

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et Hydraulique
Référence :

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع:



Mémoire de Master
2^{ème} année
Conception et Calcul des structures

**ETUDE DE L'EFFET DES HAUTES
TEMPERATURES SUR L'EVOLUTION DE LA
VITESSE DES ONDES SONIQUES DU BETON DE
GRANULATS RECYCLES (BRIQUE CONCASSE)**

Etudiants:
•Bourouis mohamed

Encadreur:
- D_r:Ounis Abdelhafid
- Mlle : Hachemi Samia

Juin 2013

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **ALLAH**, de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.

Ces remerciements s'adressent en particulier :

- Au **Dr. OUNIS Abdelhafid**, notre encadreur, pour ses remarques, ses suggestions qui ont été essentielles pour mener à bien notre travail de recherche.
- Nous remercions tout particulièrement **Mlle: HACHEMI Samia** , pour m'avoir patiemment guidé et conseillé. Sa présence, sa disponibilité ont été prépondérantes pour ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur d'évaluer notre travail.

–Tous les professeurs et les enseignants du département trouverons ici une marque de reconnaissance et de remerciement de notre part.

J'adresse mes remerciements aux techniciens, aux personnels du laboratoire des matériaux de construction de l'université de Biskra pour m'avoir aidé à la bonne réalisation de la partie expérimentale de cette thèse par leur collaboration technique, en particulier à **T. MESSAOUD**.

J'exprime également mes sincères sentiments amicaux à tous mes compagnons de travail, en particulier **M.SALHI .A** ainsi que **BEN KHADA** et **AICHE .N**.

– Enfin, nous remercions infiniment tous ceux qui sont très importants pour nous, qui nous ont toujours soutenus sans aucune condition, qui représentent le support de notre vie et sans lesquels l'aboutissement de ce travail n'aurait pas été possible : mes familles

RESUME

Aujourd'hui le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction pour les avantages économiques et la facilité de mise en œuvre qu'il présente. L'action des hautes températures sur le béton provoque une diminution graduelle des résistances. Cette diminution varie selon la température atteinte, la vitesse de montée en température et le type de béton.

L'objectif principal dans cette étude cherche à mettre en évidence la possibilité d'utiliser les briques concassé comme granulats pour béton et étudier l'évolution de la vitesse des ondes soniques.

La première partie de ce travail est de nature bibliographique. Elle présente une synthèse des travaux réalisés sur les propriétés mécaniques et physiques des composants du béton, et petite généralités sur les granulats naturels et les granulats recyclés, et sur l'évolution des propriétés hydriques et mécaniques du béton avec l'élévation de la température des composants.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale. Elle débute par une présentation des éléments constitutifs, les formulations retenues, la méthode de confection et le mode de conservation des matériaux testés au cours de cette étude. Cette présentation est suivie les résultats des vitesses des ondes soniques, qui permettent d'estimer l'influence des hautes températures sur les propriétés mécaniques des bétons, et Comparaison de l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés (brique concassée)30 % avec celles du béton de granulats naturels100% à l'état durci.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer des bétons à base de brique concassée. La résistance à la haute température de ces bétons est acceptable et comparable à celle du béton de granulats naturels 100%. Par ailleurs, pour le même niveau du béton.

Mots clés : béton, recyclé, granulats naturels, les essais, caractéristiques mécanique, propriété, haute température, pâte de ciment .

ملخص

الخرسانة هي المادة الأكثر استعمالاً في ميدان البناء وذلك لمزاياها الاقتصادية و سهولة استعمالها وصبها في القوالب. الحبيبات 75% من حجم الخرسانة. وتأثير درجات الحرارة العالية تتسبب في انهيار تدريجي في المقاومة . هذا النقص يتغير مع تغير درجات الحرارة المسجلة.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تسليط الضوء على امكانية استعمال الاجر كبد يل جزئي ب 30% من الحصى الطبيعية الكلية ودراسة تطور سرعة الموجات الصوتية بتغير الحرارة.

الجزء الأول من هذا العمل يمثل حوصلة الأعمال المنجزة بالنسبة للخصائص الميكانيكية و الفيزيائية لمركبات الخرسانة, حيث يبرز تطور الخصائص الهيدروليكية والميكانيكية مع تزايد الحرارة لمركبات الخرسانة. الجزء الثاني مخصص للدراسة التجريبية, يبدأ هذا الجزء بعرض العناصر الأساسية للخرسانة, التركيبات المنجزة , وطريقة الانجاز وحفظ العينات المنجزة , هذا العرض متبوع بنتائج سرعة الموجات الصوتية التي تسمح لنا بتقدير تأثير درجات الحرارة العالية على الخصائص الميكانيكية للخرسانة ذات اجر مكسر يقدر ب 30% من الحصى الطبيعية و مقارنتها مع الخرسانة 100% حصى طبيعية اثناء نضجها.

ان نتائج هذه الدراسة أظهرت امكانية استعمال الاجر في الخرسانة و هذا بالرغم من ضعف الخصائص الميكانيكية . كما تم التحصل على مقاومة جد مقبولة لهذه الخرسانة مقارنة بالخرسانة ذات حصى طبيعي 100% مع خفة في الوزن , وفضلا عن ذلك , فإن سرعة الموجات الصوتية هذه الخرسانة تفوق تلك الخاصة بالخرسانة ذات حصى طبيعية . وأيضاً من ناحية التمدد الاجر.

الكلمات الدالة : الخرسانة, الحبيبات الطبيعية, المميزات الميكانيكية, الخصائص, الحرارة العالية.

TABLE DES MATIERES

Table de matières I

Liste des figures III

Liste des tableaux VI

INTRODUCTION GENERALE..... 1

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1– INTRODUCTION.....3

I.2– GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON..... 3

I.2.1 – La pâte de ciment 4

I.2.2 – L'eau dans le béton..... 6

I.2.3 – L'interface pâte-granulats..... 7

**I.3. GENERALITES SUR LES GRANULATS NATURELS ET LES GRANULATS
RECYCLES.....9**

I.3.1–Les granulats naturels.....9

I.3.1.1– Classes granulaires.....9

I.3.2–Les granulats recyclés.....10

I.3.2.1–Fabrication des granulats recyclés.....11

I.3.2.2–Résistance à la compression.....12

I.3.2.3–Résistance à la traction.....14

I.4 –PROPRIETES MECANIQES DU BETON A TEMPERATURE

AMBIANTE.....15

I.4.1 – Comportement en compression 15

I.4.2 – Comportement en traction.....15

**I.5 – EFFET DES HAUTES TEMPERATURES SUR LA MICROSTRUCTURE
DU BETON.....17**

I.5.1 – Effet de la température sur la pâte de ciment..... 18

I.5.2 – Effet de la température sur les granulats..... 22

I.5.3 – Dégradation de l'interface pâte-granulats.....24

I.5.4 – Evolution de la porosité.....26

I.5.5 – Perte de masse.....30

I.6- EVOLUTION DES PROPRIETES MECANIQUES DU BETON AVEC LA TEMPERATURE.....	32
I.6.1 - Résistance en compression à hautes températures.....	33
I.6.2 - Résistance en traction à hautes températures.....	38
I.6.3 – Module d'élasticité du béton.....	41
I.7 – CONCLUSION.....	43
PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE DU BETON SOUS HAUTES TEMPERATURES.....	44
II.1 – INTRODUCTION.....	45
II.2 – PROGRAMME EXPERIMENTAL.....	45
II.2.1 – Matériaux étudiés, Composition et fabrication.....	45
II.2.1.1 – Formulations.....	45
II.2.1.2 – Caractéristiques des constituants utilisés.....	46
II.2.1.3 – Fabrication et Cure appliquée	49
II.2.2 – Essais expérimentaux.....	50
II.2.2.1 – Cycles de chauffage – refroidissement.....	50
II.2.2.2–Essai la vitesse des ondes soniques.....	50
II.3 – PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX	
II.3.1 – évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recycles avec la température	51
II.3.2 – Comparaison de l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recycles (brique concasse) avec celles du béton de granulats naturels.....	54
II.4 – CONCLUSION.....	58
CONCLUSION GENERALE.....	60
BIBLIOGRAPHIE.....	62

LISTE DES FIGURES

I.1	La diversité des formes du gel CSH.....	5
I.2	Modèle de Feldman et Sereda 1968 des particules de CSH avec les particules d'eau présentes sous forme libre ou absorbée.....	5
I.3	Illustration de la répartition de l'eau dans l'unité structurale de C-S-H.....	7
I.4	Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO.....	8
I.5	Systèmes de concassage / (a) système ouvert et (b) système fermé.....	11
I.6	Résistance en Compression à 28 jours.....	12
I.7	Evolution de la résistance en compression des bétons à base des granulats de briques concassés en fonction du dosage de ciment.....	13
I.8	Résistance en traction par fendage à 28 jours.....	14
I.9	Résistance à la traction (Essai Brésilien) des bétons à base des agrégats recyclés.....	14
I.10	Comportement du béton en compression simple.....	15
I.11	Comportement du béton en traction directe.....	16
I.12	Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique.....	18
I.13	Observation au MEB de deux échantillons de pâte de ciment durcie d'un béton.....	19
I.14	observation au MEB de la pâte de ciment durcie d'un béton après un incendie.....	20
I.15	Evolution de la quantité de portlandite et de calcite dans une pâte de ciment, au cours de l'échauffement.....	21
I.16	Influence du rapport C/S et de la température sur la nature des hydrates lors des réactions hygrothermiques.....	22
I.17	Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux)	23
I.18	Etude de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de divers granulats en fonction de la température.....	24
I.19	Déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats.....	25
I.20	Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat.....	26
I.21	Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement ..	27
I.22	Porosité en fonction de la température de conditionnement.....	28

