I.35. Résistance en compression et résistance en compression relative déterminées à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures **[GAWESKA.2004].**

Gaweska **[GAWESKA.2004]** a distingué trois phases consécutives dans l'évolution de la résistance en compression.

· Dans la **phase I**, entre 20 °C et 100 °C, la résistance relative diminue d'environs 20- 30%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau qui peut entraîner un écartement des feuillets du gel CSH. L'écartement des feuillets provoque une diminution des forces d'attraction entre ces feuillets. De plus dans les BHP les pressions de la vapeur d'eau qui se créent dans le matériau induisent des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette solide.

· Puis, dans la **phase II** entre 100°C et 250°C, les valeurs de la résistance augmentent par rapport à la valeur la plus faible à 120°C. Cette augmentation peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau ré-augmentant les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH. Pour un béton de rapport E/C faible (0.3) la phase de récupération de la

résistance est significativement retardée. Ce n'est qu'aux alentours de 400°C ou il ya une augmentation de la résistance pour ce béton. Ceci peut s'expliquer par la perméabilité plus faible de ces bétons plus compacts. Par conséquent le départ de l'eau est ralenti d'où une augmentation de la résistance retardée. Cette récupération de résistance paraît être dépendante de la durée du palier de la stabilisation de la température.

· A partir de 400°C, pour le béton de rapport E/C égale à 0.3 et 250°C pour le béton de rapport E/C égale à 0.4 et 0.5, les résistances relatives diminuent de façon monotone **(phase III**). Il n'y a plus d'eau libre dans le matériau, mais la déshydratation du gel CSH continue et la portlandite se décompose aux alentours de 450°C. Gaweska **[GAWESKA.2004]** a également observe les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats qui se dilatent et la pâte qui, elle, subit un retrait important.

Tableau I.5. Les phases de l'évolution des résistances en compression en fonction de la température **[GAWESKA.2004].**

Phase	Plage des températures, environ :	Effet sur la résistance en compression	Hypothèses concernent l'explication du phénomène
I phase	de 20 °C à 120°C	diminution	1. dilatation thermique de l'eau (α_e= 70 x 10^{-6}) qui peut entraîner un écartement des feuillets du gel CSH et ainsi diminuer les forces d'attraction 2. un affaiblissement des liaisons entre les hydrates 3. pressions de la vapeur d'eau qui créent des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette
II phase	de 100 °C à 250 °C *pour BHP de E/C faible 100°C- 400°C*	augmentation	1. départ d'eau – séchage 2. rapprochement des feuillets du gel CSH – renforcement des liaisons entre les hydrates
III phase	> 250°C *pour BHP de E/C faible >400°C*	diminution	1. déshydratation du gel CSH 2. décomposition de la portlandite 3. endommagement par la fissuration due à la différence de la dilatation thermique entre la pâte et les granulats

I.3.4 Comportement des bétons légers en traction

Dans la littérature, il existe peu de résultats concernant l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. Pourtant cette donnée est primordiale, la résistance en traction conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements) **[RILEM.1985].**

Sur la figure I.36, plusieurs résultats de résistance à la traction ont été collectés. On observe en général une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température. Jusqu'à 300°C, les valeurs sont assez dispersées avec des résistances relatives allant de 35% à 100%. Par contre, les valeurs fournies par l'Eurocode **[EUROCODE2.2005]** représentent plutôt des valeurs moyennes. Au delà de 300°C, les résultats sont tous supérieurs aux valeurs données par l'Eurocode.

Bamonte et al. **[BAMONTE.2007]** ont mené une étude sur le comportement en traction des bétons à haute température. Pour cela, ils ont mis au point différent types d'éprouvettes pour réaliser les principaux essais caractérisant le comportement à la traction d'un béton (BHP, BO et BHP avec granulats légers, BTHP, BAP provenant tous d'études déjà publiées).

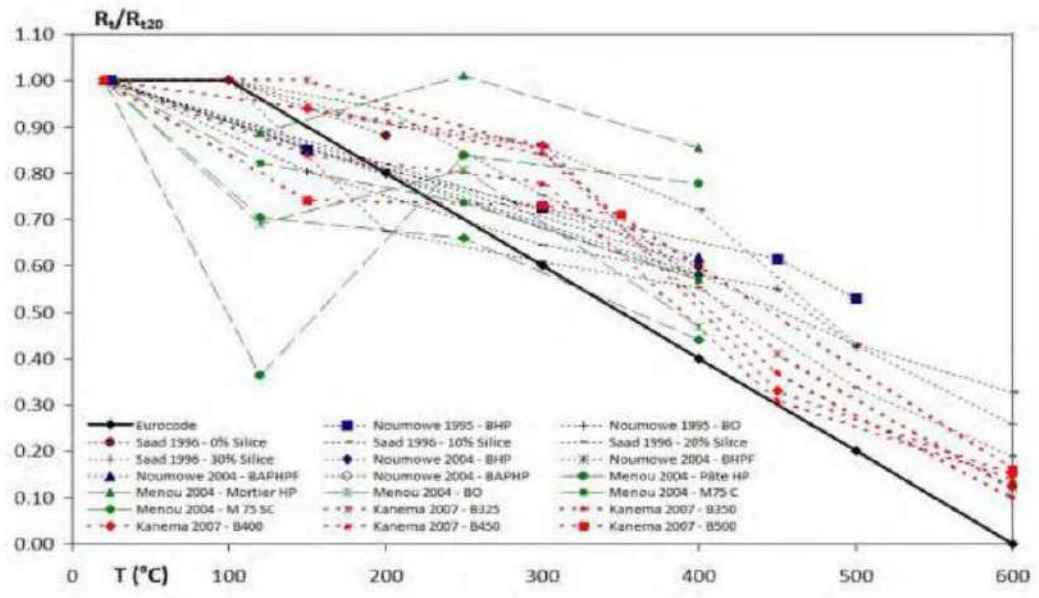


Figure I.36. Différents résultats de résistance à la traction obtenue auteurs **[FARES.2009].**

Selon Bamonte et al. **[BAMONTE.2007],** la meilleure manière de mesurer la résistance en traction est d'utiliser la traction directe avec encastrements des bords, car avec une rotation libre de l'éprouvette, la résistance est sous-estimée. Concernant l'essai par fendage (ou essai brésilien), il est considéré comme une bonne alternative aux essais de traction. Par contre, la résistance à la traction par flexion est trop affectée par l'augmentation de la ductilité d'éprouvettes prismatiques d'épaisseur fine (appelé poutre fine dans la figure I.37).

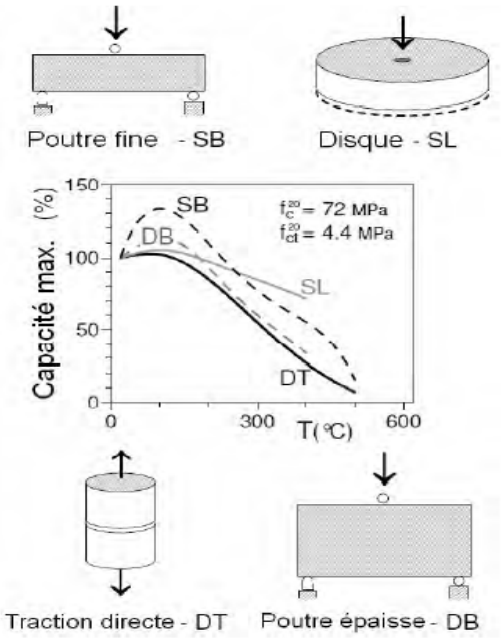


Figure I.37. Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction **[BAMONTE et al.2007].**

Aucune amélioration de la résistance en traction n'est observable au cours de l'évolution de la température. Elle diminue de façon quasi-linéaire. Noumowé **[Noumowe et al., 1996]** note que la résistance résiduelle à la traction du béton à haute performance est supérieure de 15% par rapport à celle du béton ordinaire. Il apparait au vu de ces résultats, que la résistance à la traction résiduelle par fendage est supérieure à celle déterminée par traction directe.

Kanema **[Kanema, 2007]** a choisi d'évaluer la résistance à la traction résiduelle en fonction de la température d'exposition par le biais de l'essai de traction par fendage à cause de sa simplicité de mise en œuvre. Les essais ont porté sur les cinq formulations de bétons (B325, B350, B400, B450 et B500) soumises à quatre cycles de chauffage-refroidissement composés d'une rampe de montée en température fixée à 1°C/min, d'un palier de stabilisation d'une heure aux températures cibles suivantes 150°C, 300°C, 450°C et 600°C et d'une rampe de descente en température. L'ensemble des résistances résiduelles et relatives (normalisées par rapport aux résistances à 20°C) des bétons à la traction est présenté sur les figures I.38

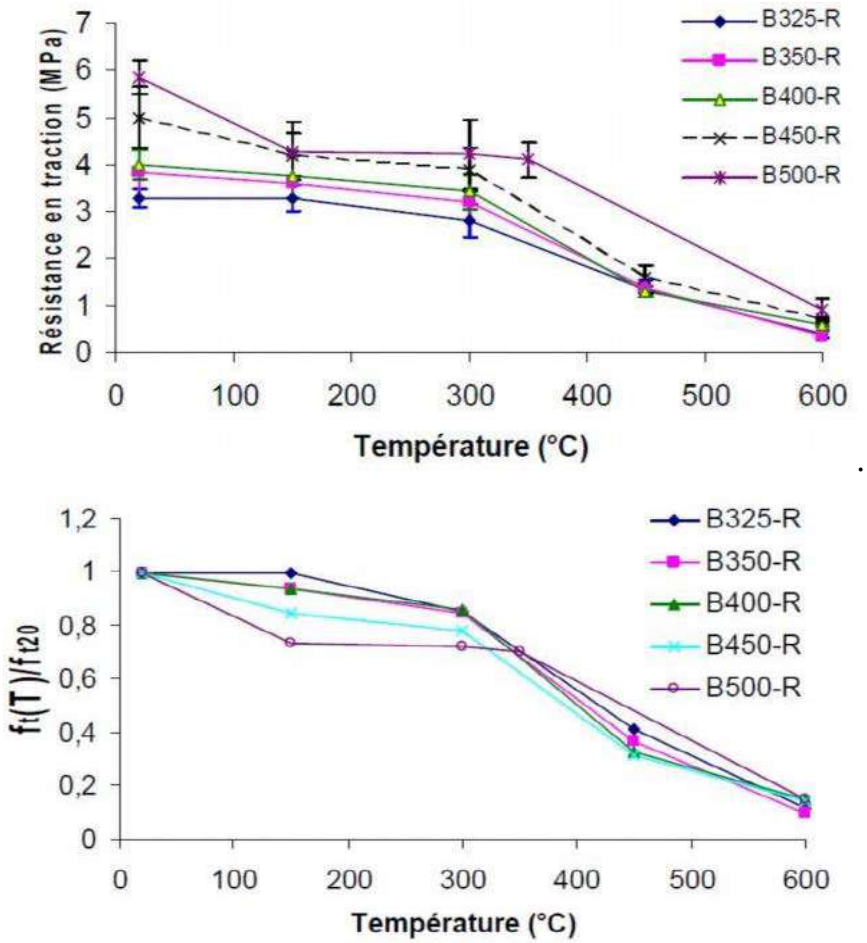


Figure I.38. Evolution de la résistance à la traction du béton mesurée par essai de fendage après refroidissement **[Kanema, 2007].**

I.3.5 Module d'élasticité

Avec l'augmentation de la température, les variations du module d'élasticité dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment **[GAWESKA.2004]** (augmentation de l'endommagement du matériau par la déshydratation et la fissuration de la matrice) et traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Ainsi, avec l'élévation de la température, on assiste à la rupture de liaisons internes qui entraînent une diminution du module d'élasticité avec un matériau de plus en plus déformable **[SCHNEIDER.1988].**

Sur la figure I.39, Nous observons une diminution progressive du module d'élasticité apparent au cours de l'échauffement ce qui se traduit par une décroissance de la pente des courbes σ(ε) avec la température. Les modules d'élasticité apparents diminuent de façon monotone dans toute la gamme de températures. A 120° C, la réduction du module est d'environ 20%. Dans la suite le module diminue. Cette diminution atteint environ 80% à 600°C. Il semblerait que le rapport E/C n'influence pas d'évolution du module d'élasticité

relatif. Les trois courbes sont confondues et diminuent avec à peu près la même intensité avec la température. Autrement dit l'eau au cours de la montée en température n'influence pas le module, où cette influence est négligeable **[GAWESKA.2004].**

