REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème: Etude de l'effet de la haute température sur les propriétés des bétons de granulats légers

---

Présenté par

BOUADJADJA Rachid

CHAANANE Ali

Proposé et Dirigé par

M^m^ HERIHIRI.O

Promotion Juin 2020

Remerciements

*Nous tenons d'abord à remercier **ALLAH** pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice **HERIHIRI OUIDED** pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée*

Nous tenons aussi à remercier cordialement et sincèrement Nos chers parents et nos chères familles

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Remerciement spécial à notre co-promoteur Dr OULD KHAOUA Younes pour leur aide appréciable, leur disponibilité, et leurs conseils.

Nous remercions également les responsables du Laboratoire de génie civil pour leur aide

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :
Mes parents, qui m'ont encouragé à aller de l'avant et qui m'ont donné tout leur amour pour prendre mes études. Aux quels je dois ce que je suis. Que dieu les protège.

Mon chère frère et sœurs pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, Merci d'avoir toujours soutenu et merci pour tout les bons moments passé ensemble, et ce n'est pas fini.
A ma famille et toutes les personnes que j'aime

A tout mes amies surtout Ali, Hakim, Hamza, Naceur, Nadjoua, Ikram et Halima qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire, en leur espérant bonne continuation dans leurs travaux.

Un dédicace tout particulier à ma super promotion de Master de génie civil un par un. Ces deux ans ont été riches en belles émotions sur beaucoup de plan, j'en garde des souvenirs impérissables. Merci pour l'ambiance qui a contribué à des moments d'échanges culturels et personnels très forts.

Des fois, les mots ne suffisent pas pour exprimer tout le bien qu'on ressent ! Juste MERCI à vous !!!

RACHID

Dédicaces

Je dédie ce travail de mémoire couronnement de mes études universitaires à
ma mère et mon père sans eux rien n'aurait été possible

À tous mes amis et mes collègues.

À mes très chers frères et sœurs

Et à la fin mon binôme RACHID et toute sa famille.

ALI

الملخص

الخرسانة هي مادة بناء، يستمر تطويرها واستخدامها في المباني وأعمال الهندسة المدنية في جميع أنحاء العالم نظرًا لسهولة تنفيذها وانخفاض تكلفتها. الخرسانة خفيفة الوزن هي واحدة من عدة أنواع من الخرسانة حيث تتميز بكثافة منخفضة.

يساهم استخدام الخرسانة منخفضة الكثافة في تقليل وزن العناصر المبنية بهذه الخرسانة وبالتالي تقليل أبعاد العناصر الحاملة ، مما يؤدي إلى تقليل القوى المنقولة إلى الأرض بواسطة الأساسات ، وبالتالي تقليل أبعاد الأخير. مما يسمح بالبناء على تربة ذات قدرة تحمل منخفضة.تتميز الخرسانة خفيفة الوزن بتوصيل حراري منخفض وعزل صوتي جيد. لذلك تعتبر بديل تقني مهم للغاية لحل مشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الخرسانة التي تم تخفيفها بواسطة حبيبات الفلين بنسب حجمية: من 25٪، 50٪، 75٪ إلى 100٪ معرضة لدرجات حرارة عالية 200، 400، 60 و 800 درجة مئوية، من أجل دراسة وتحليل الضرر الحراري للخرسانة وسلوكها عند درجات الحرارة العالية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة خفيفة الوزن, حبيبات الفلين, درجات الحرارة العالية, التوصيل الحراري

Résumé

Le béton est un matériau de construction, dont le développement et l'utilisation dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil ne cessent de croitre à travers le monde en raison de sa facilité de mise en œuvre et son faible coût. Le béton léger est un part du plusieurs types qui distingue a faible masse volumique.

L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière ; ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante. Les bétons légers ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les bétons allégés par Granulats de liège en teneurs volumique de 25%, 50%, 75% ,100 % exposés aux températures élevées de 200, 400, 600 et 800°C, afin d'étudier et analyser l'endommagement thermique du béton, et son comportement à haute température .

Les mots clés : Béton léger, granulas de liège, haute température, conductivité thermique

Abstract

Concrete is a building material, the development and use of which in buildings and civil engineering works continues to grow throughout the world due to its ease of implementation and low cost. Lightweight concrete is one of several types that distinguish low density.

The use of a concrete of low density contributes to the reduction in the weight of the elements built with this concrete and subsequently the dimensions of the load-bearing elements, resulting in the reduction of the forces transmitted to the ground by the foundations, and consequently the dimensions of the latter; which allows construction on soils of low bearing capacity. Lightweight concretes have low thermal conductivity and good sound insulation. Therefore, they can provide a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings.

The main objective of this work is to study concretes lightened by cork aggregates in volume contents of 25%, 50%, 75%, 100% exposed to high temperatures of 200, 400, 600 and 800 ° C, in order to " study and analyze the thermal damage of concrete, and its behavior at high temperature.

Key words: Lightweight concrete, cork aggregates, high temperature, thermal conductivity

Sommaire

ABLE DES MATIERES

الملخص……

Résumé …….

Abstract ……

Liste des tableaux…… II

Liste des figures …….. II

Liste d'abréviation…… II

INTRODUCTION GENERALE 01

PARTIER I : REVUE DE DOCUMENTATION

Chapitre I : Connaissances sur bétons légers

I.1. Introduction..... 05

I.2. Généralités sur les Bétons légers 05

I.2.1. Définition……..... 05

I.2.2. Types des bétons légers 06

I.2.2.1.Le béton cellulaire 06

I.2.2.2 Le béton caverneux…….. 08

I.2.2.3. Les bétons de granulats légers …… 09

A. Les bétons de granulats légers naturels…… 10

B. Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique..... 10

C. Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial..... 11

D. Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux..... 11

I.2.3.Classifications des bétons légers..... 11

I.2.4. Formulation..... 14

I.2.4.1. La nature de l'ouvrage..... 14

I.2.4.2.Le dosage..... 15

I.2.5.Propriétés des bétons légers..... 16

I.2.5.1.la masse volumique 16

I.2.5.2.La porosité 16

I.2.5.3.La légèreté..... 17

I.2.5.4.La sensibilité à l'eau 18

I.2.5.5.Propriétés élastiques des bétons légers 18

I.2.5.6.la durabilité 20

I.2.5.7.la rhéologie à l'état frais 20

I.2.5.8.les propriétés mécaniques 20

A. Résistance en compression…….. 20

B. Résistance en traction……. 23

I.2.5.9**.** Propriétés thermiques..... 24

A. La conductivité thermique..... 25

B. Chaleur spécifique..... 25

I.2.6. Les avantage des bétons légers 26

I.2.7.Utilisation 27

I.3.granulats légers..... 28

I.3.1 Porosité et densité des bétons et granulats légers..... 28

I.3.2 Fabrication des granulats légers..... 29

I.3.3Absorption d'eau des granulats légers..... 29

I.3.4 Différents types de granulats légers disponibles sur le marché..... 31

I.4Granulats de liège..... 33

I.4.1. Localisation du chêne liège..... 33

I.4.2. Provenance du liège..... 34

I.4.3. Structure du liège..... 34

I.4.4. Composition chimique du liège..... 35

I.4.5. Propriétés du liège 36

I.4.6. Béton de liège..... 37

Conclusion..... 38

Chapitre II: Comportement au feu du béton

II.1. Introduction..... 40

II.2. Terminologie feu et incendie..... 40

II.3. Physique de L'incendie..... 40

II.3.1. Le triangle du feu …..... 40

II.3.2. les phases de Le développement d'un incendie..... 41

II.3.3. Courbes températures-temps normalisées..... 42

II.3.3.1. Courbes nominales – la courbe ISO 834..... 42

II.3.3.2. La courbe hydrocarbure (HC) 43

II.4. Résistance au feu des constructions en béton..... 44

II.5. comportement au feu des structures en béton lors d'incendies..... 44

II.6. Résistance au feu des éléments structuraux..... 47

II.7.Comportement au feu de différents matériaux de construction..... 49

II.7.1. Classification des matériaux selon leur résistance au feu …… 49

II.7.2. Le bois..... 50

II.7.3. Le plâtre..... 51

II.7.4. Les métaux..... 51

II.7.5. La maçonnerie…….. 52

II.7.6. Le béton..... 52

II.8. La restauration des structures béton..... 52

II.8. 1Méthodes d'inspection..... 52

II.8.2 Possibilités de réparation..... 53

II.9. Comportement au feu du béton..... 55

II.10. Effet de la température sur la structure et les propriétés thermiques et physiques du béton..... 55

II.10.1. Evolution des composants et de la structure du béton..... 55

II.10.1.1. Evolution de la pâte de ciment..... 55

II.10.1.2. Evolution des granulats..... 56

II.10.1.3. Evolution de l'interface pâte granulats..... 58

II.10.2. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement..... 59

II.10.2.1. Densité apparente..... 59

II.10.2.2. Perméabilité..... 60

II.10.2.3. Perte de masse..... 61

II.10.2.4. Evolution de la porosité..... 62

II.10.3. Effet de la température sur les comportements mécaniques des bétons. 63

II.10.3.1. Résistance en compression à hautes températures…… 63

II.10.3.2. Résistance en traction à hautes températures…… 65

II.10.3.3. Module d'élasticité à hautes températures……... 67

II.10.4 Effet de la température sur les propriétés thermiques des bétons…… 69

II.10.4.1La conductivité thermique……. 69

II.10.4.2. Chaleur spécifique…… 70

II.10.5. Comportement au feu du béton a haute performance : éclatement et écaillage du béton……... 71

II.10.5.1. Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton……. 71

II.10.5.2. Mécanisme du phénomène…… 73

II.10.5.3. Moyens de prévention de l'éclatement……. 74

Conclusion……..... 77

PARTIER II: ETUDE EXPERIMENTAL 78

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux de base et essais effectues. 79

III.1. Introduction……... 80

III.2. Programme expérimental…….. 80

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés…….. 80

III.3.1. Le ciment……. 80

III.3.2 Eau de gâchage……. 82

III.3.3. Le sable…… 82

III.3.4: Gravier……. 87

III.3.5 Liège expansé……... 91

III.4.Formulations ……..... 94

III.4.1. Méthode de Dreux-Gorisse…….. 94

III.4.2 Calcul de la composition de 1m^3 du béton …… 94

III.4.3 Données de base……... 94

III.4.4 Dosages en ciment et en eau …… 94

III.4.5 Étape de confection du béton…… 96

III.4.5.1 Fabrication……. 96

III.4.5.2 Les corps d'épreuve…… 96

III.4.5.3 Cure Appliquée……. 96

III.4.5.4 Essai De Chauffage…….. 97

III.4.5.5 Dispositif de chauffage…….. 97

III.4.5.6 La méthodologie…… 97

III.5.Essais……..... 98

III.5.1 les essais à l'état frais……..... 98

III.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams…….. 98

III.5.2 les essais à l'état durci ……. 100

III.5.2.1 La masse volumique…… 100

III.5.2.2 Essai compression…… 100

III.5.2.3Vitesse des ondes soniques…… 101

III.5.2.4 Module d'élasticité…….. 102

III.5.2.5 Mesure de la perte de masse…… 102

III.5.2.6. L'essai de la conductivité thermique…… 102

III.5.2.7.Essais d'absorption d'eau par capillarité…… 103

III.5.2.8 La porosité…… 104

III.5.3.Désignation des bétons……..... 104

Conclusion……..... 105

Conclusion générale……... 105

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Connaissances sur bétons légers

Tableau I.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires ……... 07
Tableau I.2 : caractéristiques de béton léger caverneux……... 08
Tableau I.3 : caractéristiques de béton de granulats léger (BGL) ……... 09
Tableau I.4. Classification des bétons légers selon la masse volumique …… 11
Tableau I.5 : Classification des bétons légers en fonction de la densité…….. 12
Tableau I.6 : Classification des bétons légers en fonction de la masse volumique…….. 12
Tableau I.7. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction …. 13
Tableau I.8. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment…… 23
Tableau I.9: Pourcentages massiques des différents constituants du liège…… 35

CHAPITRE II : Comportement au feu du béton

Tableau II.1. Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie…….. 46
Tableau II.2. Classification des matériaux(NF EN 13501-1, 2013)……. 50
Tableau II.3. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température……..... 55

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux de base et essais effectues

Tableau III.1 : Analyses chimiques (NA 5042)……... 81
Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment (CLINKER)……... 81
Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du ciment MATINE……. 81
Tableau III.4 : Résistance à la compression (NA 234) …… 82
Tableau III.5: Analyse granulométrique du sable……..... 83
Tableau III.6: Les coefficients d'absorption de sable ……. 86
Tableau III.7 Les caractéristiques physiques……... 86
Tableau III.8: Les caractéristiques physiques de gravier……. 89
Tableau III.9: Analyse granulométrique de gravie, fraction 3 /8……. 90
Tableau III.10: Analyse granulométrique de gravie, fraction 8/15…….. 90
Tableau III.11: Analyse granulométrique de gravie, fraction 15 /25……... 90
Tableau III.12 : Les caractéristiques physiques de liège……. 92
Tableau III.13:Analyse granulométrique de liège…… 93
Tableau. III.14: Données de base……. 94
Tableau. III.15 Les différentes compositions des cinq bétons……. 95
Tableau III.16: Consistance du béton suivant l'essai d'affaissement au cône d'Abrams 99

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Connaissances sur bétons légers

Figure I.1 Représentation schématique des différents types des bétons légers…… 06

Figure I.2.Les types des bétons légers……. 06

Figure I.3 Le béton cellulaire…… 08

Figure I.4 le béton léger caverneux……. 09

Figure I.5 Le béton de granulats léger……. 10

Figure I.6 Babylone, Irak, construit par Sumériens dans le 3ème millenium B.C…….. 10

Figure I.7 masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours……... 12

Figure I.8 Masses Volumiques des Bétons Durcis en (kg/m³**)**……. 16

Figure I.9 Variation de la porosité en fonction de la composition de béton……. 17

Figure I.10 Variation de la porosité en fonction de la composition de béton. ……. 17

Figure I.11 Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège**.** ……... 18

Figure I.12 Courbe de contrainte – déformation pour les cylindres en béton léger……. 19

Figure I.13Évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à compression…… 19

Figure I.14 Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour E/C= 0.45&0.5……..... 21

Figure I.15 Résultats des efforts maximaux de compression uni-axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées…… 21

Figure I.16 Résistance à la compression (Mpa) en fonction des jours avec le dosage Du ciment C= 500 kg et 1% plastifiant…… 22

Figure I.17 Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du bétonfrais d'un mélange avec des granulats légers……. 22

Figure I.18 Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction de rapport VL/VS……..... 23

Figure I.19 Résistance à la traction (MPa) en fonction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant…… 24

Figure I.20 Variation de la conductivité thermique en fonction de la composition du béton……... 25

Figure I.21 la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats……. 26

Figure I.22 Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés

(Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente ρg……. 30

Figure I.23 Différents types de granulats légers disponibles sur le marché……. 32

Figure I.24 Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen occidental…… 33

Figure I.25 Aire de réparation du chêne liège en Algérie…… 33

Figure I.26 Structure cellulaire du liège…… 34

Figure I.27 Représentation schématique de la disposition cellulaire d'une section de liège…… 35

Figure I.28 Détail des parois de la structure cellulaire du liège montrant ses principaux composants…… 36

CHAPITRE II : Comportement au feu du béton

Figure II.1.Triangle du feu……. 41

Figure II.2 phases de développement d'un incendie…….. 42

Figure II.3. Courbes température-temps ISO 834 et HC…… 43

Figure II.4. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie…… 45

Figure II.5. Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50%..... 46

Figure II.6. Conseil national de recherches Canada……. 50

Figure II.7. Flambage des profilés en acier…….. 51

Figure II.8. Tunnel sous la Manche, 1996et2008…… 52

Figure II.9. Analyse ATD de 4 granulats généralement utilisés pour la confection des bétons…… 57

Figure II.10 études de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de quelques granulats en fonction de la température…… 58

Figure II.11. Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avec des granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite et d– basalte…… 59

Figure II.12. Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique. 60

Figure II.13. Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement……. 61

Figure II.14. Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température…… 61

Figure II.15.Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire (Rc=36 MPa) et d'un béton à haute performance (Rc=110 MPa)…… 63

Figure II.16. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température……. 64

Figure II.17 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température…… 65

Figure II.18.Résultats des essais de résistance en traction relative…… 66

Figure II.19. Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances…….. 66

Figure II.20. Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température…… 67

Figure II.21. Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C……. 68

Figure II.22. Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition…… 69

Figure II.23: Conductivité thermique du béton en fonction de la température…….. 70

Figure I.24 Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen occidental……. 71

Figure II.25.Mécanisme d'écaillage du béton……. 72

Figure II.26. Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc……. 72

Figure II.27 Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu…… 73

Figure II.28. Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). La fibre n'apparaît plus après le cycle de chauffage…… 74

Figure II.29. Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide…… 74

Figure II.30. Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène…… 75

Figure II.31. Observation en épi fluorescence d'un béton fibré (à gauche) et non fibré (à droite) après chauffage à 400 °C selon Kalifa et al. Les zones les plus claires correspondent aux fissures……. 75

Figure II.32. Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis-à vis du risque d'instabilité thermique du béton (pour chaque photo, à gauche formulation sans fibres, à droite formulation avec fibres)……. 76

Figure II.33. Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel. 76

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux de base et essais effectues

Figure III.1 Ciment CPJ - CEM II/B 42,5…… 81
Figure III.2 Sable d'Oued Souf…… 82
Figure III.3:La série des tamis……. 83
Figure III.4: pycnomètre…….. 84
Figure III.5: Récipient…….. 84
Figure III.6: Equivalent de sable…….. 85
Figure III.7: Gravie 3/8……. 87
Figure III.8: Gravie 8/15…….. 87
Figure III.9: Gravie 15/25…… 87
Figure III.10: pycnomètre……. 87
Figure III.11: Gravier imbibé dans l'eau pour l'essai d'absorption…….. 88
Figure III.12: La machine de Los Angeles…… 89
Figure III.13: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 ,15 /25 et sable) – Méthode de Dreux-Gorisse…….. 91
Figure III.14 Granulats de liège 8/16…… 91
Figure III.15 Liège imbibé dans l'eau pour l'essai d'absorption…….. 92
Figure III.16: Courbe d'analyse granulométrique pour les grains de liège expansé…… 93
Figure III.17: 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)… 95
Figure III. 18 : Le malaxage des bétons au laboratoire…… 96
Figure. III.19: Dispositifs de chauffage……. 97
Figure III.20: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams…….. 98
Figure III.21: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams…… 99
Figure. III.22 : Mesure la masse volumique……. 100
Figure III.23 : la presse hydraulique…… 101
Figure III.24: Photo présente l'appareille des ondes soniques…… 101
Figure III.25: Le CT-METRE…….. 103
Figure III.26: La mesure de l'absorption capillaire…… 103
Figure III.27:Mesure de la porosité accessible à l'eau…… 104

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

BL	béton léger
BN	béton normale
BGL	béton de granulat léger
AEA	agents entraineurs d'air
SP	super-plastifiants
WR	agents réducteurs d'eau
λ	Conductivité thermique
Ed, fi(t)	est la valeur calculée de l'effet des actions, des sollicitations, au moment (t) de l'incendie
Rd,fi(t)	est la valeur de calcul de la résistance de la construction aux températures élevées au moment (t).
SF	Stabilité au feu
PF	Degré pare flamme
CF	Degré coupe-feu
H2O	Eau
BHP	Béton haute performance
K	perméabilité intrinsèque
Ka	perméabilité à l'azote
CaO	la chaux
T	la température
RC	Résistance en compression
RT	Résistance on traction
E/C	Eau/Ciment
ρ	masse volumique
C	Ciment
CO2	oxyde de carbone
R	la stabilité
E	l'étanchéité aux flammes
I	l'isolation thermique**.**
REI	Le degré de résistance

CEM II/B	Ciment Portland Composé
MgO	Magnésium
Mf	module de finesse
ρs	masse volumique absolue
ρ_{ap}	masse volumique apparente
Esp	équivalent de sable au piston
Esv	équivalent de sable visuel
Ab(%)	Coefficient d'absorption
Ms	masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve.
Mh	masse de l'échantillon imbibé par l'eau.
LA	Coefficient los Anglos
Af	Affaissement
F	Charge maximale
G	coefficient granulaire
V	vitesse de l'onde sonique
L	longueur du trajet de l'onde sonique,
∆M	La perte de masse
Ɛ	La porosité

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires, ...

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.

Objectifs

L'objet de notre travail est de réaliser, caractériser un béton léger composite exposés aux températures élevées, obtenu en substituant une fraction optimale des granulats naturels par des granulats léger artificiel ou naturelle (les grains de liège en teneurs volumique de 25% ,50%,75% et100%) exposés aux températures élevées allant de 200, 400, 600, 800 et 1000°C , afin d'étudier et analyser l'endommagement thermique du béton, et nous comparons les résultats avec le béton témoin.

Structure du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre 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.

Le chapitre 2 : est consacré à l'étude du comportement au feu du béton et l'étude de l'effet de la température sur les structures construites en béton armé, ainsi l'étude de la variation des propriétés thermiques et physiques du béton exposé à des températures élevées.

Le Chapitre 3 : est consacré à la procédure d'essai qui consiste à présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, l'analyse granulométrique, la technique d'utilisation des grains de liège dans le béton ainsi que la confection des éprouvettes de béton témoin.

Le Chapitre 4 : présente les résultats et la discussion des résultats des essais effectués sur les bétons des grains de liège.

PARTIER I

REVUE DE DOCUMENTATION

Chapitre 1 : Connaissances sur bétons légers

Chapitre 2: Comportement au feu du béton

Chapitre 1
Connaissances sur bétons légers

I.1 Introduction

Le béton malgré ça complexité est 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). Ainsi, le béton ordinaire est un matériau relativement simple à fabriquer dont les composantes sont bien connues. Cependant, l'arrivée de nouvelles contraintes techniques, économiques et environnementales a conduit les chercheurs à expérimenter de nouveaux matériaux au fil des années. Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que ladensité. **[1]**

L'objectif de cette partie est de donner une revue bibliographique sur le contexte général du béton léger, ainsi les connaissances nécessaires de ses caractéristiques physico-mécaniques et thermiques à travers diverses recherches.

I.2 Généralités sur les bétons légers

I.2.1 Définition

Le béton c'est un matériau de construction composite fabriqué avec de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques de ce dernier, suggèrent de nouvelles application avec sa faible masse volumique. En effet la densité de béton normale (BN) varie de 2200 à 2600 Kg/m^3, tandis que celle du béton léger (BL) comprise entre 500 et 1850 Kg/m^3 [**1**].

D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m^3.Le BL est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). **[2]**

Ces bétons à pour but 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 une bonne matrice cimentaire afin d'atteindre les résistances voulues, Donc les BL de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances égale ou celle de BN. [2]

En fin les BL se caractérisent 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.

I.2.2 Type des bétons légers

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 (**figure I.1**) :

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

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient (**figure I.2**) :

- Les bétons cellulaires ;
- Les bétons sans fines (caverneux) ;
- Les bétons de granulats légers (argile expansé, pouzzolane naturel …..).

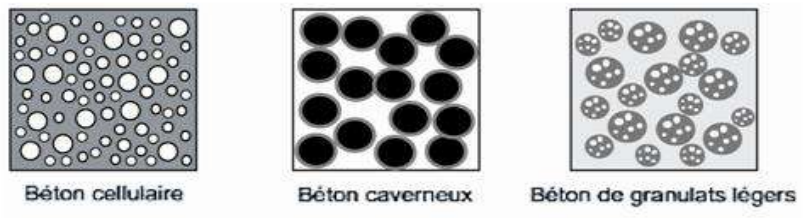


Figure : I.1 Représentation schématique des différents types de bétons légers **[3].**

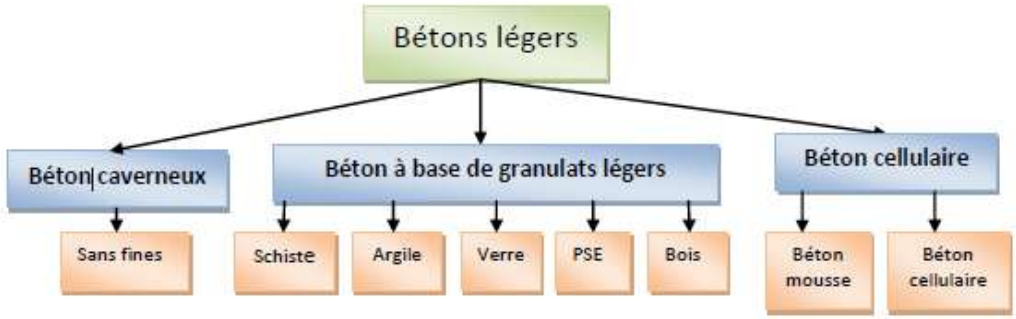


Figure I.2.Les types des bétons légers [**4].**

I.2.2.1.Le béton cellulaire

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. **[2]**

Les résistances et le module d'élasticité augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (**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. **[2]** 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, avoir une résistance et durabilité faible. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustín et al. **[5]** 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 **[3].**

Tableau I.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires **[2]**

Masse Volumique Sèche (Kg/m^3)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Conductivité thermique ($Jm/m^2s°C$)
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

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 **[2].**



Figure I.3 Le béton cellulaire

I.2.2.2 Le béton caverneux

C'est un béton très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l'absence de sable ou d'éléments fins. Il est obtenu à partir de gros granulats (courants ou légers) humidifiés et enrobés dans une pâte de ciment ou un mortier, et se met en place par couches épaisses (au moins 50 cm) et piquage. Il est utilisé comme béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires. **[6]**

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa. Plusieurs chercheures ont notez 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 **[7].**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 **[1].** 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. **[2] (voir Tableau I.2)**

Tableau I.2 : caractéristiques de béton léger caverneux ***[8]***

Types de béton spéciaux	**Propriétés, caractéristiques particulières**	**Utilisation, domaine d'applications privilégiées**
Bétons légers caverneux -béton caverneux de granulats légers -béton de bois -béton de liège	-masse volumique réduite -perméabilité à l'eau et à l'air -absorption acoustique	- allégement et drainage - absorption des bruits, réduction des bruits l'impact (écrans acoustiques, chapes flottantes, etc.)



Figure I.4 : le béton léger caverneux

I.2.2.3. Les bétons des granulats légers

Les bétons de granulats légers trouvent de nombreuses applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les structures telles que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier. Dans l'industrie du béton, cette famille de bétons est utilisée pour les produits de structure destinés aux bâtiments ou aux ouvrages de génie civil qu'ils soient en béton armé ou précontraint. Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 Kg/m^{3}et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa. **[9] (Tableau I.3)**

Tableau I.3 : caractéristiques de béton de granulats léger (BGL) **[8]**

Propriétés, caractéristiques particulières	**Utilisation, domaine d'applications privilégiées**
- Masse volumique réduite (entre 1000 et 1800 Kg/m^3) -Bonne résistance mécanique	-Allégement des produits et des ouvrages - Isolation thermique et phonique

Le béton de granulat léger, (BGL), n'est pas une nouvelle invention technologique de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver des nombreuses recherches en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scorait, etc.…Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3ème millénium A.C. (**figure I.6**).

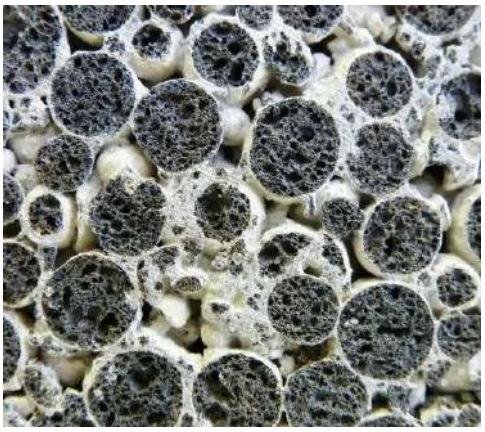


Figure I.5 : Le béton de granulats léger

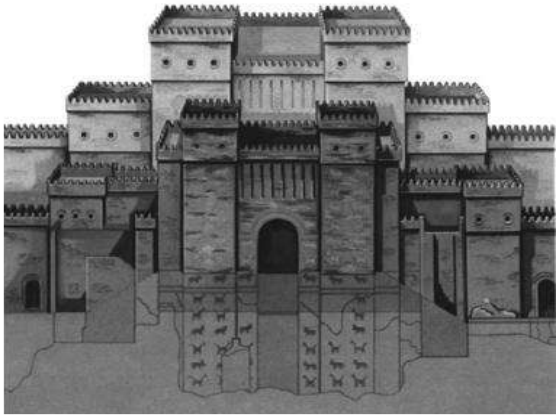


Figure : I.6 Babylone, Irak, construit par Sumériens dans le 3ème millenium B.C.

A. 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. [10]

B. 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 les Etats Unis d'Amérique(USA) et en Union des républiques socialistes soviétiques (URSS). [5]

La vermiculite est un minéral végétal 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. [5]

C. 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. [**10**]

D. Bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux

Pour la fabrication des granulats légers 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, et le verre que l'on peut également expansé. [**10**] 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. [10]

I.2.3. Classification du béton 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 γbs.
- ✓ de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **tableau I.4**. **[11]** et voir **Figure I.7**

Tableau I.4. Classification des bétons légers selon la masse volumique **[11]**

Classification	**ρ (kg/m³)**	**Rc (MPa)**
Béton de faible masse volumique	300-800	< 7
Béton léger de résistance moyenne se situe entre les deux	800-1350	7-17
Béton léger de structure	1350-1900	> 17

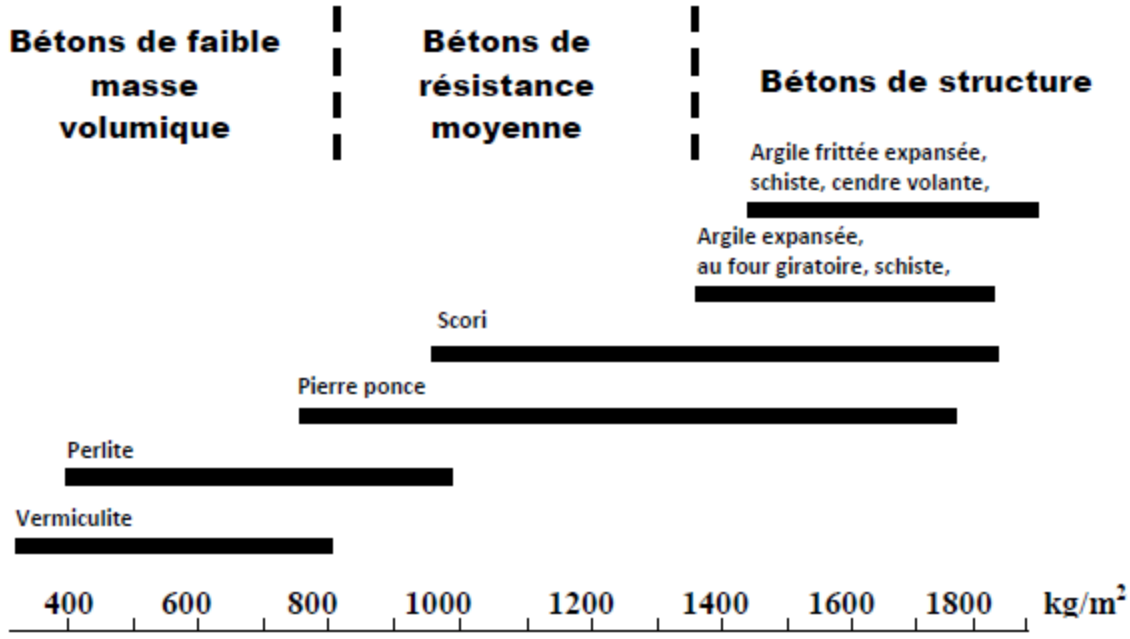


Figure I.7 : masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours **[1]**

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en Kg/m^3. [**12**]**. (Tableau I.5)**

Tableau I.5 : Classification des bétons légers en fonction de la densité **[1]**

Classe de Densité	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Kg/m3	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 I.6** ci- dessous :

Tableau I.6 : Classification des bétons légers en fonction de la masse volumique. [**12**].