I.23	Variation de poids en fonction de la température.....	28
I.24	Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement.....	29
I.25	Évolution de la distribution porosimétrique en fonction de la température mesurée par la technique d'intrusion.....	29
I.26	Évolution de la distribution porosimétrique d'un mortier.....	30
I.27	Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température.....	31
I.28.	Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température.....	31
I.29	Perte de masse des bétons chauffés à la vitesse de 1°C/min.....	32
I.30	Différents résultats de résistance à la compression obtenue d'après différents auteurs.....	34
I.31	Résistance à la compression à chaud.....	35
I.32	Résistance en compression et résistance en compression relative déterminées à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures.....	35
I.33	Rapport de la résistance en compression sur la résistance initiale en fonction de la température.....	37
I.34	Différents résultats de résistance à la traction obtenue auteurs.....	38
I.35	Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction.....	39
I.36	Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances.....	40
I.37	Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température.....	40
I.38	Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures.....	42
I.39	Evolution du module d'élasticité.....	42
II.1	Photo présentée les granulats (naturels et recyclés)	47
II.2	Analyse granulométrique des granulats (GN 5/15, GN 15/25 et BC 5/15, BC15/25, S 0/5).....	48

II.3 Photo présenté le malaxeur.....	49
II.4 Cycles de chauffage-refroidissement.....	50
II.5 Photo présenté appareil les ondes sonique.....	51
II.6 Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température.....	52
II.7 Évolution de la vitesse des ondes soniques relative avec la température.....	52
II.8 Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton ordinaire de granulats brique concassé BOBC avec celles du béton ordinaire granulats naturel BOGN.....	54
II.9 Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton haute résistance de granulats brique concassé BHRBC avec celles du béton haute résistance de granulats naturel BHRGN.....	55
II.10 Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton haute performance de granulats brique concassé BHPBC avec celles du béton haute performance de granulats naturel BHPGN.....	55
II.11 Apparition des microfissures dans le béton BOBC après chauffage.....	56
II.12 Apparition des microfissures dans le béton BHRBC après chauffage.....	57
II.13 Apparition des microfissures dans le béton BHPBC après chauffage.....	57

LISTE DES TABLEAUX

I.1 Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température.....	17
I.2 Les phases de l'évolution des résistances en compression en fonction de la température.....	37
II.1 Composition du béton testé.....	46
II.2 Composition chimique et minéralogique de ce ciment CPJ CEM II/ A 42,5 de ain-Touta	46
II.3 Propriétés mécanique et physique de ciment.....	47
II.4 Propriétés physique des granulats.....	48
II.5 Caractéristique de l'adjuvant	49
II.6 Valeurs de vitesse des ondes soniques avec la température.....	51

NOTATIONS

f_c -résistance mécanique caractéristique à la compression

f_t -résistance mécanique caractéristique en traction

E -module d'élasticité

ϕ_0 - Porosité totale

NOMENCLATURE et ABREVIATIONS

BHP - Béton à Hautes Performances

BO - Béton Ordinaire

DT- déformation thermique

DTSC –déformation thermique sous charge mécanique

DTT- déformation thermique transitoire

DTT norm- déformation thermique transitoire normalisée

M30 C - béton ordinaire de granulats calcaire, résistance en compression moyenne attendue, $f_{cmoyen} = 30$ MPa

M75 C - béton à haute performance de granulats calcaire, $f_{cmoyen} = 75$ MPa

M75 SC - béton à haute performance de granulats silico - calcaire, $f_{cmoyen} = 75$ MPa

M100 C - béton à haute performance de granulats calcaire, $f_{cmoyen} = 100$ MPa

C - granulats calcaires

SC - granulats silico-calcaire

ATD - Analyse Thermique Différentielle

ATG - Analyse Thermo Gravimétrique

C/S - rapport massique CaO sur SiO₂

C₂S - silicate bicalcique

C₃A - aluminat tricalcique

C₃S - silicate tricalcique

Ca(OH)₂ , CH - portlandite, hydroxyde de calcium ou chaux hydratée

CaCO₃ - calcaire

CaO- chaux libre

CO₂ - dioxyde de carbone

CSH - silicate de calcium hydraté

H.R. - humidité relative

RAG - Réaction Alkali-Granulat

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

E/C - rapport massique Eau sur Ciment

E/L - rapport massique Eau sur Liant (ciment + fumée de silice ou autres additions)

BTHP Béton à Très Hautes Performances

BV Béton vibré

BAP Béton auto-plaçant

MEB Micro électronique bailliage

INTRODUCTION GENERALE

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.

Cependant le comportement du béton est fortement modifié par la température. Sous l'action des hautes températures, les constituants du béton (granulats, pâte de ciment, eau) se décomposent et subissent des transformations différentes, ce qui influe sur l'évolution des propriétés mécaniques et thermiques du béton avec la température.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de la durabilité du béton de granulats recyclés (briques concassés) en cas d'incendie. On s'intéresse plus particulièrement à l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés.

Afin de mieux comprendre le comportement des matériaux étudiés à haute température il est indispensable de clarifier l'influence des principaux paramètres (rapport Eau/Ciment).

La première partie de ce travail est de nature bibliographique. Elle présente une synthèse des travaux réalisés sur les propriétés mécaniques et physiques des composants du béton, et sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec l'élévation de la température.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale. Elle débute par une présentation des éléments constitutifs, les formulations retenues, la méthode de confection et le mode de conservation des matériaux testés au cours de cette étude. Cette présentation est suivie par les résultats obtenus qui permettent d'estimer l'influence des hautes températures sur l'évolution de ces propriétés la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés (briques concassés).

PARTIE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Le béton est la matière la plus utilisée dans les constructions à travers le monde, c'est un matériau composite constitué principalement de pâte de ciment et de granulats. Ce caractère hétérogène a un rôle primordial dans le comportement mécanique de celui-ci. En effet, la plupart des phénomènes physico-chimiques se produisent dans la pâte de ciment.

L'objectif de cette partie est de donner une description des comportements mécaniques du béton et ces éléments à température ambiante et à haute température.

Cette partie est divisée en cinq éléments, premièrement on présente les généralités sur la microstructure du béton et ses composants à température ambiante. Dans le deuxième élément les généralités sur les granulats naturels et recyclés. Dans le troisième élément de cette partie les propriétés mécaniques du béton à température ambiante sont présentées, en suit, on présente l'effet des hautes températures sur la microstructure du béton. Le dernier élément détermine l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec les différentes températures.

I.2. GENERALITES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON

Le béton durci est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométriques des granulats mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative). De manière la plus générale le matériau béton, est un matériau composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte du ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). Nous présentons ci-après la microstructure de la pâte de ciment, ses principaux hydrates avec les modèles morphologiques de sa structure ainsi que la structure de l'interface pâte-granat (appelé auréole de transition).

I.2.1. la pâte de ciment

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

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

60 à 65% - $C_3S = Ca_3SiO_5$ - silicate tricalcique

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

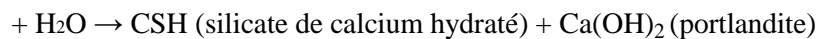
8 à 12% - **C₃A** = 3CaO.Al₂O₃ - aluminate tricalcique

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

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

Les principaux hydrates simples formés sont les suivants: silicate de calcium hydraté CSH, portlandite Ca(OH)₂ (ou hydroxyde de calcium), aluminates de calcium hydraté, ettringite, etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :

C₃S (silicate tricalcique)



C₂S (silicate bicalcique)

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

I.2.1.1. Modèles morphologiques de la structure du gel CSH

La structure de la pâte de ciment durci, composée de plusieurs variétés de silicates de calcium hydratés, est appelée gel de CSH. Les observations microscopiques des particules de CSH ont permis de les classer en quatre types morphologiques (classification de [DIAMOND, 1986].

Type I – feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux rayonnant autour des grains de ciment ; cette forme est visible pendant les premiers âges de l'hydratation.

Type II – nids d'abeilles, forme alvéolaire.

Type III – il apparaît sous une forme de petits disques ou de sphères assemblées pour former des particules plus massives.

Type IV – structure dense et amorphe.