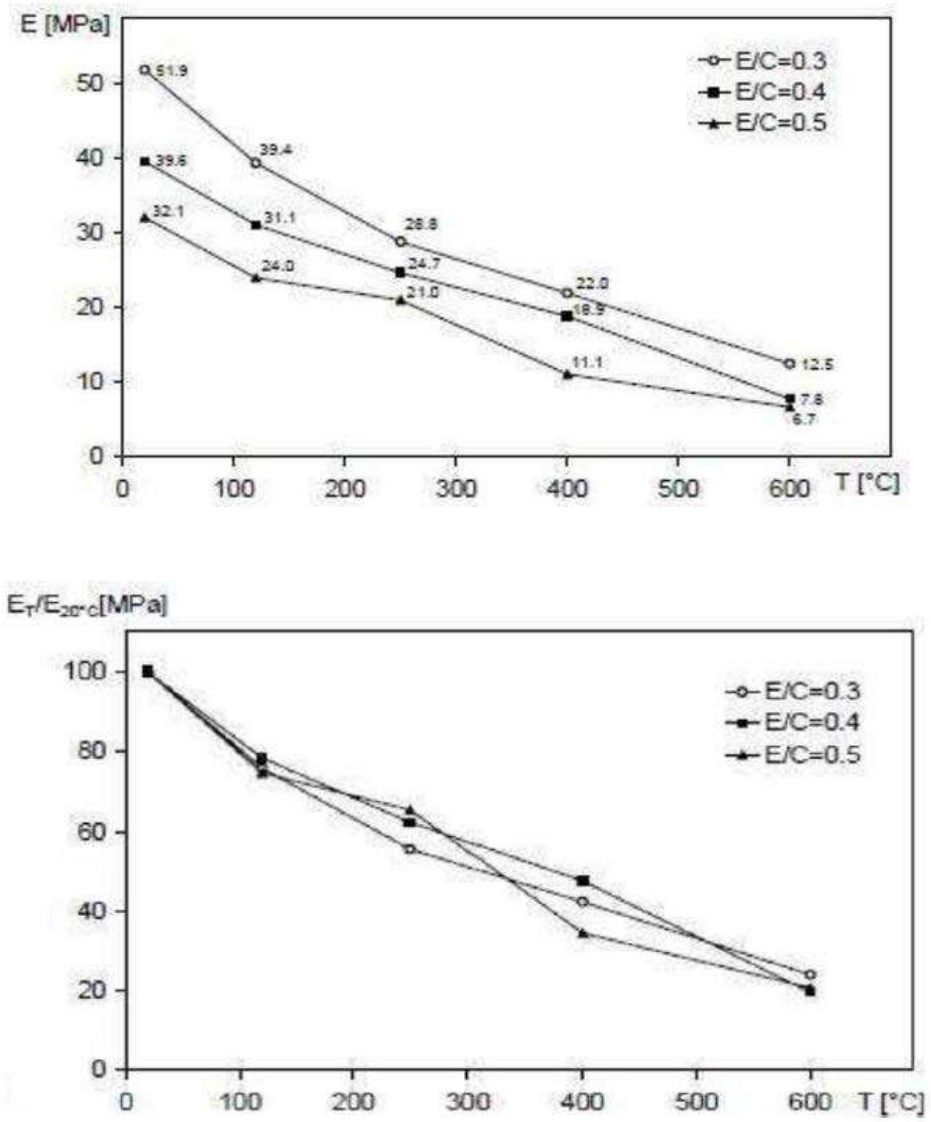


Figure I.39. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures **[GAWESKA.2004].**

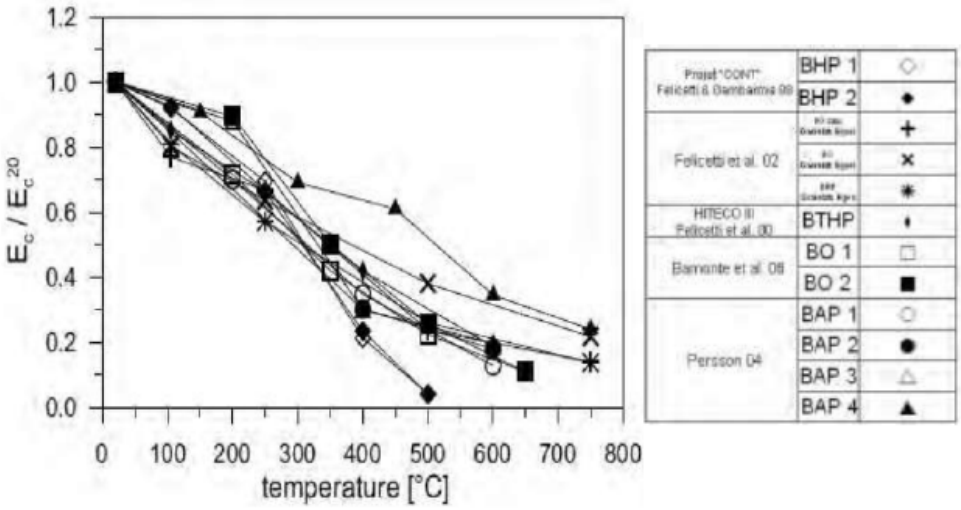


Figure I.40. Evolution du module d'élasticité **[BAMONTE.2007]**.

La figure I.40, présente des variations de modules d'élasticité en fonction de la température d'après une étude réalisée par Bamonte et al. **[BAMONTE.2007].**La diminution du module est due à l'endommagement de la microstructure du béton **[GROSS.H.1973].**

Enfin, il est intéressant de noter l'influence de l'ajout des fibres polypropylène sur l'évolution du module d'élasticité du béton avec la température. Les valeurs des modules d'élasticité apparents des bétons avec fibres polypropylène et des bétons non fibrés obtenues par Hager **[Hager, 2004]** sont présentées sur la figure I.14. Hager **[Hager, 2004]** constate que le module d'élasticité relatif du béton fibré présente une évolution semblable à celle du béton sans fibres. Elle observe aussi que, excepté à 600°C, les modules d'élasticité apparents relatifs des bétons fibrés sont globalement inférieurs à ceux des bétons non fibrés. A 600°C, les valeurs déterminées sont toutes très proches.

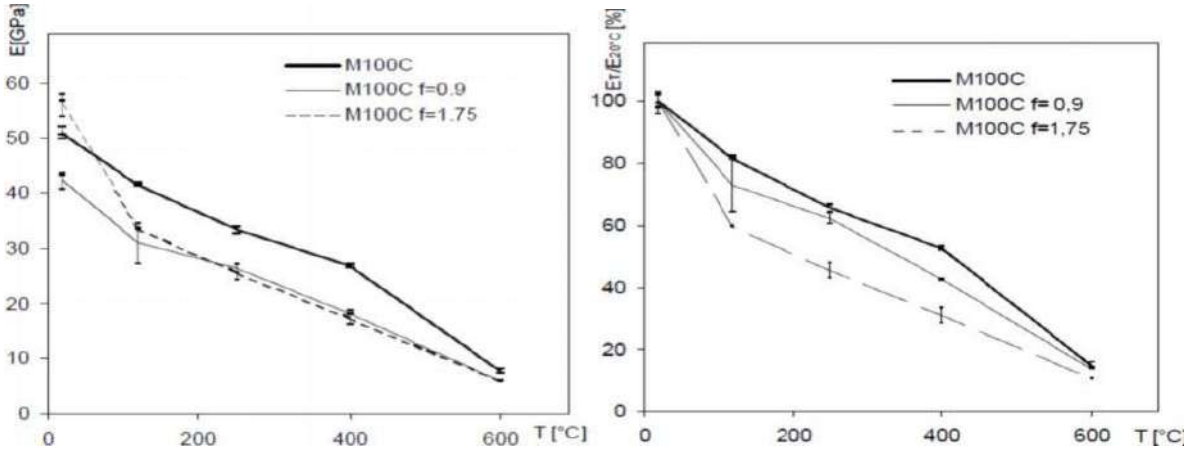


Figure I.41. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs obtenus sur deux bétons fibrés et non fibrés **[Hager, 2004].**

I.3.6 L'éclatement et l'écaillage

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. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent, tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation. 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.

- Le processus thermo-hydrique : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure I.42 montre le mécanisme d'éclatement 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.[**Van Thai**]

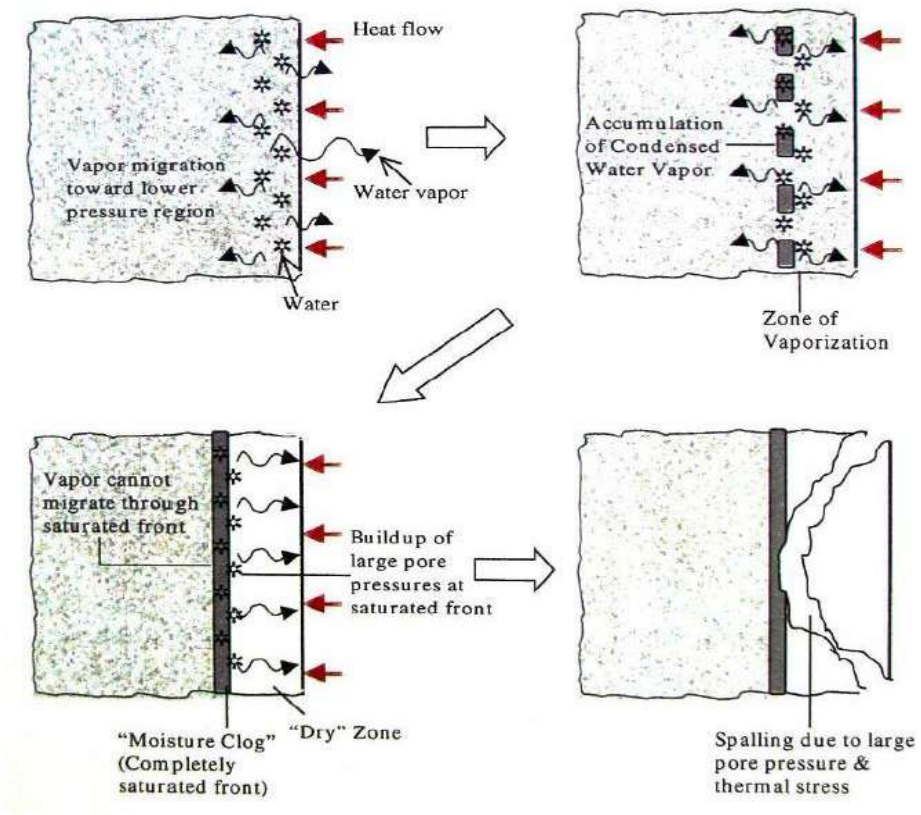


Figure I.42 : Illustration du mécanisme d'éclatement **[Van Thai]**

I.3.7 Perte de masse

Comme nous l'avons vu précédemment, l'évaporation de l'eau, l'hydratation et la déshydratation de la pâte de ciment durant le chauffage de béton, provoquent une variation de sa masse. La Figure I.43, présente une courbe caractéristique de la perte de masse et la courbe de la vitesse de la perte de masse d'un béton chauffé jusqu'à 500°C, selon Khoury, 1985 **[KHO 85].** Sachant que la quantité totale d'eau dans les bétons se situe entre 6 et 9% de la masse de béton, nous pouvons noter que pour un chauffage jusqu'à 500°C, une grande partie de perte de masse se produit entre 150°C et 300°C (jusqu'à 6%). En dehors de cette marge de température (T < 150°C et T > 300°C), la perte de masse n'excède pas 2%.

Une étude récente réalisée par Kanema et al 2007 **[Kan 07a]** montre un résultat identique à celui présenté par **[KHO 85],** pour un béton d'une porosité de 10% et une résistance de 65 MPa. Cette évolution de perte de masse et attribuée :

- Au départ de l'eau interstitielle (libre) existante dans le béton, pour des températures inférieures à 150°C.

- A la décomposition des hydrates de ciment qui représente environ 65% et 80% de la quantité totale d'eau dans le béton, pour des températures comprises entre 150°C et 300°C.