Classe de masses volumiques	**LC 1,0**	**LC 1,2**	**LC 1,4**	**LC 1,6**	**LC 1,8**	**LC 2,0**
Kg/m3	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

En Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM **[10]**, selon le **tableau I.7**

Tableau I.7. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction **[11]**

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique Kg/m^3	< 1800	No précise	No précisée
Résistance à la compression MPa	>15	>3.5	>0.5
Conductivité thermique (W/m.K)	–	< 0.75	< 0.3

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

• **Des bétons légers de remplissage** :

Leur masse volumique apparente est comprise entre **300 et 1000 kg/m^3,** leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

• **Des bétons légers porteurs isolants** :

Leur masse volumique apparente est comprise entre **1000 et 1400 kg/m^3,** leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués

• **Des bétons légers de structure** :

Leur masse volumique est comprise entre **1400 et 1800 kg/m^3**. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible.

I.2.4 : Formulation

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons ordinaire. Une attention particulière doit cependant être portée à la densité apparente et à l'absorption des granulats. [13]

L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées
(Dreux, 1990). [5] Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes :

1) définir la nature de l'ouvrage,
2) établir les propriétés du béton en fonction de la nature de l'ouvrage,
3) établir le dosage des constituants permettant ainsi d'atteindre les propriétés recherchées.

I.2.4.1- La Nature De L'ouvrage

La formulation du béton est tributaire de la nature de l'ouvrage. A ce titre, il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

- le béton léger structural,
- le béton léger architectural.

On présente de façon sommaire les distinctions entre ces deux familles

- **Le béton léger structural :**

L'Association canadienne du ciment Portland (ACCP) définit le béton léger structural comme un béton ayant une résistance a la compression à 28 jours supérieure à 15 MPa dont la masse volumique est inférieure à 1850 kg/m³ [**3**]. Dans la catégorie des bétons légers structuraux, la diminution du poids spécifique du béton provient essentiellement de l'utilisation de granulats ayant des densités nettement inférieures à celles des granulats usuels. Les laitiers de haut fourneau, les argiles et les schistes expansés, les cendres volantes, les pierres ponces, Les scories et le tuf constituent en grande partie les sources disponibles de matière première pour fabriquer des granulats légers destinés à la confection de bétons légers structuraux. [5]

Le béton léger structural est utilisé pour répondre a des exigences structurales spécifiques.

Ainsi, on utilise du béton léger lorsque la capacité portante du sol ne permet pas l'érection d'une structure conventionnelle ; pour construire un bâtiment de grande hauteur pour lequel la diminution de poids est particulièrement intéressante compte tenu de la capacité portante du sol ; pour construire des plates-formes de forage dont la diminution de masse facilite le transport dans les zones à faible tirant d'eau. Règle générale, cette réduction de poids peut entraîner des économies substantielles dans la réalisation d'ouvrage [**2**].

- **le béton léger architectural :**

Tout comme pour le béton léger structural, l'ACCP définit un béton léger architectural comme étant un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 0,7 et 7 MPa et dont la masse volumique varie entre 240 à 1440 kg/m³. [**2**].

On peut obtenir un béton de masse volumique aussi faible de trois façons :

- ✓ par l'utilisation de granulats ultra- légers (la perlite, la vermiculite et les billes de polystyrène,…).
- ✓ par l'utilisation d'un agent moussant.
- ✓ par la confection d'un béton caverneux.

I.2.4.2- Dosage

Le dosage est consiste essentiellement à déterminer la proportion des constituants de manière à produire le béton répondant aux qualités du béton recherchées. Cependant, ce dosage n'est pas aléatoire puisque l'obtention des qualités recherchées repose sur des principes (qualité de la pâte, type de granulat, rhéologie, etc.) Une fois ces principes établis, on peut identifier la méthode de dosage qui correspond le mieux aux matériaux utilisés et aux conditions d'application [**2**].

- Principes de dosages

Le principe de dosage d'un béton repose sur des concepts fondamentaux reliés au comportement du béton à l'état frais et durci. L'étude sommaire de ces concepts va permettre, d'une part, de mieux comprendre les mécanismes du comportement interne du béton et. D'autre part, aider à la compréhension des concepts menant à la formulation d'un béton léger durable. On peut, a priori, admettre que le béton est constitué essentiellement de deux phases : la pâte de ciment hydraté et les granulats [**2**].

Les propriétés du béton varient essentiellement en fonction des matériaux utilisés et de leur dosage. Les principes de dosage font référence à quatre principaux facteurs :

- ✓ la qualité de la pâte de ciment hydraté
- ✓ la qualité des granulats
- ✓ la rhéologie recherchée
- ✓ les propriétés mécaniques

- Méthodes de dosage

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton léger qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton léger est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De façon générale, toutes les méthodes de dosage conçu pour les bétons conventionnels s'appliquent au cas d'un béton léger moyennant quelques modifications, Les méthodes de dosage sont nombreuses. Dans la majorité des cas, elles proposent de fixer initialement un rapport E/L correspondant à la résistance à la compression recherchée. Par la suite, les autres paramètres sont établis à partir de concepts empiriques issus de l'expérience et diffusés sous forme d'abaques [**2**].

I.2.5. Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants :

I.2.5.1.la masse volumique

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants. Comme nous pouvons voir sur **la figure I.8** l'effet de remplacement des granulats naturels par les granulats légers sur la masse volumique du béton est plus important lorsqu'on y incorpore les granulats de brique concassée. [14]

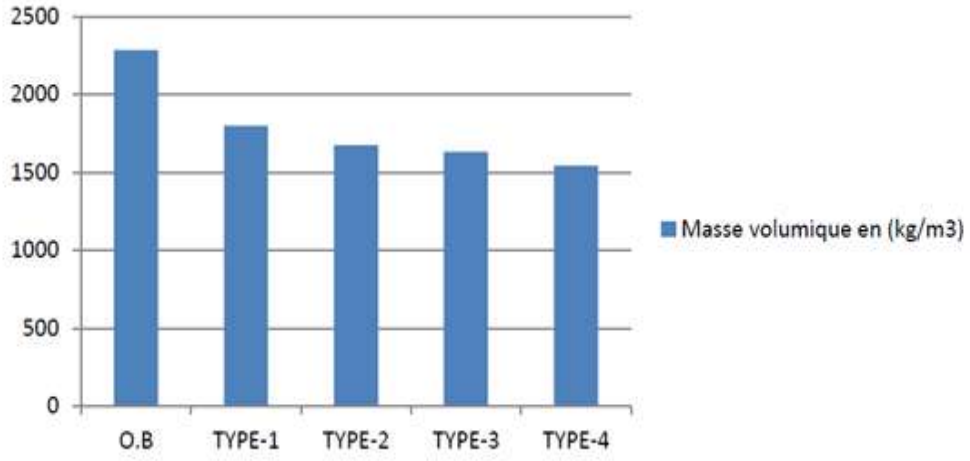


Figure I.8 : Masses Volumiques des Bétons Durcis en (kg/m³**)** [14]

I.2.5.2.La porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque a due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. [15]

Agoumimelcha.A [16] dans sa recherche sur les granulats obtenus par recyclage des boues de barrage ont obtenu les résultats suivants : (**figure I. 9**)

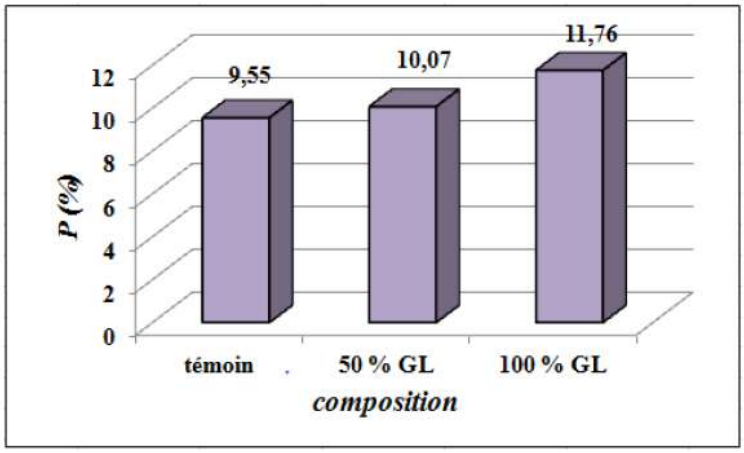


Figure I. 9. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton **[16].**

M.Zitouni et al (2019). [17] ont réalisé des essais sur des bétons légers à base des grains de liège et des billes de polystyrène comme agrégats légers. Une diminution de la porosité des bétons avec 25 et 50% de granulats légers par rapport au béton ordinaire, cette diminution est due aux billes de polystyrènes expansés qui comblent les pores dans le composite et les ferment pour empêcher le passage de l'eau. En revanche, pour les dosages supérieurs à 50%, la porosité augmente. (Figure I.10)

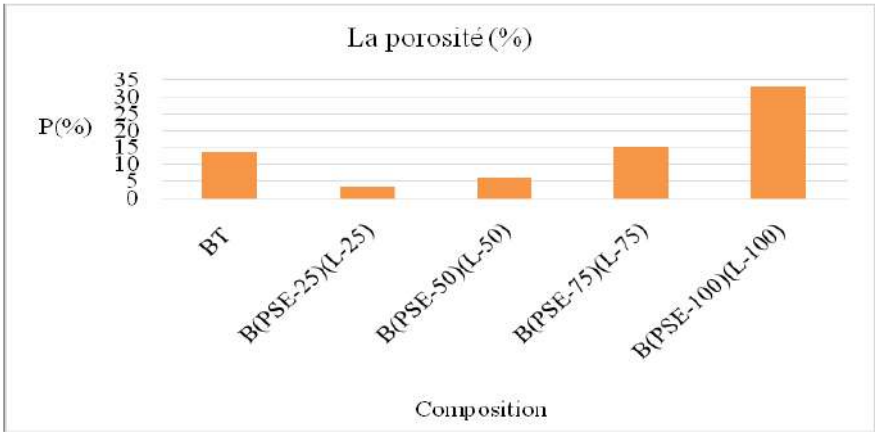


Figure I.10. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton.[17]

I.2.5.3.La légèreté

L'emploi de granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique de bétons. A titre de comparaison, la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m³ alors qu'elle se situé autour de 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m³ pour un béton de bois et qu'elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile un mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturés sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction. **[18]**

B. LAOUD (2013). [19] a rapporté que l'influence de l'incorporation des granulats de liège présente une diminution de la masse volumique de 50% selon de la substitution (**Figure I.11**).

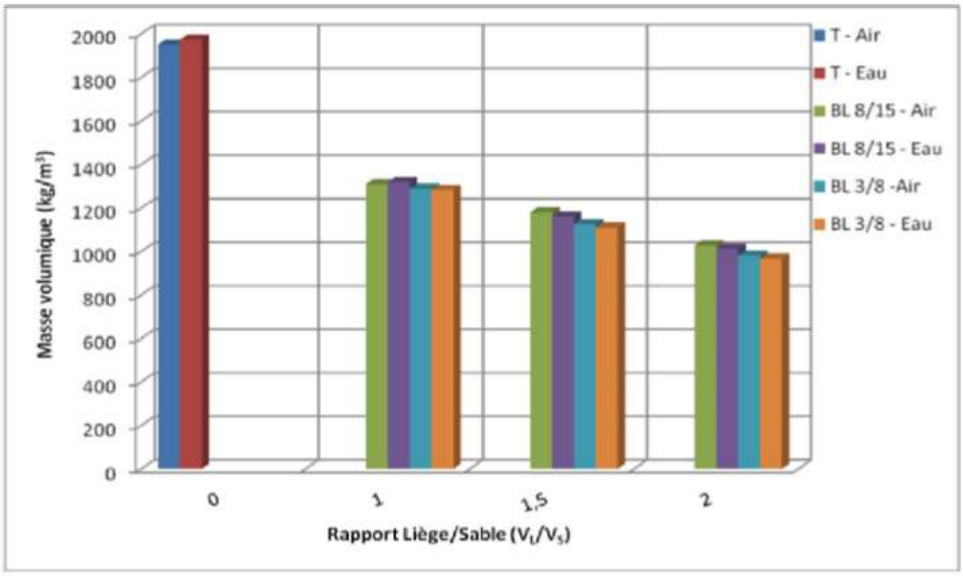


Figure I.11 Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège**. [19]**

I.2.5.4. La sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméables, permettant les transferts sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption.

La perméabilité représente la faculté qu'a un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche, un matériau peut être très poreux (le béton cellulaire) et peu perméabilité car les pores, non relies entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais la première n'applique pas forcément le deuxième. [15]

I.2.5.5. Propriétés élastiques des bétons légers

Le module d'Young d'un béton léger est évidement inferieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Généralement Le module d'Young d'un béton léger est considère comme valant 0.5 à 0.75 de celui d'un béton traditionnel de même résistance. Une plus faible rigidité peut être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou pour des structures en coques. Un faible module d'Young peut être à l'origine de désordre dans les structures en béton précontraint suite à une relaxation des câbles de précontrainte et à la chute de tension qui en découle. [15]

Mme Mohellebi.S [4] dans son recherche de granulats composites Obtenu les résultats suivants :

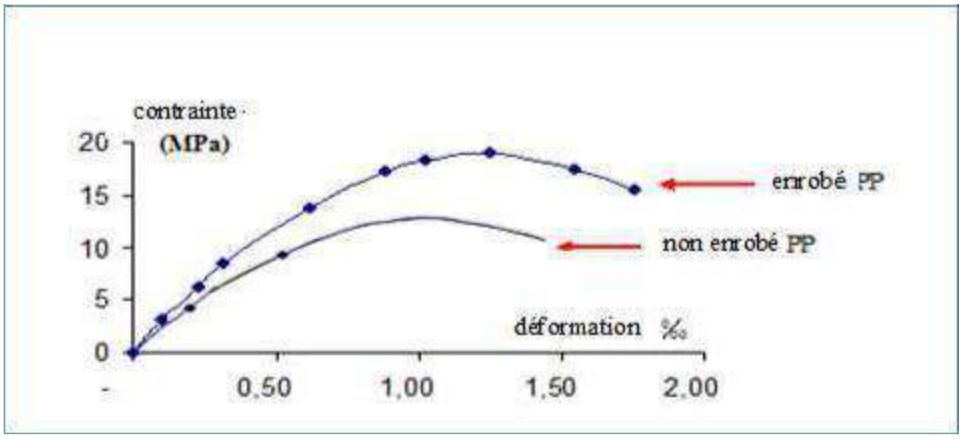


Figure I.12 Courbe de contrainte – déformation pour les cylindres en béton léger **[20]**

Le béton léger a un module d'Young moins élevé qu'un béton classique car les modules des granulats légers sont plus faibles que les modules des granulats de densité normale. selon les essais de Euro Light CON [21] dans lesquels des granulats normaux sont remplacés par des granulats léger (d'argile expansée) dans des proportions en volume de 20%,40%,60%,80%,100%,le module d'Young du béton diminue graduellement de 22400 MPa à 17300 MPa . MORIN [22] et CHI et AL. [23] constatent de même que l'augmentation du pourcentage des granulats légers dans le béton abaisse le module d'Young du béton. Par ailleurs, ils observent que le module d'Young du béton peut être amélioré par une diminution du rapport d'eau sur ciment, et que les caractéristiques des granulats légers ont une influence notable sur les modules du béton pour des fractions volumiques de granulats supérieurs à 20% a l'inverse, l'ACI remarque que la variation de granulométrie des granulats légers ,et donc de leur densité a peu d'effet sur le module d'Young si les volumes relatif de la pâte et des granulats restent constants [24].

Les propriétés élastiques des granulats ont une influence prépondérante sur le module d'Young du béton. Comme les propriétés élastiques du granulat sont liées à leur indice de vides et donc à leur densité, le module d'Young du béton léger dépend non seulement de la résistance en compression, mais aussi de la masse volumique du béton [18].

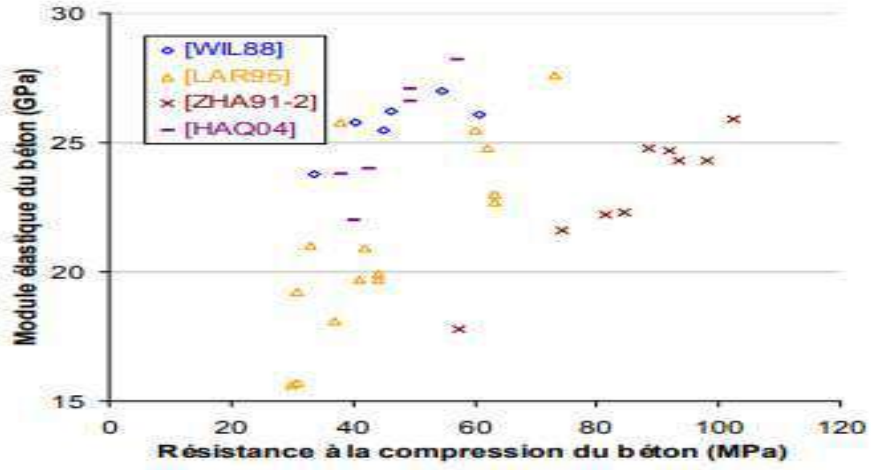


Figure I.13. Évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à compression [19-27].

I.2.5.6. la durabilité

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents. [**2]**

I.2.5.7. la rhéologie à l'état frais

La rhéologie du béton à l'état frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité. [5]

La rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [**2**].

I.2.5.8. les propriétés mécaniques

A. Résistance en 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. [4]

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. [4]

Les niveaux des performances des bétons légers sont inferieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre εg, qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats εg diminue. [4]

Herihiri.O et al, 2010 ont étudiés les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de polystyrène expansé par la substitution totale et partiels du sable alluvionnaire par les billes de polystyrène expansé PSE, trouvent que pour une teneur de 100% de PSE, la masse volumique décroit de 60% et la résistance décroit de 48,12%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allégement des structures. (**Figure I.14). [4]**

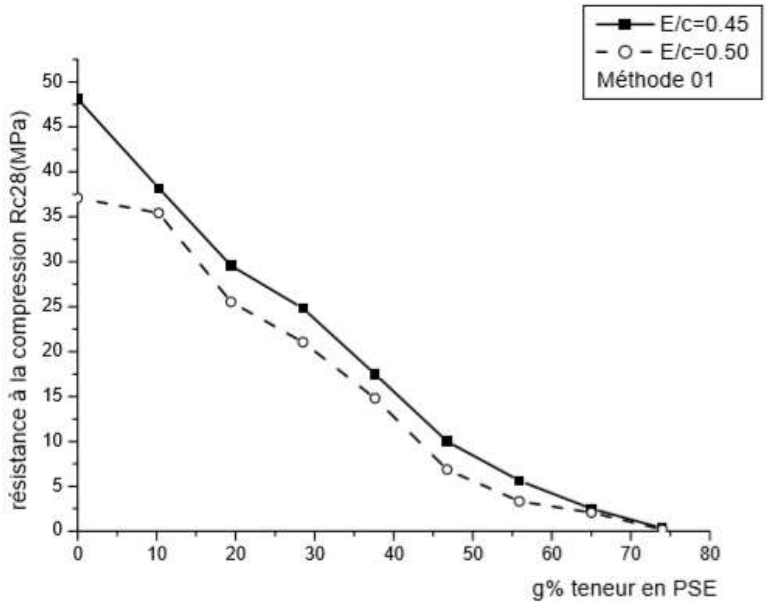


Figure I. 14 Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour E/C= 0.45&0.5 **[4]**

Mohellebi.S (2014) a fait des recherches sur la formulation du béton allégé par La substitution d'une fraction d'agrégats naturels par des billes de polypropylène enrobées d'une couche céramique ou/ et de marbre, selon la figure I.15, elle a constaté que la perte de résistance et de masse comparativement au béton témoin est respectivement de l'ordre de 38% et 8,5%. **[4]**

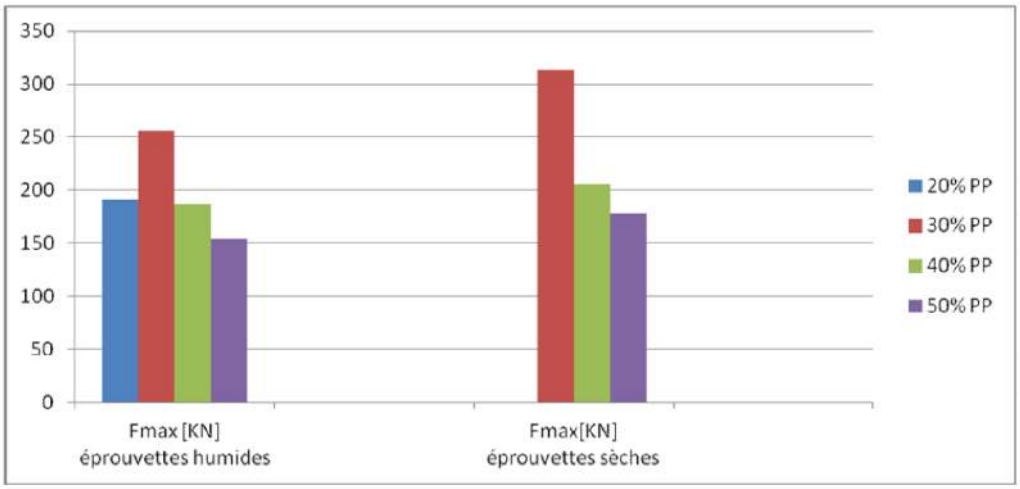


Figure I.15. Résultats des efforts maximaux de compression uni-axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées. **[4]**

Comme pour le béton de densité normale, la fumée de silice améliore l'évolution de la résistance du béton léger. D'autres ajouts peuvent être aussi incorporés dans le béton léger. Il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple,

l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraineurs d'air, AEA, super-plastifiants, SP, agents réducteurs d'eau, WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. L'utilisation du dosage important du liant et les plastifiants augmente la résistance du béton à base de polystyrène (**figure I.16**). **[28]**

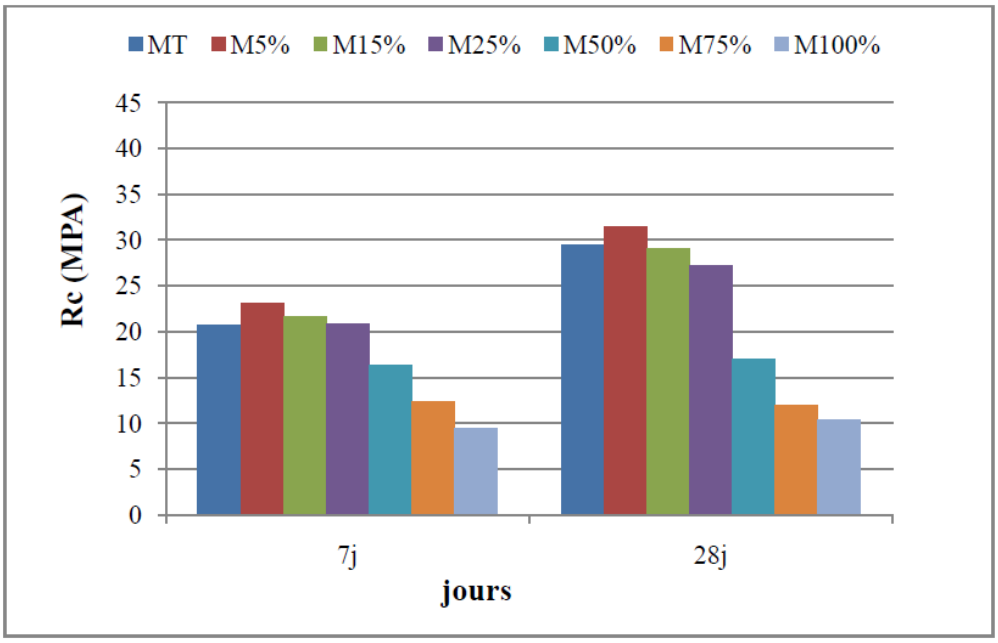


Figure I.16. Résistance à la compression (Mpa) en fonction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 1% plastifiant. [28]

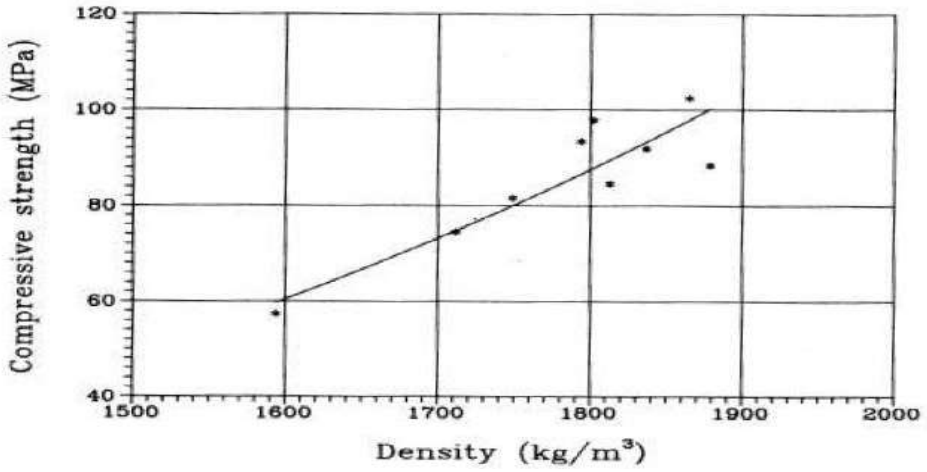


Figure I.17. Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [18]

La figure I.17, montre clairement que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité du béton.

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. [29] Le tableau (I.8) illustre cette constatation.

Tableau I. 8. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment. [1]

Résistance moyenne à la compression sur cylindre normalisé (MPa)	Dosage en ciment	
	Avec granulats fins légers (kg/m³)	Avec granulats fins de densité normale (kg/m³)
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

B. Résistance à la traction

De même que pour les bétons ordinaires, les bétons légers présentent une résistance à la traction assez faible. Ceci est d'autant plus vrai pour les bétons légers, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 MPa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m³ [21], ou de 3,5 à 5,6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³ [18].

Selon B. Laoud (2013), le béton avec l'ajout de liège, connu une chute très rapide de résistance en traction. Ainsi, l'utilisation des classes de grains de liège faible (3/8) devant les grains (8/15) présente une diminution des valeurs de la résistance en traction. [19]

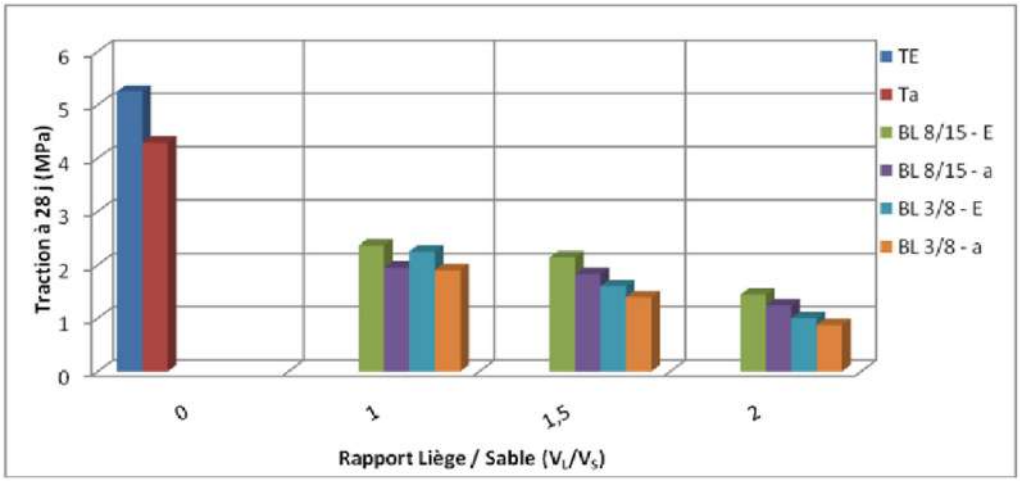


Figure I.18 Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction de rapport VL/VS [19]

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment / grains. L'essai le plus couramment utilisé, il consiste à rompre en flexion (par trois points), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L. Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 jours.

D'après Laidi .W et al (2015) la résistance à la traction de tous les mélanges est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de polystyrène. Cette diminution des résistances est expliqué par le défaut d'adhérence entre le polystyrène et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases.[28].Figure I.19

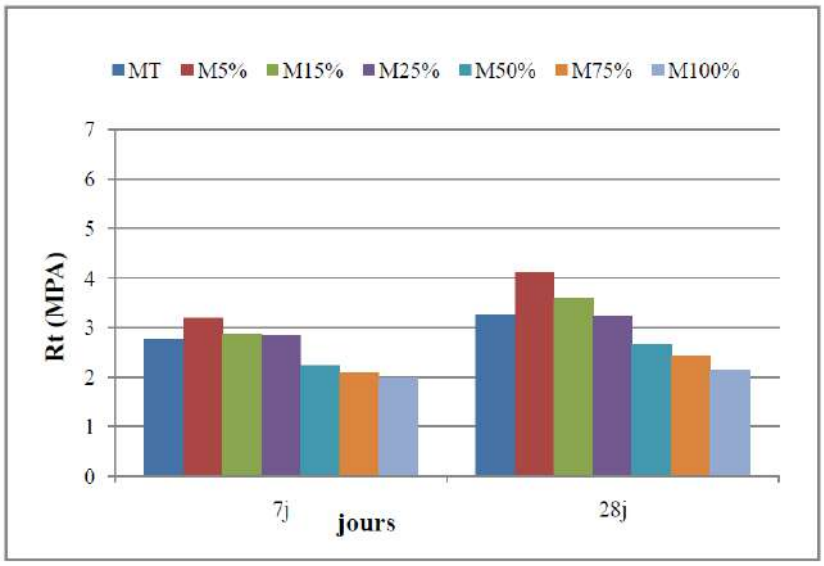


Figure I.19. Résistance à la traction (MPa) en fonction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant. [28]

I.2.5.9. 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 w/m.k, pour des densités de 400 kg/m³ et 0.30 w/m.k à pour des densités de 800 kg/m³. [**30**].

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. [30]

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 [**30**].