Les CSH de type I et II cristallisent au début de la prise, dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Les types III et IV sont les hydrates tardifs (appelés les hydrates internes) qui

peuvent occuper la place des grains anhydres d'origine. Les différentes formes du gel CSH sont présentes sur Figure I.1

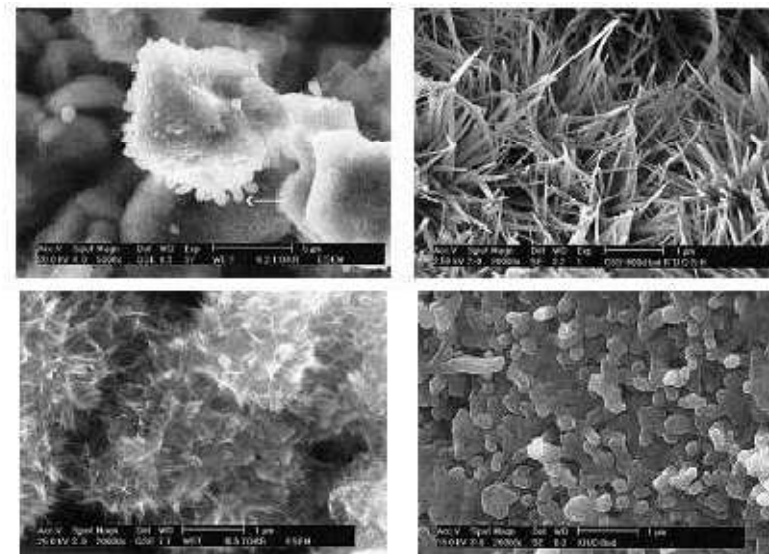


Figure I.1. La diversité des formes du gel CSH [Stark et al 2001].

Pour le CSH de type I est fondé sur une structure en lamelles (Figure I.2). Chaque lamelle a une forme de 2 à 3 feuillets d'une épaisseur de trois couches moléculaires, avec une extension de l'ordre du dix micromètres dans les deux autres directions et dont les pores d'une trentaine d'Angström [30×10^{-10} m] contiennent de l'eau en insertion. Chaque feuillet est composé d'une couche centrale d'octaèdres de chaux insérés entre deux couches de tétraèdres de silice [BILLARD.2003].

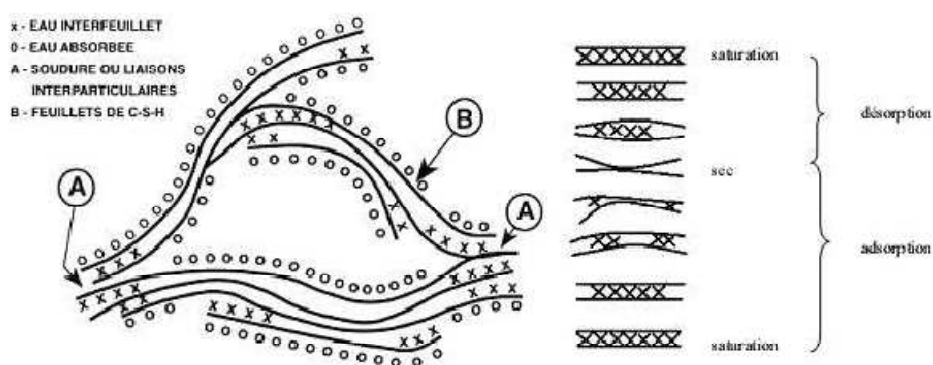


Figure I.2. Modèle de Feldman et Sereda 1968 des particules de CSH avec les particules d'eau présentes sous forme libre ou absorbée [BILLARD.2003].

I.2.2. L'eau dans le béton

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, voire le plus important avec le ciment. En effet, l'eau intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physicochimiques.

Ainsi, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication, va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

Une fois la prise et le durcissement achevés, l'eau de gâchage résiduelle devient un constituant à part entière de la microstructure du béton, jouant ainsi un rôle essentiel dans le comportement du matériau durci, avec effets sur le plan mécanique mais aussi sur celui de la durabilité (mouvements ioniques, cycles gel-dégel...).

L'eau présente dans le béton n'est pas une phase singulière et homogène. Plusieurs mécanismes sont mis en jeu afin de retenir l'eau dans la structure poreuse de la matrice (les granulats seront supposés ici non poreux).

La coexistence de l'eau avec la partie solide est l'objet de nombreuses classifications.

La méthode de classification, qui consiste à diviser l'eau en deux parties : l'eau évaporable et l'eau non-évaporable [HARMATHY 1965], suffit en général.

I.2.2.1. L'eau évaporable

L'eau évaporable comprend :

- l'eau libre : elle est constituée de la phase condensée qui n'est plus dans le champ d'influence des forces superficielles (en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane).
- l'eau capillaire : elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques.
- l'eau adsorbée la moins liée : elle est adsorbée sur la surface externe des particules (eau inter-lamellaire)

I.2.2.2. L'eau non-évaporable

L'eau non-évaporable comprend :

- l'eau adsorbée la plus liée : elle correspond à l'eau interfeuillet (fixée entre les feuillets des particules),
- l'eau chimiquement liée : elle correspond à l'eau qui a été consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment et qui est donc combinée avec d'autres composants à l'intérieur des hydrates.

Différents modèles de la répartition de l'eau, dans l'unité structurale de C-S-H, existent.

La figure suivante présente celui de Feldman et Sereda [BILLARD.2003] où l'on peut différencier notamment l'eau interfeuillet de l'eau hydroxylique.

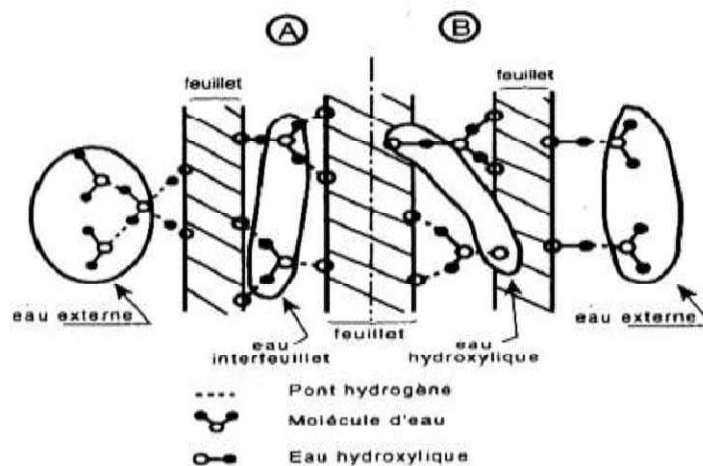


Figure I.3. Illustration de la répartition de l'eau dans l'unité structurale de C-S-H [BILLARD.2003].

I.2.3. Interface pâte-granulats

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice. Il existe des modèles de la zone de transition proposés par Monteiro [MONTEIRO.1986], Zimbelman [ZIMBELMAN.1987].

Nous présentons sur la figure I.4 le modèle de Diamond [DIAMOND 1986]. On observe, autour des granulats, une zone de pâte hydratée particulière. Sa première couche, plus proche de la surface des granulats, très compacte est composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats [DIAMOND.1986].

La deuxième couche d'épaisseur $0,5 \mu\text{m}$, est composée de feuillets de CSH. Après la deuxième couche de Ca(OH)_2 , nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique que la matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent à travers la matrice. La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. Les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion [PIASTA.1994]. La réaction entre le CaCO_3 provenant des granulats calcaires et les aluminates tricalciques et les alumino-ferrites tétrecalciques engendrent une formation des monocarbo-aluminates de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_n$. Ainsi, la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du matériau béton réalisée avec les granulats de cette nature a été observée [MALIER.1992], contrairement aux granulats du type quartz, qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Par ailleurs les liaisons entre la pâte et granulats concassés sont plus fortes qu'avec des granulats roulés [MALIER.1992].

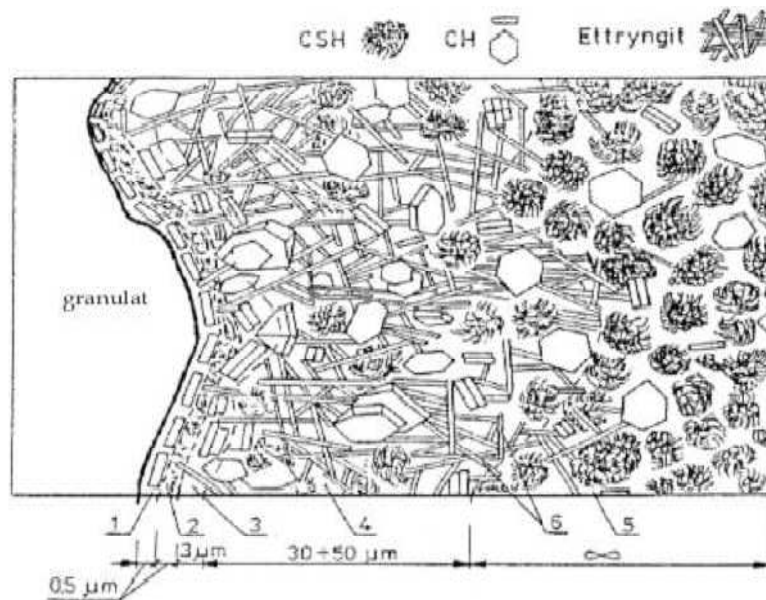


Figure I.4. Modèle de la morphologie de l'aurole de transition d'un BO [DIAMOND.1986].