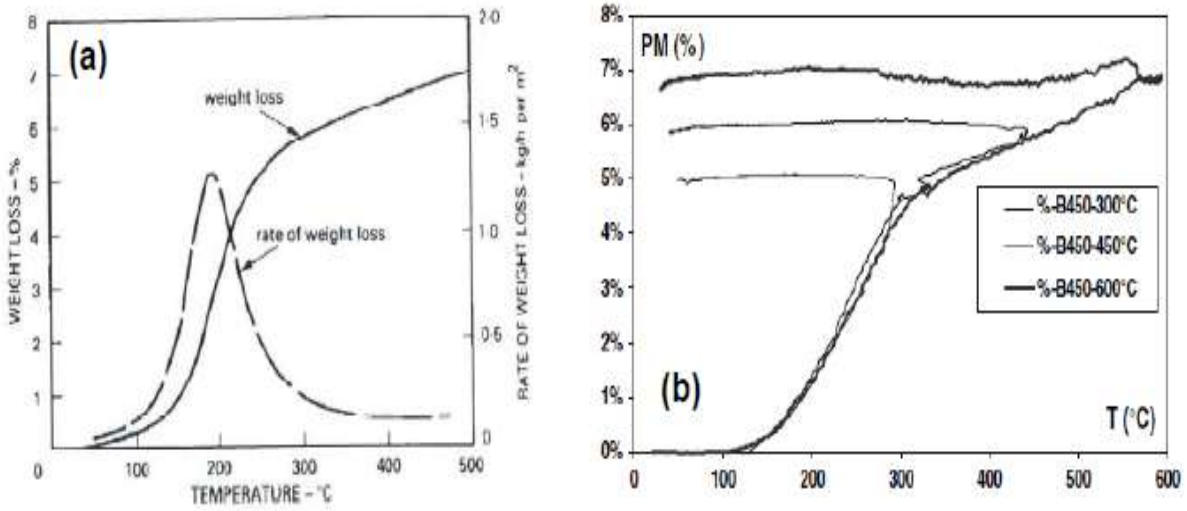


Figure I.43. (a) : perte de masse en fonction de la température selon Khoury 1985 **[KHO 85]. (b)** : la perte de masse en fonction de la température selon Kanema 2007 **[KAN 07].**

Notons qu'un résultat de perte de masse est lié à la méthodologie expérimentale utilisé. Deux paramètres sont importants : la taille des échantillons et la vitesse de chauffage.

Hager **[HAG 04]** a montré que pour un séchage à 105°C jusqu'à poids constant, le temps de séchage est de 15 jours pour un échantillon cylindrique de dimensions, en mm, 104x60, alors qu'il est de 60 jours pour un cylindre de 104x300, donc le temps de séchage et 4 fois plus important pour une hauteur 5 fois plus grande. L'auteur a présenté une perte de masse de trois échantillons avec différent prétraitement (Figure I.44), un pré-séché à 105°C, le deuxième pré-séché à 80°C et le troisième sans pré-séchage préalable, les échantillons ont été chauffés jusqu'à poids constant. Il a constaté que les courbes de perte de masse des bétons pré-séchés sont très proches et qu'aucune perte de masse n'est enregistrée avant 200°C. On constate que la perte de masse n'excède pas 1,2% pour les bétons pré-séchés, alors qu'elle est de l'ordre de 4,21 % pour le béton sans pré-séchage.

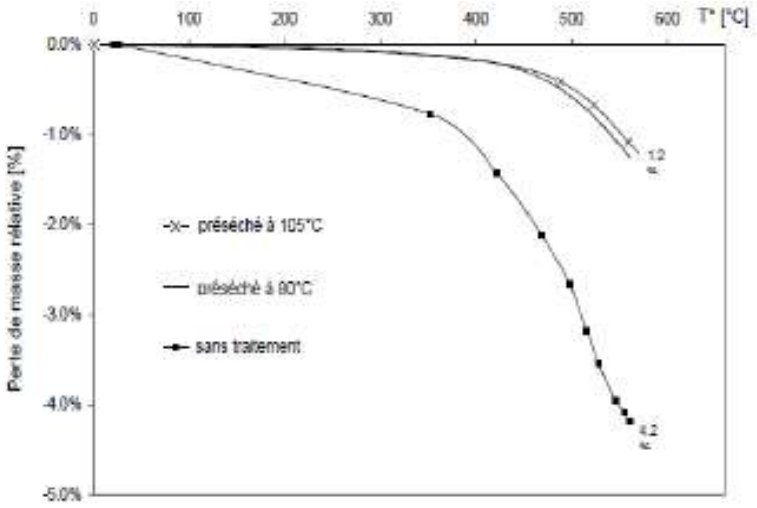


Figure I.44. La perte de masse des BHP (M100C), pré-séchés et sans prétraitement, chauffés à 600°C **[HAG 04].**

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la figure I.45 nous pouvons observe une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

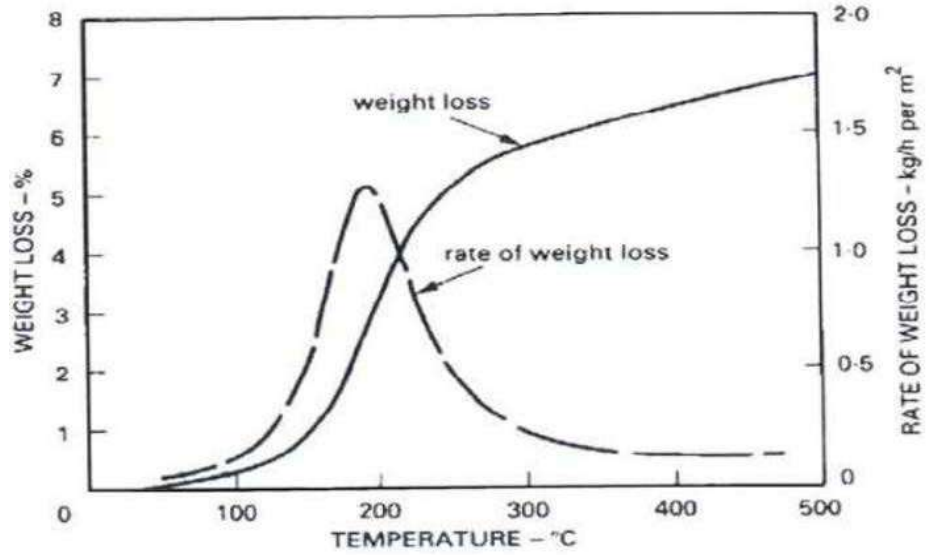


Figure I.45. Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température **[KHOURY.1992].**

Durant l'échaudement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment.

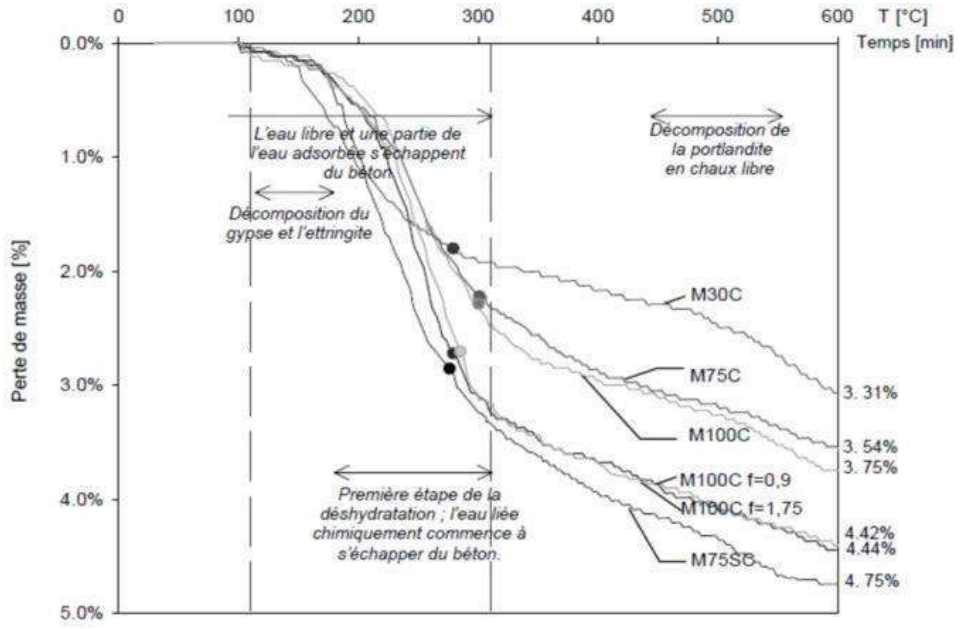


Figure I.46. Perte de masse des bétons chauffés à la vitesse de 1°C/min **[GAWESKA.2004].**

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau. Il est possible d'étudier la cinétique du processus de séchage et de déshydratation. Sur la figure I.46, on observe la perte de masse en phase transitoire, c'est-adire durant le traitement thermique. Dans ce cas, la vitesse de chauffage est de 10C /min jusqu'à 6000C. Mais, la perte de masse ne débute qu'à partir de 1000C. L'auteur **[GAWESKA.2004]** observe que la perte de masse commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Puis progressivement, les gaz et fluides présents dans le matériau sont mis en mouvement.

I.3.8 les propriétés thermiques

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons de polystyrène expansés sont constituent de bons isolations thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour des densités de 400 kg/m3 et 0.30 à pour des densités de 800 kg/m3. [**G. DREUX & J. FESTA , 1998**].

La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs.

Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments

[**K. MILLED, 2005**]. Les recherches réalisées par **A. GUEZOULI** et **A. BENAISSA** ont montées que l'évolution de la conductivité thermique du béton de polystyrène décroit avec l'augmentation des perles de polystyrène dans le béton comme l'indique la figure I.47.

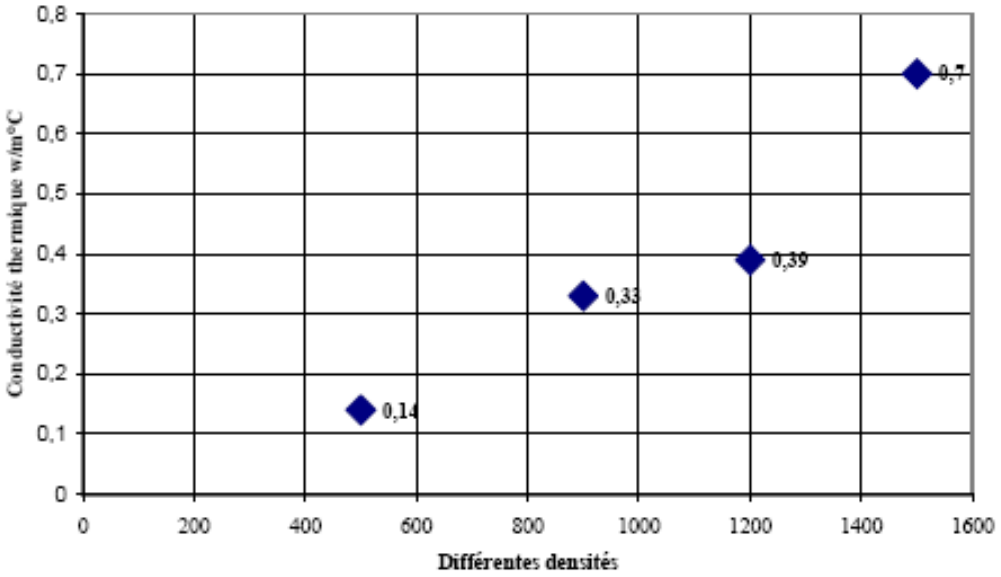


Figure. I.47. conductivité thermique en fonction de différentes masses volumiques [**K.MILLED, 2005].**

On peut remplacer la méthode d'isolation thermique à l'aide de plaque de polystyrène, à celle du béton de polystyrène non seulement isolant thermiquement mais aussi léger et résistant.

I.3.8.1 La conductivité thermique :

La conductivité thermique désigne l'aptitude que possède un matériau à conduire de la chaleur. Ce paramètre est prépondérant pour décrire la distribution de la température au sein du matériau lors du chauffage. La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure, les microfissures limitent les transferts de la chaleur.

Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont : la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton. **[Hachemi Samia]**

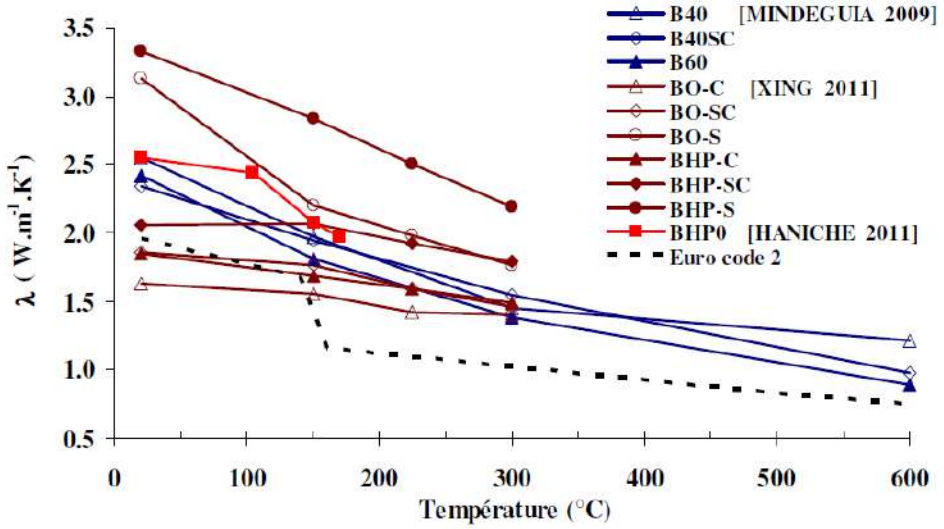


Figure I.48 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température **[Van Thai]**

I.3.8.2 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. Autrement dit, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur.