A. La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des caractéristiques importantes des bétons légers. Elle est contrôlée par des paramètres physico-thermiques qui sont : la conductivité thermique λ (w/m.K), la chaleur spécifique c (J/kg.k), la diffusivité thermique a (m^2/s) et l'effusivité thermique b ($J/m^2.S^2.K$). 30]

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. À cet égard, de nombreuses études antérieures ont étudié le pouvoir d'isolation des bétons légers. [30]

Zitouni .M et al (2019) **[30]** dans leurs résultats, montre que la substitution des granulats usuels par les grains de liège et les billes de polystyrène diminue la conductivité thermique. **Figure I.20**.

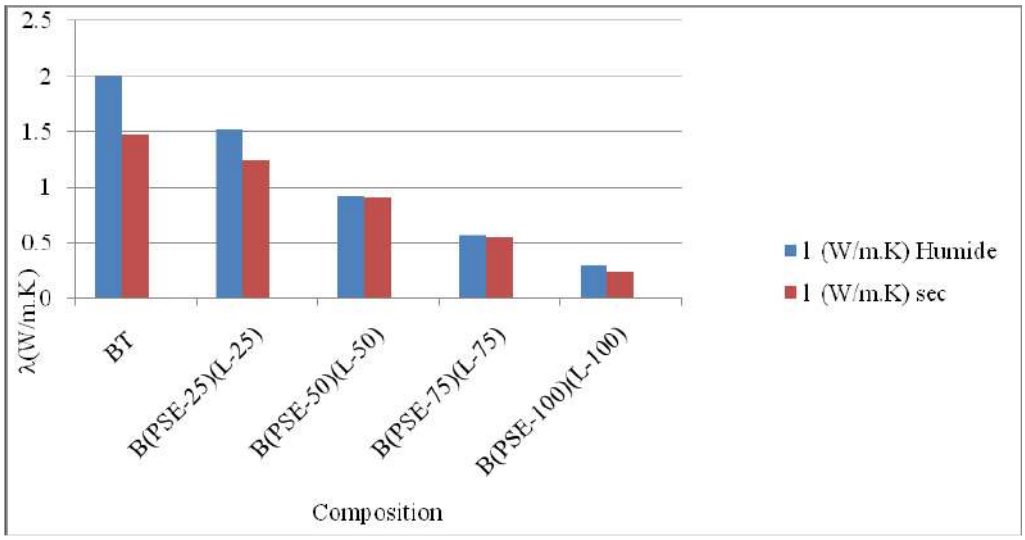


Figure I.20. Variation de la conductivité thermique en fonction de la composition du béton [17]

B. 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. C'est à dire, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. **[31]**

L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. **[32].** Elle 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 est gouvernée significativement par la nature du granulat existant dans la composition du béton.

La **figure I.21**, représenté la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats d'âpres Bennacer .S et al. Ils ont élaboré un béton de plâtre allégé par des déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments**.** Les résultats montrent que la chaleur spécifique augmente avec le dosage en granulats légers. [33]

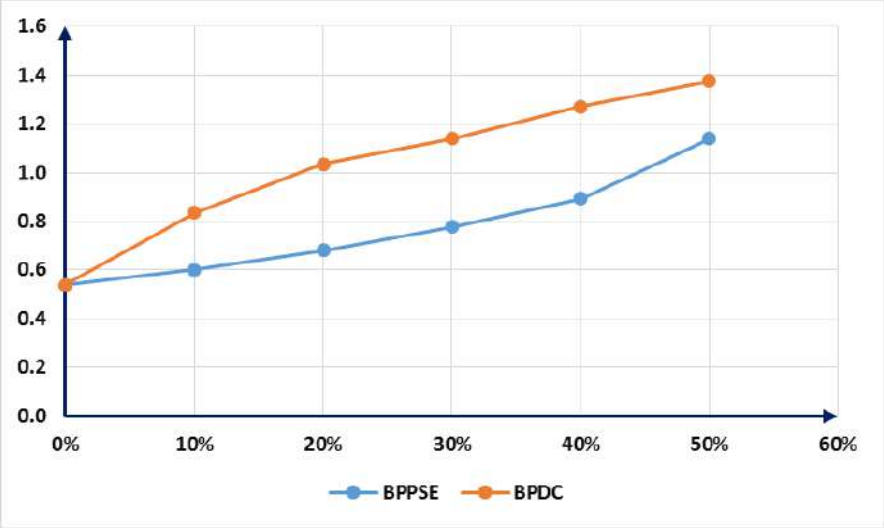


Figure I.21 .la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats [33]

I.2.6 Les Avantages Des Bétons Légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

A. Avantages techniques

- **Légèreté** : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1 ,2 en comparaison de 2 ,2 à 2,5 pour un béton classique.
- **Isolant** : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- **Non inflammable** : La chape en béton léger est classées M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- **Imputrescible** : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

B. Avantages de Mises En Œuvre

- **Exécution simple et rapide** : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- **Maniabilité** : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers.

- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté.

C. Avantages Economiques

- une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations
- Economie sur le ferraillage des éléments ;
- le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de
- ciment par rapport au béton ordinaire ; **[1]**

Les inconvénients du béton allégé

- Compte tenu de sa faible résistance, le béton allégé ne peut faire l'objet d'utilisation sur toutes les composantes structurelles du bâtiment. Sa densité étant trop faible, il est le plus souvent utilisé comme béton de remplissage.
- Il est impératif, selon les règlements des documents techniques unifiés (DTU), de recouvrir le béton léger d'une chape de mortier de 5 cm d'épaisseur. Seul le béton allégé composé de billes de polystyrène fait exception à cette règle. [34]

I.2.7 Utilisation

Le béton léger est un matériau composite constitué de différents éléments allégés, d'où son nom. Cette particularité permet une utilisation plus facile contrairement au béton lourd. Le béton léger est divisé en trois domaines d'utilisation ;

- **Des bétons d'isolation pure, non porteurs** leur masse volumique est faible (600 kg/m³) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement :

- En forme de pente isolante pour toiture-terrasse ;
- En isolation de sols sur terre-plein ;
- La préfabrication des éléments architecturaux ;
- La protection d'étanchéité sur terrasse ;
- chapes, planché, dalles d'isolation ;
- Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation ;
- Le rattrapage de niveau

- **Des bétons porteurs et isolants** leur masse volumique varie de 1 000 à 1 300 kg/m³ et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- Des murs banchés ou préfabriqués

- Des blocs à maçonner ;
- Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage
- Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces ;
- La protection incendie

➢ **I.5.3 Des bétons légers de structure** Ils ont une masse volumique de 1 700 à 1 800 kg/m³ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité.

Ces bétons sont utilisés pour :

- Ouvrage ou le poids mort est important par rapport au poids total
- Immeuble de grande hauteur ;
- Portée importantes (poutres, voiles) ;
- Structures marines immeubles ;
- Surélévation d'immeubles existants ;
- Restauration d'anciens immeubles ;

Le béton léger permet de réduire l'armature en acier d'un plancher ou de réhabiliter un sol peu solide. Mais il est recommandé de prendre l'avis d'un maçon professionnel afin d'éviter les erreurs lors du coulage du béton et de son application. En effet, il faut tenir compte du taux d'humidité, des contraintes techniques ou de la chaleur. Le béton est un composite vivant qui réagit avec les conditions extérieures. [35]

I.3 : granulats légers

I.3.1 Porosité et densité des bétons et des granulats légers

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c.-à-d sans sable) et dans les granulats (bétons de granulats légers). [17]

Les granulats allégés par expansion ou frittage, reste utilisés dans de nombreux pays comme Union des républiques socialistes soviétiques (URSS) ou les Etats Unis d'Amérique(USA) et aussi bien dans la France ; ils ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressantes. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme NF P18-309) et le laitier expansé (NF P18-307) ; d'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Un gain de poids intéressant puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

Les granulats très légers sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers de masse volumique variable entre 20 et 100 kg/m³; ils permettent de réaliser des bétons de 300 à 600 kg/m³; on voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles ou rechargement sur planchers peu résistants.[17]

I.3.2 Fabrication des granulats légers

Les procédés de fabrication usuels des granulats légers artificiels à base de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou de sous produits industriels (laitiers, cendres volantes) ; sont l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles granulats et bétons légers, 1986, presse de l'école nationale des ponts et chaussées [30]. L'expansion est alors générée par la formation d'un gaz à l'intérieur du matériau en fusion (entre 1000 et 1300°c) ; la structure poreuse est alors conservée par le refroidissement rapide du matériau. Ces granulats peuvent être obtenus par le concassage des masses expansées ou par préformage vante l'expansion (moulage et déchiquetage de l'argile, pulvérisation des schistes et de l'ardoise, frittage des cendres volantes). Le moulage et le frittage permettent d'obtenir des granulats de forme sphérique (granulat bouleté ou roulé).

Le laitier liquidé à 1450°c, est fabriqué sans opération de concassage ni préformage ; il est alors projeté dans l'atmosphère au moyen d'un tambour rotatif tandis que des jets d'eau assurent l'expansion des particules en fusion [7].Ces granulats manufacturés sont à l'heure actuelle les meilleurs granulats pour la fabrication des bétons légers de structure. On préfère toutefois les granulats roulés aux granulats concassés car leur forme arrondie et leur plus faible absorption d'eau améliorent les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons légers [36] [37] [38].

I.3.3. Absorption d'eau des granulats légers

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75% du volume apparent). La taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats, mais déterminent surtout leurs propriétés d'absorption (taux d'absorption et absorption totale). Les données de la littérature montrent que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels est très élevé, plus de 50% de l'absorption dès les toutes premières minutes [18] (**figure I.22).**

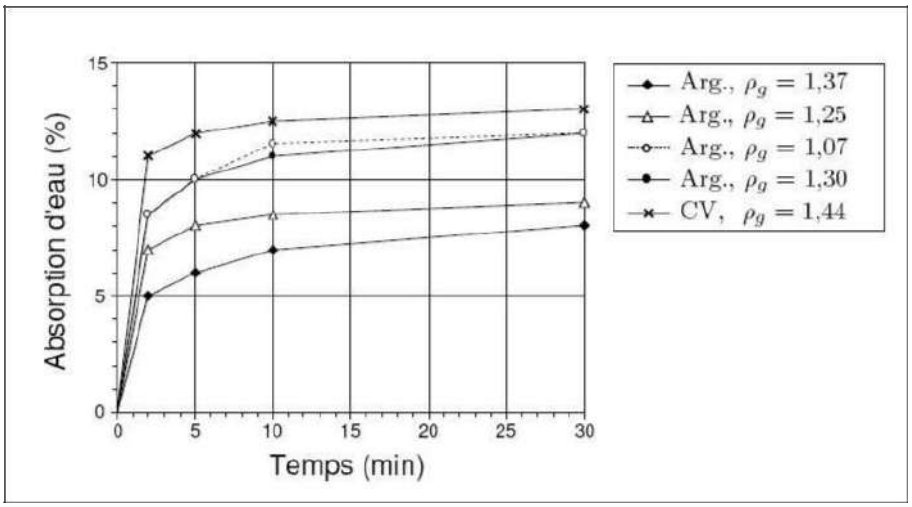


Figure I.22. 2 Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente ρg [18].

Par ailleurs, la porosité des granulats légers varie proportionnellement à la taille des grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente. Les cendres volantes frittées, sont les plus absorbantes comparativement à l'argile expansée ; étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores. Le problème qui se pose lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers est qu'une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats légers. L'effet sur l'ensemble du matériau peut se traduire par une perte rapide de maniabilité [30]. Certains moyens tel que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption d'eau des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers [39].

Différents travaux ont été mené pour régler ce problème d'absorption d'eau des granulats légers ; voir la possibilité technique d'introduire des granulats caoutchouteux dans le béton ou bien des polymères, comme le polystyrène expansé ; grâce à leur forme, les perles de polystyrène expansé n'absorbent presque pas l'eau de gâchage ; mais en raison de leur poids très léger et de leur surface hydrophobe, le béton de polystyrène expansé est prédisposé à la ségrégation lors de la mise en coffrage du béton ; une méthode de pré mélange semblable à la technique « enveloppant sable »[40] ; cette recherche a montré qu'en remplaçant partiellement des granulats ordinaires par les perles de polystyrène expansé, on aboutit à un béton léger de masse volumique comprise entre 800 et 1800 kg/m³ et une force de compression variant de 10 à 25 MPa.
D'autres recherches dans le domaine des nouveaux matériaux de construction ont montré que l'introduction de particules de caoutchouc issues de l'industrie de récupération (déchiquetage des tubes inutilisables en PVC) réduit l'absorption d'eau du composite [41] [42].

I.3.4. Différents types de granulats légers

Ils existent différent GL disponibles sur le marché mondial en peut citer le :

- **Les argiles expansées**
- **Schistes expansés**
- **Laitier expansé**
- **Pierre ponce**
- **Pouzzolane**
- **Perlite**
- **Vermiculite**
- **Billes de polystyrène**
- **Granulats De Liège**

♦**Les argiles expansées** sont des granulats qui disposent d'une faible densité et qui sont prêts à l'emploi. Ils ne nécessitent aucun broyage ou concassage. Son élément constitutif est une argile grasse. Elle est introduite humide dans un four et en ressort après séchage sous forme de nodule (une grosseur anormale de forme généralement arrondie) dont la surface est lisse et légèrement vitrifiée. Les argiles expansées sont rarement utilisées dans la confection du béton du fait de leur coût de production exorbitant [43].

♦**Schiste expansé** C'est une variante d'argile expansée que l'on obtient par cuisson de schistes appropriés. [43]

♦**Laitier expansé** est obtenu par l'insufflation d'air dans le laitier en fusion. Après cette étape, le concassage offre des granulats de diverses dimensions. Ils sont assez rares sur le marché. [34]

♦**Pierre ponce** C'est une lave volcanique alvéolée de couleur grise. On obtient des granulats après concassage de cette dernière. [43]

♦**Pouzzolane** C'est une roche naturelle constituée par les projections volcaniques. Elle est assez abondante. [43]

♦**Perlite** Sous forme de petits grains arrondis et creux, on les obtient par le traitement chimique d'une lave volcanique. [43]

♦**Vermiculite** Sous forme de petits parallélépipèdes, elles sont obtenues par la cuisson suivi d'un refroidissement brusque des silicates. [43]

♦**Billes de polystyrène**

a. Composition et origine

La matière première servant à la formation des billes de polystyrène est constituée de granules de polystyrène non expansé renfermant un pyrogène. [43]

b. Méthode de fabrication

Le pyrogène, sous l'action de la chaleur, passe à l'état gazeux, ce qui provoque l'expansion. Une fois expansées, les perles peuvent avoir atteint plusieurs fois leur diamètre initial, de 0,4 à 2 mm. Le polystyrène présente une masse volumique parmi les plus faibles (10 à 40 kg/m3) en considération aux autres matériaux étudiés [43]

♦**Granulats De Liège** Ce type de granulat est obtenu à partir des chaines de lièges, en passant par le concassement de celles-ci et puis le liège est torréfie dans des autos claves vers 350°c sa densité sèche varie entre 65 et 120 kg/m3. Le domaine d'utilisation des granulats de liège est bien la confection de chapes et de planchers. [2]



Figure I.23. Différents types de granulats légers disponibles sur le marché [43].

I.4 granulats de liège

I.4.1 Localisation du chêne liège en Algérie

En termes de statistique, l'Algérie est parmi les pays qui disposent d'une importante forêt de chêne liège par rapport au total des subéraies autour du bassin méditerranéen. Elle occupe la troisième place avec un pourcentage de 18% après le Portugal et l'Espagne [44]. (**Figure I.24**).

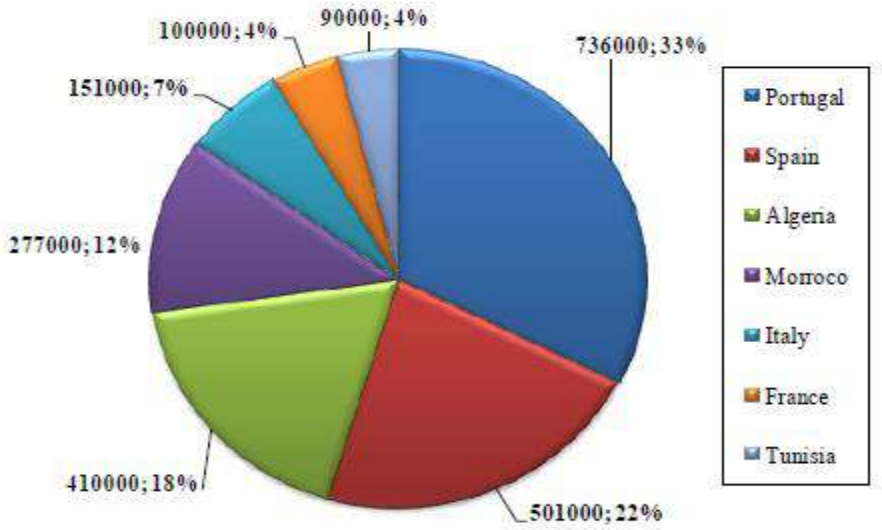


Figure I.24: Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen occidental [44].

Le chêne liège domine les essences forestières algériennes après le Pin d'Alep. Il est localisé au nord algérien essentiellement dans le Tell Oriental jusqu'à la frontière tunisienne. La partie occidentale possède quelques aires isolées dont les plus importantes sont les monts de Tlemcen, de région d'Oran, Mascara, Ténès et l'Ouarsenis (**Figure I.25**).

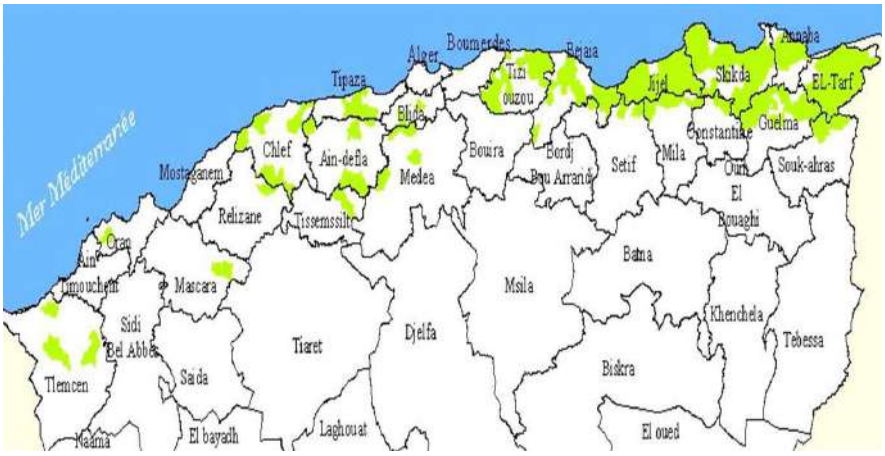


Figure I.25 : Aire de réparation du chêne liège en Algérie [45].

Le chêne liège est une essence forestière nécessaire pour l'équilibre environnemental. C'est un bon absorbant d'oxyde de carbone (CO2). Grâce aux caractéristiques uniques de son écorce, il est considéré comme une barrière contre le feu. Après l'extraction du liège endommagé par le feu, la subéraie peut commencer un nouveau cycle de production de liège [46].

I.4.2. Provenance du liège

Le liège est l'écorce du chêne liège, peut être récolté pour la première fois vers l'âge de 25 ans puis chaque 9-12 ans dès que l'arbre atteint 25 centimètres de diamètre ; c'est un matériau renouvelable. Durant les cycles de vie du chêne liège, qui peut vivre 200 à 500 ans, trois qualités de tissus subéreux sont distinguées : (1) Le liège male (ou le liège vierge) qui est de moindre qualité, (2) le premier liège de reproduction depuis la deuxième récolte et (3) le deuxième liège de reproduction depuis la troisième récolte et plus. Les deux dernières sont dites « liège femelle », qui son de meilleure qualité. La qualité du liège s'améliore au fils des prélèvements au cours de la vie du chêne liège.

Le liège male est irrégulier dans sa structure, épais, dense et rugueux n'ayant pas les qualités pour être commercialisé, il est utilisé pour la fabrication des panneaux isolants ou dans l'industrie des sandales. Le liège femelle, dès la première récolte est de meilleure qualité, il est beaucoup plus régulier, lisse et intact [46].

I.4.3. Structure du liège

Le liège révèle une structure alvéolaire identique à celle d'un nid d'abeille avec une absence d'espaces intercellulaires (**Figure I.26**). Cette structure cellulaire contient entre 30 et 43 millions de cellules. Le tissu subéreux contient 89,7% de matière gazeuse [47]. Malgré l'orientation aléatoire des parois cellulaires latérales (parallèles à la direction radiale), le liège est considéré comme un matériau transversalement isotrope (**Figure I.27**).

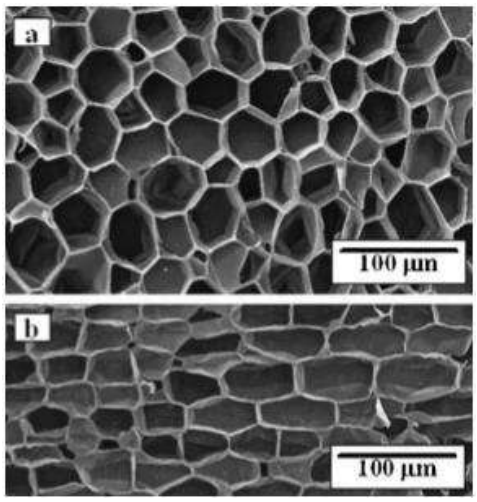


Figure I.26 : Structure cellulaire du liège [46].

a)Section radiale - b) Section tangentielle.

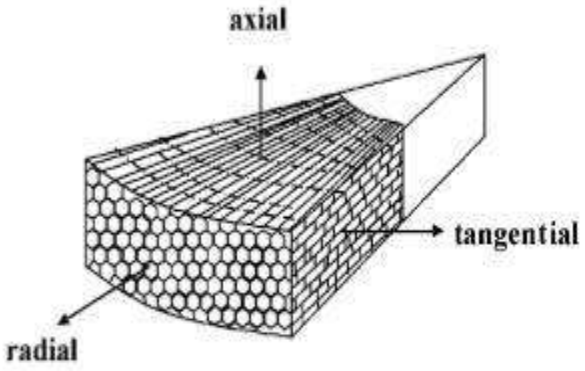


Figure I.27 : Représentation schématique de la disposition cellulaire d'une section de liège [46].

I.4.4. Composition chimique du liège

Des travaux effectués sur la composition chimique du liège ont trouvé que les constituants de ce matériau dépendent de plusieurs facteurs tels que : l'origine géographique et génétique, le climat, le sol, les conditions de croissances, l'âge et les dimensions de l'arbre. Donc, cette composition diffère d'un arbre à un autre ; mais aussi dans le même arbre, entre le bas et le haut. Probablement, cette composition dépend aussi du nombre d'extraction du liège, puisque son arrangement s'améliore en fonction de ce même paramètre [46].

Le Tableau (I.9) représente le classement des différents constituants du liège avec un ordre décroissant par rapport à leur participation massique.

Tableau I.9: Pourcentages massiques des différents constituants du liège [48].

Liège naturel	Constituants(%)
Subérine	45-46
Lignine	24-25
Polysaccharides (cellulose et hémicellulose	10-12
Extractibles	8-10
Cendres	3-5
Cires	4-6
Tannins	3-5
Autres	2-3

La structure cellulaire de la paroi de liège se compose principalement par un milieu riche en lignine, sous forme de lamelle et c'est l'élément qui apporte la rigidité à la structure. Une paroi secondaire, plus épaisse formée de subérine avec une quantité abondante et des lamelles

de cire. La troisième paroi est composée par le polysaccharide, qui donne une rigidité structurelle à la cellule de liège et empêche son effondrement (**Figure I.28**) [46].

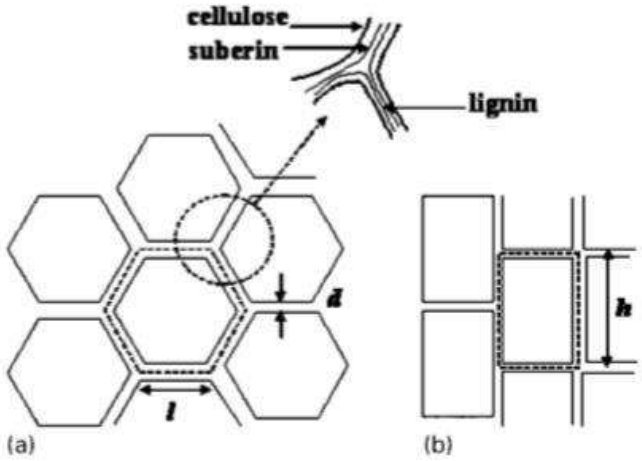


Figure I.28 : Détail des parois de la structure cellulaire du liège montrant ses principaux composants [46].

a) Section radiale, b) Coupe tangentielle/axiale.

L : bord de la base du prisme, d : épaisseur du mur, h : hauteur du prisme

I.4.5. Propriétés du liège

Le liège a souvent été connu par sa destination vers la production de bouchons, ainsi que pour quelques applications d'isolement. Dans les deux dernières décennies (1990-2010), le liège a connu une crise suite à l'apparition des alternatives en matières synthétiques, qui sont économiquement plus avantageuses. Récemment, le liège a commencé à retrouver sa position mais comme un matériau innovant convenable au développement durable. Il est employé dans différents domaines tels que l'industrie, le sport, l'environnement, l'aérospatial et le bâtiment.

La composition chimique du liège est complexe et reste toujours considérée comme un domaine de recherche. Cette composition offre au liège la particularité d'être respectueux de l'environnement (naturel, renouvelable et recyclable). Le liège offre une gamme de propriétés physiques et mécaniques avantageuses pour le domaine du bâtiment, à savoir :

♦**Légèreté :** Sa faible densité est due à la forte teneur en gaz de ses petites cellules.

♦**Isolation thermique :** grâce à sa légèreté et sa composition unique, le liège est l'un des meilleurs isolants avec une conductivité thermique de l'ordre de 0,045 W/(m.K). Cette dernière est proche à la conductivité thermique de l'air sec qui égale à 0,025 W/(m.K).

♦**Isolation acoustique :** le liège est un mauvais conducteur de son, donc un bon isolant acoustique.

♦**Elasticité - Capacité d'amortissement – souplesse :** le liège ne subit aucune déformation permanente sous l'action de compression en raison de sa mémoire élastique. C'est donc un excellent isolant vibratoire.

♦**Imperméabilité aux liquides et aux gaz :** l'imperméabilité du liège est due à la contre pression du gaz et aux substances grasses (subérine) existantes dans les cellules.

♦**Résistance au feu :** ignifuge, il nécessite énormément d'oxygène pour prendre feu. Autant, il se carbonise en surface ce qui contraint la combustion (retardateur naturel de la progression du feu).

♦**Sans réaction aux produits chimiques :** sans réaction avec les produits chimiques, le liège ne produit pas d'émissions toxiques.

♦**Durabilité :** grâce à toutes ces qualités, le liège conserve ses caractéristiques dans le temps. (Imputrescible)

♦**Recyclable :** grâce à sa durabilité, le liège peut être réutilisé dans différentes applications.

[46], [47], [49].

I.4.6. Béton à base de granulats de liège

Nous présentons ci-dessous une synthèse de quelques travaux de recherche qui ont abordé le sujet du béton de liège.

► **(Aziz M A et coll., 1979)** [50]a évalué plusieurs paramètres du béton de liège (ciment, liège et de l'eau). Il a abouti qu'un serrage par vibration est beaucoup plus adaptés a ce béton et a aussi trouvé que l'augmentation du pourcentage du liège conduit à une diminution de la résistance mécanique à la compression et de la conductivité thermique.

► **(Branco et coll, 2007)** [51]dans ce document, les auteurs ont varié : (1) la provenance du liège, naturel et expansé, (2) la tailles des granulats de liège et (3) le pourcentage de substitution. Le remplacement des granulats de liège a été effectué soit par rapport au sable ou par rapport au gravier soit le sable et gravier en même temps. Les résultats ont montré que plus le taux de remplacement augmente plus la résistance diminue d'une façon remarquable pour les deux types de granulats. Il est à noter que le liège expansé a conduit à des pertes de résistance plus importante.

► **(Moreira A et coll., 2014)** [52], ont étudié différentes caractéristiques des chapes à base de granulats de liège (ciment, sable, liège et de l'eau). Ils ont trouvé que l'addition du liège affecte les propriétés des chapes par une diminution de la masse volumique, de la résistance à la compression et de la conductivité thermique.

► **(Chadi Maalouf et coll, 2015)** [53], ce travail porte sur les mortiers de liège. Les auteurs ont expérimenté deux doses de substitution en liège, 50% et 75% par rapport au sable. La conclusion révélée de cette étude est que la composition de 75% a permis la réduction de la

consommation d'énergie de 29% en comparant avec la consommation d'énergie des brique creuse.

► **(Ziregue A et coll., 2016)** [54], ont étudié un béton à base des chutes de granulats de liège provenant de la fabrication des panneaux d'isolation. Ils ont trouvé qu'il existe un effet significatif de l'ajout des granulats de liège sur la diminution de la densité du béton et sur l'amélioration de l'isolation thermique ainsi que sur la diminution des performances mécanique.

► **(Boussetoua H et coll., 2017)** [55], ont trouvé que l'augmentation de la quantité du liège dans un béton (liège, sable, ciment et eau) a tendance à diminuer la densité et à réduire la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Ils ont conclu qu'un béton de liège peut être utilisé comme un isolant thermique ou comme un matériau structurel selon sa teneur en liège.

Conclusion

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons légers, leurs définitions et classement ainsi ses caractéristiques physico-mécaniques. La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Le choix des granulats légers repose sur ses caractéristiques particulières afin de fabriquer un produit rempli les fonctions recherchées.

Nous avons choisies les granulats de liège expansé pour fabriquer une série du composite léger, car ils font partie des granulés légers fabriqués en Algérie, d'origine végétale, sont obtenus à partir des chaines de lièges, ils sont employé en remplacement total ou partiel des agrégats usuels. Ces agrégats artificiels sont légers et mieux adaptés aux conditions économiques du monde moderne pour alléger et améliorer certaines caractéristiques des bétons.

Chapitre 2

Comportement au feu du béton

II.1 INTRODUCTION

Le béton est spécifié dans les bâtiments et dans les projets de génie civil pour plusieurs raisons: question de coût, de vitesse de construction, d'esthétique ou d'apparence architecturale. Néanmoins, un des bénéfices majeurs, inhérent au béton, est sa performance en cas d'incendie et ce, sans sur coût, élément qui peut s'avérer prédominant au regard des facteurs affectant le processus de décision lors de la conception d'un projet 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.

Dans ce chapitre nous parlons de la physique de l'incendie, Comportement au feu du béton et les effets des hautes températures sur les éléments constitutifs et les principales propriétés physiques et thermiques du béton.

II.2. Terminologie feu et incendie

Un feu est une combustion [56]. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie, il devient une combustion incontrôlée. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un **i**ncendie**.** Il y a une différence fondamentale entre feu et incendie. Les experts du feumaîtrisent une combustion contrôlée qui répond au scénario défini par un programme thermique prédéterminé. On les trouve dans l'industrie du verre, celle de la céramique et autres, dans les laboratoires d'essai également, tous lieux où des feux sont réalisés dans des fours ou enceintes d'essai, où les fumées sont canalisées pour ne pas incommoder les opérateurs. Les experts de l'incendieque sont les sapeurs pompiers doivent, eux, tenter de maîtriser une combustion incontrôlée qui répond à un scénario parsemé d'imprévus, avec des vies humaines qui doivent être secourues, qui doivent aussi secourir, intervenir… [57].