1- couche continue de Ca(OH)_2 , 2- couche de CSH, 3- couche de Ca(OH)_2 , 4- zone poreuse, 5- pâte du ciment hors de l'aurole de transition, 6- ettringite.

Pour les bétons à haute performance, modifiés par l'ajout de fumée de silice, nous pouvons obtenir une réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone. En comparant avec le BO, où l'auréole de transition est d'environ 50 μm , son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 μm . Certaines sources [AITCIN.2003], [STARK.2001] signalent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (Figure I.4) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques. La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/C. Lorsque E/C augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.

I.3. GENERALITES SUR LES GRANULATS NATURELS ET LES GRANULATS RECYCLES

I.3.1. Les granulats naturels

Les granulats naturels sont utilisés actuellement à hauteur de 70 à 80% en volume dans la composition d'un béton et représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue. Les formulations actuelles de béton visent à augmenter la part de granulats de roche massive concassés. Ces matériaux, de par leur histoire de fabrication, n'ont pas du tout la même morphologie. La substitution des granulats roulés par des granulats concassés affecte considérablement la mise en œuvre du matériau.

I.3.1.1. Classes granulaires

Les granulas sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres. Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (Norme NFP18-101):

- Les fines 0/D avec $D \leq 0.008\text{mm}$;
- Les sables 0/D avec $D \leq 6.3\text{mm}$;
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31.5$;
- Les cailloux d/D avec $d \geq 6.3\text{mm}$ et $D \leq 80\text{ mm}$;
- Les graves d/D avec $20\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$.

Les granulats sont des roches qui ont été naturellement cassées et roulées dans le lit des cours d'eau ou mécaniquement concassées. Ils serviront, avec les liants à la composition des

mortiers et bétons, donc ce sont des matériaux inertes, de formes et de dimensions quelconques, appelées aussi par des agrégats.

Les granulats qui constituent le squelette du béton, doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les gisements géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières (ou sablières) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière [DEGHFEL.2010]

I.3.2. Les granulats recyclés

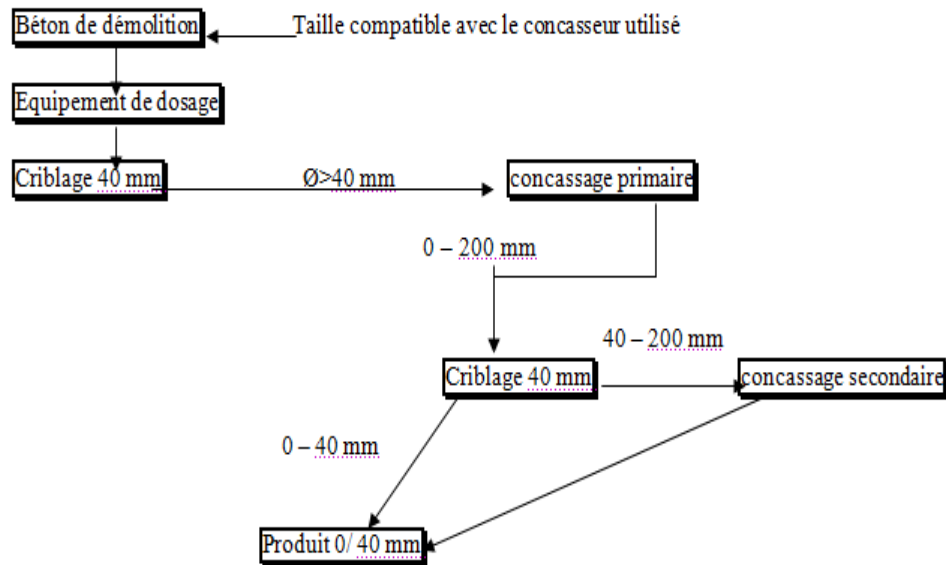
Par ailleurs, les déchets de démolition de bâtiments en béton qui, en région Île-de-France par exemple, s'élèvent à plusieurs millions de tonnes sont, au pire, transportés de plus en plus loin de la capitale pour être enterrés ou, au mieux, recyclés comme matériau de remblais à faible valeur ajoutée dans le domaine du terrassement routier. L'évolution anticipée des volumes de bétons en fin de vie indique clairement que, lorsque les bâtiments construits massivement dans les années 50-80 arriveront en fin de vie, les volumes de béton à recycler seront tels qu'ils ne pourront pas être entièrement utilisés en sous-couche routière.

Les granulats recyclés et les granulats de roche massive concassés ont pour point commun d'être constitués de particules dont la forme ne résulte pas d'une érosion lente comme dans le cas des granulats naturels alluvionnaires. Ils sont ainsi constitués de particules souvent anguleuses et présentant une rugosité de surface importante. L'influence de cette morphologie sur les propriétés d'empilement des grains et sur le comportement à l'état frais des bétons est extrêmement forte mais peu étudiée dans la littérature.

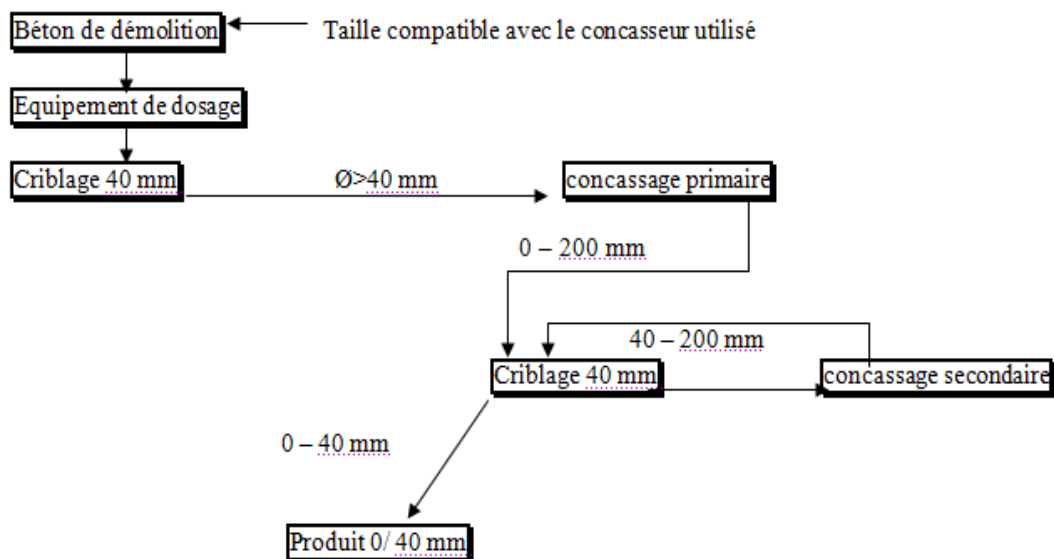
Le calcul en est bien simple pour le prix des granulats, qu'ils soient recyclés ou non. Plus les matériaux » nécessitent des transformations, plus ils sont dispendieux. Aussi, présentement avec tous les traitements effectués sur les résidus, les coûts sont plus élevés pour des granulats recyclés. Pour ce qui est des matériaux provenant de la démolition des bâtiments ainsi que des ouvrages de travaux publics tels que les blocs de béton et de maçonnerie qui nécessitent des stations de traitement et de concassage ce qui exige plus de transformations et par conséquent un coût élevé relativement à la fabrication des granulats naturels, mais devant les besoins prépondérants des granulats d'une part et les exigences environnementales d'autre part le recyclage de ces matériaux reste la solution meilleure et efficace.

I.3.2.1. Fabrication des granulats recyclés :

L'Organigramme suivant présente les différents systèmes de fabrication des granulats recyclés



(a) Système ouvert



(b) Système fermé

Figure I.5. Systèmes de concassage / (a) système ouvert et (b) système fermé [QUEBAUD.1996 cité par HACHANA.2008]

I.3.2.2. Résistance à la compression

La figure I.6 montre l'évolution de la résistance en compression à 28 jours en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés de béton et leurs humidifications. On constate des améliorations de la résistance à la compression par rapport au mélange témoin (graviers naturels 100%) sont obtenues pour les taux de substitution en graviers recyclés à 20 et 40%. Au-delà de 40% de granulats recyclés, les résistances diminuent et ceci est probablement lié aux caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés.