L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. **[Melle. KAOUANE].** La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la montée de la température. Cette variation est liée aux différentes réactions endothermiques. 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 (figure I-49). L'influence des granulats calcaires sur la chaleur massique du béton est négligeable pour une température inférieure à 600°C - 800°C. 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. **[Van Thai]**

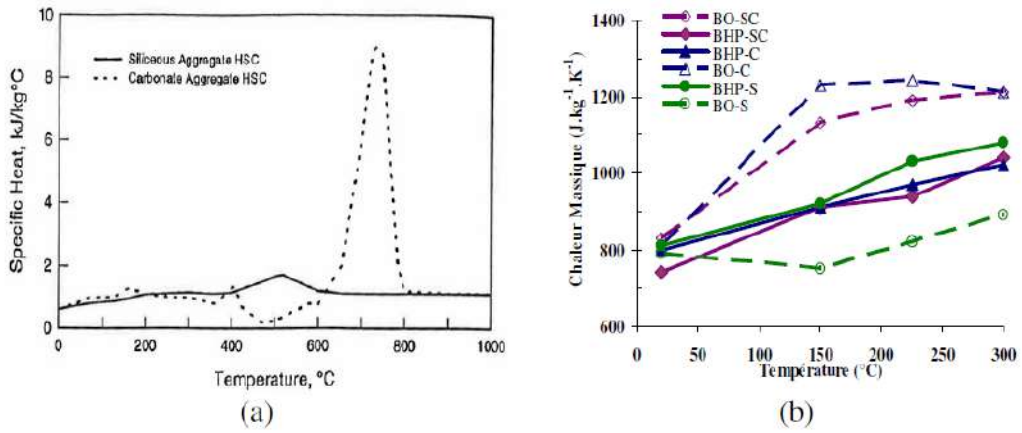


Figure I.49 : Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons **[Van Thai]**

I.4 Conclusion

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons légers, leurs définitions et classement ainsi ses caractéristiques physico-mécaniques d'une part. D'autre part présenter le comportement des bétons légers exposés aux températures élevées.

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Le polystyrène expansé est un agrégat artificiel, il est employé en remplacement total ou partiel des agrégats naturels. Ces agrégats artificiels sont légers et mieux adaptés aux conditions économiques du monde moderne pour alléger et améliorer certaines caractéristiques des bétons.

Peu d'études traitent le comportement des bétons à base de polystyrène expansé exposé aux températures élevées, l'originalité de notre travail consistant à évaluer et caractériser les paramètres physico- -mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites exposé aux températures élevées. A partir de notre étude on essaye d'étudier quelques caractéristiques telles que la résistance – la masse volumique – perte de masse de ces bétons spéciaux.

Chapitre 02 : Matériaux et essais

II.1 INTRODUCTION

Le béton et notamment celui à haute performance, grâce à sa porosité limitée, sa grande durabilité, ses qualités rhéologiques et ses propriétés mécaniques remarquables, a un emploi qui se développe fortement. Dans Cette partie on découvert les caractérisations des matériaux utilisés et les essais faits en laboratoire. Des essais expérimentaux sont effectués afin d'étudier les propriétés physiques, mécaniques.

II.2. Matériaux utilisées

II.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé pour la présente étude est du ciment portland composé CPA-CEM I 42.5 produit par la cimenterie de la société BISKRIA CIMENT situé à Branis wilaya de BISKRA, ALGERIE.

Les principales caractéristiques physiques, la composition chimique et la composition minéralogique de ce ciment sont récapitulés dans les **Tableaux II.4**, **II.5** et **II.6** respectivement.



Figure. II.1. Ciment CPA- CEMI 42.5

Tableau II.1: Caractéristiques physiques du ciment

Ciment	Désignation	Masse volumique absolue (Kg/m^3)	Surface spécifique Blaine (cm^2/g)
CPA-CEM I 42.5	**C**	**3150**	**3020**

Tableau II.2: Composition chimique du ciment

Teneur %									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	P.A.F
21,62	4,49	5,37	63,91	1,66	2.2-2.8	0,25	0,08	0.03 -0.07	2.6 -3.7

Tableau II.3: Composition minéralogique du ciment CPA-CEM I 42.5 selon Bogue

Teneur %			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
56-66	5.0-15	5.1-7.2	10-15

II.2.2 Polystyrène expansé

Les billes de polystyrènes expansés utilisés dans notre étude ont été fournies par la société L'EPE/Spa SOFATPO est une filiale du groupe EAGR (Entreprise Nationale de Génie Rural), son siège social et son unité de production sont situés au niveau de la zone industrielle de Oued Smar, Algérie.

Le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation du produit de base qui est **le STYRENE** (granulé translucide).



Figure. II.2: Les billes de polystyrène PSE

Ces granulats se présente sous forme de billes sphériques de petit diamètre (1 à 2 mm), contenant 98% d'air et peu de consommateur de matière première, le polystyrène ne contient ni gaz CFC, ni HFC, ni HCFC.

- **La densité :** la masse volumique apparente ρ_{app} = 20 Kg/m^3 et la masse volumique absolue ρ_{abs} = 30 Kg/m$^{3.}$
- **Absorption d'eau par immersion :** en raison de sa structure à cellules fermées, le polystyrène est caractérisé par sa faible absorption de l'eau.
- **Tenue à la chaleur :** le polystyrène expansé se ramollit à partir d'une température 90°C.

II.2.3 sable

Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable de rivière de la région d'El-Baaj, est une zone située entre les wilayas d'Oued Souf et de Biskra, Algérie.



Figure. II.3: Sable d'el-baaj

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique du sable sont présentées dans les **Tableaux II.4** et **II.5**.

Tableau II.4: Caractéristiques physiques du sable

Propriétés		**S 0/5**
Masse volumique absolu (kg/m^3)		2540
Masse volumique apparente (kg/ m^3)		1770
Equivalent de sable (%)	Esv	66.330
	Esp	59.300
Module de finesse		2.35

Tableau II.5: Analyse granulométrique du sable

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	**100**
2.5	237,58	528	26.4	**73.6**
1.25	137.1	665.1	33.25	**66.75**
0.63	285.1	950.2	47.51	**5249**
0.315	221.9	1630.8	81.45	**18.46**
0.16	47.9	1906.2	95.31	**4.69**
0.08	12.5	1979.9	98.99	**1.01**
Le fond	**19.4**	**1999.3**	**99.97**	**0.03**

II.2.4 GRAVIER

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à MON GUORNO de la région de Berrouaghia (medea), Algérie.

Classes granulaires

Les fractions du gravier sont :

Fraction **3/8**

Fraction **8/16**



Figure. II.4: Gravier 3/8



Figure. II.5: Gravier 8/15

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique gravier sont présentées dans les **Tableaux II.6** et **II.7**, **II.8.**

Tableau II.6: Propriétés physique des Gravier.

Propriétés	GN 3/8	GN 8/16
Masse volumique absolu (t/m^3)	2.257	2.585
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.380	1.350
Coefficient los Anglos(%)	19.920	26.500

Tableau II.7: Analyse granulométrique du Gravier 3/8

Tamis, (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	(g)	(%)	
8	1.99	0.095	**99.90**
6.3	199.1	9.95	**90.05**
5	689.9	34.49	**65.505**
4	1253.4	62.56	**37.34**
3.15	1641.5	82.07	**17.925**
2.5	1895.5	94.975	**5.025**
1	**1989.3**	**99.465**	**0.535**

Tableau II.8: Analyse granulométrique Gravier 8/16

Tamis, (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	(g)	(%)	
16	5	0.16	**99.83**
12.5	569.6	18.98	**81.01**
10	1989.5	66.31	**33.68**
8	2678.5	89.28	**10.71**
6.3	2954.9	98.496	**1.503**
5	**2991.0**	**99.7**	**0.3**

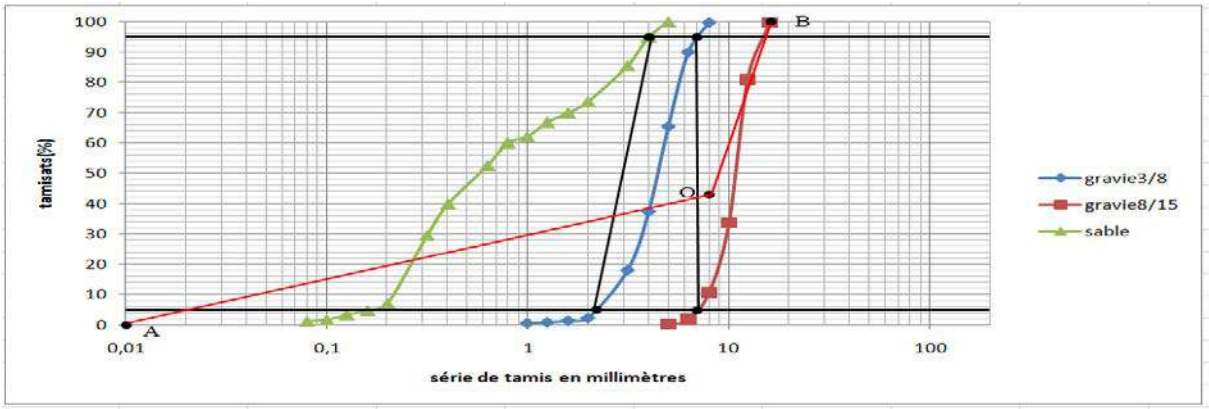


Figure. II.6 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 et sable) – Méthode de Dreux. G

II.3 Formulations

II.3.1. Méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu prés adaptée au béton étudié. Toutefois, seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvette permettront d'ajuster au mieux la composition définitive en fonction des qualités souhaitées et des matériaux utilisés.

II.3.2 Calcul de la composition de 1m^3 du béton

Tableau. II.9: composition de 1m^3 du béton

Granulats		Sable	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Pourcentages des granulats (%)		37	10	53
Volume absolu des granulats (l)		691		
Dosages en matériaux (l)	Sable	255.67		
	Gravier 3/8	69.1		
	Gravier 8/16	366.23		
	Ciment	129.032		
	Eau	208.00		
Densités absolues des granulats	Sable	2.687		
	Gravier 3/8	2.846		
	Gravier 8/16	2.585		
Dosages en matériaux (kg)	Sable	686.985		
	Gravier 3/8	196.658		
	Gravier 8/16	946.705		
	Ciment	400.00		
	Eau	208.00		
Masse volumique théorique du béton (kg/m^3)		2438.35		

II.3.3 Données de base

Tableau. II.10: Données de base

σ'_n (MPa)	σ'_{28} (MPa)	A (cm)	D_{max}	σ'_C (MPa)	G	γ_c
25	28.74	7	16	45	0.45	0.82

II.3.4 Dosages en ciment et en eau

On commence par évaluer le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désirée σ'_{28} qui est donnée par la formule :

$$\sigma'_{28} = G.\sigma'_C(\frac{C}{E} - 0.5)$$

Où : G : coefficient granulaire.
σ'_{28} : résistance moyenne désiré à 28 jours [MPa].
σ'_C : classe de résistance vraie du ciment [MPa].
C : dosage en ciment [Kg/m³].
E : dosage en eau [l/m³].