II.3. Physique de L'incendie

II.3.1. Le triangle du feu

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance [58], il faut la présence conjuguée de trois éléments : l'oxygène (21 % en volume d'air), des matériaux combustibles et une source de chaleur. Ils constituent ce qu'il est convenu d'appeler le triangle du feu**,** représenté à la **figure II.1** ci-dessous. Les deux premiers éléments entrent en combustion lorsque la température d'inflammation est atteinte. La combustion du carbone produit du gaz carbonique CO2 et, si l'oxygène vient à manquer, elle produit le gaz bien connu, très dangereux pour l'être humain, le CO. [59]



Figure: II.1. Triangle du feu [60]

II.3.2. les phases de Le développement d'un incendie

Une fois que le feu est initié par la présence des trois éléments qui forment le triangle de feu il se développe un incendie suivant deux phases principales, une phase de développement pendant laquelle la température s'élève puis une phase de décroissance où cette température va diminuer. Les différentes phases d'un incendie réel sont représentées sur la **figure II.2** et comportent les quatre phases suivantes : [61]

►**Première phase "Croissance de Feu" :** Au cours de cette phase, le feu est localisé son développement et sa propagation peuvent être facilement contrôlés s'il est rapidement découvert et si une efficace lutte contre l'incendie est activée. En contrepartie, si le feu localisé est suffisamment alimenté en matériau combustible, et s'il y a une offre suffisante d'oxygène, le feu peut se généraliser en conduisant à un "flash over". Le principal danger à ce stade est le risque pour la sécurité des personnes en raison de la production de grandes quantités de fumée et de gaz toxiques par le feu.

►**Deuxième phase "Embrasement généralisé ou flash over" :** Les gaz chaud accumulés portent les combustibles présents à leur température d'inflammation et l'ensemble du volume s'embrase brutalement (flash over). La présence de gaz inflammables peut également provoquer des déflagrations plus ou moins violentes, l'incendie se propage brutalement en fonction de la circulation de l'air et des combustibles mobilisables. Après cette phase, la température de la flamme augmente rapidement.

►**Troisième phase "Embrasement stable":** Dans cette phase, la combustion est caractérisée par un régime d'embrasement presque stable, et la vitesse de combustion sera contrôlée par la ventilation, l'incendie atteint son point maximal.

►**Quatrième phase "Retombée du feu" :** Après une période de feu continu, les matériaux les plus combustibles seront consommés et la vitesse de combustion commence à diminuer.

Le feu finit par décroître quand tous les matériaux combustibles dans l'enceinte de feu sont consommés.

La sévérité du feu et la durée de ces phases dépendent de plusieurs paramètres : [61]

- ♦quantité et répartition des matériaux combustibles (charge incendie).
- ♦vitesse de combustion de ces matériaux.
- ♦conditions de ventilation (ouvertures).
- ♦géométrie du compartiment.
- ♦propriétés thermiques des parois du compartiment.
- ♦mesures actives de lutte contre l'incendie.

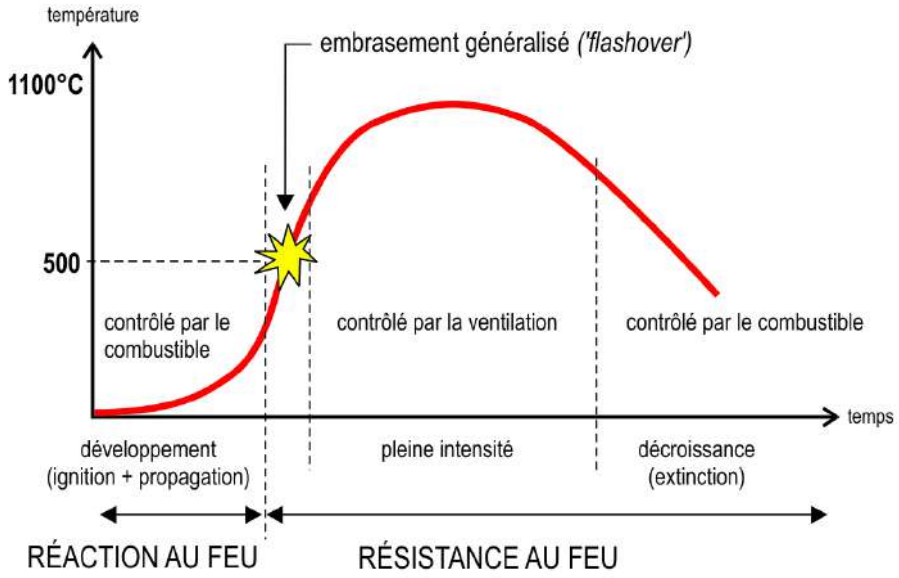


Figure II.2 phases de développement d'un incendie [57].

II.3.3. Courbes températures-temps normalisées

Les courbes températures- temps sont des courbes conventionnelles, normalisées, censées se rapprocher de celle qui se développe lors d'un incendie réel. Ces courbes sont établies à partir de l'expérience sur des feux réels, elles sont utilisées pour des essais en laboratoire sur des matériaux et des éléments de construction. Les courbes températures-temps différent d'un pays à un autre et dépendent de la destination de la structure. Parmi ces courbes on peut citer : [62]

II.3.3.1. Courbes nominales – la courbe ISO 834

La courbe ISO 834 (reconnue internationalement), dite d'incendie conventionnel, est une courbe qui est censée représenter un scénario d'incendie développé dans un bâtiment, Elle présente une augmentation continue et logarithmique avec le temps (**figure II.3**). Cette courbe atteint environ 500 °C après seulement 3 minutes, 800 °C après 30 minutes et plus de 1000 °C après 90 minutes. L'équation régissant la variation de cette courbe est:

La courbe standard ISO : Ø g= 20 + 345 log10(8t+1)

Avec Ø g= température des gaz dans le compartiment en °C, T = temps en minutes

II.3.3.2. La courbe d'hydrocarbures

C'est une courbe qui tient compte de la sévérité lors d'un incendie sur les ouvrages de pétrochimie de certains combustibles caractérisés par un taux de combustion élevé, tels que l'essence, les produits chimiques, etc. Cette courbe est applicable dans le cas de petits incendies liés aux produits pétroliers tels que les incendies de réservoirs de voiture, camions citernes transportant du fuel, de l'essence ou certains produits chimiques (**figure II.3**). Cette courbe est caractérisée par une augmentation de la température beaucoup plus rapide que la courbe ISO 834, et elle se stabilise à 1100°C. L'équation caractérisant la variation de cette courbe est:

Ø g =20+1080. (l-0,325. $e^{-0,167t}$- 0,675. $e^{-2,5t}$)

Les courbes d'hydrocarbures plus sévère sont été mises au point plus récemment suite à la vague d'incendies majeurs dans les tunnels, qui ont indiqué que des scénarios de feu plus sévères devaient être considérés. Les Pays-Bas ont mis au point la courbe « RWS » simulant le comportement de camions citernes en feu transportant de l'essence avec une puissance calorifique de 300 MW, générant une température de 1350 °C et causant un feu d'une durée de 2 heures. Les Pays-Bas se sont dotés de cette courbe comme référence de calcul thermique réaliste et indispensable pour garantir la tenue de leurs tunnels passant sous leurs ouvrages hydrauliques. [57]

Les éléments en béton s'accommodent sans problème d'un feu ISO d'1 heure. Une résistance supérieure peut être obtenue sans difficulté, ce qui est très loin d'être le cas des éléments métalliques non protégés. Après 10 à 15 minutes, l'acier atteint 500 à 600 degrés et sa résistance chute fortement. Il existe des plaques et des peintures isolant l'acier, mais une mauvaise exécution de chantier, une dégradation de ces matériaux rapportés peuvent entraîner des conséquences dramatiques. [57]

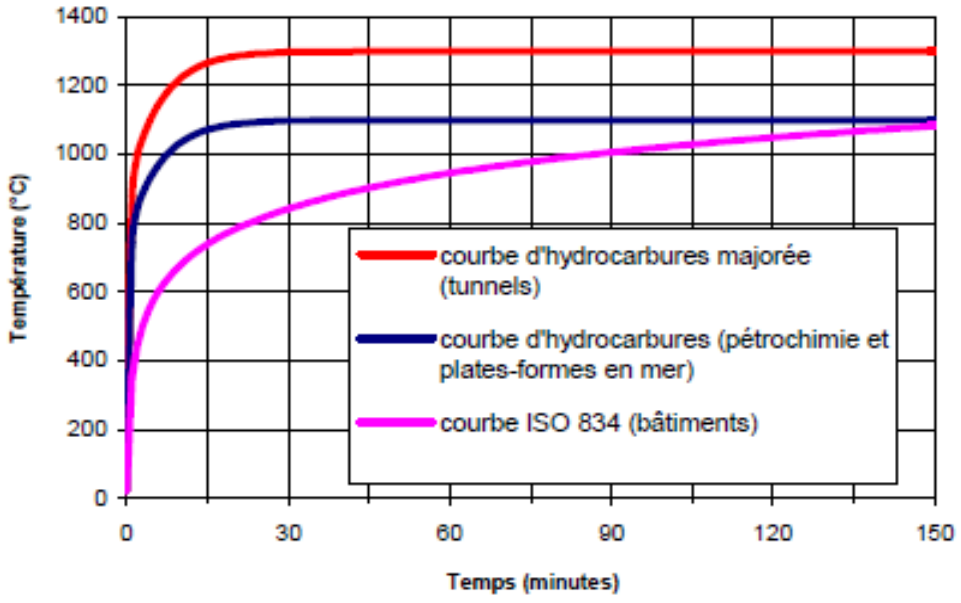


Figure II.3. Courbes température-temps ISO 834 et HC. [57]

II.4 Réaction et résistance au feu

La réaction au feu[63] s'applique aux matériaux de construction. Elle mesure l'ensemble des propriétés des matériaux de construction en rapport avec la naissance et le développement d′ un incendie. Elle est caractérisée par le potentiel calorifique, la non combustibilité, l'inflammabilité, le mode de propagation des flammes à la surface du matériau, éventuellement par d'autres propriétés comme la formation de fumées et la production de gaz toxiques. [58]

La résistance au feu s'applique aux éléments de construction. Elle constitue une mesure de leur aptitude à remplir le rôle qui leur est dévolu, malgré l'action d'un incendie. Ces deux notions sont donc totalement différentes. La première intervient à la naissance et au début du développement de l'incendie alors que la seconde se manifeste dans la phase de pleine intensité. Aucun des deux domaines ne peut être négligé en prévention incendie. Les prescriptions comportent donc des exigences relatives aux deux aspects. [57]

Ainsi le bois [58] est un matériau qui ne présente pas une bonne réaction au feu – le bois brûle – alors que des poutres ou des colonnes en bois sont des éléments de construction présentant une résistance au feu significative.

Par contre l'acier est un matériau qui présente une bonne réaction au feu, alors que les éléments en acier sont des éléments de construction présentant une très faible résistance au feu.

Enfin le béton, lui, cumule les deux qualités. C'est pourquoi il est " le " matériau de prédilection en matière d'éléments de construction où est recherchée une bonne tenue en cas d'incendie. [57]

Les choix qui améliorent la résistance au feu des éléments de construction offrent, par leur caractère plus permanent, plus de sécurité pour la prévention contre l'incendie. Chaque modification (rénovation, agrandissement) est soumise à un nouveau permis de bâtir ou à une révision du permis d'exploiter où les services d'incendie sont consultés. [57]

Il n'en est pas de même pour les parachèvements, en particulier dans les immeubles d'habitation, où le propriétaire/locataire de l'immeuble peut modifier le contenu du bâtiment et la nature des revêtements à un point tel que la charge et le risque d'incendie sont fondamentalement modifiés. [57]

II.5. comportement au feu des structures en béton lors d'incendies

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il estexposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi,

pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable. [64]

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est resté debout malgré le feu qui s'est propage à de nombreux étages. Le feu à démarré au 21^{ième} étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brulé [57].

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003. Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles [57].



Figure II.4. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [57].

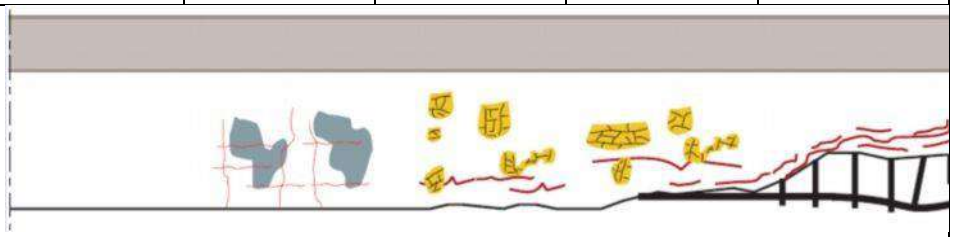
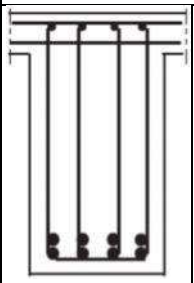
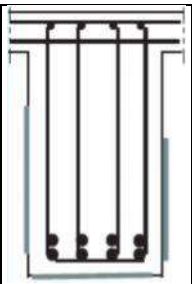
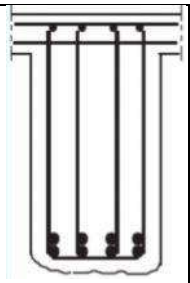
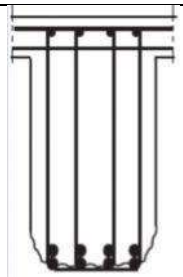
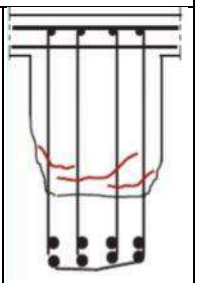
Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C [57]. On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C.

Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [65].

Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations.

Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le **Tableau II.1.**

Tableau II.1. Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie [65].

Classe de désordres	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Vue en élévation d'une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	*Aucun. état de référence de béton sain.*	*Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faïençage).*	*Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).*	*Disparition du Béton d'enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.*	*Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.*





a- classe2 b- classe3 c- classe4

Figure II.5. Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [65].

II.6.La résistance au feu des éléments structuraux

L'aptitude d'une construction en béton à conserver sa fonction portante pendant la durée exigée est exprimée comme suit : [57]

$$E_{d,fi(t)} \leq R_{d,fi(t)} \text{ …….(1)}$$

Où :

$E_{d,fi(t)}$ est la valeur calculée de l'effet des actions, des sollicitations, au moment (t) de l'incendie ;

$R_{d,fi(t)}$ est la valeur de calcul de la résistance de la construction aux températures élevées au moment (t).

La résistance au feu des éléments structuraux est mesurée lors d'essais sous la sollicitation thermique décrite par la courbe ISO. Elle comporte les trois critères qui s'appliquent à la majorité des éléments de construction :

- la stabilité **R** (capacité portante).
- l'étanchéité aux flammes **E.**
- l'isolation thermique **I.**

Dans certains états membres, l'exigence de performance **W** (rayonnement limité) peut être exigée. Say ajoutent des critères complémentaires : **M** (résistances aux impacts), **C** (fermeture automatique) et **S** (étanchéité aux fumées) ainsi que des suffixes apportant des précisions relatives à la configuration d'exposition au feu et au domaine d'application des résultats d'essais. Le degré de résistance REI de l'élément est le temps immédiatement inférieur à la duré observée, choisi parmi les valeurs de 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360 minutes, [66],[67].

- **Le critère « stabilité » (R)** d'un élément indique le temps durant lequel est assurée sa résistance mécanique sous charge statique définie au et durant lequel ses déformations restent compatibles avec sa fonction dans la stabilité de la construction (généralement 1/30ème de sa portée). Il correspond à la dénomination française de « Stable au Feu SF ». [57]

- **Le critère de « l'étanchéité aux flammes »(E)** n'est plus satisfait lorsqu'une nappe de coton, placée à la distance de 2 à 3 cm d'une ouverture, s'enflamme spontanément.

  La dénomination française « Pare Flamme PF » correspond aux critères RE. .

- **Le critère de « l'isolation thermique » (I)** est satisfait si l'élévation de température de la surface non exposée de l'élément reste inférieure à 140 °C en moyenne et à 180 °C ponctuellement.

La dénomination française « Coupe-feu CF » correspond aux critères REI. Ces deux derniers critères permettent d'éviter l'inflammation de matériaux en contact avec cette face.

Dans les éléments structuraux porteurs comme les poutres, colonnes, murs et dalles, la résistance R empêche l'effondrement de la structure. En général, la fonction séparative (E et I) s'applique aux éléments qui font partie intégrante des parois et de l'enveloppe du compartiment : ainsi les murs et les dalles. Pour la fonction de capacité portante, il convient d'évaluer tous les modes de rupture, tels la rupture par flexion, par effort tranchant, par flambement ou rupture de l'ancrage des armatures des éléments en béton.

L'essai avec la courbe ISO ne prend pas en compte les liaisons aux éléments voisins, qui permettent des redistributions de contraintes vers des sections ou des éléments moins exposés Certains phénomènes, surtout la dilatation d'ensemble de la structure sous l'influence des hautes températures, ne sont pas considérés dans l'essai sous courbe ISO, alors qu'ils peuvent être déterminants dans la réalité.

Les éléments en béton des bâtiments peuvent satisfaire à toutes les classes de résistance au feu définies par la Directive Européenne relative à la " Sécurité à l'incendie » " sans mesure de protection complémentaire de quelque nature que ce soit (revêtement de plâtre, peinture intumescente…).

Attention ! Qu'un élément structural ait résisté à un incendie ne signifie pas que l'élément n'a pas subi de dégâts, ni que l'élément ne doit pas être remplacé. Cela signifie seulement que les fonctions structurales de l'élément ont été remplies sous les charges thermiques et mécaniques supportées.

Le calcul pour une période exigée de résistance au feu, n'explore pas le comportement de la structure au-delà de cette période ni, à fortiori, après refroidissement de la structure à température ambiante.

Les essais comportent des limites : coûteux, ils ne permettent que de tester des éléments de longueur limitée, généralement sans pouvoir, à leurs extrémités, reproduire les liaisons à la structure. [57]

Afin d'éviter [68] qu'un essai de résistance au feu ne soit nécessaire pour chaque produit de construction, des méthodes de calcul ont été mises au point pour définir les sollicitations thermiques et mécaniques et ainsi évaluer la résistance au feu des structures en béton, en acier, en acier/béton mixte, en bois, en maçonnerie et en aluminium. Ces méthodes de calcul se retrouvent dans la partie des Euro-codes relative au comportement au feu. L'objectif de ces documents est de définir d'une manière uniforme à travers toute l'Europe la tenue aux feux des structures.

Sur base de ces normes de calcul, une norme produit européenne a été élaborée spécifiquement pour chaque type d'élément. Ainsi les faux plafonds, les gaines techniques, les façades, les murs, les clapets, les dalles alvéolées en béton… disposent d'une norme spécifique. Cette disposition n'était pas celle qui prévalait en Belgique où, précédemment, l'ensemble de ces éléments était traité au sein d'une seule et même norme. [57]

Les dénominations R, E et I ne sont pas reprises dans les normes de base belges mais elles sont reprises actuellement au plan international et notamment par le CEN, le Comité Européen de Normalisation. La dénomination Rf en heures de la norme NBN 713.020 sera adaptée à la dénomination REI en minutes, suivant les normes CEN. Les textes sont déjà préparés dans ce sens au SPF de l'Intérieur.

A présent, les essais au four ont été normalisés au niveau européen, afin de veiller à leur reproductibilité d'un four à l'autre.

Précédemment, les résultats pouvaient varier sensiblement [69], par exemple de deux à plus de cinq heures pour un même élément de plancher alvéolé dans différents fours. En comparant les élévations de température [58] mesurées sur la face exposée d'un élément identique placé dans 14 fours européens respectant la courbe ISO, la température de 800 °C est atteinte après des temps compris entre 28 et 48 minutes. Les fours belges sont parmi les plus sévères.

Les différences étaient dues, entre autres, au rayonnement des flammes et des parois du four, à la surpression imposée dans le four, aux conditions d'appuis. La Belgique était la seule à imposer une valeur aussi élevée de surpression des gaz (20 Pa). Cette différence modifie de façon significative les durées de résistance au feu des éléments qui ont une fonction de séparation mais pas la résistance des éléments portants entièrement entourés par le feu. [57]

II.7. Comportement au feu de différents matériaux de construction

II.7.1. Classification des matériaux selon leur résistance au feu

Les matériaux de construction sont généralement classifiés selon leur :

- Réaction au feu : participation au développement d'un feu, selon son caractère plus ou moins combustible
- Résistance au feu : capacité du matériau à continuer de remplir sa fonction sous l'action de l'incendie
- Stabilité au feu : durée pendant laquelle l'élément résiste mécaniquement (indice SF selon NF ou R selon EN)
- Degré pare flamme : durée pendant laquelle l'élément reste étanche aux flammes, aux fumées et aux gaz (indice PF selon NF ou E selon EN)
- Degré coupe-feu : durée pendant laquelle l'élément assure une isolation thermique suffisante pour ne pas échauffer la face non exposée au foyer (indice CF selon NF ou I selon EN)

Tableau II.2: Classification des matériaux(NF EN 13501-1, 2013) [70]

AUTRES PRODUITS QUE SOLS				SOLS		
CLASSES SELON NF EN 13501-1			EXIGENCE	CLASSES SELON NF EN 13501-1		EXIGENCE
A1	-	-	Incombustible	$A1_{fl}$	-	Imcombustible
A2	s1	d0	M0	$A2_{fl}$	s1	M0
A2	s1	d1	M1	$A2_{fl}$	s2	M3
A2	s2 s3	d0 d1		B_{fl}	s1 s2	
B	s1 s2 s3	d0 d1		C_{fl}		
C	s1 s2 s3	d0 d1	M2	B_{fl}	s1 s2	M4
D	s1 s2 s3	d0 d1	M3 M4 (non gouttant)	s : fumées ; d : débris enflammés. Les classes admissibles sont définies par une combinaison de niveaux de performance lorsqu'il est fait appel à classification(s) supplémentaire(s)		
Toutes classes autres que E-d2 et F			M4			

II.7.2. Le bois

- Le bois non traité est généralement classé D (M3 ou M4) : mauvaise réaction au feu
- Brûle rapidement en surface, forme une couche de charbon (mauvais conducteur thermique) qui isole le cœur de la pièce : stabilité au feu pas si mauvaise
- Faible conductivité thermique du bois : degré pare-flammes moyen
- Avec traitement (ignifugation, enduits, enrobements, revêtements) possibilité d'obtenir une bonne réaction au feu (A2 ouA1). [71]



Figure : II.6. (Conseil national de recherches Canada) [72]

II.7.3. Le plâtre

- Incombustible : très bonne réaction au feu
- Mauvais conducteur thermique (forte porosité)
- Consomme de la chaleur lors des estrans formations minéralogiques : bon coupe-feu.

►Entre 80 et 200 °C :

- $CaSO_4H_2O \rightarrow CaSO_4\ 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O$
- $CaSO_4 0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4(III) + 0{,}5H_2O$

►*Entre 350 et 400* °C

- $CaSO_4(III) \rightarrow CaSO_4\ (II)$

►Entre 600 ET 750 °C

- $CaCO3 \rightarrow CaO + CO2$

►Au dessus1180 °C

- $CaSO_4\ (II) \rightarrow CaSO_4\ (I)$

II.7.4. Les métaux

- Incombustible : très bonne réaction au feu
- Très bon conducteur thermique : très mauvais degré coupe-feu
- Chute importante des propriétés mécaniques : mauvaise stabilité au feu
- Comportement à chaud (pendant l'incendie) différent du comportement après refroidissement



Figure: II.7. Flambage des profilés en acier. [73]

II.7.5. La maçonnerie

- Pierres taillées, terre cuite, blocs bétons
- Matériaux incombustibles : très bonne réaction au feu
- Réactions physico-chimiques qui modifient les propriétés des matériaux
- Instabilités mécaniques : écaillage
- Évolution des propriétés mécaniques
- Instabilités mécaniques

II.7.6. Le béton

- Matériau incombustible : bonne réaction au feu
- Conductivité thermique faible : bon degré coupe-feu
- Bon comportement mécanique aux hautes températures : bonne stabilité au feu



Figure II.8. Tunnel sous la Manche, 1996et2008. [73]

II.8.La restauration des structures béton

Une construction en béton exposée à des températures élevées peut être endommagée. Dans certains cas, les dégâts peuvent être réparés. Dans d'autres cas, ils sont irréversibles et la construction doit être démolie. [57]

II.8.1 Méthodes d'inspection

Après un incendie, la première chose à faire est de procéder à une évaluation de l'intégrité structurale de la construction en béton. Cette évaluation déterminera si on peut encore pénétrer dans le bâtiment en toute sécurité. Ensuite, il faut évaluer l'ampleur des dégâts et voir si le bâtiment peut encore être réparé. [57]

- **Constatation visuelle**

Lors d'une première inspection, l′écaillage, l'éclatement du béton, la formation de fissures importantes et la déformation de la construction sont relativement faciles à détecter. Un simple coup d'œil suffit. [57]

Le béton est fabriqué à base de granulats calcaires ou siliceux : soumis à échauffement, sa couleur change. Le changement de couleur est imputable à la présence de certains composants ferrugineux. De ce fait il varie selon le type de béton. Cette modification de couleur est permanente : il est donc possible, sur base de la couleur du béton, d'évaluer approximativement la température maximale atteinte pendant l′incendie. Les différentes couleurs du béton sont les suivantes :

- rose ou rouge pour des températures comprises entre 300 et 600 °C ;
- gris blanchâtre pour des températures comprises entre 600 et 900 °C ;
- terne ou jaune clair (couleur peau de chamois) pour des températures excédant 900°C

Ceci implique qu'il est également possible d'évaluer la résistance du béton après incendie. Dans la pratique, on peut affirmer qu'un béton présentant une coloration rose est suspect. Une température de 300 °C correspond en effet, grosso modo, à celle d'un béton qui a perdu une partie permanente de sa résistance. Une coloration gris blanchâtre indiquera, elle, un béton fragile et poreux. [57]

Par ailleurs, une déformation permanente de la construction indique une surchauffe de l′armature. [57]

- **Méthodes d'essais**

On dispose des méthodes suivantes :

- examen de la résistance à la compression, par exemple avec un scléromètre ;
- réalisation de mesures acoustiques, en vue de détecter la formation de fissures internes ;
- forage et extraction de carottes pour effectuer à la fois des essais de compression et un examen tant pétrographique que microscopique.

II.8.2 Possibilités de réparation

Après un incendie, il est parfois nécessaire de procéder à d′importants travaux de réparation. Pour la réparation d'une construction en béton, il est pratiquement impossible de fournir des solutions standards. Il faut examiner la situation cas par cas et opter pour la meilleure solution. A cet égard, les facteurs suivants doivent néanmoins être pris en considération : [57]

- la résistance de la construction après incendie.
- les déformations permanentes.
- la durabilité après incendie et réparations.
- l′aspect esthétique.

Le choix de la solution est largement dicté par des considérations d'ordre économique : quelle est la solution économiquement la plus avantageuse ? Remplacer ou réparer les éléments endommagés ? En règle générale, pour une construction en béton qui, suite à un incendie, présente une déformation, la solution la plus logique consiste à remplacer les éléments de construction ou à démolir le bâtiment.

Lorsque l′armature n'a pas été soumise à une chaleur trop élevée, le décapage du béton endommagé jusqu'au béton sain sera largement suffisant. Dans la pratique, une bonne solution consiste à réparer le béton endommagé à l'aide de béton projeté, pour autant que ce travail soit effectué par des hommes de métier. En collant sur la surface endommagée du béton des plats métalliques ou des bandes de fibres de carbone, il est parfois possible de renforcer une armature affaiblie localement. Ce travail doit également être exécuté par des spécialistes. Dans le cas de dégâts à l′esthétique du bâtiment, la solution la plus évidente consiste à appliquer un revêtement. [57]

Le béton projeté est souvent utilisé pour des réparations, des rénovations ou pour une construction de type particulier. Dans le cadre du thème ″ La sécurité incendie et les structures en béton ″, le béton projeté est plus particulièrement utilisé pour la réparation d'éléments de structure où l′armature a été mise à nu. Dans le cas du béton projeté, le mortier est projeté sous pression. On distingue deux techniques de projection : par voie sèche et par voie humide. [57]

La projection par voie sèche

Le mortier sec est dirigé vers une conduite haute pression. Celle ci transporte le mélange sec vers la tête de projection où l′injection d'eau le transforme en béton qui est ensuite projeté sur la surface à réparer. Il s'agit d'une technique relativement compliquée qui nécessité un appareillage lourd. Elle est uniquement appliquée pour des éléments volumineux.

La projection par voie humide

Avant projection, le mélange de ciment et de sable, éventuellement de granulats, est introduit dans un malaxeur où il est mélangé avec de l'eau. Ce mélange est ensuite projeté sur la surface à traiter, à l'aide d'une pompe à piston plongeur, et mis en œuvre. Cette technique est particulièrement appropriée pour de petits éléments et pour des éléments dans lesquels de minces couches doivent être projetées. C'est une technique simple qui nécessite un appareillage plus léger. [57]

II.9. .Comportement au feu du béton

Lorsque le béton est exposé à des hautes températures, le chargement thermique imposé conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton induisant des phénomènes très complexes. Parmi les plus importants figurent la modification de la teneur en eau, la décomposition chimique de la pâte de ciment et le changement de pression interne. Ces mécanismes sont souvent considérés comme les principales causes des changements au niveau de la microstructure du béton qui entrainent des modifications des propriétés thermiques, hydriques et mécaniques. Dans ce paragraphe, nous parlons des effets des hautes températures sur les éléments constitutifs et les principales propriétés physiques et thermiques du béton. Puis, nous attachons la plus grande attention sur ce que peuvent engendrer ces modifications sur le comportement mécanique et les déformations thermiques du béton. [74]

II.10. Effets de la température sur la structure et les propriétés thermiques et physiques du béton

II.10.1. Evolution des composants et de la structure du béton

II.10.1.1. Evolution de la pâte de ciment

Au cours de l'échauffement du béton, on observe de nombreux phénomène physicochimiques et des transformations qui modifient sa microstructure. Ces modifications ont un effet sur les propriétés thermiques, hydrique, et mécaniques du béton [75].

L'eau joue un rôle prépondérant dans le comportement de la matrice cimentaire. Sous l'effet de la température, elle se dilate puis s'évapore en entrainant une déshydratation des hydrates formés. Les principales transformations de la matrice cimentaire décrite par Schneider et Noumowé avec une élévation en température sont présentées dans le **tableau II.3**.

Tableau II.3. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température [76] [77] [78] [79].