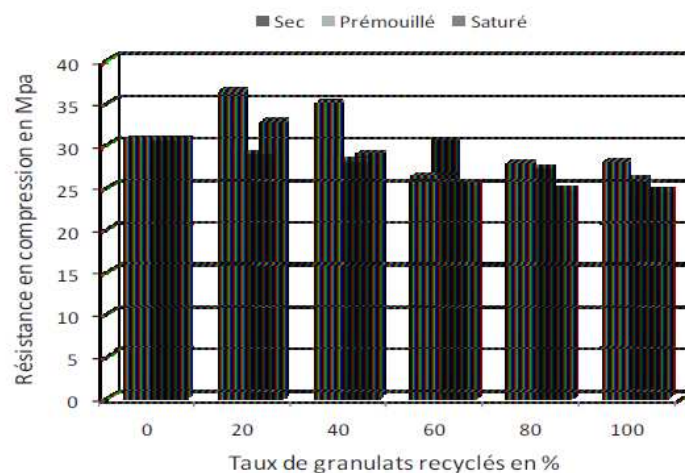


Figure I.6. Résistance en Compression à 28 jours [MEFTAH et ARABI.2011]

Les graviers recyclés utilisés à l'état sec semblent donner des meilleures résistances en compression que s'ils étaient prémouillés ou saturés d'eau. Cette dernière option compromet les résistances si les mélanges sont à forts taux en recyclés et la résistance visée n'est pas atteinte. Cette figure départage les mélanges en deux catégories, la première se distingue par une franche désignation de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec comme meilleure pour la résistance avec une limite du taux à 40%, la seconde pour des taux supérieurs à 40% la supériorité de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec n'est pas mise en évidence de manière claire. Pour cette teneur et moins en graviers recyclés à l'état sec, l'excès d'eau de gâchage est absorbé par les granulats recyclés et les mélanges obtenus sont à tendance ferme en maniabilité et par conséquent une bonne résistance. Cette dernière tend à chuter et plusieurs paramètres se conjuguent : forte présence de granulats recyclés de caractéristiques physiques et mécaniques moindres, chute de maniabilité pour les uns (granulats sec) et une quantité d'eau en excès pour les autres (granulats prémouillés et saturés).

Les graviers recyclés utilisés à l'état sec semblent donner des meilleures résistances en compression que s'ils étaient pré-mouillés ou saturés d'eau. Cette dernière option compromet les résistances si les mélanges sont à forts taux en recyclés et la résistance visée n'est pas atteinte. Cette figure départage les mélanges en deux catégories, la première se distingue par une franche désignation de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec comme meilleure pour la résistance avec une limite du taux à 40%, la seconde pour des taux supérieurs à 40% la supériorité de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec n'est pas mise en évidence de manière claire. Pour cette teneur et moins en graviers recyclés à l'état sec, l'excès d'eau de gâchage est absorbé par les granulats recyclés et les mélanges obtenus sont à tendance ferme en maniabilité et par conséquent une bonne résistance. Cette dernière tend à chuter et plusieurs paramètres se conjuguent : forte présence de granulats recyclés de caractéristiques physiques et mécaniques moindres, chute de maniabilité pour les uns (granulats sec) et une quantité d'eau en excès pour les autres (granulats pré mouillés et saturés).

D'après les essais réalisés par [HACHANA.2008] dont les variations du pourcentage des granulats naturels par rapport les granulats recyclé (briques : 0-30-50-70-100 %), on conclu que le meilleur pourcentage de substitution des granulats naturels par granulats recyclés (brique concassé) est égale à 30 % (figure I.7.).

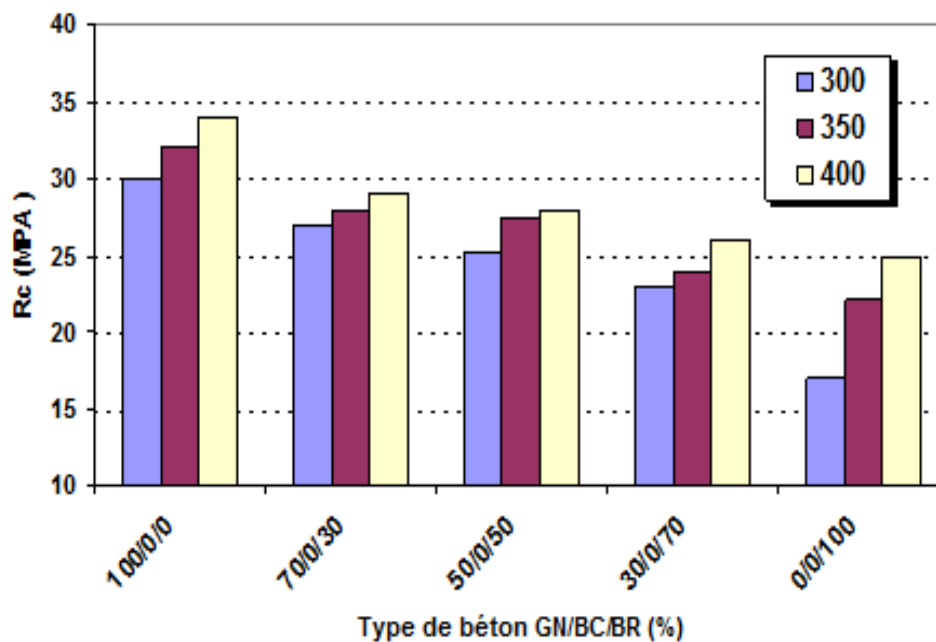


Figure I.7. Evolution de la résistance en compression des bétons à base des granulats de briques concassés en fonction du dosage de ciment [HACHANA.2008]

I.3.2.4. Résistance à la traction

Une similitude pour ce comportement à celui observé en compression est constatée, une meilleure résistance que celle du témoin est relevée à 20% de recyclés (figure I.8). Les résistances en traction obtenues reflètent parfaitement les bonnes résistances obtenues en compression, ce qui traduit une répartition homogène des composants dans le volume de béton.

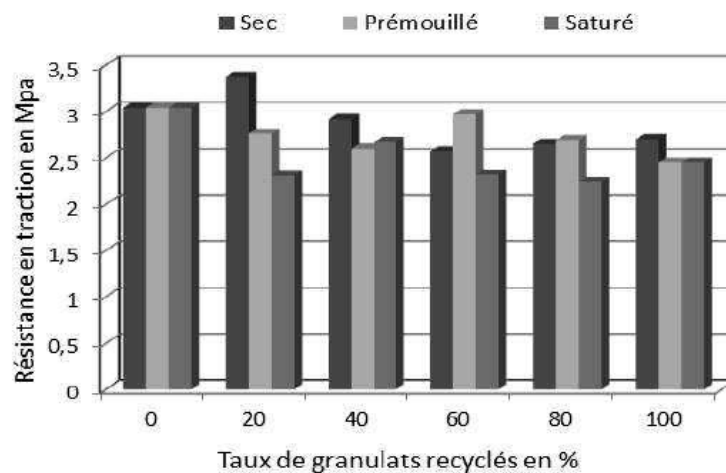


Figure I.8. Résistance en traction par fendage à 28 jours [MEFTAH et ARABI.2011]

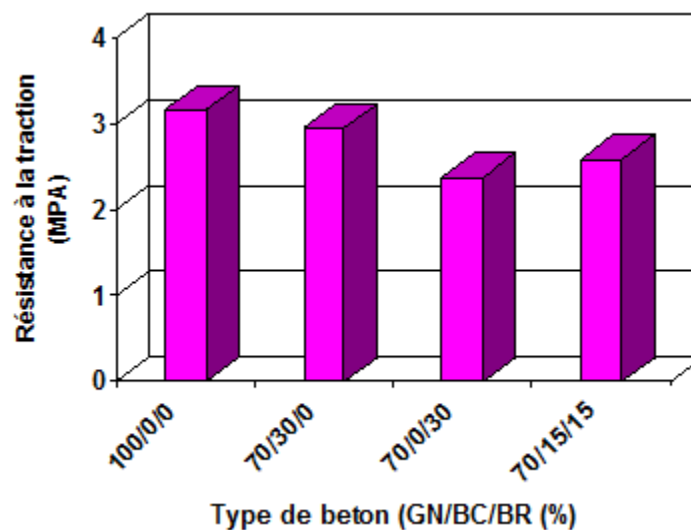


Figure I.9. Résistance à la traction (Essai Brésilien) des bétons à base des agrégats recyclés [HACHANA.2008]

I.4. PROPRIETES MECANQUES DU BETON A TEMPERATURE AMBIANTE

Le béton se caractérise pour la partie mécanique par la résistance à la compression, la résistance à la traction et plusieurs caractéristiques mécaniques.

I.4.1. Comportement en compression

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton. C'est pour cette raison que l'essai de compression uniaxial est le plus étudié. La forme de la courbe contrainte-déformation (figure I.10) montre que la réponse est principalement linéaire jusqu'à 30 % (phase 1) de la contrainte maximale f_c . Après ce point la réponse de la courbe devient non linéaire jusqu'à 80 % de la limite en compression simple (phase 2). Dans la troisième phase, la non linéarité est plus accentuée qu'avant et caractérisée par un début d'augmentation du volume apparent du matériau. Au delà de cette phase, le comportement devient adoucissant (phase 4). La présente (figure I.10) le comportement de béton en compression simple selon [RAMTANI.1990].