La valeur définitive du rapport $\frac{C}{E}$ doit respecter les conditions de consistance. Pour cela on se réfère aux conclusions de graphe de : $C = f(\frac{C}{E}, A)$. On obtient ainsi "C". A : Affaissement

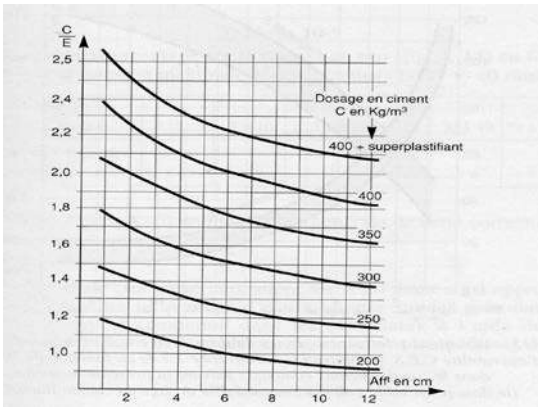


Figure. II.7*:* Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)

Tableau. II.11: compositions des mélanges réalisé (pour 1 m³)

PSE	0	5	15	25	35	45
Sable(Kg)	659,348	626,404	560,444	494,499	428,574	362,640
PSE kg	0	0,368	1,104	1,841	2,580	3,313
Gravier 3/8	196.658					
Gravier 8/16	946.705					
Ciment	400.00					
Eau	208.00					
E/C	0.500	0.463	0.444	0.435	0.428	0.405

II.4 Fabrication

La modalité de fabrication des différents types de bétons que nous avons suivie se déroule comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il à été utilisé auparavant.
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable et puis le ciment.
- De (T_0) à (T_0+1') : malaxage à sec des constituants solides.
- De (T_0+1') à (T_0+1' 30") : ajout de l'eau. - De (T_0+1' 30") à (T_0+3' 30") : malaxage.
- De (T_0+3' 30") à (T_0+3' 45") : ajout du Polystyrène (le malaxeur continue à tourner).
- De (T_0+1' 45") à (T_0+5') : fin du malaxage.

Le béton a été coulé dans les moules cubiques en deux couches. Chaque couche a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes par couche



Figure. II.8 : Malaxeur

II.4.1 Les corps d'épreuve

Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions 10x10x10 cm. Ces moules sont en métal (acier), cette matière est imperméable, non absorbante et non réactive au liant. Les éprouvettes cubiques sont destinées aux essais de perte de masse et aux essais de compression avant et après exposition aux cycles thermiques.

II.5 La masse volumique

La masse volumique du béton léger a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[53],** à l'aide d'une balance à 0.01 g près, et mesure des dimensions des échantillons, à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. Pour chaque composition, la masse volumique sèche apparente représente la moyenne de trois mesures.



Figure. II.9 : Photo La balance

II.6 Cure Appliquée

Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Au bout de 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans les mêmes conditions de conservation que les bétons des ordinaires

II.7 Essai De Chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. La Norme RILEM [Rilem, 2004], recommande pour un diamètre des cylindres compris entre 6 et 10 cm une montée en température comprise entre 1°C/min et 4°C/min avec un palier de 60 ± 5 min. Nous avons choisi, pour la sollicitation thermique des éprouvettes, d'appliquer une vitesse de chauffage moyenne de 3°C/min pour tous les bétons. L'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes provoque des contraintes thermiques dues aux gradients thermiques. Les vitesses de chauffage comprises entre 1 et 5°C/min n'ont pas d'influence sur le caractère explosif du béton [Haniche, 2011].

II.7.1 Dispositif de chauffage

Afin de réaliser les cycles de chauffage, nous utilisons un four électrique programmable dont les dimensions utiles sont de 25x28x18 cm. Ce four permet le chauffage de deux éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm en même temps.



Figure. II.10 : Dispositifs de chauffage.

II.7.2 La méthodologie

Toutes les éprouvettes retenues pour cette étude sont testées après leur refroidissement. Nous appliquons trois cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 200°C, 400°C et 600°C. Chaque cycle de chauffage-refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante.

La rampe de montée en température est constante et la vitesse égale à 3°C/min. Ces rampes de montée en température sont suivies d'un palier de stabilisation en température d'une durée d'une heure. La dernière phase est une rampe de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

La durée du palier d'1 heure a été choisie pour permettre une confrontation de nos résultats à ceux de la littérature. Le tableau II.9 dresse un récapitulatif des différents cycles thermiques appliqués aux matériaux.

Tableau. II.12: Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de matériaux.

Températures du palier (°C)	Vitesse de montée en température (°C/min)	Duré de palier de stabilisation (min)	Refroidissement (°C/min)
200	**3**	**60**	*Libre*
400	**3**	**60**	*Libre*
600	**3**	**60**	*Libre*

La figure II.9 présente les évolutions de la température en fonction du temps au cours des cinq cycles de chauffages étudiés appliqués

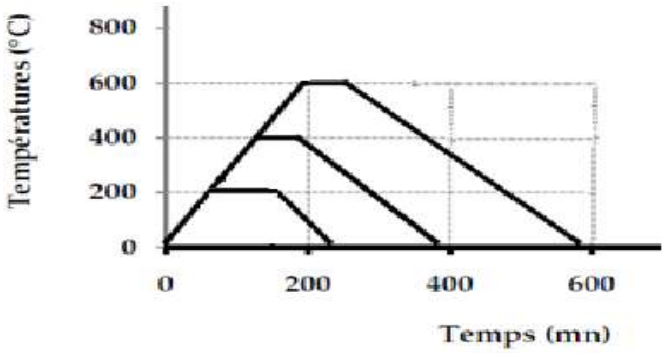


Figure II.11 : Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min).

II.8 Perte de masse

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. Elle permet, en complément des essais mécaniques réalisés après application des cycles thermiques, de suivre l'évolution du poids des matériaux ayant subi un cycle de chauffage. Pour la quantification de l'eau perdue, la masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement.

La perte de masse à été calculée selon la formule ci- après :

$$dm = \left[(mi - mt) / mi\right] x100$$

dm : Perte de masse (%);

m_i: masse initiale (g) ;

m_t : masse après chauffage (g).

II.9 Essai la vitesse des ondes soniques

Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton ; cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton a un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante.

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores **t**.

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

Ou :

V : est la vitesse de propagation du son, en km/s ;

L : est la longueur de parcours, en mm ;

T : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en μs.



Figure. II.12 : Photo présenté appareil les ondes sonique

II.10 Essai de compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f c28. La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cubique de dimensions 10x10x10 cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{Fc=F/Ac}$$

Où :

- fc: résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés).
- F : charge maximale, exprimée en Newtons.
- Ac : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.



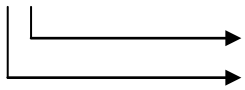
Figure .II.13 : la presse hydraulique

II.11 Désignation des bétons

Les différents composites de béton avec ou sans polystyrène et ajouts minéraux sont désignés de la façon suivante :

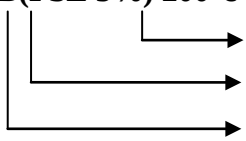
a) Bétons sans polystyrène, ni ajouts

BT



b) Bétons avec de polystyrène expansé (5%, 15%, 25%, 35% et 45%)
Traitement thermique à (20°c, 200°c, 400°c et 600°c)

B(PSE 5%) 200°c



II.11. Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumées dans la figure suivant :

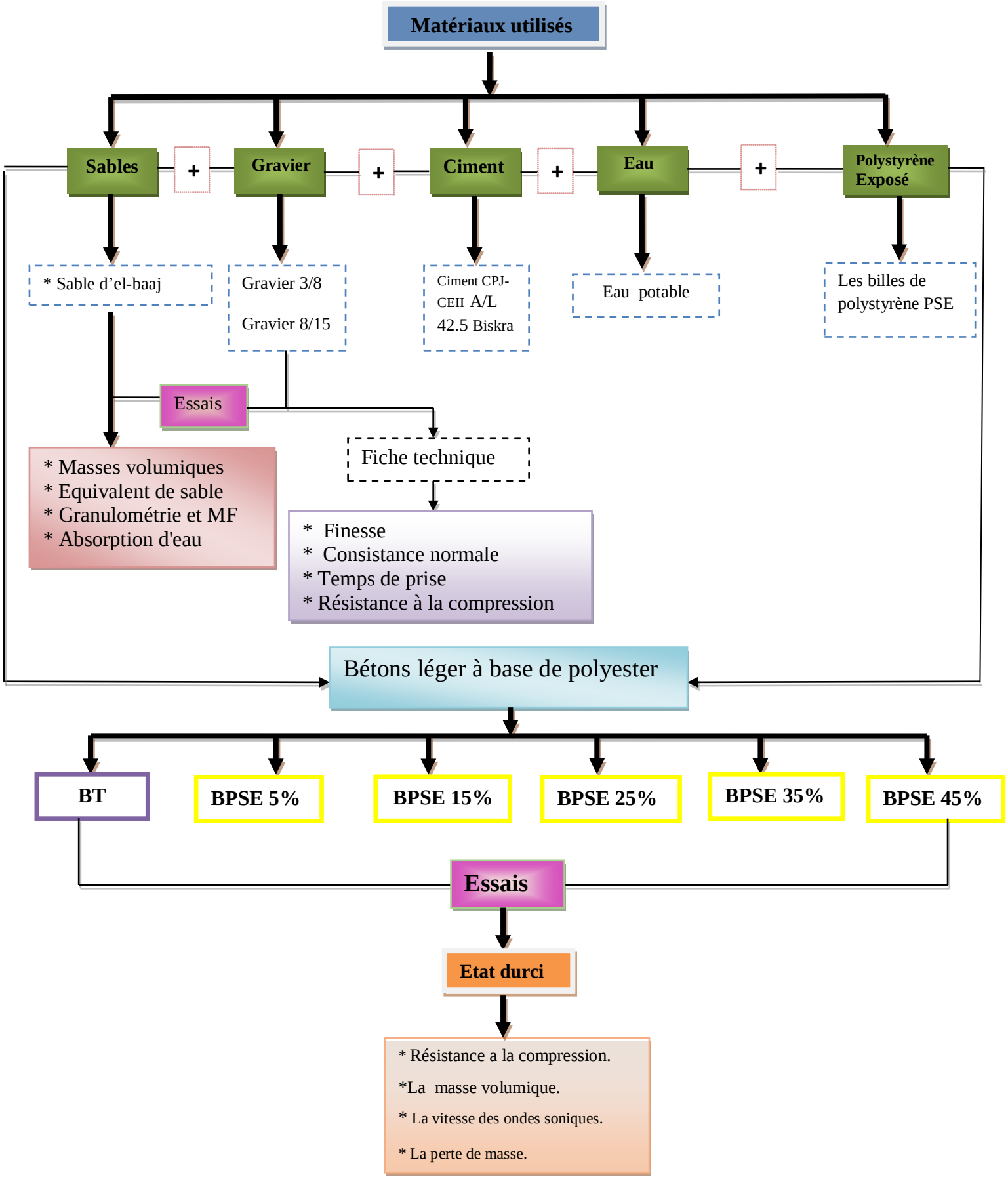


Figure II.14. Variables étudiées.

Chapitre 03:

Résultats et interprétations

III.1.Introduction

Les matériaux composites à base de polymère sont de plus en plus couramment utilisés comme alternative aux matériaux conventionnels, principalement en raison de leurs hautes caractéristiques d'isolation.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les bétons allégés par les billes de polystyrène expansé en teneurs volumique de 5% , 15%, 25%, 35%, et 45% exposés aux températures élevées allant de 200 puis 400 en fin 600°C, afin d'étudier et analyser l'endommagement thermique du béton. Dans ce chapitre sont présentés les résultats des essais conduits sur les composites élaborés à l'état durci, énoncés dans le chapitre précédent, en suivant le programme des essais.

III.2.Résultats et interprétations

III.2.1. L'effet de l'élévation de température sur la perte de masse

L'évolution de la perte de masse des différents composites élaborés en fonction de l'élévation de la température est donnée dans le tableau III.1 et la figure III.1.

Tableau III.1 La perte de masse des différents composites

	BT	BPSE 5%	BPSE 15%	BPSE 25%	BPSE 35%	BPSE 45%
20°C	0	0	0	0	0	0
200°C	0,98	1,14	1,27	1,35	1,47	1,64
400°C	1,23	1,54	1,65	1,82	1,96	3,23
600°C	1,78	2,10	2,81	3,20	3,82	4,25

Le tableau III.1 montre l'effet du pourcentage des perles de polystyrène expansé sur la perte de masse pour les mélanges des bétons de polystyrène exposés aux températures élevées, elle a évoluée en fonction de l'augmentation du pourcentage PSE% et avec l'augmentation de la température de chauffe.