Entre 30 et 120°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170°C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse CaSO4.2H2O. Fusion des fibres polypropylène à 171°C
Autour de 180°C et jusqu'à environ 300°C :	On a la première étape de la déshydratation. Il y a rupture du gel de ciment la chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement

	commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370°C :	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques). Clivage des granulats silico-calcaires à 300°C.
Entre 450 et 550°C	Il y a une décomposition de la portlandite en chaux libre : Ca(OH) 2 CaO + H2O
Autour de 570°C (573°C)	Transformation de structures de quartz α en quartz β, accompagnée d'un gonflement
Entre 600 et 700 °C	Décomposition des phases de C-S-H et formation de β-C2S. c'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques.
Entre 700 et 900°C	Décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en CaCO3 CaO + CO2, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
Au dessus de 1300 et 1400°C	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

L'étude des résultats d'analyses thermiques différentielles (ATD) et d'analyses thermo gravimétriques (ATG) permet de détecter l'apparition de transformations chimiques se produisant au sein du béton porté à des températures élevées, et de suivre leurs progressions. Plusieurs auteurs ont présenté les résultats de ce type d'analyses réalisées sous diverses conditions

II.10.1.2. Evolution des granulats

Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Les granulats sont en principe inertes dans le béton à la température ambiante sauf cas de pathologie comme les réactions alcali-granulats, sous l'effet de la température, des modifications physico-chimiques se produisent également dans le granulat en fonction de leur nature minéralogique. Le facteur important du comportement du béton chauffé est la stabilité chimique et physique des granulats. Il est donc nécessaire de

connaitre le comportement des granulats à haute température. Les granulats les plus utilisées pour les ouvrages en béton sont les granulats siliceux et les granulats calcaires [80].

Comme le montre les **figures II.9.**et **II.10.**La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C [81]. Les granulats siliceux sont constitués de minéraux tels que le quartz, la calcédoine, l'opale, le silex. Dans la structure de ces minéraux contiennent de l'ordre de 20% d'eau combinée [82]. Cette eau, entre 120 - 600°C est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ de l'eau peut entraîner un clivage des granulats. Un autre phénomène concerne le quartz à 575°C. Un changement de phases avec un changement de volume de 1 à 5, %. Le quartz présent dans les granulats siliceux SiO4 est un édifice de tétraèdres (un atome de silicium entouré de 4 atomes d'oxygène) soudés par les sommets, en chaînes. C'est une forme stable à basse température de la silice. Au-dessus de 573°C à la pression ambiante une légère rotation de liaisons entre tétraèdres, conduit à une forme cristalline de symétrie hexagonale; le quartz β. La température de transition du quartz α-β peut augmenter avec la pression [83]. Ainsi ces deux phénomènes qui apparaissent dans les granulats à base de quartz, peuvent provoquer l'endommagement de la structure du béton.

Les granulats calcaires présentent un bon comportement thermique jusqu'à 700°C. Cette température est le début de la décarbonatation (CaCO3 CO2 + CaO) qui se produisent entre 600 et 900°C. Le CaO libre présent dans les bétons chauffés puis refroidis réagit avec l'humidité et se transforme en Ca(OH)2 en multipliant son volume par 2,5. Cette réaction peut expliquer la diminution de la résistance résiduelle (résistance mesurée après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de 700°C.

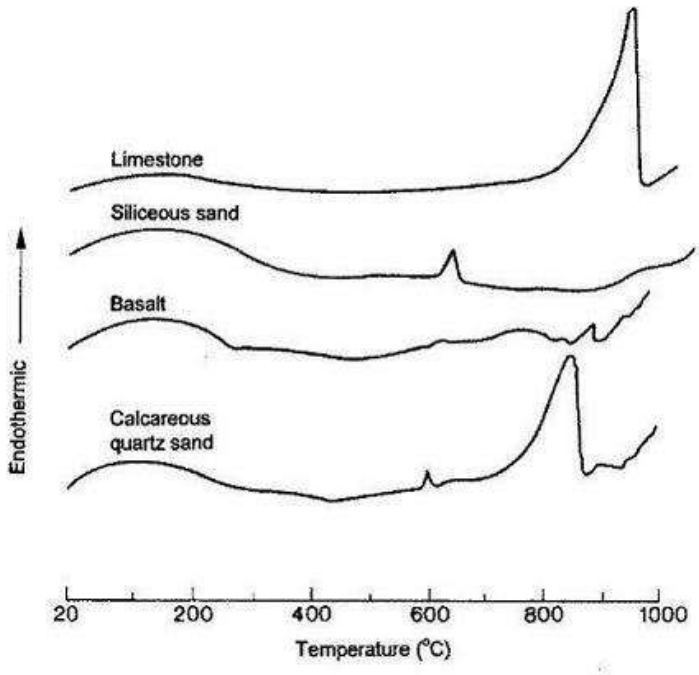


Figure II.9. Analyse ATD de 4 granulats généralement utilisés pour la confection des bétons [84].

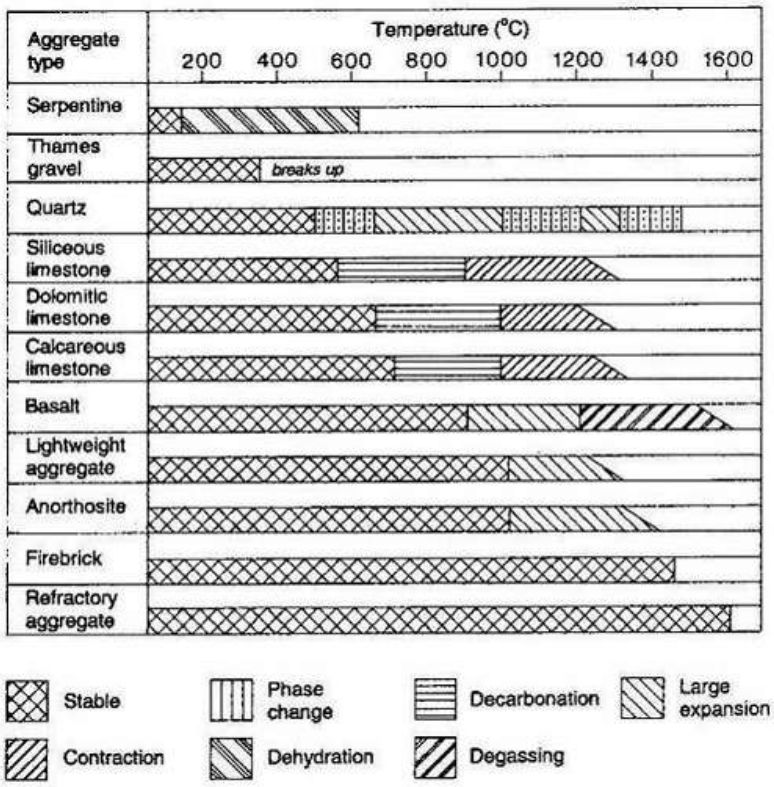


Figure II.10 études de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de quelques granulats en fonction de la température [84].

D'après les recherches menées par Schneider [85] et Khoury [86] et bien d'autres chercheurs Les propriétés d'un bon granulat du point vu de l'utilisation à haute température sont :

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

II.10.1.3. Evolution de l'interface pâte granulats

Dans les bétons, l'interface pâte-granulat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre cette zone est moins riche en gel de CSH. [87]

A haute température cette partie, appelée aussi l'auréole de transition, se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au d'el de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide

au niveau d cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par Diederichs et al en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats. [88]

II.10.2. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement

II.10.2.1. Densité apparente

D'après les travaux de Bazant and Kaplan, on observe une légère diminution de la masse volumique Pour tous les bétons entre la température ambiante et la température 400 °C à cause de l'expansion thermique du matériau et du départ de l'eau. [89] Voire **figure II.11.**

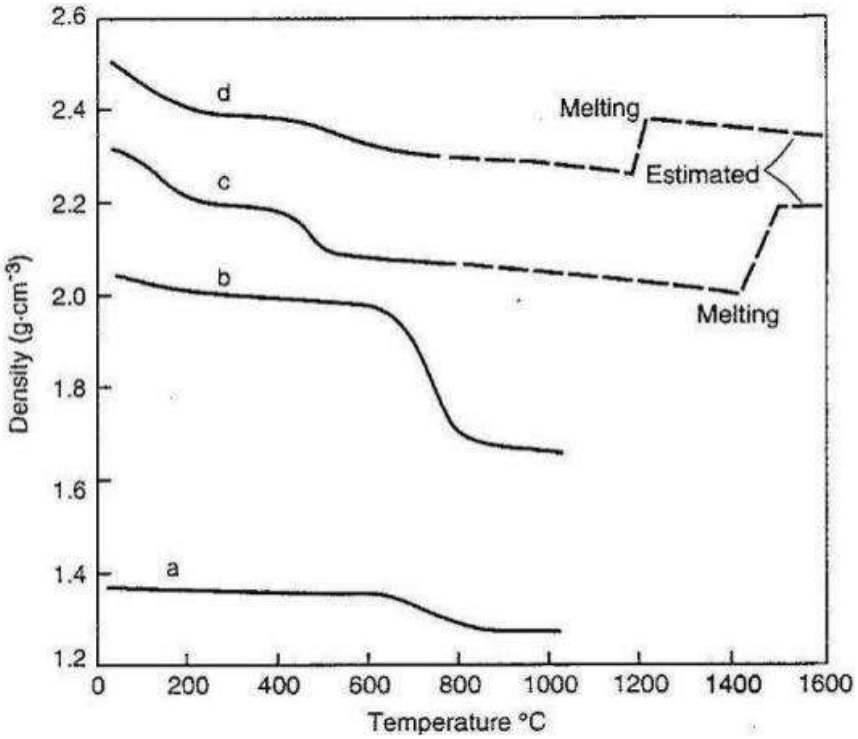


Figure II.11. Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avecdes granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite etd– basalte. [89]

Les roches d et c contenant du quartz, leur expansion à 573 °C provoque une diminution de la masse volumique des bétons. La forte baisse de la masse volumique dans le béton b est attribuée à la présence de granulats calcaires dans sa composition, ce qui peut entrainer un fort dégagement de CO2 à partir de 600 °C [89].

D'après ces résultats on peut conclue que :

- L'expansion thermique du béton et le départ d'eau par séchage et déshydratation de CSH et portlandite diminue la densité du matériau,

- La forte expansion à 573 °C des granulats contenant du quartz diminue la densité du béton,
- Le fort dégagement de CO2 qui accompagne la décomposition du carbonate de calcium à partir de 700 °C diminue fortement la densité du béton,
- La fusion du béton densifie le matériau, augmentant par conséquence sa masse volumique [89].

II.10.2.2. Perméabilité

Dans les travaux de Sliwinski et al. [90], il a été montré que la perméabilité du béton augmente avec la température de manière exponentielle. Les valeurs de la perméabilité ont ét obtenues pour un béton de granulats basalte chauffé à 1°C/min et refroidi à la température ambiante **(figure II.12).**

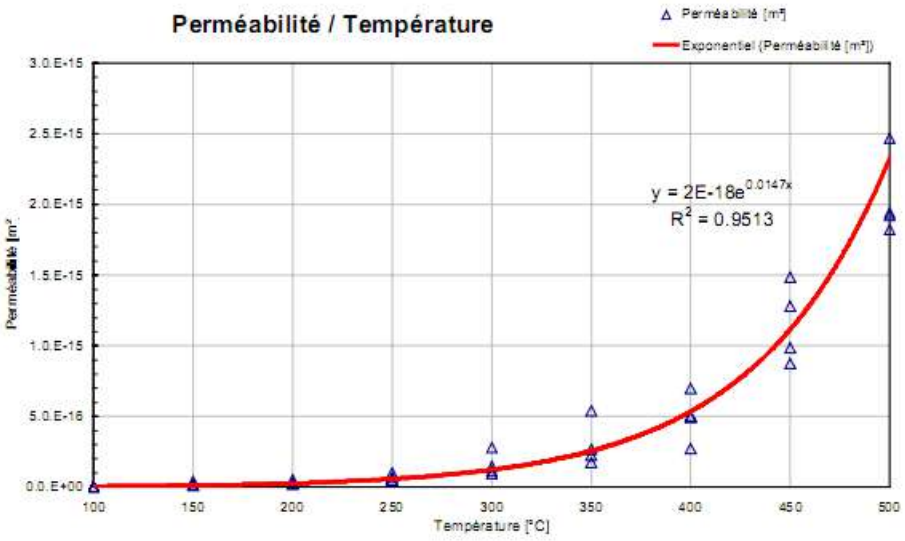


Figure II.12. Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique [90].

L'évolution de la perméabilité avec la température a été aussi étudiée dans le cadre du Projet National BHP 2000 [91]. La détermination de la perméabilité intrinsèque (k) a été réalisée à partir de la mesure de la perméabilité à l'azote (Ka) selon la méthode de Klinkenberg en utilisant la relation : $Ka = k\ (1+\frac{b}{p})$ ……. (2)

Où P est la pression moyenne et b un coefficient déterminé expérimentalement. La **figure II.13.** Montre qu'à 105°C la perméabilité intrinsèque du BHP est nettement inférieure à celle d'un BO Par contre, elle augmente plus rapidement avec la température pour le BHP que pour BO. A 350°C, le BHP a une perméabilité équivalente à celle du béton ordinaire.

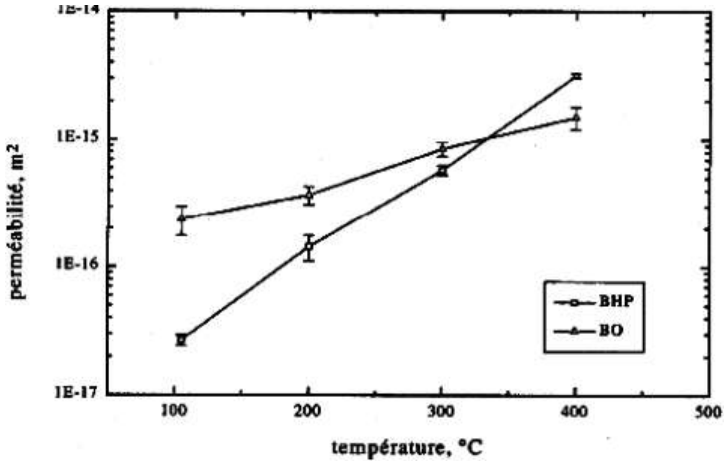


Figure II.13. Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement [92].

II.10.2.3. Perte de masse

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

La **figure II.14.**regroupe les résultats d'analyses thermogravimétriques (ATG), menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Globalement on observe entre 20°C et 200°C une perte de masse due à l'eau libre, entre 200 et 500°C une perte de l'eau liée chimiquement et au-delà de 500°C une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats [79**].**

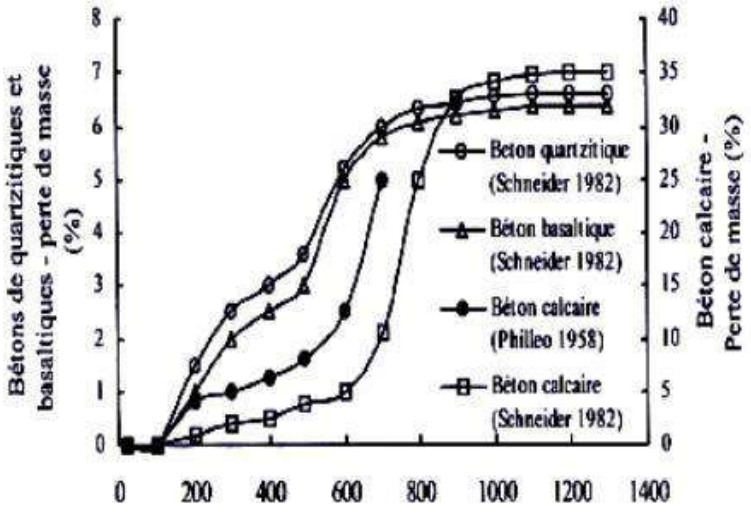


Figure II.14. Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température [79].

La perte de masse est plus importante dans un béton ordinaire (BO) que dans un béton à haute performance (BHP). En effet, le ratio E/C est de l'ordre de 0.5 pour un BO contre 0.3 pour un BHP.

La perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs :

- de la température ambiante à 120°C (150°C) : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires, [93],
- de 120°C (150°C) à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide. Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [93], [77].
- au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de la dé hydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [93], [83], [77].

II.10.2.4. Evolution de la porosité

La déshydratation reste un de phénomènes majeurs durant l'échauffement de la pâte de ciment. Elle change les hydrates en anhydres. Le volume des anhydres qui se créent est inférieur à celui des hydrates de départ. Ceci entraîne une augmentation de la porosité du système. La porosité totale augmente et la taille caractéristique des pores change [77]. Noumowé et al. [94] ont montré une augmentation de la porosité au mercure à 300°C avec un accroissement de la taille des pores. Pour Ye et al. [95], la porosité totale et la distribution des pores évoluent plus sur les pâtes de ciment des bétons à haute performances que celles des bétons ordinaires. Les travaux de Gaweska [77] confirment l'augmentation de la porosité en fonction de la température. Cependant, Gaweska note une croissance rapide avant 180°C puis une évolution progressive jusqu'à la température de 600°C. A 180°C, la porosité relative du BO augmente de 57% et celle du BHP de 98%. A l'inverse pour Kalifa et al. [96], la valeur de la porosité à l'eau évolue très peu entre 105°C et 400°C. Elle augment de 2.3% pour le BO et de 0.9% pour le BHP**.** Tsymbrovska observe l'évolution de la porosité totale à l'eau avec la température. Quel que soit le béton considéré, la tendance est identique, la porosité augmente régulièrement jusqu'à 450°C, puis de façon plus importante à partir de cette température. Cette évolution est attribuée à la détérioration de la pâte et de l'interface granulat/pâte, puis à la déshydratation de la Port landit [97]. Voir **figure II.15.**

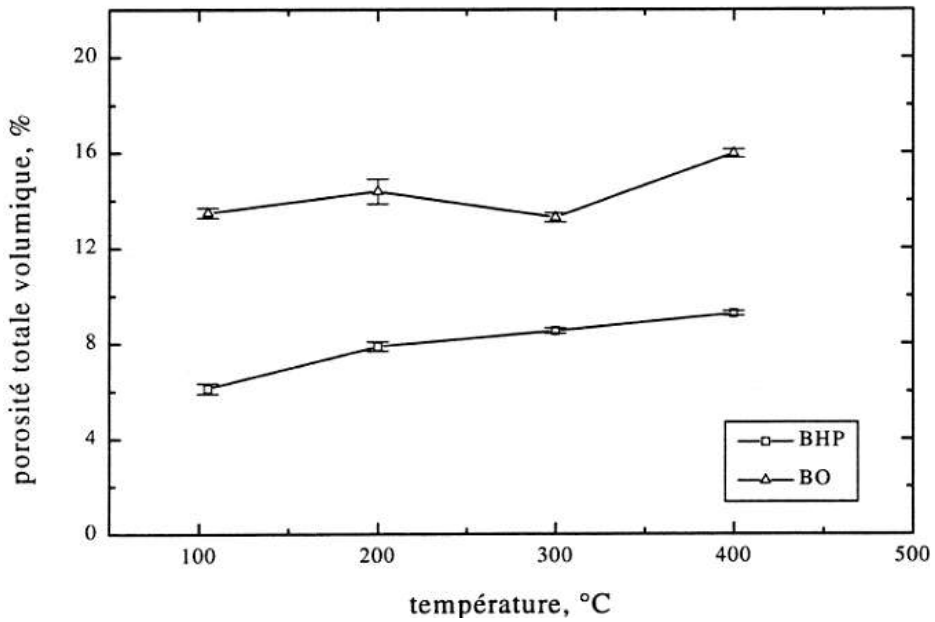


Figure II.15.Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire (Rc=36 MPa) et d'un béton à haute performance (Rc=110 MPa), d'après [97]

II.10.3. Effet de la température sur les comportements mécaniques des bétons

Le béton subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. Les résultats obtenus de différentes investigations sur le comportement du béton chauffé, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres. [87]

Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes…..

Les recherches menées jusqu'à présent sur les bétons à haute température ont visé principalement, l'amélioration de ses performances mécaniques à l'état durci aussi bien qu'à l'état frais. En revanche l'amélioration de ses performances vis-à-vis du comportement au feu reste un champ d'investigation assez peu développé. [87]

II.10.3.1. Résistance en compression à hautes températures

L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température a été le sujet de plusieurs investigations expérimentales. Cette évolution est affectée par de nombreux paramètres : nature du liant et des granulats, rapport agrégat/ciment, rapport E/C [85].

Phan dans ses travaux, rassemble les résistances en compression résiduelles obtenues au cours de ses essais e une partie des résultats obtenus par d'autres chercheurs. L'allure générale des courbes débute par une chute de résistance au voisinage de 100 à 150°C, suivi d'un accroissement de résistance entre 300 et 350°C, puis d'une chute de résistance continue avec la température au-delà de 350°C.(**figure II.16)** [98]

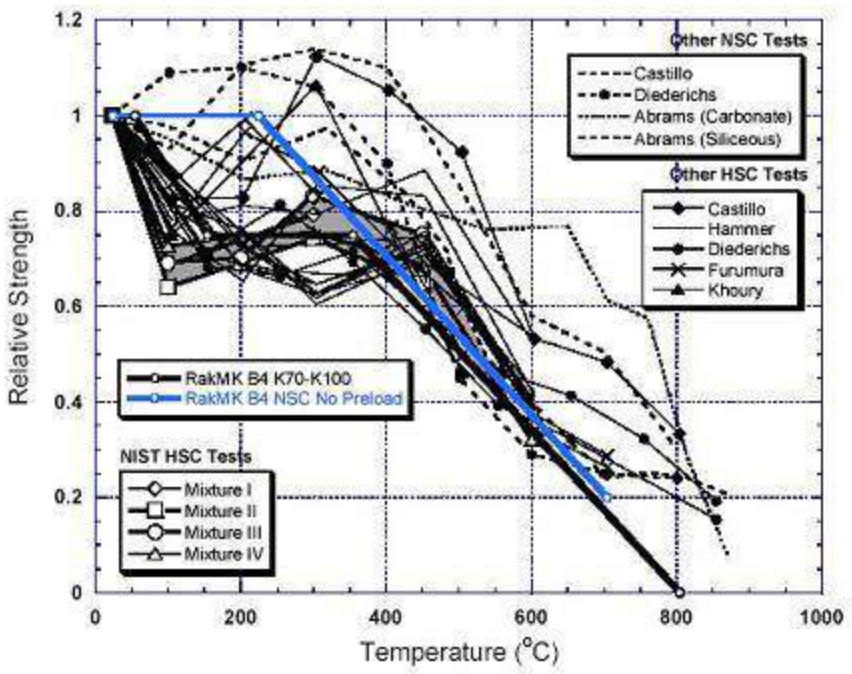


Figure II.16. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [98].

Khoury attribue la baisse de résistance enregistrée entre 100-150°C à un gain de fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles. [86]

D'après Dias [99] et Cast [100], le gain de résistance vers 300-350°C est dû à une augmentation des forces de liaisons entre hydrates et à un accroissement des énergies de surface. Les bétons à hautes performances (BHP) présentent un gain plus marqué et décalé vers les hautes températures par rapport aux bétons ordinaires (BO).

La raison de la baisse de résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Cette réaction de déshydratation étant chimiquement irréversible, la chute de résistance du béton est liée au degré d'hydratation de la matrice cimentaire. Cette explication est à nuancer dans la mesure où le clivage qui transforme le quartz α en quartz β dans des granulats siliceux à 573°C fragilise le granulat et peut entraîner également une chute des résistances mécaniques du béton [101].

AIFA et al(2018) ont obtenu des résultats similaires. Ils ont rapporté que l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons légers à base de polyester expansé en fonction de la température de chauffe diminue lorsque la teneur en polystyrène augmente et l'augmentation de la température de chauffe ainsi. **Figure II.17**. [19]

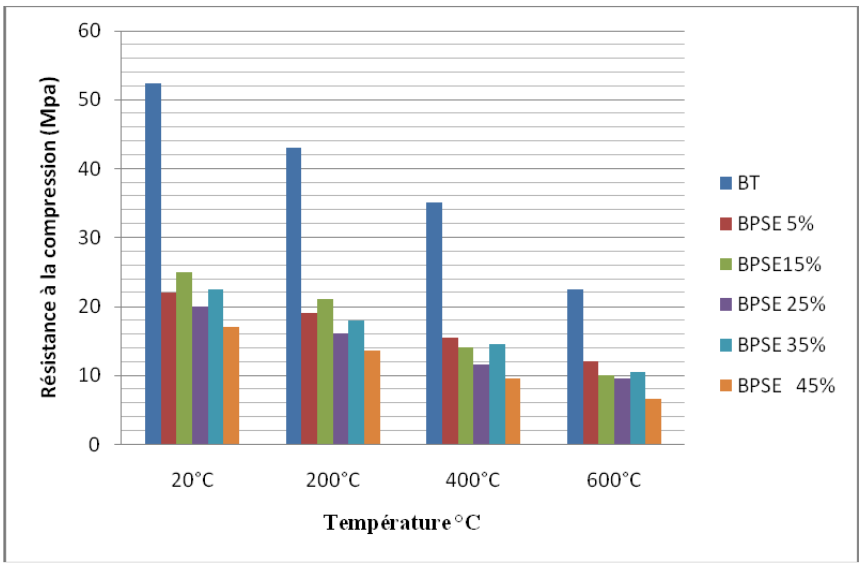


Figure II.17 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température. [19]

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. [19]

II.10.3.2. Résistance en traction à hautes températures

Peu de recherches ont été faites pour déterminer la résistance à la traction à haute températures, vu la complexité de la réalisation des essais. La plupart des observations, de l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température, sont réalisées après le refroidissement par fendage (Thelandersson [102], Noumowé [93].).

Sur la **Figure II.18**, on présente les résultats de traction directe à chaud obtenus par Thelandersson [102], Felicetti& al [103] et Felicetti&Gambarova [104]. Comparés avec les valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton.

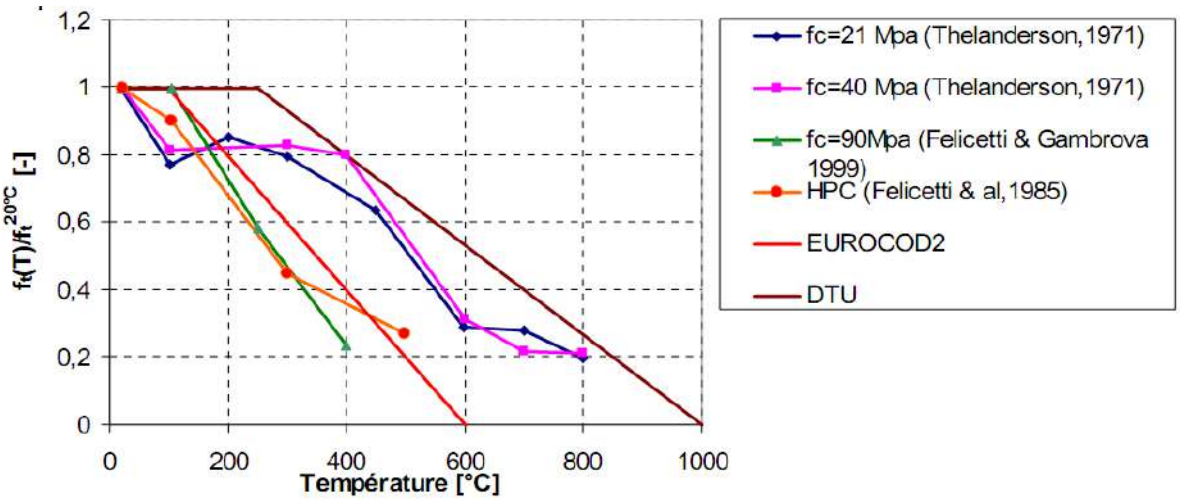


Figure II.18.Résultats des essais de résistance en traction relative obtenus par [102], [103] et [104] comparés à ceux de la DTU et EUROCODE 2.

Toutes les valeurs déterminées se situent au dessous de celle du DTU. A partir de ce graphe, comme pour la variation de la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. En effet, la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage…). Par ailleurs, Harada& al. [105] affirment que, par rapport à la résistance en compression, la diminution de la résistance en traction est très marquée.

Gaweska [77] a effectué des essais de traction directe durant le cycle thermique à la fin de la période de stabilisation du palier de température sur un BHP (100 MPa). Elle observe que la résistance à la traction obtenue « à chaud » à 120°C, 250°C et 400°C est supérieure à celle déterminée à 20°C (**figure II.19**). Ces résultats semblent corroborer ceux de Khoury [106] obtenus par des essais de flexion à haute température.

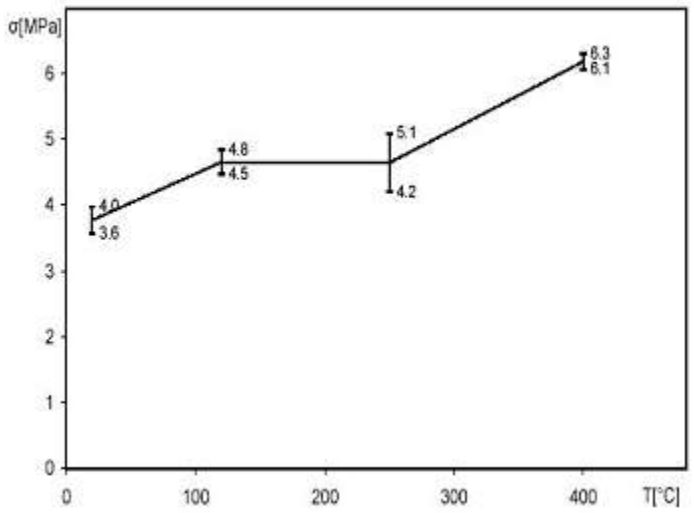


Figure II.19. Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [77].

Les essais menés par Chang sur la résistance résiduelle à la traction normalisée montrent une diminution de cette dernière avec la température. Ils soulignent que la baisse de résistance en traction est beaucoup plus rapide que celle de la résistance en compression, pour des températures supérieures à 400°C. Il apparaît, au vu de ses résultats, que la résistance en traction initiale des bétons n'a aucune incidence sur l'évolution de la résistance avec la température. [107]

Min Li note que sur la résistance résiduelle à la traction par fendage est plus sensible aux effets de la fissuration que la résistance résiduelle à la compression. Il indique également que la baisse de résistance des pâtes à hautes performances est beaucoup plus rapide que celles des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200 et 400°C (**figure II.20**). [108]

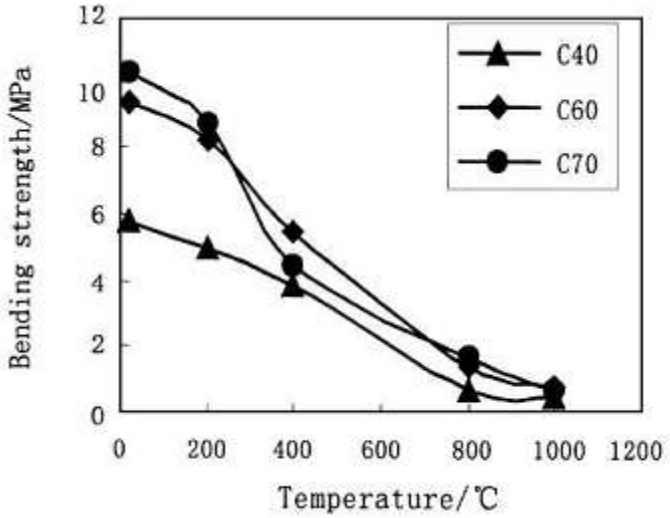


Figure II.20. Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température. [108].