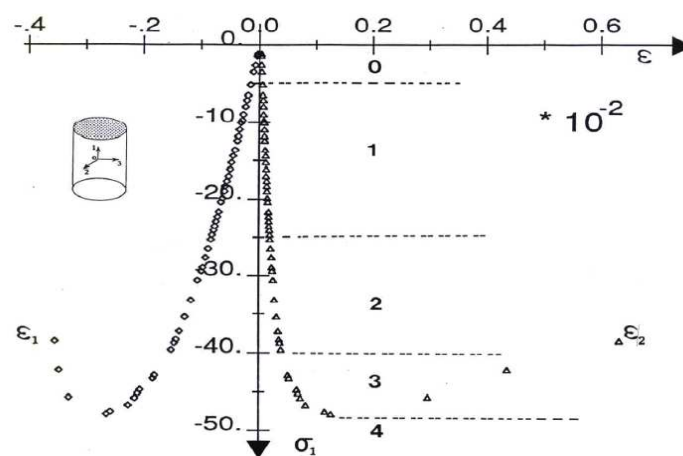


Figure I.10. Le comportement de béton en compression simple d'après [RAMTANI.1990].

I.4.1. Comportement en traction

Le comportement mécanique du béton en traction est moins étudié que la compression car d'une part le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et d'autre part, dû à son comportement quasi fragile, l'essai de traction directe est difficile à réaliser. Par

conséquent, on fait appel à des essais indirects de type flexion trois points pour identifier le comportement en traction du béton.

La Figure I.11. présente la courbe contrainte-déformation pour le béton en traction simple (essai de traction directe). Dans cette figure, on peut distinguer deux phases importantes du comportement du béton: dans la première phase, le comportement est quasiment élastique linéaire avec une légère perte de raideur juste avant d'atteindre le pic. La deuxième phase (phase adoucissante), après le pic, est caractérisée par une chute presque brutale de la contrainte. Durant cette phase, les microfissures bifurquent dans la pâte de ciment et se propagent pour constituer une fissure continue perpendiculaire à l'extension principale.

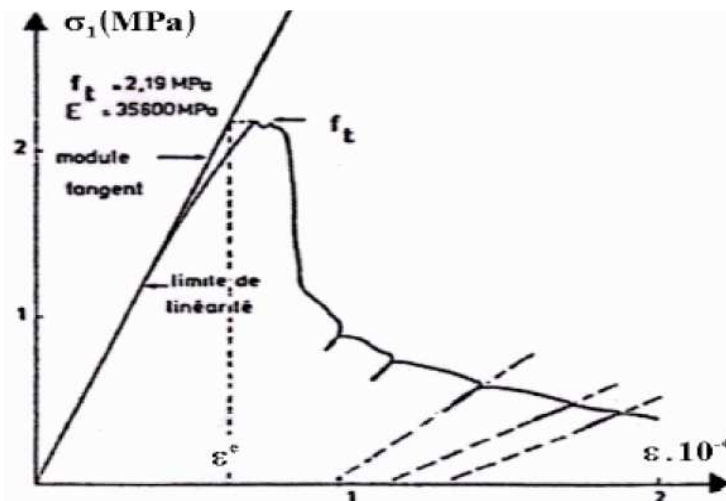


Figure I.11. Comportement de béton en traction directe [NECHNECH.2000].

L'interprétation de cette courbe fait apparaître distinctement deux phases :

- le pré-pic ($\sigma < f_t$) où la courbe s'écarte assez peu de la droite élastique. Selon [NECHNECH.2000], les premières dégradations apparaissent à environ 50 % de la contrainte maximale. La meilleure façon d'étudier les phénomènes qui se passent dans cette phase est la technique de l'émission acoustique.. Trois types de spectres ont été observés selon le degré d'humidité du matériau : bas (0-50 Hz) lié à la migration de l'eau présente dans le béton humide, moyen (jusqu'à 200 Hz) et élevés (jusqu'à 300 Hz) sont liés à la décohésion des interfaces et à la progression de microfissures. Par ailleurs, la localisation dans la phase pré-pic indique la présence de plusieurs sources d'émissions dispersées dans le matériau.

- Le post-pic (phase d'adoucissement) où la contrainte chute brutalement avant de se stabiliser.

Les microfissures se propagent dans la pâte de ciment pour constituer une fissure continue perpendiculaire à l'extension principale, tandis que les déformations continuent de croître.

I.5. EFFET DES HAUTES TEMPERATURES SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON

Dans cette partie nous présentons les effets physico-chimiques de la température sur la pâte de ciment et sur les granulats, et puis nous étudions par la suite le comportement à haute température du béton. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées selon Noumowé dans le Tableau I.1 [NOUMOWE.1995].

Entre 30 et 120°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170 °C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C	la première étape de la déshydratation. 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).
Entre 450 et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C	Il y a transformation de structure du quartz α en quartz β accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.
Entre 700 et 900 °C	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
A dessus de 1300°C	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

I.5.1.1' Effet de la température sur la pâte de ciment

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes comme nous l'avons déjà dit. Entre 30 et 120°C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer selon [HISLDORF.1967]. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de [HARMATHY.1970], montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable.

Ensuite à partir de 180 °C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium β C₂S, β CS et en eau [BAZANT.1996] tandis que se forme l'hydroxyde de calcium CH qui donne l'oxyde de calcium Ca(OH)₂.

A l'aide de la diffraction aux rayons X, Piasta et al [Piasta.1984] ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200 et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases β C₂S et C₃S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de Ca(OH)₂.

Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, [FISCHER.1970] a montré que celle-ci augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation, notée aussi dans d'autres travaux de Bazant et al [BAZANT.1982], est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel de CSH lors du processus de déshydratation.

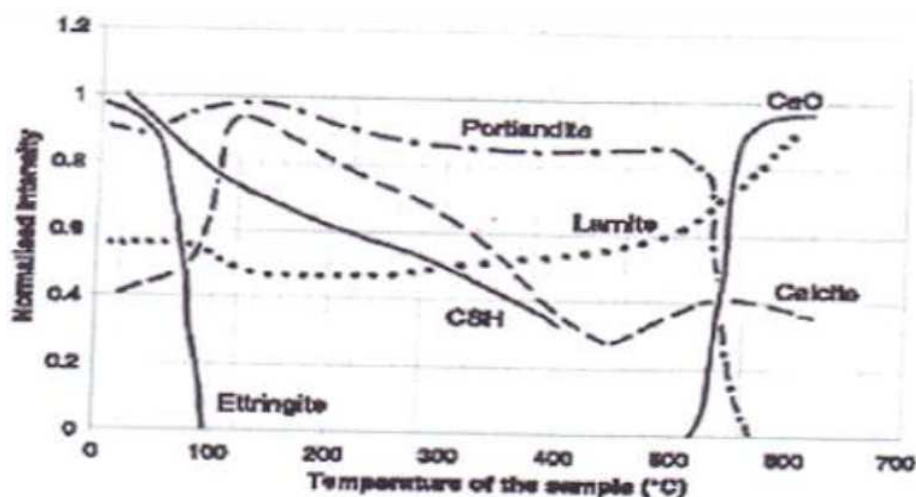


Figure I.12. Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique [CASTELLOTE et al .2004].

Par exemple, les travaux de Handoo [HANDOO et al.2002], dont sont extraits les clichés de la Figure I 13, présentent l'observation d'une pâte de ciment ordinaire à température ambiante et à 600 °C. Les clichés permettent de distinguer les deux principaux hydrates de la pâte de ciment, le gel CSH (structure amorphe, sans véritable morphologie type) et la Portlandite (structure nettement plus cristalline). La comparaison des clichés pris à température ambiante et à 600 °C met en évidence des modifications importantes de la microstructure du matériau : le gel CSH change de morphologie, des vides et des microfissures apparaissent.

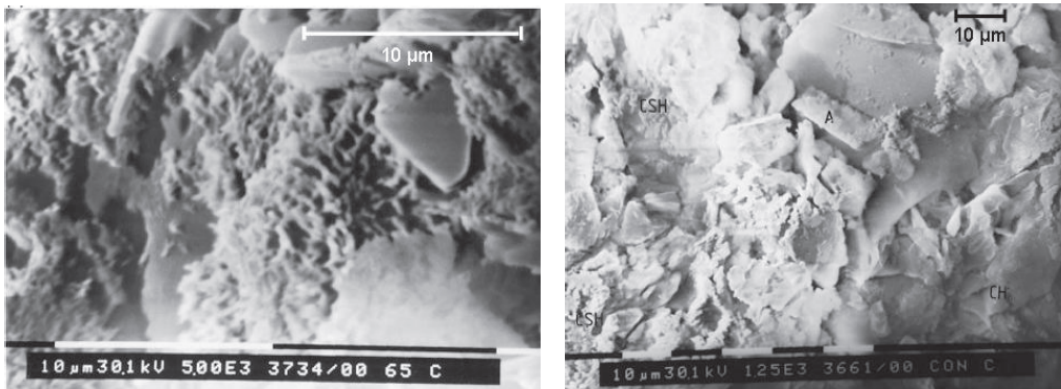


Figure I.13. Observation au MEB de deux échantillons de pâte de ciment durcie d'un béton : à température ambiante (cliché de gauche) et à 600 °C (cliché de droite) [HANDOO et al.2002]

Le cliché de la Figure I.13 présente l'observation au MEB d'un échantillon de béton ayant été soumise à un incendie réel. L'aspect vitreux du matériau ainsi que l'apparition d'une porosité importante permet d'estimer la température atteinte à plus de 1000 °C [DIVET et al.2005]. Effectivement, à partir d'une certaine température, le béton est un matériau qui peut fondre :

- la fusion de la pâte de ciment dépend essentiellement de la composition chimique du ciment employé. Une composition ordinaire de ciment (60% de C3S, 20% de C2S) entraîne une température de fusion de la pâte de ciment située aux alentours de 1200°C [SCHNEIDER et DIEDERICHS.1981, BAZANT et KAPLAN.1996].
- la température de fusion des granulats dépend évidemment de leur nature. Nous pouvons donner comme exemples 1060 °C pour les roches basaltiques, 1210 °C pour les roches granitiques et 1700 °C pour les quartzites [BAZANT et KAPLAN.1996].