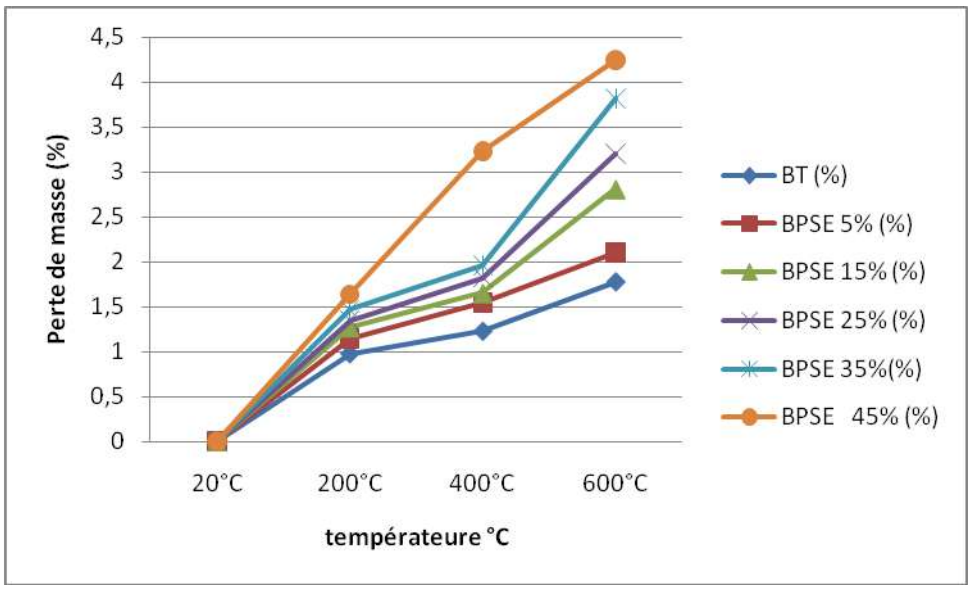


Figure III.1 La perte de masse en fonction de la température de tous mélanges.

La figure III.1 présente l'évolution de la perte de masse des bétons légers à base de polyester en fonction de l'élévation de la température. On constate que quel que soit les types de bétons léger formulés (BPSE 5% ; BPSE 15% ; BPSE 25% ; BPSE35% ; BPSE45%) la perte de masse est toujours permanente durant l'échauffement de tous les types des bétons légers, la perte de masse est commencée à 20° température de référence. Elle a varie entre 1% et 4,25% pour tous les types de BL.

A 200°C, l'évolution de la perte de masse pour toutes les composites proportionnelles avec l'augmentation du pourcentage de ***PSE,*** elle a varié de 0,98% à 1,64%, pour une teneur de 0%, à 45% de ***PSE.*** Cette perte correspond à l'évaporation de libre et l'eau capillaire présente entre les particules. Cette constatation a été mentionnée par ***Hachemi*** et al.

A 400°C, l'augmentation de la perte de masse continue d'évolue en fonction de l'augmentation de pourcentage de PSE. Elle varié de 1,23% à 1,96% pour une teneur de 0% à 35%. Cette perte est causée par l'évaporation de l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite d'une part, d'autre part le polystyrène expansé se dégrade à partir de 244 °C selon la fiche technique du PSE utilisé, à 450 °C, il est dégradé à 95 %.

Pour le pourcentage de PSE 45%, on constate un changement de l'allure d'augmentation de la perte de masse, ici la perte de masse développe de 64,79% en comparant

l'augmentation pour le pourcentage 35% de PSE. C'est évident, car la quantité importante de PSE fondu.

A 600°C, la perte de masse devient très importante à cause de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui engendre lui-même l'évaporation d'une nouvelle quantité de l'eau liée chimiquement, et la décomposition du carbonate de calcium.

KHOURY et al [KHOURY.1992], ont confirmé nos résultats. Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH.

III.2.2. L'effet de l'élévation de température sur la masse volumique

Comme on le voit sur le tableau III.2 et la figure III.2 les masse volumique des bétons témoins et béton allégé formulés avec la méthode de Dreux-G, ont cette allure.

Tableau III.2 La masse volumique des différents composites

	0% (Kg/m^3)	5% (Kg/m^3)	15% (Kg/m^3)	25% (Kg/m^3)	35% (Kg/m^3)	45% (Kg/m^3)
20°C	2412	2341,666	2297	2186,666	2150	2114,666
200°C	2250	2204	2145	2060	2020	2000
400°C	2229	2180	2095	2040	2005	1985
600°C	2202	2135	2063	2025	1990	1974

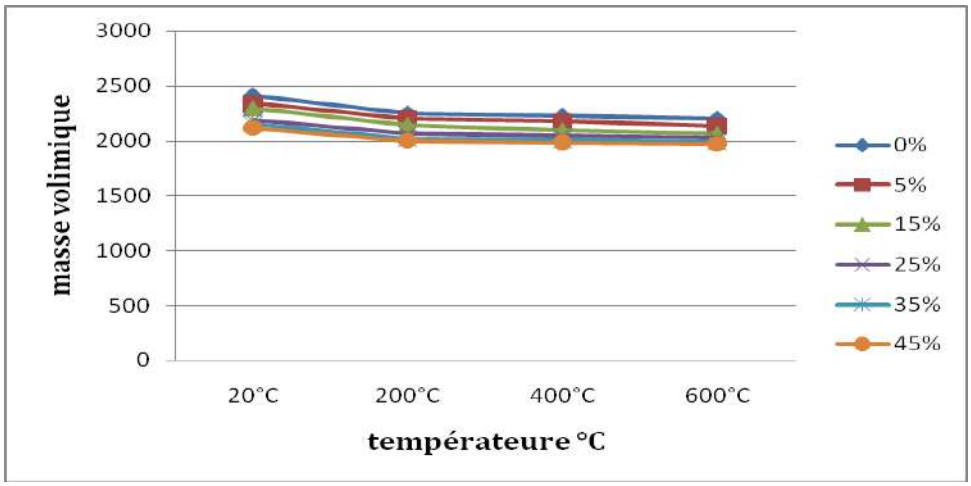


Figure III.2 La variation de la masse volumique avec l'élévation de la température de tous mélanges.

La masse volumique des différents composites diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de PSE et l'élévation de la température de chauffe.

La décroissance est due à la substitution d'une partie des granulats naturels par son équivalent en matériaux moins dense d'une part, d'autre part l'élévation de la température influe sur les granulats de PSE qui caractérisé par le point de fusion = 270°C selon le fabricant.

Elle varie de 2412 kg/m3 à 1974 kg/m3, pour une teneur en PSE allant de 0% à 45% correspond aux températures 20°C à 600°C. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 18,16%, particulièrement utile pour la préfabrication des pièces exploités dans les travaux de réhabilitation et l'allégement des structures.

La baisse de la masse volumique du composite, est liée à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice, qui augmente avec la teneur en PSE.

III.2.3. L'effet de l'élévation de température sur la vitesse de propagation du son

Le tableau III.3 regroupe les valeurs de la vitesse du son propagé dans les éprouvettes de différents mélanges et différents traitement thermique.

Tableau III.3 Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques

Température d'essai	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C
Béton témoin (m/s)	4048,58	3773,59	3246,75	2123,25
Béton PSE 5% (m/s)	3821,12	3236,24	2481,38	1840,56
Béton PSE 15 % (m/s)	3755,70	3164,50	1992,50	1755,65
Béton PSE 25 % (m/s)	3736,24	3112,04	1818,04	1694,46
Béton PSE 35% (m/s)	3705,12	3008,65	1713,58	1666,60
Béton PSE 45 % (m/s)	3608,52	2941,11	1655,22	1566,6

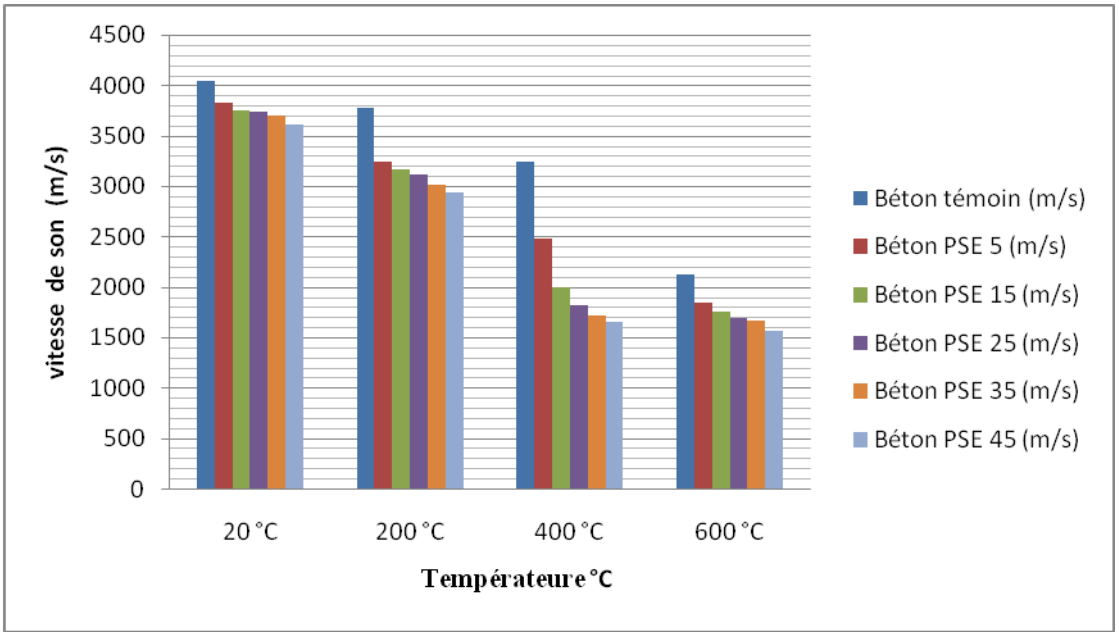


Figure III.3 La vitesse du son en fonction de la température de tous mélanges.

Les figures III.4 présente les valeurs des vitesses des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures.

La vitesse du son varie de 4048,58 à 1566,6 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45% et de température de 20°C à 600°C respectivement. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores d'un coté, d'autre coté l'effet de la température de chauffe qui engendre des pores dans les éprouvettes chauffés.

Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans les composites. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la matrice. Ceci met ainsi en évidence la capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations, caractéristique d'une bonne isolation phonique.

Hachemi **[HACHEMI.S, 2015]** confirme que la vitesse des ondes décroit d'une manière quasi linéaire en fonction de l'élévation de la température. Elle explique la baisse des valeurs de la vitesse des ondes par l'augmentation des volumes pores et l'endommagement de la microstructure par propagation des fissures.

III.2.4. L'effet de l'élévation de température sur la résistance à la compression

Les résultats obtenus sur la résistance à la compression après le chauffage des éprouvettes à 200 °C, 400°C et 600 °C sont représenté sur le tableau III.4.

Tableau III.4 Résistance à la compression (Mpa)

	BT	BPSE 5%	BPSE15 15%	BPSE 25%	BPSE 35%	BPSE 45%
20°C	52,4	22	25	20	22,5	17
200°C	43,0	19	21	16	18	13,5
400°C	35,0	15,5	14	11,5	14,5	9,5
600°C	22,5	12	10	9,5	10,5	6,5

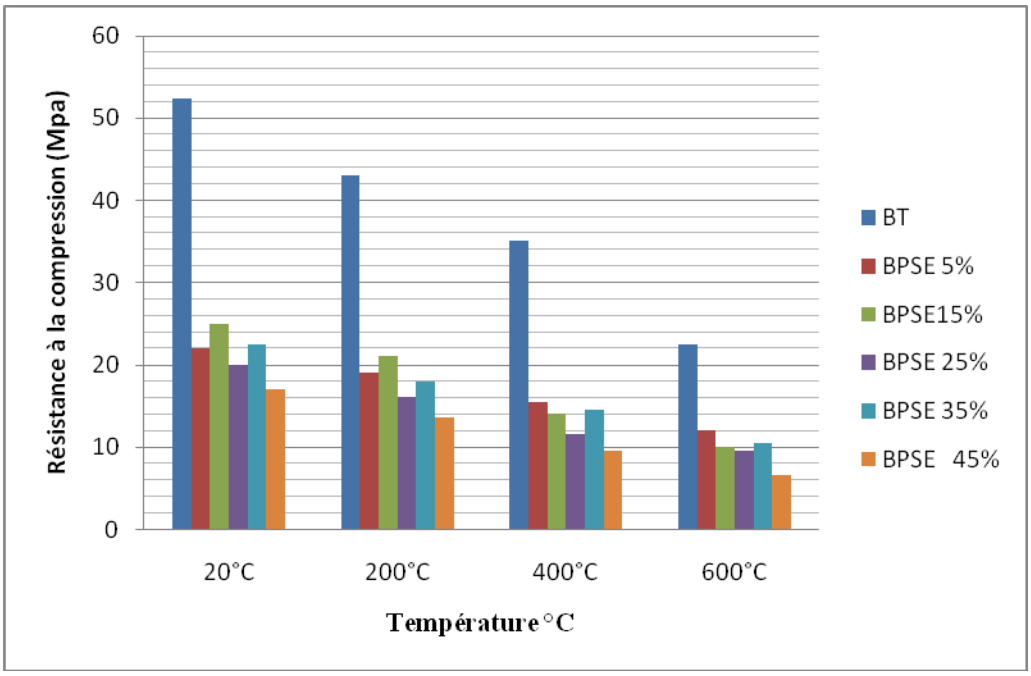


Figure III.4 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température.