II.10.3.3. Module d'élasticité à hautes températures

Ce module traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. La perte de l'eau évaporable au dessous de 100°C du béton a tendance à faire augmenter la résistance en compression et diminuer le module d'élasticité. La chaleur affecte similairement le module d'élasticité et la résistance du béton au dessus de 100°C. De nombreuses études expérimentales montrent une diminution graduelle du module élastique en compression avec la température [93], [109], [77].

Noumowé [93] a effectué des essais de module d'élasticité résiduel, après un chauffage à 150°C, 300°C, 450°C et 600°C sur un béton ordinaire (38,1 MPa) et sur un béton à hautes performances (61,1 MPa). Il constate que la baisse du module d'élasticité des deux bétons s'effectue de manière linéaire avec l'augmentation de la température et que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du BHP reste très proche et semble similaire à celle du béton traditionnel. Sabeur [110] aboutit à la même constatation pour des mesures de module d'élasticité réalisé à chaux

Gaweska [77] a noté une décroissance du module d'élasticité relatif entre 20°C et 600°C sur trois BHP M100C, M75C, M75SC et un BO M30C comme montre **la figure II.21**. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%. La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2 %). Gaweska conclut aussi que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température

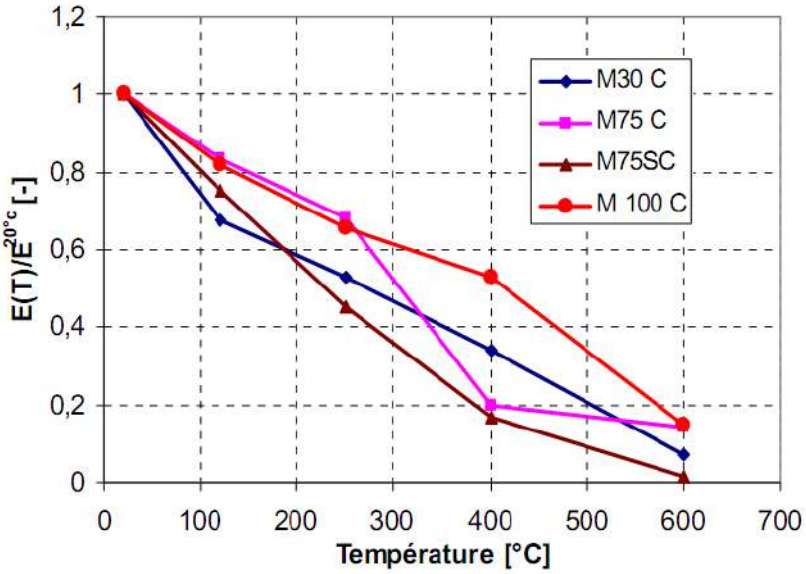


Figure II.21. Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C,M75SC, M100C [77].

La comparaison du module d'élasticité mesuré à chaud et en résiduel effectuée par Gaweska indique une diminution plus importante du module d'élasticité résiduel au-delà de 120°C. La différence entre les deux types d'essais semble croître avec l'augmentation de la température. Le gradient thermique additionnel induit durant la période de refroidissement et la réaction de réhydratation expansive de la chaux CaO semblent être à l'origine d'une fissuration additionnelle du matériau. [77]

Les variations du module d'élasticité avec l'augmentation de la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment (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 entrainent une diminution du module d'élasticité avec un matériau de plus en plus déformable [111].

Le module d'élasticité diminue de manière continue à partir du cycle de 150°C. L'auteur obtient une baisse de plus de 98% de la rigidité initiale à un chauffage de 600°C. Il conclut donc qu'après 600°C, les éprouvettes de bétons testées ne présentent plus une rigidité significative. Tolentino explique la baisse de rigidité des bétons portés à une température élevée par l'augmentation des volumes poreux dans le béton. [109]

Les modules d'élasticité déterminés par Diederichs et al [112] sur les trois BHP et par Castillo et Durrani [100] sur le BHP et le béton ordinaire sont portés sur **la figure II.22**. Les valeurs du DTU sont également données sur la même figure.

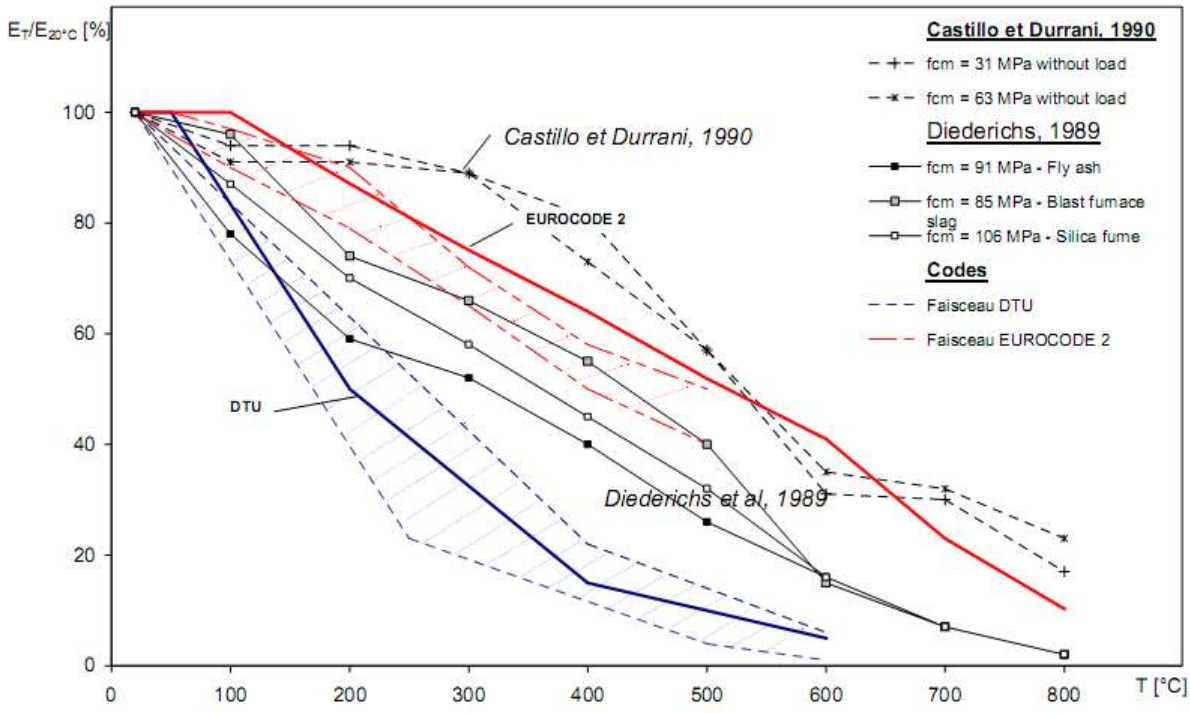


Figure II.22. Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition;

La zone grisée indique les valeurs expérimentales prises en compte pour l'établissement du DTU (les courbes extrêmes représentant déjà des moyennes d'après leurs auteurs).Il est clair, qu'au-delà de 200°C, les modules d'élasticité déterminés sont supérieurs à ceux obtenus par Diederichs. Les deux séries de courbes restent cependant supérieures à celles du DTU. Les différences sont importantes sur une grande plage de température. Elles sont maximales à T = 400 °C et comprises entre 20 et 70 %. Seule une valeur déterminée à T = 100°C sur le BHP de cendres volantes se situe environ 5 % au-dessous de la courbe du DTU

II.10.4 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton. [74]

II.10.4.1 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. **[74]**

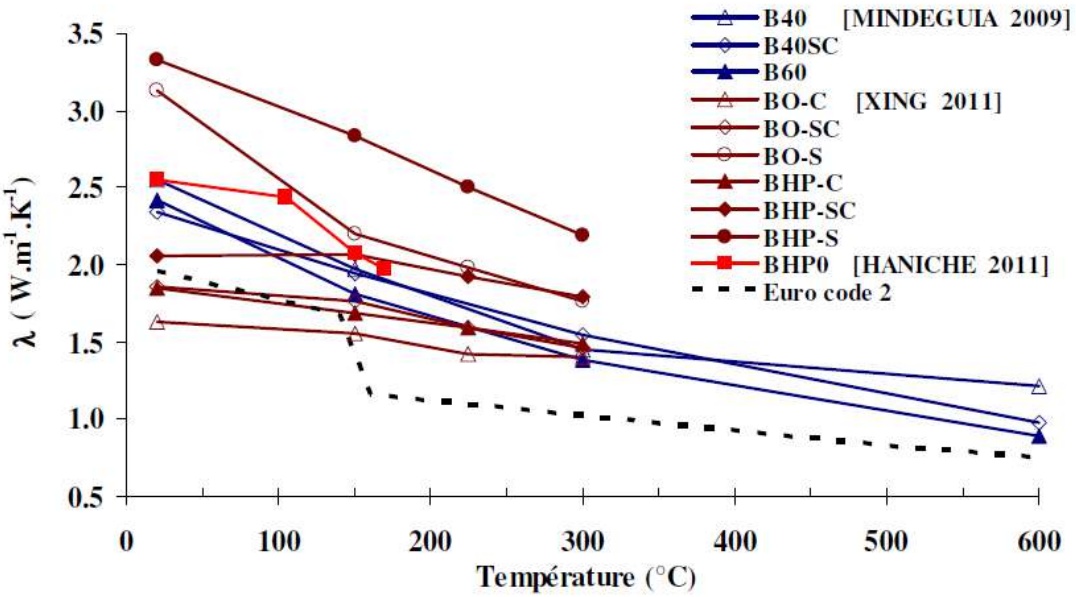


Figure II.23: Conductivité thermique du béton en fonction de la température **[113]**

II.10.4.2 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. **[32].** 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 II.24).**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. **[113]**

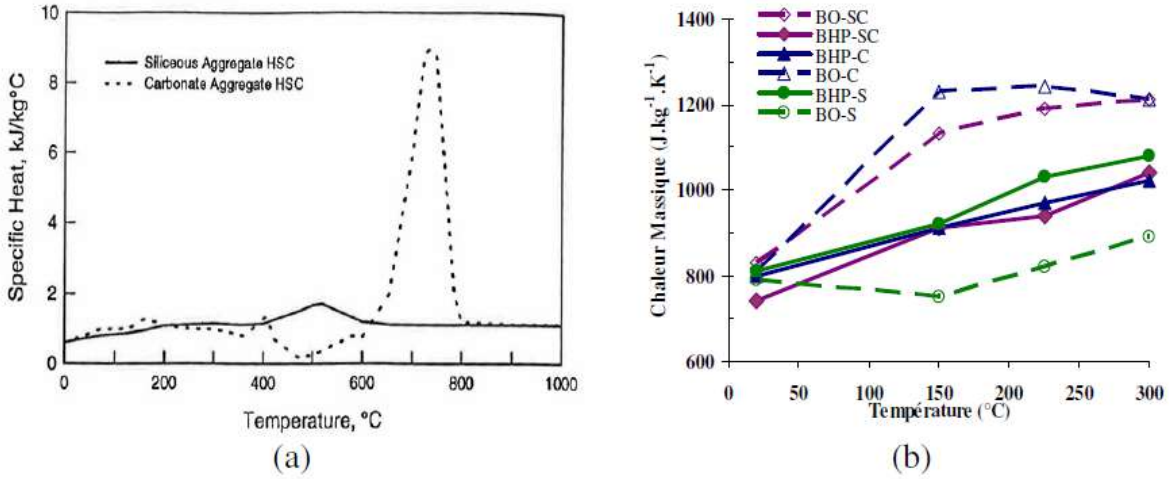


Figure II.24: Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons **[113]**

II.10.5.Comportement Au Feu Du Béton A Haute Performance : Eclatement Et Ecaillage Du Béton

II.10.5.1. Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton

Quand un béton est chauffé, deux phénomènes proches peuvent conduire à la perte de matière: l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis assez précisément.

. L'écaillage : c'est la rupture des couches ou des pièces proches de la surface d'un élément de structure en béton lorsqu'il est soumis à une haute et rapide augmentation de la température. Harmathy est le premier à avoir tenté d'expliquer le phénomène d'écaillage du béton. Il considère la présence des forts gradients thermiques et le développement de pression de vapeur d'eau comme les deux principales causes de l'écaillage du béton. En effet lorsque le béton est sollicité thermiquement à haute température, la vapeur d'eau se déplace vers les surfaces froides et se condense. Les pores se remplissent alors d'eau sous forme liquide qui migre vers les régions froides. La migration est rendue difficile par la condensation alors que de plus en plus de vapeur essaie de se déplacer. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'écaillage. La figure II.25illustre ce mécanisme d'écaillage. [114]

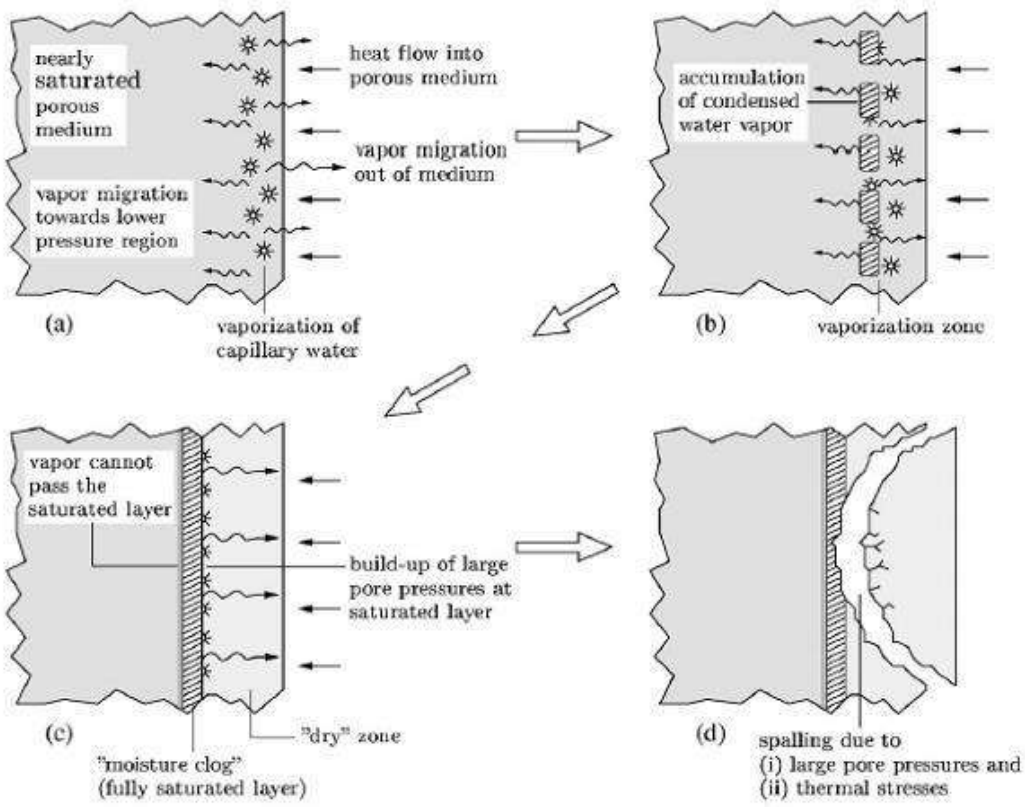


Figure II.25. Mécanisme d'écaillage du béton [115].



Figure II.26. Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc. [115]

. L'éclatement : C'est la soudaine désintégration de l'élément de structure en béton qui s'accompagne d'une libération d'une grande quantité d'énergie en projetant des morceaux de béton à grande vitesse dans toutes les directions. L'éclatement est la résultante de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et éventuellement concurrents, impliquant un grand nombre de paramètres, tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure. De ce fait le comportement à l'éclatement présente un caractère stochastique, comme en témoigne les essais au feu : dans des conditions expérimentales identiques, seulement une partie des éléments de structures testées présentent de l'éclatement. [116]

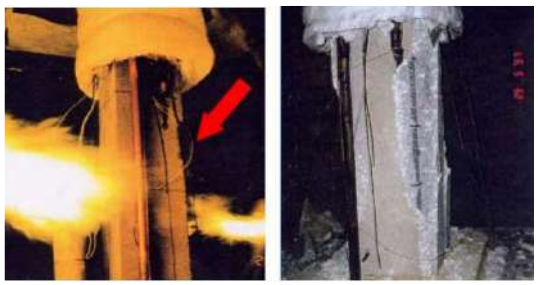


Figure II.27 Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu. [116]

II.10.5.2. Mécanisme du phénomène

Les premières mentions concernant l'éclatement des bétons datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy (1965) [117] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Ce n'est qu'en 1984 que Hertz [118], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élèves a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement. Plusieurs études menées sur ce sujet, notamment, par [119], [120], [121] ont permis d recenser cinq principaux paramètres augmentant la probabilité d'apparition du phénomène. Ces paramètres sont :

1. **faible porosité** : cette caractéristique a été citée comme un paramètre principal d'éclatement. La porosité faible (caractéristique principale des BHP), entraîne une faible perméabilité et par conséquent un transfert de masse plus difficile.
2. **contrainte thermique** : notamment dues aux gradients thermiques provoqués notamment par l'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes, ou l'échauffement des éléments asymétriques. Ces facteurs entraînent les gradients thermiques et hydriques plus importants ainsi que des états de contraintes qui favorisent l'éclatement.
3. présence de l'eau et apparition des pressions internes: l'eau présente dans le matériau est considérée comme la raison principale de l'éclatement. Les travaux de Harmathy ont montré que le comportement explosif commence à partir d'une certaine teneur en eau du matériau. Les sources [119,122] citent 3-4% de la teneur en eau (massique) comme une valeur au-dessus laquelle la possibilité d'éclatement est très forte. Il a été observé que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec, même en condition de présence d'un fort gradient thermique. L'eau libre contribue fortement à l'apparition des pressions internes de vapeur d'eau. L'augmentation des pressions de vapeur d'eau dans le matériau est l'une des principales raisons de l'éclatement. Dans le travail de Hertz, 1984 [118] le mécanisme de l'éclatement due à l'apparition des pressions de vapeur d'eau est comparé au mécanisme de travail du canon à vapeur « Architronito » de Léonard de Vinci.
4. présence de la charge mécanique notamment de la précontrainte qui favorise, dans certains cas, l'éclatement.
5. **déformations thermiques empêchées** : Ulm et al. [123] a montré que la dilatation thermique empêchée, génère des contraintes internes en compression dans la direction parallèle à la surface soumise au feu. Selon ces auteurs, c'est cette compression qui provoque

la fissuration, tandis que les pressions internes dans la structure ne jouent qu'un rôle secondaire en influençant l'éclatement après localisation des déformations. Cette hypothèse est cohérente dans le sens où les BHP présentent un risque d'écaillage plus élevé que le béton ordinaire à cause de leur faible ductilité en compression.

II.10.5.3. Moyens de prévention de l'éclatement

. Fibres de polypropylène

L'addition de fibres polypropylène est recommandée par l'EUROCODE 2 comme moyen permettant la réduction des risques d'éclatement des BHP, lorsqu'ils sont soumis au feu.

Les fibres de polypropylène utilisées fondent durant le chauffage à une température d'environ 170 °C [124; 125], soit une température inférieure à celles généralement rencontrées au moment de l'éclatement. Des expériences ont montré [126] que les fibres ainsi fondues étaient absorbées par la pâte de ciment durcie (**figure II.28**). Un vide est par conséquent crée à l'endroit initial de la fibre, offrant un volume supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. D'après [127], la fibre n'a pas besoin d'être entièrement fondue pour procurer un nouveau chemin aux gaz du fait de la mauvaise adhésion entre la fibre et la matrice cimentaire (**Figure II.29**)

Les fibres sont employées en quantité de 0.1% à 0.2% du volume du béton. Ceci correspond à une quantité couramment employée dans le but de la prévention de l'écaillage.

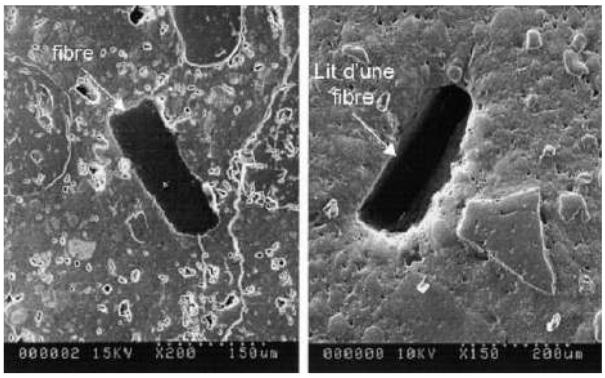


Figure II.28. Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). La fibre n'apparaît plus après le cycle de chauffage [126]

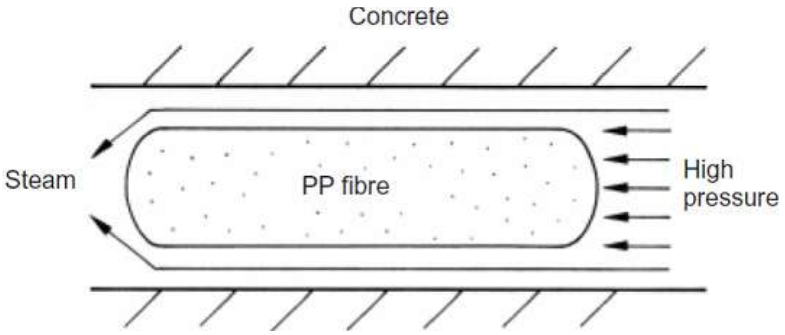


Figure II.29. Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide [127].

Sur la **figure II.30**, représentant l'analyse thermique différentielle des fibres polypropylène, les pics sur la courbe correspondent au: point de la fusion (171°C), à la température d'évaporation (341°C), et de carbonatation (457°C). Les fibres fondent à 171°C et sont absorbées totalement ou partiellement par le réseau poreux de la matrice cimentaire. A 341°C le polypropylène se vaporise. Rappelons que les éclatements se produisent à des températures comprises entre 190-260°C. L'incorporation des fibres diminue significativement les valeurs des pressions et diminuent la température de l'apparition des pics de la pression (180-200°C).

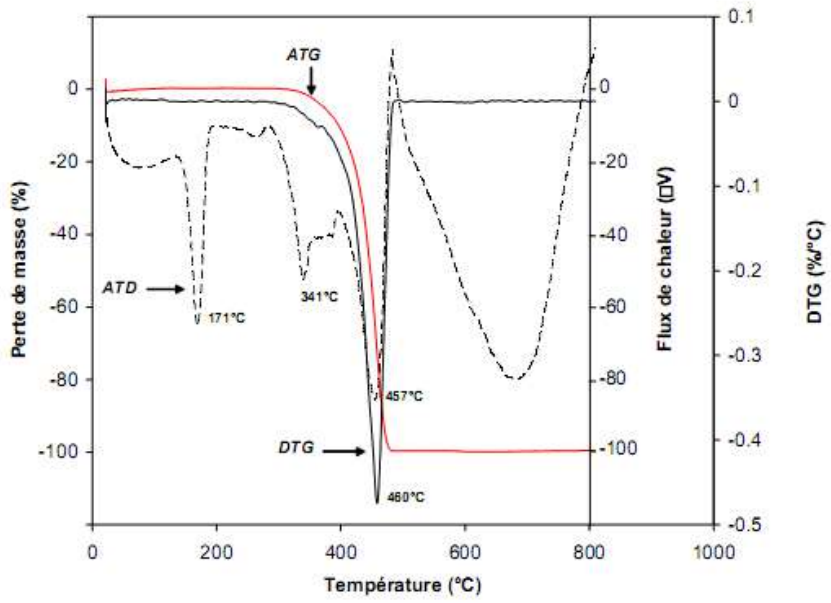


Figure II.30. Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène [128].

La fonte des fibres s'accompagne également de fissures (observations au MEB, **figure II.31**). Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres se dilatent de 10% en fondant, ce qui peut générer des contraintes et par la suite une formation de fissures [126].

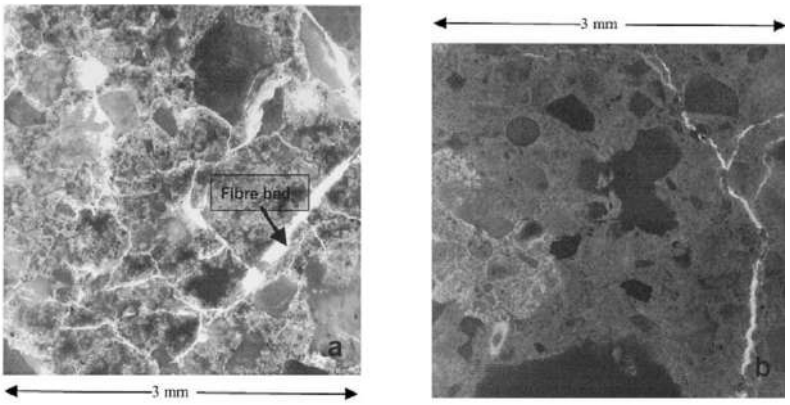


Figure II.31. Observation en épi fluorescence d'un béton fibré (à gauche) et non fibré (à droite) après chauffage à 400 °C selon Kalifa et al. [126]. Les zones les plus claires correspondent aux fissures.

L'étude [129] a montré que l'utilisation des fibres en quantité d'environs 0.2 % du volume permet de réduire efficacement les pressions internes. L'ajout de 1.75 kg/m2 entraîne une réduction de 70% de la valeur de la pression maximale observée au cours d'essais sur un béton de référence sans fibres. Il à été noté que l'effet des fibres n'augmente pas significativement lorsque le taux des fibres est supérieur à 1.75 kg/m3 [126], [129] et [130]. La **figure II.32.** Met en évidence le rôle favorable de l'ajout de fibres de polypropylène.

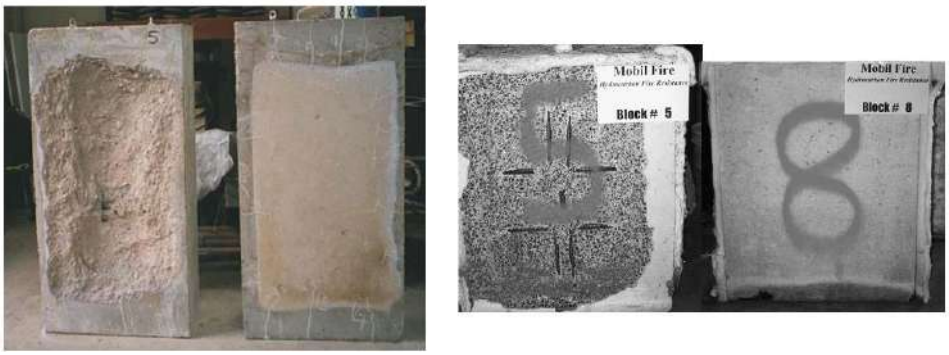


Figure II.32. Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis-àvis du risque d'instabilité thermique du béton (pour chaque photo, à gauche formulation sans fibres, à droite formulation avec fibres) [131] et de [132].

. Protection thermique

La protection thermique est une protection rapportée sur l'ouvrage, dont le rôle est de limiter la température et les gradients thermiques au sein du béton. Il s'agit généralement de plaques d'isolant performant, fixées sur les parties de la structure potentiellement exposées au feu [133]. Nous pouvons citer par exemple l'emploi de silicate de calcium sous forme de plaques fixées au béton (**Figure II.33**). Une telle solution nécessite du temps pour son installation et peut s'avérer onéreuse si la structure à protéger est très longue.



Figure II.33. Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel. [133]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons accédé à la physique de l'incendie, Comportement au feu du béton et les effets des hautes températures sur les éléments constitutifs des structures afin de mettre en évidence l'effet des températures élevées sur les structures construites en béton d'une part. D'autre part, les principales modifications des propriétés physico-mécaniques et thermiques du béton exposé à la haute température. Nous avons compris de toute cette littérature que la haute température agit sur la plupart des caractéristiques du béton exposé aux températures élevées.

Peu d'études traitent le comportement des bétons à base des grains de liège exposé aux températures élevées, l'originalité de notre travail consiste à évaluer et caractériser les paramètres physico- -mécaniques d'un béton léger à base de granulats de liège expansé exposé aux températures élevées. Dans de notre étude, nous allons essayer d'étudier quelques caractéristiques telles que la résistance – la masse volumique – perte de masse de ces bétons spéciaux.

PARTIER II
ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre III : Matériaux, Mélanges et essais
Chapitre IV: Présentation et Discussion des Résultats

Chapitre III : Matériaux, Mélanges Et ESSAIS

III.1 INTRODUCTION

Parmi les exigences du travail expérimental se trouve la définition des matériaux utilisés et de leurs propriétés afin de pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus, c'est l'objet de ce chapitre. Ainsi, présentation des essais réalisés et la méthodologie choisie lors du travail de recherche expérimental afin d'étudier les propriétés physico-mécaniques et thermiques des familles de bétons confectionnés.

En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la potentialité d'utiliser les grains de liège expansé comme granulats légers dans le béton d'une part, d'autre part l'étude du comportement de ces bétons quand nous les exposants aux hautes températures.

III.2. Programme expérimental

Le programme expérimental réalisé dans cette recherche a pour but d'examiner le comportement à haut température de bétons de liège,

Le programme expérimental réalisé comprend plusieurs essais regroupés en quatre parties principales:

Partie 1: Essais de caractérisation des différents constituants utilisés dans la composition bétons. Cette partie a pour but de définir les différentes caractéristiques (géométriques, physiques, et mécaniques) des différents constituants employés dans cette recherche

Partie 2: Formulation et essais de caractérisation à l'état frais de bétons. Cette partie a pour but de donner une formulation pour le béton et de les caractériser à l'état frais par des essais normalisés selon le type de béton (essai d'affaissement.)

Partie 3: Essais mécaniques sur bétons durcis avant et après exposition au feu. Cette partie a été réalisée pour examiner l'influence du feu sur le comportement mécanique (résistance à la compression et à la traction)

Partie 4: Essais physiques sur bétons durcis avant et après exposition au feu. Cette partie comprend des mesures de perte de masse, la masse volumique résistance à la compression Rc et vitesse des ondes soniques. Avant et après exposition au feu.

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisées

III.3.1. Le ciment

Le ciment employé lors de l'étude est un ciment portland composée CPJ - CEM II/B 42,5; de classe commerciale 42.5 MP ; Mais sa résistance moyenne à 28 jours (classe vrais), est estimé a 45 MP. Le ciment MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1.



Figure III.1 Ciment CPJ - CEM II/B 42,5

Caractéristiques techniques :

Tableau III.1 : Analyses chimiques (NA 5042).

	Valeur
Perte au feu (%)(NA5042) (%)	10.0±2
Teneur en Sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en Oxyde de Magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	0.02-0.05

Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment (CLINKER)

	Pourcentage
C3S (%)	58 – 64
C2S	12-18
C3A	6 – 8
C4AF	10 – 12

Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du ciment MATINE.