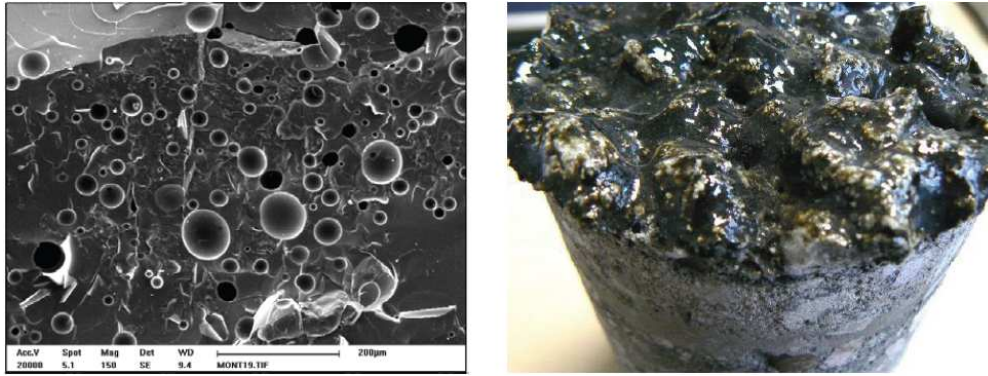


Figure I.14. À gauche, observation au MEB de la pâte de ciment durcie d'un béton après un incendie selon [DIVET, et al. 2005], à droite cliché d'une carotte prélevée dans une dalle en béton après 2 heures [MINDEGUIA.2009]

Un phénomène très intéressant appelé «**l'autoclavage interne** » est observé dans les bétons chauffés. La vapeur d'eau qui remplit le réseau poreux tend à s'échapper du béton. Si elle n'arrive pas à s'échapper facilement (cas des bétons denses – BHP), la pression de vapeur augmente. La température et la pression de la vapeur qui augmentent, favorisent l'apparition des réactions hydrothermiques. Les réactions de ce type entraînent des changements significatifs de la microstructure des hydrates. Le phénomène est bien connu dans le domaine de la préfabrication qui emploie parfois des autoclaves.

Le phénomène dans le cas des pâtes de ciment soumises aux températures élevées a été observé par [PIASTA 1984]. Il conduit à une augmentation de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Au-delà de 200 °C, la carbonatation de la portlandite s'accélère. Ceci se manifeste par la diminution de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ corrélativement à l'augmentation de la quantité de CaCO_3 (Figure I.15). La présence d'eau, sous forme de vapeur à haute température, peut également modifier la structure physique et chimique de la pâte de ciment. La combinaison des conditions hydrothermiques selon [VERBECK et al.1972], peut provoquer les changements de la nature des hydrates. Les changements dépendent principalement du rapport C/S (CaO/SiO_2), de la température et de la pression qui règne dans le matériau. La valeur du rapport C/S influence la formation de diverses formes d'hydrates entraîne la création des diverses formes des hydrates aux propriétés mécaniques différentes.

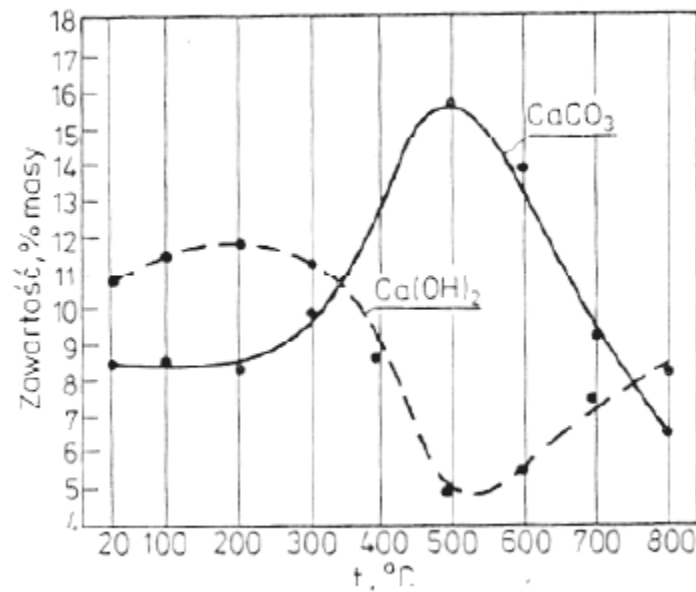


Figure I.15. Evolution de la quantité de portlandite et de calcite dans une pâte de ciment, au cours de l'échauffement, [PIASTA et PIASTA.1994].

La Figure I.16 provenant de l'étude de [VERBECK et al.1972], montre que pour une pâte de ciment de rapport C/S proche de 1, un gel de tobermorite se forme. Lorsque la température dépasse 180-200°C, d'autres types de silicates, du type xonolite et hillebanlite, peuvent se former.

Les réactions hygrothermiques qui sont recherchées en autoclave pour augmenter la résistance au jeune âge du béton, peuvent apparaître durant l'échauffement du matériau et en présence pressions internes de vapeur d'eau. Ainsi, la nature des hydrates peut changer au cours de l'échauffement affectant la résistance et le module d'élasticité.

Cependant, la déshydratation reste un de phénomènes majeurs durant l'échauffement de la pâte de ciment. La déshydratation 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.

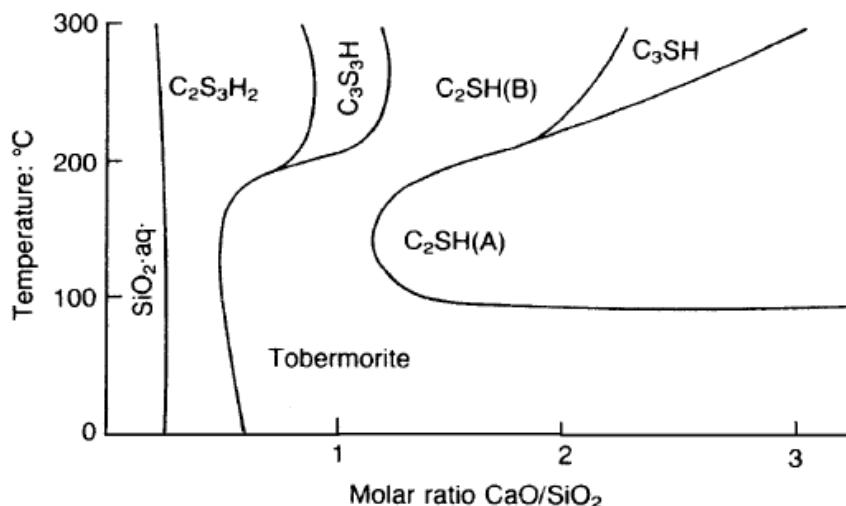


Figure I.16. Influence du rapport C/S et de la température sur la nature des hydrates lors des réactions hygrothermiques [VERBECK et COPELAND.1972]

I.5.2. L'effet de la température sur les granulats

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

La majorité des granulats est généralement stable jusqu'à 600°C [HARADA-1973]. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. La Figure I.17 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).

Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C. Une autre transformation cristalline est présente entre 500 et 650 °C (Figure I.17). A ces températures, le quartz- α se transforme en quartz- β sans changement de masse en revanche cette transformation est accompagnée d'une dilatation significative de l'ordre de 1 à 1,4 %. Dans le cas des granulats calcaires, la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) se produit entre 600 et 900°C. En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO)

formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 44%. Ceci cause la fissuration et l'endommagement des structures en béton.

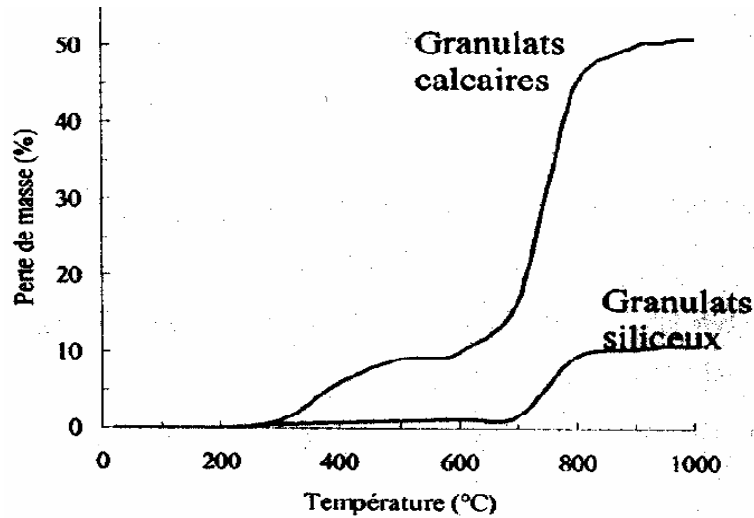


Figure I.17. Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux)

[HARMATHY.1965]

La figure I.18 présente la stabilité minéralogique de divers granulats sous l'effet de sollicitations thermiques. Les granulats étudiés peuvent présenter un caractère instable. Dans cette étude, les granulats légers possèdent une bonne stabilité thermique jusqu'à 1000°C. Par contre, les granulats calcaires, siliceux et silico-calcaires sont instables dès 550 °C.