L'évolution de la résistance à la compression des différents bétons légers à base de polyester expansé en fonction de la température de chauffe est représentée en figure III.4 ci-dessus.

L'augmentation de la température affecte la résistance en compression des bétons soit ordinaire ou allégé par les billes de PSE. La résistance du béton à base de polystyrène est inférieure à celle du béton témoin pour tous les pourcentages de substitution, cette diminution de résistance est liée à l'augmentation de la proportion de polystyrène expansé.

Pour une teneur en PSE de 45%, la résistance à la compression décroît de 22,5 MPa à 6,5 MPa. Soit une réduction de l'ordre de 71,11% pour les températures allant de 20°C à 600°C respectivement. La diminue est considérable avec l'augmentation de la température de traitement, mais reste dans les valeurs compatibles avec l'utilisation en isolations. Ce qui confirme les résultats trouvé par Sayadi et al.

III.3. Observations visuels des dégradations des différents composites après le refroidissement

Sous l'effet d'un traitement thermique, l'endommagement apparait dans le béton élaboré sous différentes formes. L'une des conséquences de l'endommagement thermique du béton est l'apparition des fissures dans la matrice comme nous pouvons le voir sur les photos.

A 20°C, les observations ont montré une répartition homogène des granulats de PSE, donc ne présentent pas le phénomène de remonter des billes de PES à la surface des composites, qui était constaté dans les mortiers à base de polystyrène expansé, selon les chercheurs Milled et al.

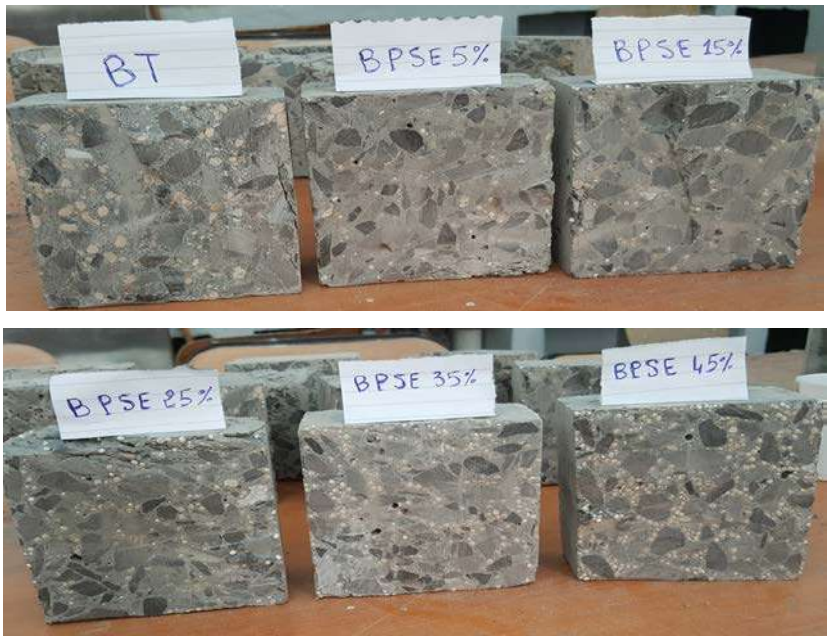


Figure III.5 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE à 20°C, après l'écrasement

- A 200°C, les observations dans cette température, ont montré que les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible à l'œil à la surface des éprouvettes. Ainsi la totalité des billes de PSE qui se trouve à la surface des éprouvettes sont fondues, mais à l'intérieure des éprouvettes une partie des billes de PSE restent sains, par contre les granulats naturelles restent intacts.



Figure III.6 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE chauffés à 200°C , après l'écrasement

- A 400°C, selon la photo III.2 la totalité des billes de PSE qui se trouve à la surface des éprouvettes sont fondues. Les premières fissurations ont été observées à la surface des éprouvettes après le cycle de chauffage-refroidissement sans présence d'éclatement des éprouvettes de béton témoin. La totalité des billes de PSE sont fondue se qui provoque des pores non connectés.

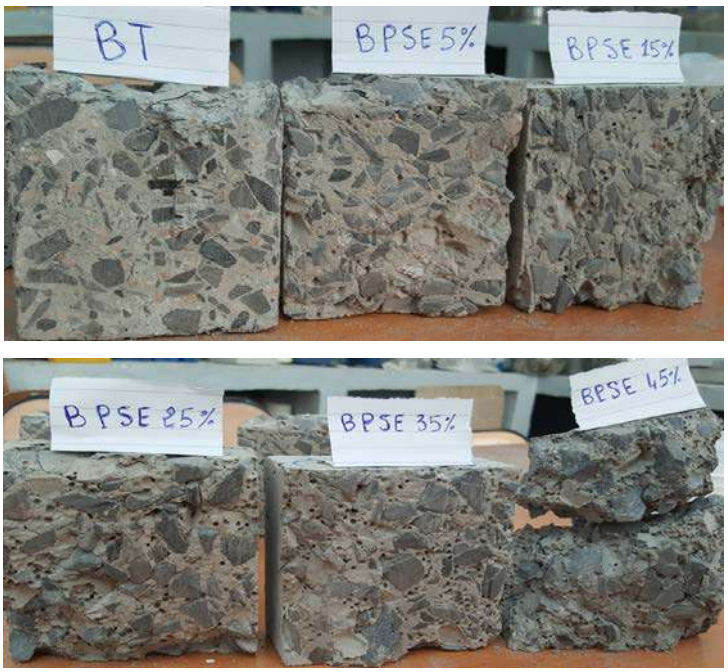


Figure III.7 Photo L'état des éprouvettes BT et BPSE chauffés à 400°C, après l'écrasement.

- A T = 600°C, après le refroidissement des éprouvettes qui ont subi l'échauffement, nous avons constaté un endommagement très important des éprouvettes pour les pourcentages de PSE 45%, ce qui explique les valeurs de perte de masse des bétons déterminée à cette température et la diminution importante de la résistance en compression. Les microfissures deviennent des macro-fissures et conduisant à la rupture du matériau. Les granulats naturels commencent à cette degré à présenté des désordres.

.

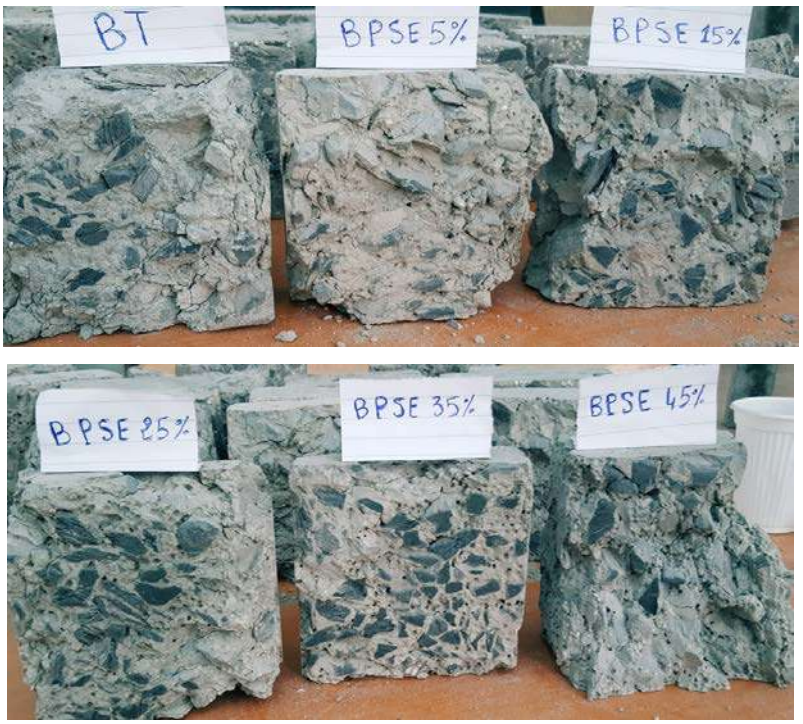


Figure III.8 Photo L'état des éprouvettes BT et chauffés à 600°C après l'écrasement

III.4. Billant

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux conclusions suivantes:

- Les performances mécaniques des bétons allégés (résistance à la compression) sont diminuées en fonction d'augmentation des pourcentages d'ajouts des polystyrènes.
- Les résultats de pesée des éprouvettes avant et après le chauffage à différents température montrent une diminution de la masse des différents bétons légers avec l'augmentation de la température.
- La poursuite des changements de la résistance en compression montre une perte progressive en fonction de l'augmentation de la température.
- La résistance à la compression diminuée en fonction de l'augmentation de la perte de masse et par la diminution de la vitesse des ondes soniques.
- La vitesse des ondes soniques diminue significativement avec l'augmentation de la porosité provoquée par la fonte des billes de polystyrène à cause de la température élevée jusqu'à 600°C cela augmente la quantité de porosité.

- La masse volumique du béton à base de polystyrène est diminué avec l'augmentation de la température et avec l'augmentation du pourcentage de PSE. Cette diminution revient d'une coté à la fonte des billes de PSE et d'autre coté la déshydratation complète de la pâte.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

L'objectif de ce travail était d'évaluer expérimentalement l'effet de température élevée sur les propriétés du béton allégé par les perles de PSE en teneurs volumiques allant de 5, 15, 25, 35 et 45% (physique et mécaniques). Dans ce contexte, les caractéristiques de ces composites ont été établies à l'état de référence à 20°C et comparer avec celles déterminées aux températures de 200, 400 et 600°C après le refroidissement.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure que :

- **Pour les Bétons légers avant l'exposition aux températures élevés**

  - De façon générale la substitution des granulats usuels par les billes de polystyrène expansé influe négativement sur les propriétés physiques (γ) et la vitesse du son, ainsi mécaniques (Rc) ;
  - La masse volumique varie de 2412 kg/m^3 kg/m3 à 2114,666 kg/m3, pour une teneur en PSE allant de 0% à 45% respectivement. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 12,327% ;
  - La résistance à la compression des bétons allégés est diminuée en fonction d'augmentation des pourcentages de la substitution de PSE, la réduction est de l'ordre de 67,557% ;
  - La vitesse de propagation du son dans les composites élaborées varie de 4048,58 m/s à 2123,25 m/s pour une teneur en PSE allant de 0% à 45%. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores.

- **Pour les Bétons légers après l'exposition aux températures élevés**

  - L'élévation de la température de chauffe influe sur toutes les caractéristiques des bétons témoins et les bétons de PSE ;

- L’élévation de la température et l’augmentation du pourcentage du PSE induit une augmentation du taux de la porosité ;
- L’augmentation de la température affecte négativement la résistance en compression des bétons soit ordinaire ou allégé par les billes de PSE.
- La vitesse du son diminue en fonction de l’augmentation du pourcentage de PSE et l’élévation de température cette diminution est d’ordre de 61,30. L’écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l’absorption des ondes ultrasonores d’un coté, d’autre coté l’effet de la température de chauffe qui engendre des pores dans les éprouvettes chauffées.

Références Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[ABRAMS. M]. Compressive strength of concrete at temperature to 1600 F°. ACI Special Publication, SP 25, Détroit, 1971.

[A. NEVILLE] : «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000.

[AL98] AL-KHAIAT H., HAQUE M. N., Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete, Cement and Concrete Research, **28**, P859-866, 1998.

[Ali A .SAYADI], Juan V. Tapia, Thomas R. Neutzert, G. Charles Clifton, 2016 "effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete". Construction and building materials. 112 (2016) 716 – 724.

[ARN86] ARNOULD M., VIRLOGEUX M., Granulats et bétons légers, Presses de ENPC, 1986.

[ACI03] ACI 213R-03, Guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2003.

[Andrade et al., 2003] Andrade C., Alonso C., Khoury G.A., Microstructure & Moisture, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.

[A.GUEZOULI &A. BENAISSA] «le polys beto un nouveau matériau de construction».Décembre 2005.

[BAR82] BARON J., SAUTEREY R., Le Béton Hydraulique : connaissance et pratique, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussés, 1982.

[BEN99] BENTZ D. P., SNYDER K. A., Protected paste volume in concrete. Extension

to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, **29**, P1863-1867,1999.

[BEN01] BENTUR A., IGARASHI S., KOVLER K., Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, **31**, P1587-1591,2001.

[B. BENKHALFA]: «contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués».Thèse de magistère. Université d'Annaba. 1988.

[BOUROUIS MOHAMED], Etude de l'effet des hautes températures sur l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recycles (brique concasse) Université Mohamed khider-Biskra 2013.