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3700-5200
Retrait à 28 jours (μm)	<1000
Expansion (mm)	≤3.0
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (mm)	230±50

Tableau III.4 : Résistance à la compression (NA 234)

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10.0
28 jours (MPa)	≥42.5

III.3.2 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue directement du robinet de laboratoire de génie civil de l'université de MEDEA. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est la valeur conventionnelle de 1000 kg/m3. Les propriétés chimiques de cette eau n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Elle est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis…).

III.3.3. Le sable

Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable 0/5 de rivière de la région d'Oued Souf, Algérie.



Figure III.2: Sable d'Oued Souf

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de sable

III.3.3.1 l'analyse granulométrique (norme NF EN 933-1)

L'essai consiste à classer les différents grains constituants l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis, pendant cinq minutes pour le sable et sept minutes pour le gravier puis on prélève les différents refus de chaque tamis et on les pèse.



Figure III.3:La série des tamis

Tableau III.5: Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé(%)	Tamisât (%)
5	5.1	0.51	99.49
2.5	23.4	2.34	97.66
1.25	85.3	8.53	91.47
0.63	419.9	41.99	58.01
0.315	859.3	85.93	14.07
0.16	966.7	96.67	3.33
Fond	992.4	99.24	0.76

III.3.3.2Module de finesse (NF P 18-304)

C’est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25-2.5 et 5mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$Mf = \sum Rc/100$$

III.3.3.3 Masse Volumique Absolue (NF EN ISO 11272)

La masse volumique absolue ρs est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre ρs avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3, en kg/dm3, ou en g/cm^3. L’essai est réalisé à l`aide du pycnomètre.



Figure III.4: pycnomètre

La masse volumique absolue est donnée par la relation suivante :

$$\rho s = \frac{M2}{M1 + M2 - M3}$$

Où :

- ✓ M1: masse de pycnomètre rempli ou l'eau.
- ✓ M2:masse d'échantillon de granulat.
- ✓ M3: masse de pycnomètre rempli ou l'eau +l'échantillon.

III.3.3.4 La masse volumique apparente (NF EN ISO 17828)

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent, après passage à l'étuve à 105±5C°, notée γap est exprimée en (g/cm^3, kg/dm^3, t/cm^3)

On fait cette essai à l`aide d'un récipient de 1L

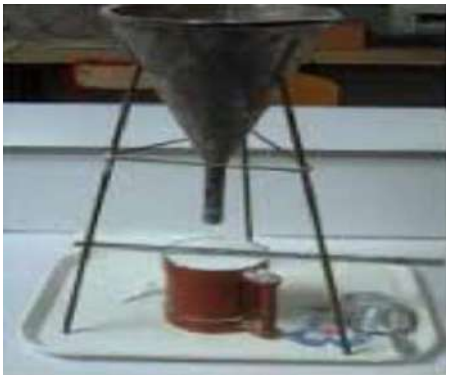


Figure III.5: Récipient

La masse volumique apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{ap} = (m_2 - m_1)/v_{rèc}$$

Où :

- ✓ m_2 **:**La masse de recepions avec le matériau
- ✓ m_1**:**La masse de recepions vide
- ✓ $v_{rèc}$**:** Volume de recepions vide V=1000 ml.

III.3.3.4 Equivalent de sable (NF P18-598)

Cette essai permet de déterminer le pourcentage de fines dans le sable on met, dans une éprouvette à deux repères conçue spécialement, une solution lavant (vendue toute prête) jusqu'au premier repère. On ajoute alors une quantité de sable sec et on attend 10 minutes. Ensuite on agite l'éprouvette (à raison de 90 coups en 1 minute avec des battements de 30 cm) et on la remplit de solution lavant jusqu'au deuxième repère. Au bout de 20 minutes, le sable s'est déposé au fond et les fines forment une couche de « boue » par dessus. On mesure donc la hauteur totale (sable + fines) et la hauteur du sable propre, et on calcule le pourcentage que représente ce dernier. Ce pourcentage est appelé équivalent sable (E.S.).

Si on mesure la hauteur du sable propre avec une règle, on parle d'E.S.V. (E.S. à vue). Si on utilise un piston (plus précis), on parle d'E.S.P (E.S. au Piston).

$$ES = (h_1 / h_2) * 100$$

- ✓ hauteur h1 : sable propre + éléments fins
- ✓ hauteur h2 : sable propre seulement.

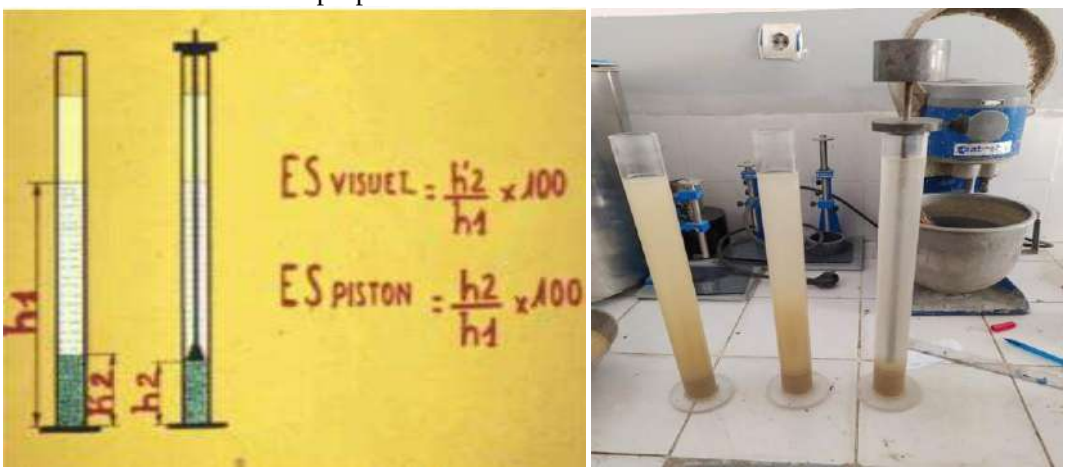


Figure III.6: Equivalent de sable

III.3.3.5Coefficient d'absorption

Cet essai est normalisé selon la norme NFP18-555.Le coefficient d'absorption est définir comme le rapport d'augmentation de la masse d'un échantillon imbibé par l'eau, à la masse de cet échantillon.

Elle est définir par la relation suivant :

$$Ab(\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100$$

- ✓ Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.
- ✓ Mh : masse de l'échantillon imbibé par l'eau.

Les résultats de le coefficient d'absorption obtenus pour notre sable, sent récapitulés sur le **tableau III.6** suivant :

Tableau III.6: Les coefficients d'absorption de sable

Sable	**Mh (kg)**	**Ms(kg)**	**Ab (%)**
0 /5	1.005	1	0.5

Les résultats des essais obtenus pour notre sable, sent récapitulés sur le tableau suivant :

TableauIII.7 Les caractéristiques physiques

Propriétés		0 /5
Masse volumique absolu (kg/m³)		2650
Masse volumique apparente (kg/m³)		1480
Equivalent de sable (%)	ESV	82.49
	ESP	78.77
Module de finesse		2.36
Coefficient d'absorption (%)		0.5

III.3.4: 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 (médéa), Algérie. Les fractions du gravier sont : Fraction **3/8 ;** Fraction **8/15 ;** Fraction **15/25.**





Figure III.7:Gravie 3/8. **Figure III.8: Gravie 8/15.** **Figure III.9: Gravie 15/25.**

III.3.4.1 La masse volumique absolue (g/cm³):NF EN 1097-6

Même principe que le sable et les résultats sont :

$$\rho s = \frac{200}{1491.62+200-1616.04}$$

$$\rho s = 2.64 \text{ g/cm}^3$$



Figure III.10:pycnomètre

III.3.4.2La masse volumique apparente (NF EN459-2)

$$\rho_{ap} = (m_2 - m_1) / v_{rèc}$$

- ✓ **m_2 :** La masse de recepions avec le matériau
- ✓ **m_1:** La masse de recepions vide

$v_{réc}$: Volume de recepions vide V=1000 ml

Fraction **3/8**

ρ_{ap}= (4436 –3106) /1 .ρ_{ap}= 1.330 (g/cm³)

Fraction **8/15**

ρ_{ap}= (4460 –3106) /1 .ρ_{ap}= 1.354 (g/cm³)

Fraction **15/25**

ρ_{ap}= (4430 –3106) /1 .ρ_{ap}= 1.324 (g/cm³)

III.3.4.3 Coefficient d'absorption : NF EN 1097-6



Figure III.11: Gravier imbibé dans l'eau pour l'essai d'absorption

$Ab(\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100$

- ✓ Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.
- ✓ Mh : masse de l'échantillon imbibé par l'eau.

$Ab(\%) = (3.04 - 3) / 3 \times 100.$ $Ab(\%) = 1.33$

III.3.4.4 Coefficient los Anglos LA

Cet essai est normalisé selon la norme **NFP18-555,** consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angles .Et pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc et la résistance obtenue par frottement des granulats.

La résistance à la fragmentation aux chocs exprimés par le coefficient Los Angeles LA :

$$LA = (M0 - M1) / M1 \times 100$$



Figure III.12: La machine de Los Angeles

Les caractéristiques physiques des graviers sont présentées dans le Tableau**III.8** suivant :

Tableau III.8: Les caractéristiques physiques de gravier

Propriétés	**GN 3/8**	**GN 8/15**	**GN 15/25**
Masse volumique absolu (g/cm³)	2.64		
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.33	1.354	1.324
Coefficient los Anglos(%)	25.86	24.10	21.5
Coefficient d'absorption(%)	1.33		

III.3.4.5L'analyse granulométrique

Cet essai est normalisé selon la norme NF P18 560. Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différentes classe (3/8 ,8 /15et15/25) des graviers, sent récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau III.9: Analyse granulométrique de gravie, fraction 3 /8

Tamis	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
12.5	0	0	100
10	0	0	100
8	20.17	10.08	89.92
6.3	902.9	45.15	54.85
5	1183.6	59.18	40.82
4	1513.9	75.69	24.31
3.16	1782	89.1	10.9
2.5	1866.7	93.34	6.66
1.6	1976.7	98.83	1.17
Fond	1996.6	99.83	0.17

Tableau III.10: Analyse granulométrique de gravie, fraction 8/15

Tamis	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	479	15.96	84.04
12.5	1361	45.36	54.64
10	2173	72.43	27.57
8	2786	92.86	7.24
6.3	2918	97.26	2.74
5	2944	98.13	1.87
2.5	2965	98.83	1.17
Fond	2990	99.66	0.34

Tableau III.11: Analyse granulométrique de gravie, fraction 15 /25

Tamis	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
25	52	1.04	98.96
20	791.4	15.822	84.18
16	3611	72.22	27.78
14	4513.4	90.268	9.73
12.5	4662.5	93.25	6.75
10	4902.8	98.056	1.944
8	4968.1	99.362	0.638
6.3	4978.7	99.574	0.426
5	4981.5	99.63	0.37
Fond	4985.3	99.706	0.294

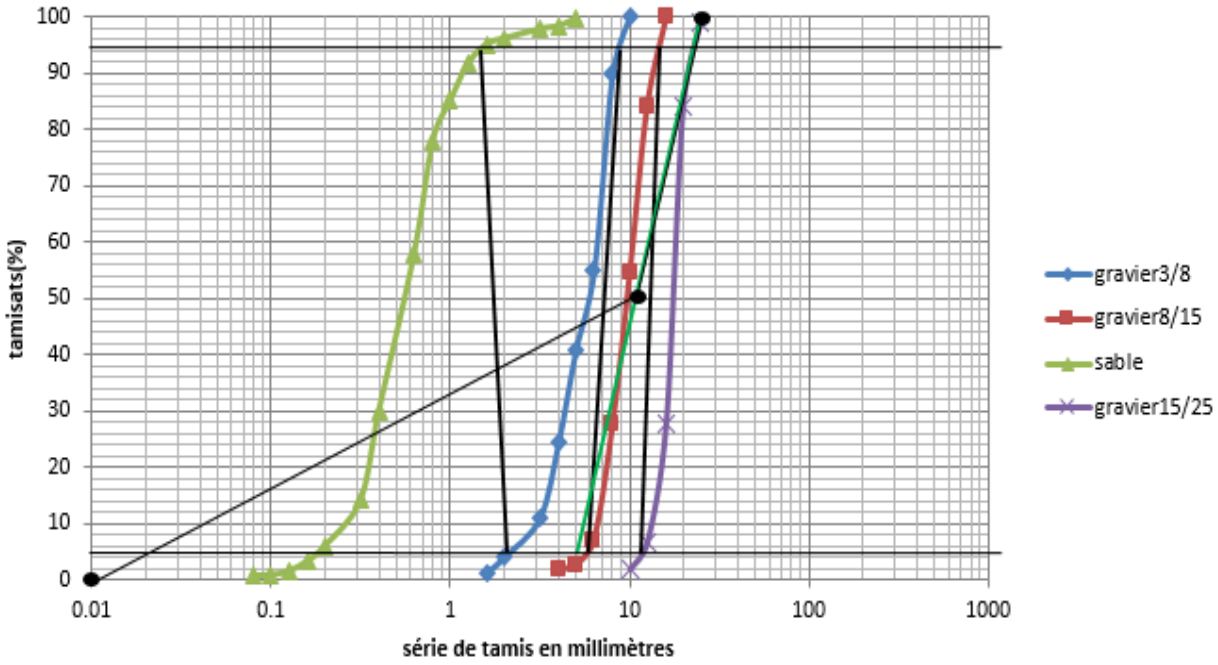


Figure **III.13**: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 ,15 /25 et sable) – Méthode de Dreux-Gorisse

III.3.5Liège expansé

Granulats de liège utilisés dans notre étude ont été fournis par la société JLE EPE Jijel liège étanchéité SPA, son siège social et son unité de production sont situés au niveau de la route de Bejaïa BP Jijel 18000 Algérie. Ce type de granulat est obtenu à partir des chaines de lièges, en passant par le concassement de celles-ci et puis le liège est torréfié dans des autos claves vers 350°c sa densité sèche varie entre 65 et 140 kg/m³.



Figure III.14 Granulats de liège 8/16.

Ces caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique

III.3.5.1Coefficient d'absorption



Figure III.15 Liègeimbibé dans l'eau pour l'essai d'absorption

$$Ab(\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100$$

- ✓ Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.
- ✓ Mh : masse de l'échantillon imbibé par l'eau.

$$Ab(\%) = (0.210 - 0.160) / 0.160 \times 100$$

$$Ab(\%) = 31.25$$

Les caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.12 : Les caractéristiques physiques de liège

Propriétés	Liège
Masse volumique absolu (Kg/m³)	138
Masse volumique apparente (Kg/m³)	130
Coefficient d'absorption	31.25

L'analyse granulométrique

Tableau III.13:Analyse granulométrique de liège

Tamis	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	4.6	0.92	99.08
14	24.7	1.94	95.06
12.5	50.3	10.06	89.94
10	160	32	68
8	388.7	77.74	22.26
6.3	454.2	90.84	9.16
5	465.2	93.04	6.96
3.15	485.7	97.14	2.86
2.5	489.1	97.82	2.18
Fond	493.9	98.58	1.42

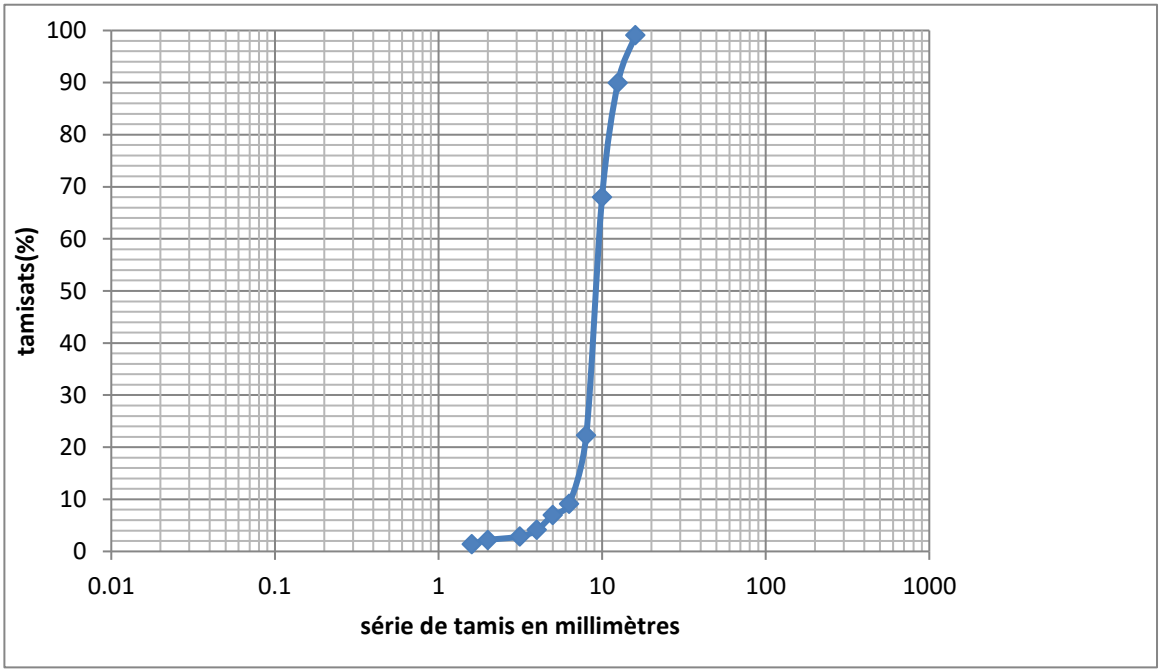


Figure III.16: Courbe d'analyse granulométrique pour les grains de liège expansé

III.4.Formulations

La méthode de formulation du béton choisie pour notre étude est celle de Dreux-Gorisse. L'allégement du béton réalisé par la substitution volumique des pourcentages en gravier de classe 8/16 par les grains de liège 8/16. Nous avons varié le dosage de remplacement du gravier par le liège de 25; 50; 75et 100 %.

III.4.1. 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.

III.4.2 Calcul de la composition de 1m^3 du béton

III.4.3 Données de base

Tableau. III.14: Données de base pour la formulation du béton témoin

σ'_n (MPa)	σ'_{28} (MPa)	A (cm)	Dmax	σ'_c (MPa)	G	Γc
25	28,75	7	25	45	0.45	0.82

III.4.4 Dosages en ciment et en eau

On commence par évaluer le rapport E / C 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 figure **III.17** présente l'Abaque qui permet d'évaluer le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée, pour cela on se réfère aux conclusions de graphe de : C= F(C/E.A)

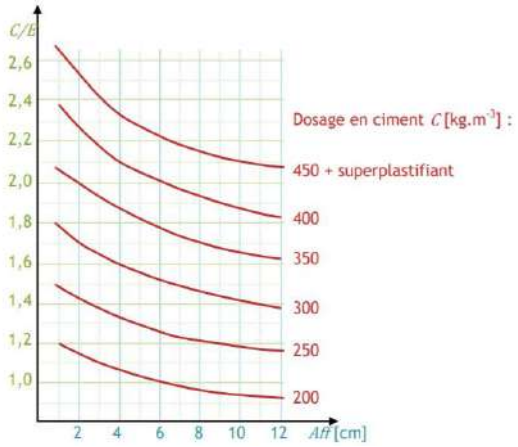


Figure III.17: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)

Tableau III.15 : Les différentes compositions des cinq bétons

	Matériaux	BT	BL			
			BLi01	BLi02	BLi03	BLi04
Dosages en Matériaux (kg)	Liège E	0	6.80	13.600	39.234	64.868
	Sable	537	537	537	537	537
	Gravier 3/8	155.445	77.722	0	0	0
	Gravier 8/16	104.806	52.403	0	0	0
	Gravier 16/25	980.78	980.78	980.78	490.39	0
	Ciment	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
	Eau	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00

BT : Béton témoin;

BLi01 : 50% de liège expansé remplace 50% du volume de gravier G3/16 ;

BLi02 : Le liège expansé remplace totalement (100%) le volume de gravier G3/16;

BLi03 : Le liège expansé remplace 100% le gravier G3/16 et 50% de substitution volumique du G16/25 par les grains de liège expansé ;

BLi04 : Le liège expansé remplace totalement (100%) le volume de gravier G3/16, et 100% de substitution totale du gravier G16/25 par le liège expansé.

Remarque : La valeur définitive du rapport E/C doit respecter les conditions de consistance choisies.

III.4.5 Étape de confection du béton

Dans cette partie nous expliquons le mode de travail de notre étude.

III.4.5.1 Fabrication

La modalité de fabrication des différents types de bétons que nous avons choisi, 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 liège, le sable et puis le ciment; puis un malaxage à sec pendant 1 minute
- ✓ Ajout de l'eau de gâchage puis un malaxage pendant 2 minutes.
- ✓ Le béton a été coulé dans les moules cubiques. Il a été vibré sur une table vibrante pendant 30 secondes.



Figure III. 18 : Le malaxage des bétons au laboratoire.

III.4.5.2 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.

III.4.5.3 Cure Appliquée

Après le gâchage du béton témoin et les bétons de liège, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment. Finalement, après plus de 28 jours de cure à l'eau et après passage à l'étuve pendant 24h les éprouvettes sont près au programme d'essai.

III.4.5.4 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. [134]

III.4.5.5 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. III.19: Dispositifs de chauffage.

III.4.5.6 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, 600°C et 800°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.

III.5.Essais

Deux types d'essais sont :

- les essais à l'état frais pour évaluer :
  - ✓ Consistance : Affaissement au cône d'Abrams.
- les essais à l'état durci pour déterminer :
  - ✓ La masse volumique.
  - ✓ Résistance à la compression Rc.
  - ✓ Vitesse des ondes soniques.
  - ✓ Module d'élasticité
  - ✓ La perte de masse
  - ✓ Conductivité thermique
  - ✓ L'absorption d'eau par capillarité
  - ✓ La porosité

III.5.1 les essais à l'état frais

III.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams



Figure III.20: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Le cône d'Abrams est un outil de mesure normalisé (NFP 18-451). [135] Il détermine le taux d'affaissement du béton frais et donc sa consistance. La hauteur de l'affaissement du béton est mesurée en cm. La mesure de l'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle souhaitée. Le dosage en eau du béton peut être ajusté selon le résultat de l'essai.

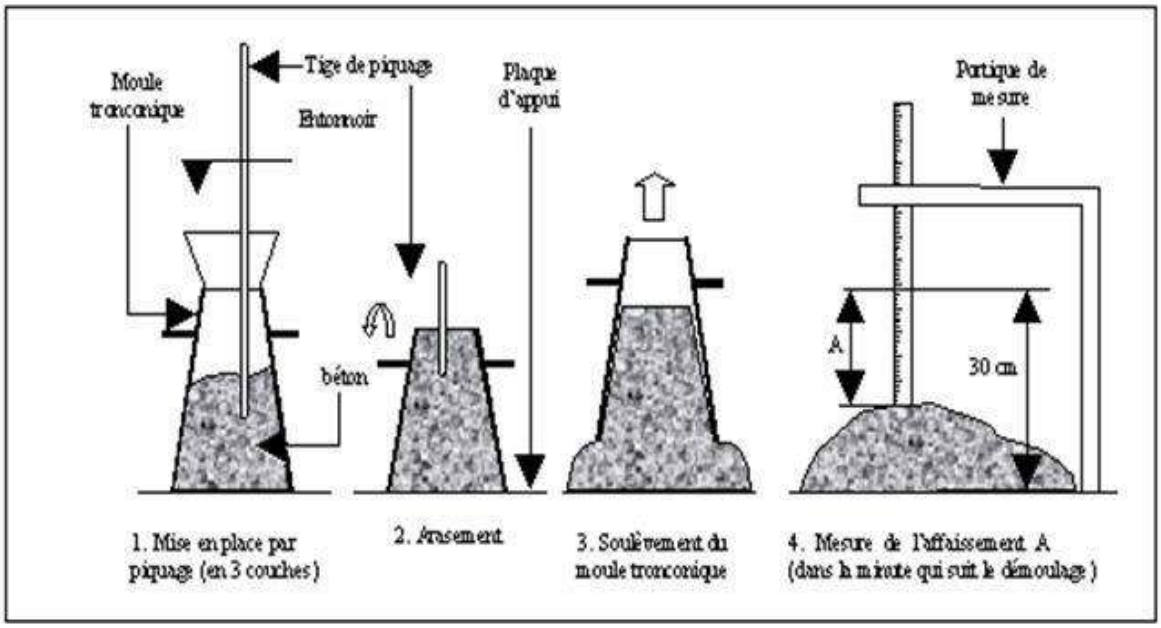


Figure III.21: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Selon la norme NFP 18-451, après avoir huilé le moule, il est fixé sur la surface d'appui légèrement humidifiée. Le béton est ensuite introduit dans le premier tiers du moule, et vibré en appliquant 25 coups de tige. L'opération est recommencée pour le deuxième tiers du moule, le béton est de nouveau vibré 25 fois avec la tige en pénétrant la couche précédente. Le dernier tiers du moule est remplit généreusement et piqué 25 fois puis araser en faisant rouler la tige sur le dessus du moule. Le cône de béton est délicatement démoulé, celui-ci s'affaisse sous son propre poids selon sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté *A,* et dont la lecture est procédé dans la minute en mesurant la distance entre le point haut du béton et le portique de mesure. Suivant la valeur de son affaissement *Af* un béton peut être ferme, plastique, très plastique ou fluide.

Suivant la valeur de son affaissement *Af* un béton peut être ferme, plastique, très plastique ou fluide.

Tableau III.16 : Consistance du béton suivant l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

(Dupain et al., 1995) **[17]**

Affaissement au cône Af	**Consistance**	**Désignation (Norme NF P 18-305)**	**Classe (Norme ENV 206)**
De 1 à 4 cm	Ferme	F	S1
De 5 à 9cm	Plastique	P	S2
De 10 à 15 cm	Très Plastique	TP	S3
Supérieur à 16 cm	Fluide	F	S4

III.5.2 les essais à l'état durci

III.5.2.1 La masse volumique

La masse volumique du béton léger a été mesurée selon la norme [NF EN 12390-7] [136] 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.

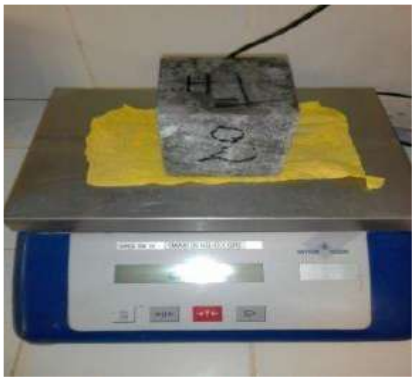


Figure. III.22 : Mesure la masse volumique**.**

III.5.2.2 Essai compression : [NF EN 12390]

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 [137]

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. [137]

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

$$Fc=F/Ac$$

Où :

- ✓ Fc: résistance en compression, exprimée en méga pascal (MPa).
- ✓ 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 III.23 : la presse hydraulique

III.5.2.3Vitesse des ondes soniques

Cette technique standardisée par la norme NF EN 12504-4, 2005, [138]L`équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est portable ultrasonique non destructive digital indication tester, appareil fabriqué par CONTROLS, qui donne le temps de parcours d'une impulsion traversant le matériau testé. A l'usage, un transducteur de transmission est placé sur un coté du béton à être mesuré et un transducteur réception placé directement en face de l'autre coté. Nous avens utilisé matière étanche (la graisse) comme milieu de couplage entre les transducteurs et le béton pour assurer un contact suffisant .La longueur du trajet doit ensuite être mesuré avec précision.

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

$$V = L / T$$

Où :

- ✓ V: vitesse de l'onde sonique, (m/s)
- ✓ L: longueur du trajet de l'onde sonique, (m)
- ✓ T: temps, (s)

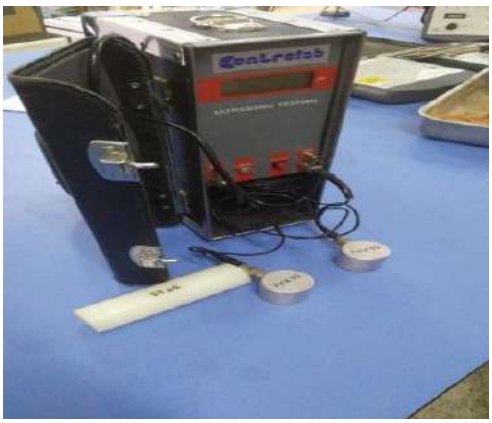


Figure III.24: Photo présente l'appareille des ondes soniques

III.5.2.4Module d'élasticité :[NF EN12390-13]

Pour de petites déformations du béton, la courbe contrainte- déformation peut être assimilée à une droite, il y a approximativement proportionnalité entre la contrainte ⍵ et la déformation Ɛ. [139]

Soit E ce coefficient de proportionnalité

⍵= E * Ɛ

- ✓ **E** : est appelé module d'élasticité.

Afin de s'assurer d'être dans le domaine de validité de la loi de Hooke, le module est calculé sur l'intervalle de contraintes limité par : $\sigma \in [0 ; 0{,}3.\ Max]$.

À l'aide de capteurs de déplacement permettent de calculer la déformation longitudinale moyenne, l'évolution de l'effort appliqué par la presse sur le matériau en fonction de sa déformation longitudinale, est mesurée. Le diagramme contraintes/déformations $\sigma\ (Ɛ) = f(Ɛ)$ du béton peut ainsi être tracé.

Une fois le module élastique estimé, soit la cage est laissée afin de tracer le diagramme jusqu'à rupture (possible uniquement avec des bétons ordinaires) soit la cage est retirée afin de pouvoir mener l'essai jusqu'à rupture. C'est le cas notamment pour les bétons hautes performances qui vont exploser et risquerait d'endommager la cage extenso métrique. [140]

III.5.2.5Mesure de la perte de masse

Cette partie d'étude a eu pour but d'évaluer les quantités de l'eau libre présente dans les matériaux testés. Elle permet également d'observer les cinétiques du processus de séchage et de déshydratation. Les mesures sont réalisées sur les bétons avant et après l'essai d'échauffement stationnaire. Les pesés ont été effectués avec une balance de résolution 0,1g.

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

$\Delta M = (M0-M1)/ M0*100\%$

- ✓ ΔM : Perte de masse (%).
- ✓ M0: masse initiale (g).
- ✓ M1: masse après chauffage (g).

III.5.2.6. L'essai de la conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des Matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés Thermiques des déférents mélanges ont été mesuré à l'aide d'un CT Mètre conformément la Norme ISO 8497-1.

CT METRE Norme de référence NF EN 993-15 C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance

thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de généré la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans la température induite.

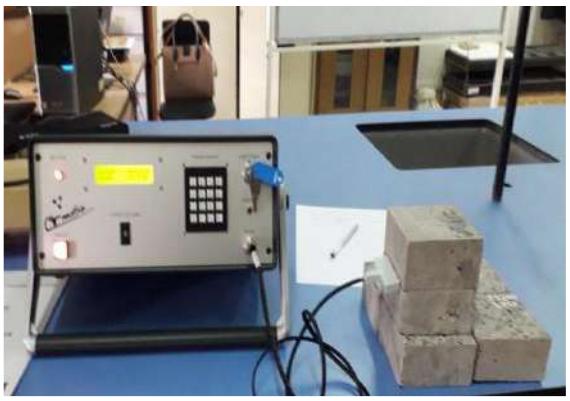


Figure III.25: Le CT-METRE.

III.5.2.7.Essais d'absorption d'eau par capillarité (NF EN722-11)

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend les éprouvettes de béton (cubiques 10×10x10 cm) déjà sécher et on le pesé (m_0), après on les introduire dans un bac remplir de 1 cm d'eau de profondeur et de suivre l'évolution de la masse de ces éprouvettes au cours du temps. La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein, pendant chaque intervalle de temps (60s, 5min, 10min, 20min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h, on remesure les éprouvettes (m1), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (m1-m0) (ASTM C1585 – 11). Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire (T= 20 ± 2°C). [141]



Figure III.26: La mesure de l'absorption capillaire

III.5.2.8 La porosité (NF P18-459)

La porosité accessible à l'eau Ɛ, exprimé en pourcentage en volume, [142] est donnée par

L'équation :

$$Ɛ=\frac{Ma-Ms}{Ma-Mh} \times 100$$

- ✓ Ma : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air
- ✓ Ms: La masse d'éprouvette sec
- ✓ Mh: La masse d'éprouvette immergée dans l'eau

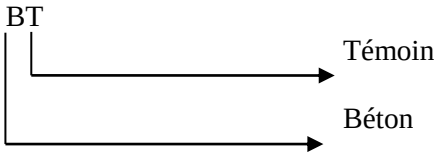


Figure III.27: Mesure de la porosité accessible à l'eau.

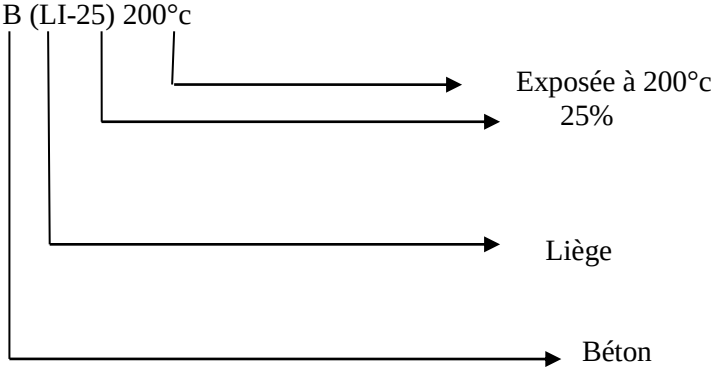
III.5.3.Désignation des bétons

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

a) Bétons sans liège



b) Bétons avec liège (25%, 50%, 75% et 100%)



Conclusion

Ce chapitre a levé une combinaison de connaissances des propriétés physico- chimiques de différents constituants de bétons allégés avec des grains de liège. Ainsi, nous avons présenté la composition de nos mélanges et les procédures de mesure de différentes propriétés recherchées.

Conclusion générale

Les bétons légers se caractérisent 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.

Le béton léger peut être utilisé pour réduire le poids élevé des structures en béton. Une perte de poids encore plus importante sera possible avec le béton conventionnel. Cependant, la teneur élevée en ciment du béton conventionnel rend ce béton plus cher et moins écologique. Dans ce contexte, une étude a été menée qui visait à produire du béton léger avec une résistance à la compression cubique caractéristique en 28 jours d'au moins 65 MPa, et les coûts des matériaux étaient aussi bas que possible.

Il s'est avéré qu'avec une teneur en ciment de 350 Kg/m³, une teneur en ciment suffisamment faible pour un mélange économique, la résistance requise pendant 28 jours ne pouvait pas être obtenue avec les mélanges testés. Pour obtenir une plus grande résistance, des teneurs en ciment plus élevées étaient nécessaires. De plus, il a été constaté que la plupart des procédures par lesquelles une résistance plus élevée pouvait être obtenue avaient un impact négatif sur la maniabilité et les coûts du mélange.

Le but de l'utilisation de béton léger haute performance est de réduire les coûts, d'améliorer la fonctionnalité structurelle ou une combinaison des deux. L'économie du béton léger haute performance sera discutée. On pourrait soutenir que la production de béton léger haute performance est supérieure à celle du béton de poids naturel. Cependant, sachez que le coût différentiel ne dépassera pas 1%. Ce surcoût peut facilement être compensé par l'autre avantage économique procuré par un béton léger à hautes performances. L'économie du béton léger haute performance s'explique par les points suivants:

1-Cela réduit la charge permanente de la superstructure, de sorte que la fondation recevra des charges plus petites. En conséquence, la fondation sera de plus petite taille, moins de pieux seront nécessaires et une couverture de pieux plus petite sera nécessaire. Enfin, un taux de renforcement inférieur sera utilisé.

2-En raison de la réduction de la charge permanente, des dimensions plus petites seront nécessaires pour les éléments de superstructure tels que les poutres, les colonnes, le tablier, les poutres et les piliers. Cela réduira considérablement le coût.

3-La réduction de la charge permanente entraîne des forces de ralenti plus faibles lors des tremblements de terre. Cela réduira l'ampleur de la détérioration de la structure et donc le coût de la réhabilitation sera plus faible.

4-Relativement parlant, de longues portées peuvent être obtenues lorsque du béton léger et haute performance est utilisé pour construire des éléments précontraints sans augmenter la masse totale. En conséquence, non seulement il y aura un besoin de moins de colonnes ou de piliers dans le système structurel, mais également moins de connexions seront nécessaires, ce qui facilitera et facilitera le processus de montage.

5-Il a été rapporté que le coût de livraison du béton préfabriqué léger de haute performance est également réduit, compensant facilement le coût accru d'utilisation du béton préfabriqué léger de haute performance.

6-Le béton léger à haute performance permet un déplacement facile des plates-formes offshore lors du déplacement hors des cales sèches et du déplacement dans des canaux d'eau peu profonde. En effet, le béton léger haute performance augmente les charges latérales supérieures et réduit le tirage de la structure

7-Le béton léger à haute performance augmente la résistance au feu des éléments en béton. C'est pourquoi l'épaisseur des panneaux peut être réduite et ainsi le volume de béton peut également être réduit.

8-En cas de réparation de la structure du pont, le tablier du pont peut être agrandi en utilisant du béton léger et haute performance à la place du béton conventionnel existant sans augmenter les charges globales et les autres éléments de la structure.

9-Ceci est très important car la capacité du pont est augmentée et c'est un aspect crucial de ce type de béton d'un point de vue économique

10-Le béton léger et performant réduisant la charge permanente de l'élément, il est possible d'augmenter le revêtement en béton sur les barres d'armature, ce qui augmente la durabilité de la structure.

11-Après cela, la structure nécessitera un entretien moins fréquent, ce qui est un autre avantage économique du béton léger et haute performance.

12-L'isolation thermique est une autre propriété importante du béton léger à hautes performances qui est d'une grande importance, en particulier pour les structures thermosensibles telles que le stockage d'eau chaude, le stockage de pétrole ou l'isolation des bâtiments.

13-Cette caractéristique peut rendre la structure convenablement résistante à la chaleur ou si un degré d'isolation plus élevé est requis, le coût d'application de l'isolation ne serait pas élevé si du béton conventionnel était utilisé pour construire le bâtiment.

L’objectif principal de notre travail est composé de deux volés, commençant par la formulation et la caractérisation des différentes classes de béton léger à base des grains de liège, après avoir établie une étude de caractérisation des différentes composantes utilisés. Ensuite, en deuxième volé, après avoir formulé les éprouvettes en béton léger nous procédons à l’étude de l’effet de haute température sur nos composites. Cette étape est en attente de réalisation à prétexte de la pandémie de Covid-19 qui a fait trembler le monde entier depuis février 2020.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

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

[2] : **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.

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

[4] : **S. MOHELLEBI :** «*Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygromécaniques d'un béton léger à base de granulats composites»* Thèse doctorat 29 Mai 2014.

[5] **O. Herihiri** (2010), « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers », mémoire de magistère université de Biskra, Algérie

[6] : **Livre :** «Dictionnaire Professional du BTP» l'auteur : **J. Roy**, 1 janvier 1998.

[7] **Malhotra. V** ; Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton ; centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie ; Ottawa 1989.

[8] : **Jean-Pierre lott***« Le béton, matériau de structure d'expression architecturale* **».**

[9] : **Latifou Bello** «*Méthodologie de formulation des Bétons Auto-Plaçant Légers* **»** 2015.

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

[11] **RILEM**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69

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

[13] **COQUILLAT, G.** (1976), "Bétons légers de structure", *Le bâtiment, bâtir.*

[14] **DJAKAM .I**: «*Elaboration d'un béton léger à partir des Matériaux locaux»2015/2016*

[15] **Thèse *doctorat*** *« caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation »* 2008.

[16]**Agoumimelcha.A**: mémoire *« Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage»* 2016/2017.

[17] **Zitouni .M** : « Etude des propriétés physico-mécaniques des composites écologiques applications sur les bétons allégés par les billes de PSE et les grains de liège » 2018/2019

[18] **Zhang .M-H &Gjorv .O**-E; Caractéristiques des granulats lightweight pour une résistance élevée béton, ACI Materials Journal; 88 (2): 150-158; 1990.

[19] **LAOUD B** : article « *Caractérisation mécanique et physique d'un béton léger à base de sable calcaire et des granulats de liège*» en 2013.

[20]**Auriault .Jl**; «*Modélisation du compactage à chaud de la poudre métallique par homogénéisation; Mécanique des matériaux*», volume 13, numéro 3, juillet 1992, pages 247–255.

[21] **EuroLightCon,** Mechanical properties of lightweight aggregate concrete document BE96-394/R23, European Union-Brite EuRam III, June 2000.

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

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

[24] **ACI213R-03**, guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by AC Committee 213, American Concrete Institute, 2003.

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

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

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

[28]**W. Laidi& N. Ben Yahia**: élaboration d'un composite a bas de granulat légers *2014/2015*

[29] **Arnould .M Et Virlogeux .M**. *« Granulats et bétons légers »* Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1986

[30**] 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

[31] **AIFA .S & GHELIAOUI .M**«Etude du comportement des bétons légers à haute température » 2018

[32]**M. KAOUANE:**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

[33]**BENNACER .S CHEBABHI** .M Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des Déchets industriels en vue de leur utilisation dansl'isolation des bâtiments. 2016 /2017

[34] https://www.ideal-decor.fr/beton-leger/

[35]**BOUHADJERA .M**Effet du rajout des fibres en polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'un béton cellulaire ; 2019

[36] **Ke .Y, Beaucour .Al, Ortola .S, Dumontet .H , Cabrillac .R** ; Comportement mécaniquedes bétons de granulats légers : *« étude expérimentale et modélisation ; 24ème rencontre AUGCMontpellier »;* juin 2006.

[37] **Ke .Y, Beaucour. Al, Ortola .S, Dumontet .H**; «Influence de la fraction volumique et des caractéristiques du béton à granulats légers sur les propriétés mécaniques du béton»,Matériaux de construction et de construction, vol. 23 décembre 2009, p. 2821-2828.

[38] **Ke .Y, Ortola .S, Beaucour. Al, Dumontet .H**, «Identification des caractéristiques de microstructure dans les bétons à granulats légers par modélisation micromécanique, y compris la zone de transition interfaciale (ITZ)», Recherche sur le ciment et le béton, vol. 40, 2010, p. 1590-1600.

[39] **Bederina .M, Marmoret .L, Mezreb .K, Khenfer .M-M, Bali .A et Queneudec .M**; Effet de l'ajout de copeaux de bois sur la conductivité thermique des bétons de sable: étude expérimentale et modélisation; matériaux de construction et de construction; 21: 662 à 668; 2007.

[40] **CHEN B et LIU J**; Propriétés du béton léger de polystyrène expansé renforcé avec de la fibre d'acier; recherche sur le ciment et le béton; volume 34: N ° 12, P59-63; 2004.

[41] **Benazzouk .A, Douzane .O, Langlet .T, Mezreb .K, Roucoult .J-M et Queneudec .M;** Propriétés physico-mécaniques et absorption d'eau d'un composite de ciment contenant déchets de caoutchouc déchiquetés; recherche sur les composites de ciment et de béton; vol29: N ° 10, P732-740 ; 2007.

[42] **Benazzouk .A, Douzane .O, Mezreb .K, Laidoudi .BetQueneudec .M**; Thermique conductivité des composites de ciment contenant des particules de déchets de caoutchouc: étude expérimentale et modélisation; matériaux de construction et de construction; vol22, P573-579; 2008.

[43]https://maconnerie.bilp.fr/guide-general/part-1-generalites/materiel materiaux/beton/granulats-legers.

[44] **GARAVAGLIA V., BESACIER C**. (2012). State of MediterraneanForests. Fête de liège 14-15 juin. Vives.

[45] **BOUHRAOUA R.** (2014). Le chêne-liège face au feu de 2012 : Etat des lieux de 2 années s après : Cas de l'Algérie. Fête de liège 13 juin à Vivès. Université de Tlemcen, Algérie.

[46] **Silva S. P., Sabino M. A**., Fernandes E. M., Correlo V. M., Boesel L. F & Reis R. L. (2005 Cork: properties, capabilities and applications International MaterialsReviews VOL 50 NO 6, (345-365).

[47] **PINTUS A.** (2012). Les propriétés techniques du liège Intérêt pour la construction. Colloque International "Liège et éco construction", 13-15 juin, Vivès. AgenziaRegionaleper la RicercainAgricoltura.

[48] **BoulahiaHakima**. (2016) : Etude du comportement physico-mécanique de nouvelle bio composite poudre de liège–PVC. Thèse de doctorat. Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Algérie, 150 pages.

[49] **Soutehi Nassima**. (2010) : Caractéristique thermique des parois de bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Universités Mentouri, Constantine, Algérie, 110 pages.

[50]**Aziz M A., Murphy C K., &Ramaswamy S**.D. (1979). Lightweight concrete using cork granules. The international Journal of Lightweight concrete. Vol 1, No 1 p 29-3 S. P. Silva., M. A. Sabino., E. M. Fernandes., V. M. Correlo., L. F. Boesel and R. L. Reis Cork: properties, capabilities and applications. 2005.

[51]**Branco Fernando G**., Tadeu António., Belgas Maria de Lurdes., & Reis C. (2007). Can Cork Be Used As A Concrete Aggregate?. Department of Civil Engineering, Faculty Of Sciences And Technology, University Of Coimbra, Portugal & Department Of Civil Engineering, Polytechnic Institute Of Tomar, Portugal.

[52]**Moreira A., Antonio J &Tadeu, A.** (2014). lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. Cement and Concrete Composites. 49 (2014): 1-8. Elsevier.

[53]**Maalouf C, Boussetoua H, Moussa T, Lachi M, Belhamri A**. (7-septembre- 2015) Experimental And Numerical Investigation Of The HygrothermalBehaviour Of Cork Concrete Panels In North Algeria. Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec.

[54]**Ziregue Ahmed., MouldiKhenfer Mohamed**., Quéneudec-t'KintMichèle&Montrelay Nicolas. (2016). Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. Journal of Adhesion Science and Technology, 30:9, 934-946.

[55]**Boussetoua H., Maalouf C., Lachi M., Belhamri A & Moussa T**. (2017) Mechanical and hygrothermalcharacterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study, European Journal of Environmental and Civil Engineering,Taylor& Francis. DOI.

[56] Cours de protection contre l'incendie destiné au préventionnistes incendie, http://www.aresu.be/, HelidAresu de Seui.

[57]**Ir Jean-François Denoël** ; Sécurité incendie et constructions en béton .

[58] Sécurité contre l'incendie dans les bâtiments, partie 1 prévention passive, dr. Ir. Aloïs Brüls et prof. Dr. Ir. Paul Vandevelde, mai 2000, ISIB.

[59] Sécurité incendie, collection Mémento acier, 2002.

[60] **Loïc Thomas Guy Archambault.** Sécurité incendie Collection Mémentos acier.Nouvelle édition 2005.

[61] **Guoqiang Li Peijun Wang**, Advanced Analysis and Design for Fir Safety of Steel Structures, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springe Verlag Berlin Heidelberg 2013.

[62]I**. ALLAL**« Tenue et comportement au feu des bétons » mémoire de magistère,université des freresmentouri Constantine.

[63] Cycle de formation, Résistance au feu des constructions, application des Eurocodes dans le cadre de la formation « FireSafety Engineering », Pr. J.C. Dotreppe, A. Brüls, 2000.

[64] **Touidjine K.,** Le béton sous haute température – Avis d'expert, http://www.batiactu.com/edito/le-beton-sous-haute-temperature--28201.php, 2011.

[65] **Divet L., Arnaud S**., Derobert X., Fasseu P., Faure R.-M., Larive C., Naquin B., Olivier G., Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai n° 62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2005.

[66]http://www.bbri.be/antenne_norm/brand/french/home/norm_and_regl/norm_europe/index.html

[67] Décision de la Commission du 3 mai 2000 mettant en œuvre la directiv 89/106/CEE du Conseil, en ce qui concerne la classification des caractéristiques de résistance au feu des produits de construction, des ouvrages de construction ou de parties de ceux-ci (2000/367/CE)

[68] La résistance au feu des constructions et les Euro codes, 1ère partie, Magazine CSTC 3ème trimestre 2001, Yves Martin.

[69] La résistance au feu des bâtiments, **Arnold Van Acker**, avril 1996.

[70] **NF EN 13501-1 (2013).**Classement au feu des produits et éléments de construction - partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu.

[71] Comité national pour le développement du bois (2012). Le matériau bois et ses dérivés.

[72]**Laurent Molez.** RÉSISTANCE AU FEU DES OUVRAGES EN BÉTON. Master. Université Laval, Québec, Canada. 2017. cel-01508072

[73] Irish Concrete Federation (2007). Compréhensivefier protection and safty with concrète.

[74] **S.HACHEMI:** «Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants»**.** Thèse doctorat Université Mohamed khider Biskra 2015

[75]**Xing Z.,** « Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[76] Xiao-Ting C., « Effet du chauffage sur le comportement mécanique et pro mécanique de matériaux cimentaires -propriétés hydrauliques et changements morphologiques », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2009.

[77] **Gaweska I. H**, «Comportement à haute température des bétons à haute performance évolution des principales propriétés mécaniques », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MODES, 2004.

[78] Menou A., « Etude du comportement thermo mécanique des bétons a haute Température *:* Approche multi échelles de l'endommagement thermique», Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004

[79] Belkacem T., « Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton », thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.

[80] Bidossessi A. Prosper P., « Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.

[81] Harada T., Takeda J., Yamane S., Furumura F., « Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures », Concrete for Nuclear Reactors, Detroit : Americain Concrete Institue, SP-39, p. 179-203, 1973.

[82] Felicetti R., Gambarova P.G., « Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strenght Siliceous Concretes », ACI Materials Journal, vol. 95, No.4, 1995.

[83] Schneider U., Diederich U., EHM C., « Effect of temperature on steel and concrete for PCRV'S », Nuclear Engineering and Design, vol. 67, p.245-258, 1981

[84] « Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling », International Federation for Structural Concrete.

[85] Schneider U: « concrete at high temperature – a general review ». Fire Safety Journal, vol. 13, p.55-68, 1988.

[86] Khoury G. A., « compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment », Compressive Strength of Concrete Research, Vol. 44, p.291-309, 1992.

[87] **I. SAADI :** Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances, « Effet des additions minérales et fibres de polypropylène » . Thèse de doctorat (2017)

[88] Diederichs U., Jumpanen U-M. and Penttala V., « *Behaviour of high temperatures »*, Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92. p.723, 1992.

[89] Bazant Z. P. et Kaplan M. F., « *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models* », Pearson Education, 1996.

[90] Sliwinski J., Leonard R., Tracz T., « *Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish)* », Proc. Of 2nd Conf. DniBetonu,Polski Cement, Wisła 2004.

[91] Kalifa, P. et Menneteau F. D., « Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures », Rapport BHP 2000.

[92] Piasta J., « *Heatdeformations of cements phases and microstructures of cementpaste*», Matériaux et Constructions, N°102, p.415-420, 1984.

[93] Noumowé N. A., « *Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances »*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.

[94] Noumowé N. A.,Clastres P., Debicki G., Costaz J. L., « *Transit heating effect on high strength concrete »*, Nuclear Engineering and Design, vol. 166, p. 99-108, 1996.

[95] Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Vandevelde P., « *Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature »*, Cementand Concrete Research, vol. 37, p. 978-987,2007.

[96] Kalifa P.,Tsimbrovska M., « *Comportement des BHP à hautes températures »*, État de la Question et Résultats Expérimentaux, Cahier de CSTB N° 3078.

[97] Ludovic M., « *Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV »*, Thèse de doctorat, Université deGrenoble, 2006.

[98] Phan L. T., Carino N. J., « *Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature* », National institute of standards andtechnology, Materials and structures, vol. 36, N°256, p.91-98, 2003.

[99] Dias W. P. S., Khoury G. A., Sullivan P. J. E., « *Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C »*, ACI Materials Journal, N°87M18, 1990.

[100] Castillo C., Durrani A. J., « *Effect of transient high temperature on high-strength concrete »*, ACI Materials Journal, N°87-M7, p.47-53, 1990.

[101] Felicitti R.,Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G .A., « *Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling »*, Fifth RilemSymposium on Fibre-Reinforced Concretes, N°5, p.749-758, Lyon, France, 2000.

[102] Thelandersson S., « *Effect of high temperatures on tensil strength of concrete* », Lund Institute of Technology, Division of Struct. Mech. And Concrete Constr., Neostyled, p. 27, 1971.

[103] Felicetti R.,Gambarova P. G., Sora MP. N., Khoury G. A. « *Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling* », 1985.

[104] Felicetti R.,Gambarova P. G., « *The Residual Tensile Properties of Performance Siliceous Concrete Exposed to High Temperature* », Mechanics of Quasi-Brittle Materialsand Structures, HERMES Science Publications, Paris, p.167 -186, 1999.

[105] Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F., « *Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures* », In International Seminar onConcrete for Nuclear reactors, ACI Special Publication, paper SP34, p 377-406, 1972.

[106] Khoury G. A., Sullivan P. J. E., « *Research at imperial college on the effect of elevated temperatures on concrete* », Fire Safety Journal, vol. 13, p.68-72, 1988.

[107] Chang Y. F., Chen Y. H., Shen M. S., Yao G. C., « *Residual stress-strain for concrete after exposure to high temperatures* », Cement and Concrete Research, vol. 36, p.1999-2005,2006.

[108] Min Li et al., « *Mechanical properties of high-strength concrete after fire* », Cement and Concrete Research, vol. 34, p. 1001-1005, 2004.

[109] Tolentino E.,Lameira F.S., Gomes A.M., Rigo da Silva C.A., Vasconcelos W.L., « *Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes* », Materials Research, vol. 5, N°3, p. 301-307, 2002.

[110] Sabeur H., Colina H., Bejjani M., « *Elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete* », Magazine of Concrete Research, vol.59, N°8, p. 559-566,2007.

[111] Fares H., « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.

[112] **Diederichs U.,**Jumppanen U. M., « *High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete* », VerlogfürArchitekturundtechn.wissencheften, Ernst&schn, p.191-197, 1992.

[113] 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.

[114] Harmathy T. Z., « *Effect of moisture on the fire endurance of building elements* », ASTM Special Technical Publication, N° 385, p. 74-95, 1964.

[115] Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A., « *How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?* », Cement and Concrete Research, vol. 36,p. 929-942, 2006.

[116] Phan L.T, Lawson J.R., Davis F.L., « *Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and résidual properties of high performance concrete* »,Materials and Structures, vol. 34, p.83-91, 2001.

[117] Harmathy T.Z., « *Effect of moisture on the fire endurance of building element* », National Research Council, Research paper No 270 of the division of building research, Ottawa, Canada, 1965.

[118] Hertz K., « *Heat-induced explosion of dense concretes* », Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report No 166, 1984.

[119] Zhukov V.V., « *Reasons of explosive spalling of concrete by fire »*, Scientific research Institute for Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, 1994.

[120] Hertz K. D., « *Limits of spalling of fire – exposed concrete »*, Fire safety Journal, vol. 38, p. 103-116, 2003.

[121] **Khoury G.A,** « *Effect of heat on concrete* », International Centre for Mechanical Sciences, 2003.

[122] Hertz K., S., « *Limits of palling of Fire Exposed Concrete* », Dep. Of Buildings and Energy Technical University of Denmark, 1998.

[123] **ULM F.J., Coussy O., Bazant Z.P.,** « *The "Chunnel" Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete* », Journal of Engineering Mechanics, pp 272-282, 1999.

[124] Noumowe A., « *Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C* », Cement andConcrete Research vol.35(11), p. 2192-2198, 2005.

[125] Khoury G. A., Willoughby B., « *Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: molecular structure and materials behaviour*», Magazine of Concrete Research, vol. 60(2),p. 125136, 2008.

[126] Kalifa P., Chéné G., Gallé C., « *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure* », Cement and Concrete Research, vol. 31(10), p.1487-1499, 2001.

[127] Khoury G. A., « Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: pressure relief mechanisms and modelling criteria », Magazine of Concrete Research, vol. 60(3), p. 189-204, 2008.

[128] Kalifa P.,Menneteau F.D., Quenard D., « *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures »*, Cement and Concrete Research, pp 1915-1927, 2000.

[129] Kalifa P., Pardon D., Manneteau F.D., GALLE C., CHENE G., PIMIENTA P., « *Comportement à haute température des Bétons à Hautes Performances: de l'éclatement àla microstructure »*, Cahiers du CSTB.

[130] Kalifa P.,Chene G., Galle C., « High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure », Cement and Concrete Research, p. 1487–1499, 2001.

[131] Shuttleworth P., « Fire protection of precast concrete tunnel linings on theChannel Tunnel Rail Link », Concrete, vol. 35(4), p. 12-22, 2001.

[132] Bilodeau A., Kodur V. K. R. et Hoff G.C., « Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire », Cement and Concrete Composites, vol. 26(2), p. 163-174, 2004.

[133] Yasuda K., Ono, et Otsuka T., « Fire protection for TBM shield tunnel lining », Tunn. Undergr. Sp. Tech., vol. 19(4-5), p.317, 2004.

[**134**] **R. Haniche.** Contribution à l'étude des bétons portés en température / Évolution des propriétés de transfert : Étude de l'éclatement, Thèse de doctorat, Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.

[135] NFP 18-451 « Bétons-Essai d'affaissement, Décembre 1981 ».

[136] NF EN 12390-7 « essai pour béton durci –partie7 : masse volumique du béton durci »

[137] NF EN 12390 « essai pour béton durci –partie 3 résistance à la compression des éprouvettes »

[138] NF EN 12504-4 « Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son », AFNOR

[139] **NF EN12390-13** « essai pour béton durci –partie13: détermination du module sécant d'élasticité en compression »

[140] Xavier JOURDAIN – Hélène HORSIN MOLINARO- François SOLEILHET-« Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature » école normale supérieure paris-saclay. Edité le 12/11/2018

[141] **NF EN722-11** « norme française –Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie-partie 11 : détermination de l'absorption de l'eau par capillarité »

[142] NF P18-459 « béton –essai pour béton durci-essai de porosité et de masse volumique »

ANNEXE



50kg

متين
Matine

LAFARGE



Ciment pour béton exigeant

CPJ - CEM II/B 42.5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments.

Matine
CPJ - CEM II/B 42,5 N.

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA 442) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec)	Gravillons (sec)	Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	+ X7	+ X5	+ X4 + 25 L

Remaque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

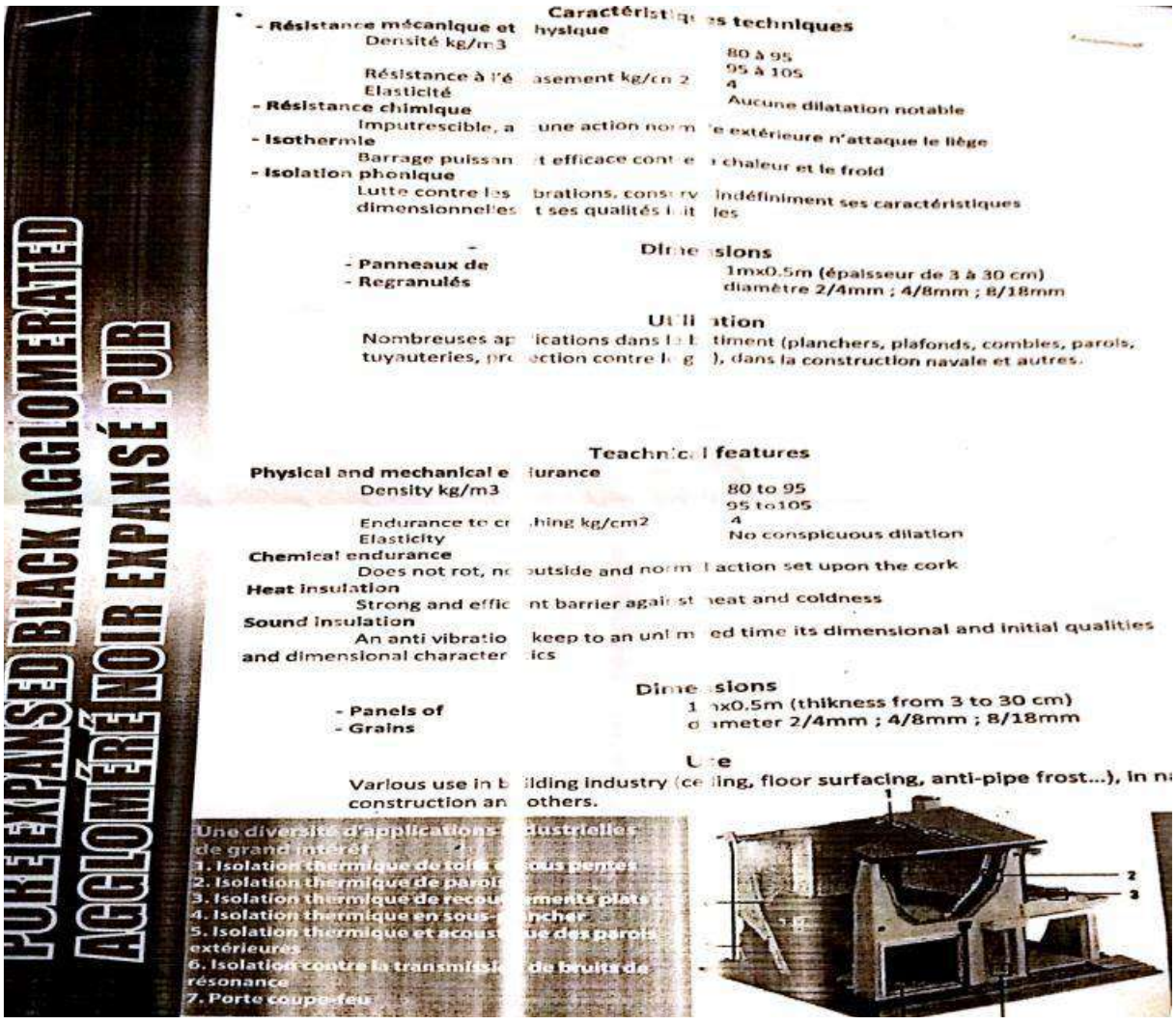
1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél. : + 213 (0) 21 98 54 54
Fax : + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com

LAFARGE لافارج



Fiche technique de liège expansé



Le malaxage des bétons au laboratoire. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.