[BILLARD]. Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein dune paroi en Béton : application au cas des enceintes de confinement en conditions d'épreuve et Accidentel, thèse de doctorat, instuit national des sciences appliquées de LYAN ,2003.

[BAMONTE et R. FELICETTI]. On the tensile behavior of thermally-damaged concrete. Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure - FraMCoS6, Vol. 3:8 pages, 2007.

[Choinska, 2006] Choinska M., Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure, Thèse de DOCTORAT, L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2006.

[CHI03] CHI J. M., HUANG R., YANG C. C., CHANG J. J., Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, **25**, P4197-205, 2003.

[DIAMOND.S]. „The microstructure of Cement Paste in Concrete_. VIII International Cong. Chem.Cem., vol I, Rio de Janeiro 1986, pp 113-121.

[DEM06] DEMIRDAG S., GUNDUZ L., Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units, Construction and Building Materials, 2006.

[DEJONG MJ. Et FJ. ULM]. The nanogranular behavior of c-s-h at elevated temperatures (up to 700°C). Cement and Concrete Research, Vol. 37, N°1 :1{12,2007}.

[EUR00] EuroLightCon, Mechanical properties of lightweight aggregate concrete, Document BE96-3942/R23, European Union – Brite EuRam III, June 2000.

[ELS05] ELSHARIEF A., COHEN M. D., OLEK J., Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar, Cement and Concrete Research, **35**, P1368-1376, 2005.

[Eurocode2.] Calcul des structures en béton-partie1-2 : Règles générales, calcul du comportement au feu. AFNOR, NF EN 1992-1-2, Octobre 2005.

[Fares et al., 2009] Fares H., Noumowe A., Remond S., Self-consolidating concrete subjected to high temperature – Mechanical and physicochemical properties, Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 1230–1238, 2009.

[FARES. H.] Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés a une température élevée. THESE DOCTEUR. Université de Cergy-Pontoise.2009.

[FELICETTI, PG]. GAMBAROVA, MN. SORA, and GA. KHOURY. Mechanical behavior of hpc and uhpc in direct tension at high temperature and after cooling. Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes, N°5 - France, Lyon: 749-758, 2000.

[G. DREUX & J. FESTA] : «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998.

[GEN05] DE GENNARO R., CAPPELLETTI P., CERRI G., DE'GENNARO M., DONDI M., LANGELLA A., Neapolitan Yellow Tuff as raw material for lightweight

aggregates in lightweight structural concrete production, Applied Clay Science, **28**, P309-319, 2005.

[GAN03] GANESH BABU K, SARADHI BABU D., Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume**,** Cement and Concrete Research, **33**, P755-762, 2003.

[GES06-1] GESOGLU M., OZTURAN T., GUNEYISI E., Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates, Construction and Building Materials, 2006.

[GES06-2] GESOGLU M., OZTURAN T., GUNEYISI E., Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes, Cement and Concrete Composites, **28**, P598-605, 2006.

[GAWESKA. H]. Comportement à haute température des bétons à haute performance. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, école Polytechnique de Cracovie. gradients et des incompatibilités de déformation. 2004.

[GROSS .H]. On high temperature creep of concrete. International Conference on Structural Mechanics in reactor Technology - 2nd SMIRT, Vol. 3, 1973.

[HUS03] HUSEM M., The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete**,** Materials Science and Engineering A363, P152-158, 2003.

[HOL00] HOLM T.A., RIES J. P., Specified density concrete -- a transition, Proceeding of 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, NORWAY, P18-22 June, 2000.

[HAQ04] HAQUE M. N., AL-KHAIAT H., KAYALI O., Strength and durability of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, **26**, P307-314, 2004.

[HACHEMI Samya] Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants) Université Mohamed khider-Biskra 2015

[HAN 10] Hanna F., Remond S., Noumowe A. and Cousture A. High temperature behaviour of self-consolidating concrete : Microstructure and physicochemical properties. Cement and Concrete Research, vol. 40 (3), pp. 488-496, 2010.

[Hager, 2004] Hager G. I., Comportement à haute température des bétons à haute performance – Evolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.

[HAG 04] Hager I. G. Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et des chaussés, 183 p., 2004.

[HAG 04] Hager I. et Pimienta P. Mechnical properties of HPC at high temperature. Fib task group 4.3, fire design of concrete structures. Milan, Italy, 2-4 December, 2004.

[JO06] JO B. W., PARK S. K., PARK J. B., Properties of concrete made with alkaliactivated fly ash lightweight aggregate (AFLA), Cement and Concrete Composites, 2006.

[JOZ05] JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA D., Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Composites, **27**, P709-715, 2005

[JOHN L, CLARKE] «Structural lightweight Aggregate Concrete» Edited by Chief Structural Engineer British Cement Association Crowthorne First Edition 1993

[KOH99] KOHNO K., OKAMOTO T., ISIKAWA Y., SIBATA T., MORI H., Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, **29**, P611-6184, 1999.

[Kanema et al., 2005] Kanema M., Noumowe A., Gallias J.-L., Cabrillac R., Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons, XXIIIièmes Rencontres Universitaires de Génie Civil – Risque & Environnement, 2005.

[KHOURY. **GA].** Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Magazine of concrete Research, no 161:291{309, 1992.

[Kanema, 2007 Kanema T. M., Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de Doctorat, Université de Cersy-Pontoise, 2007.

[KHO 85] Khoury G. A., Grainger B. N., and Sullivan G. P. E. Strain of concrete during first heating to 600°C under load. Magazine of concrete research, vol. 37, pp 195-215, 1985.

[KAN 07a] Kanema M., M.V.G. de Morais, A. Noumowe, J.L. Gallias, R. Cabrillac. experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers in a concrete exposed to high temperature, Heat and mass transfers. Vol. 44, pp.149–164, 2007.

[K. MILLED]: «Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé». Thèse de Doctorat. L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées. 21 Novembre 2005.

[KHOURY. **GA].** Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Magazine of concrete Research, no 161:291{309, 1992.

[LO04-1] LO T. Y., CUI H. Z., Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrète, Materials Letters, **58**, P916-919, 2004.

[LO04-2] LO T. Y., CUI H. Z., Spectrum analysis of the interfacial zone of lightweight aggregate concrete, Materials Letters, **58**, P3089-3095, 2004.

[LO04-3] LO T. Y., CUI H. Z., LI Z. G., Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete, Waste management, **24**, P333-338, 2004.

[LO07] LO T. Y., TANG W. C., CUI H. Z., The effects of aggregate properties on lightweight concrete, Building and Environment, **42**, P3025-3029, 2007.

[LAR95] De LARRARD F., Une approche de la formulation des bétons légers de structure, bulletin de liaison LCPC, **195**, janv. – fév., P39 -47, 1995.

[LAU05] LAUKAITIS A., ZURAUSKAS R., KERIENE J., The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, Cement and Concrete Composites, **27**, P41-47, 2005.

[LO08] LO T. Y., CUI H. Z., TANG W. C., LEUNG W. M., The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, Construction and Building Materials, **22**, P623-628, 2006.

[Malier Y], Les Bétons à hautes performances: caractérisation, durabilité, applications : compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1992.

[M. CONTANT]: «Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000.

[M.SHINK] «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Université Laval Québec Avril 2003.

[MONTEIRO] P.J.M., 8th ICCC Rio de Janeiro 1986, 3, s.433.

[MALIER, Y]. Sous la direction d_ Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications. Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, 1992. p.674.

[MIL04] MILED K., LE ROY R., SAB K., BOULAY C., Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode, Mechanics of Materials, **36**, P1031-1046, 2004.

[MIL07] MILED K., SAB K., LE ROY R., Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modeling, Mechanics of Materials, **39**, P222-240, 2007.

[MOR76] MORIN D., Sur les bétons légers et leur comportement mécanique sous des sollicitations biaxiales, Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.

[Melle. KAOUANE] Malika- Mémoire de Magister Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI OUZOU.2011

[NEV00] NEVILLE A. M., Propriétés des bétons , Eyrolles, 2000.

[Nyry et al., 2014] Niry R., Beaucour A-L, Hebert R., Ledesert B., Noumowe A., Bodet R., Comportement à haute température des bétons de granulats naturels siliceux et calcaires, 32èmes Rencontres de l'AUGC, Polytech Orléans, 4-6 juin 2014.

[NECHNECH.w]. Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées : Une approche thermo-élasto-plastique en dommageable. Thèse doctorat. L_institut national des sciences appliquées de Lyon.2000. Normale Supérieure de Cachan. 2007.

[Noumowe et al., 2009] Noumowe A. N., Siddique R., Debicki G., Permeability of highperformance concrete subjected to elevated temperature (600°C), Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1855–1861, 2009.

[NOUMOWE A.N]. "Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de dotorat de l_INSA de Lyon. (1995).

[Noumowe et al., 1996] Noumowe A.N, Clastres P., Debicki G., Costaz J.L., Thermal stresses and water vapor pressure of high performance concrete at high temperature, Proceedings, 4th International symposium on utilization of High-strength/HighPerformance Concrete, Paris France, 1996.

[PIASTA, J. HEAT]. Déformations of céments phases and microstructures of cément paste, Matériaux et Constructions, N°102, pp.415-420. 1984.

[PIASTA,J.etPIASTA,W.G]. Beton zwykly : dobor kruszyw i cementow,projektowanie betonu, trwalosc betonu, odpornosc chemiczna i termiczna'. Warszawa, Arkady 1994.

[QUE 91] Quénard D., Sallée, H. Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment. Cahier de CSTB, N° 2525, 1991.

[Reynouard et Pijaudier-Cabot] comportement mécanique du béton, mécanique et ingénierie des matériaux. Série matériaux de construction, hermes science 2005.

[SFBC] «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.

[SAR92] SARKAR S. L., CHANDRA S., BERMSSON L., Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, Cément and Concrete Composites, **14**, P239-248, 1992.

[SAH03] SAHIN R., DEMIRBOGA R., UYSAL H., GUL R., The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete, Cement and Concrete Research, **33**, P1245-1249, 2003.

[SAR05] SARADHI BABU D], GANESH BABU K., WEE T. H., Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, Cement and Concrete Research, **35**, P1218-1223, 2005.

[Stark et Wicht, 2001] Stark J., Wicht B., Dauerhaftigkeit Von Beton Der Baustoff als Werkstoff. Bau Praxis, Weimar, 2001.

[SCHNEIDER, U] ,'Behaviour of concrete at high temperatures'. Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Vertrieb Durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1982.

[TEO06] TEO D.C.L] , MANNAN M.A., KURIAN V.J., GANAPATHY C., Lightweight

concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties, Building and Environment, 2006.

[Tsimbrovska M], Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure, Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 1998.

[TC44-PHT]. Rilem Technical Committees 44-PHT - Behaviour of Concrete at high temperature. Technical Report Ed. by, U. Schneider, Dept. of Civil Engineering. Germany : 122 pages, 1985.

[UNA07] UNAL O], UYGUNOGLU T., YILDIZ A., Investigation of properties of lowstrength lightweight concrete for thermal insulation, Building and Environment, **42**, P584-590, 2007.

[Van Thai NGUYEN]- Thèse de Doctorat Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions.

[WAS96] WASSERMAN R., BENTUR A., Interfacial interaction in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength, Cement and Concrete Composites, **18**, P67-76,1996.

[WAS97] WASSERMAN R., BENTUR A., Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes, Cement and Concrete Research, **27**, P525-537, 1997.

[WAN06] WANG H. Y., TSAI K. C., Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt, Cement and Concrete Composites, **28**, P481- 485, 2006.

[WEB97] WEBER S., REINHARDT H. W., A New Generation of High Performance Concrete- Concrete with Autogenous Curing, Advanced Cement Based Materials, **6**, P59-68, 1997.

[WIL88] WILSON H. S., MALHOTRA V. M., Development of high strength lightweight concrete for structural applications, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, **10**, P79-90, 1988.

[WPS. Dias, GA. Khoury], and PJE. Sullivan. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C. ACI Material Journal, no 87 :160-166, 1990.

[Yang KE], Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontoise 2008.

[ZIMBELMAN R], Cem. Concr. Res., Vol. 17, nr 4 1987, s.651.

[ZHA90-1] ZHANG M. H., GJORV O. E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cément paste, Cément and Concrete Research, **20**, P610-618, 1990.

[ZHA90-2] ZHANG M. H., GJORV O. E., Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, **20**, P884-890, 1990.

[ZHA91-2] ZHANG M. H., GJORV O. E., Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, P240-247, 1991.

[ZHU04] ZHUTOVSKY S., KOVLER K., BENTUR A., Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Composites, **26**, P499-507, 2004.

[ZHU04] ZHUTOVSKY S., KOVLER K., BENTUR A., Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Composites, **26**, P499-507, 2004.