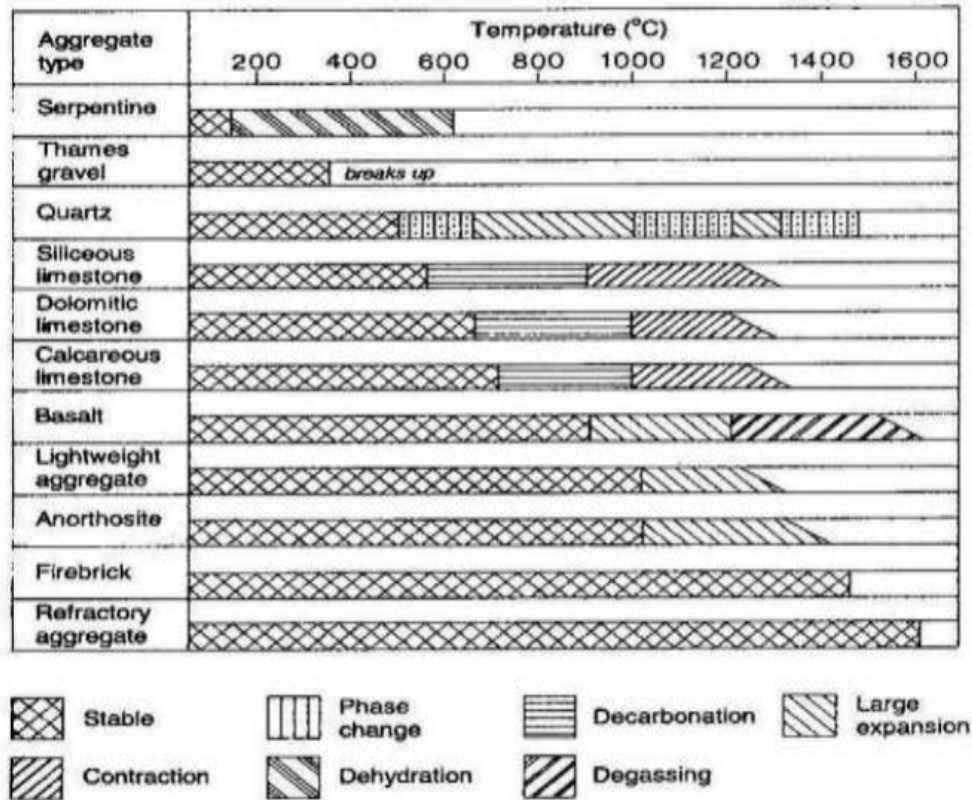


Figure I.18. Etude de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de divers granulats en fonction de la température [FIB.2007].

I.5.3. Dégradation 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.

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 delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation 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 [DIEDERICHS et al 1992] en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats.

Tous les éléments constituant le béton subissent avec la température des modifications physiques et chimiques. Concernant la matrice cimentaire et les granulats, des comportements opposés sont observés. Au delà de 105°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Ce comportement opposé engendre une microfissuration au niveau de l'interface pâte-granulat [FARES. 2009].

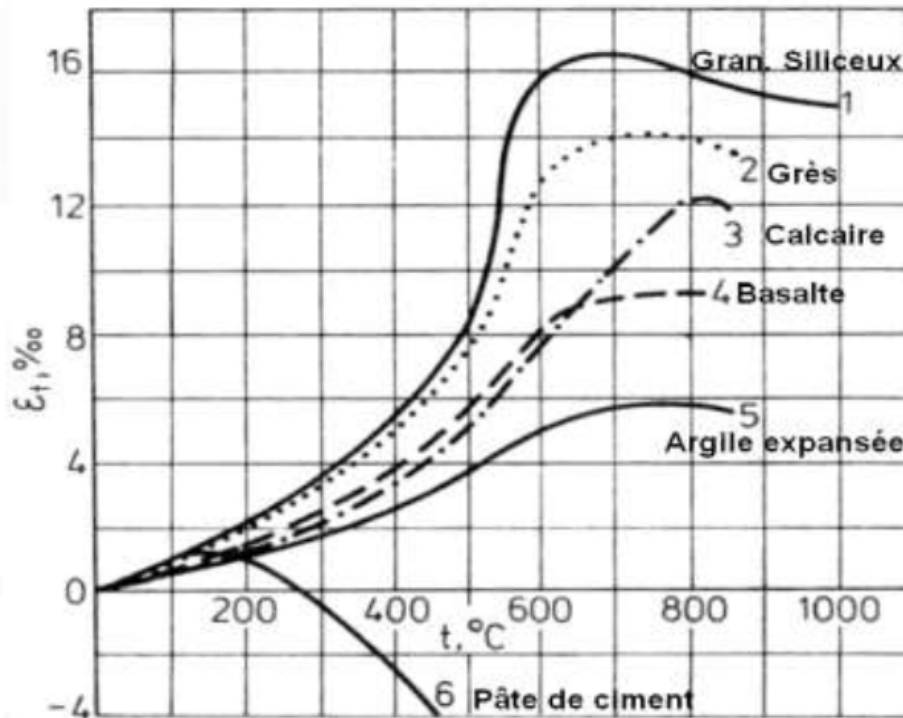


Figure I.19. Déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats [PIASTA.1984].

Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de compression au sein des granulats. [FARES.2009] constate que la déformation thermique des bétons composés de granulats légers sont les plus faibles, tandis que celles des granulats siliceux les plus importantes (Facteur 4 entre les 2 extrêmes). Donc, la nature du granulat a une incidence sur la déformation thermique, et par conséquent sur l'incompatibilité pâte-granulats.

Parallèlement à cette incompatibilité, les hautes températures entraînent le départ d'eau (libre, liée, adsorbée) contenue dans les pores et dans les hydrates. Or, au niveau de l'auréole de transition, cette déshydratation détériore rapidement les liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment. Cela entraîne l'apparition de microfissures.

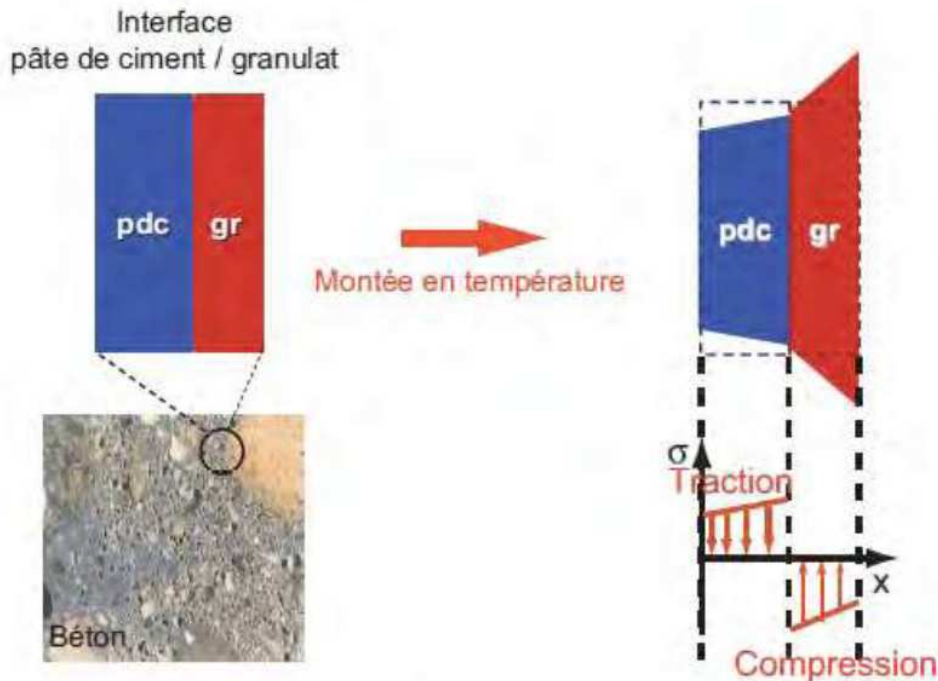


Figure I.20. Mécanismes liés aux incompatibilités pâte-granulat [DE SA.2007].

I.5.4. Evolution de la porosité

Le béton est un matériau poreux bi-phasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre [KALIFA.1998], [NOUMOWE .1995] montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

La Figure I.21 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par Kalifa et al [KALIFA.1998] par la méthode de la saturation d'eau.

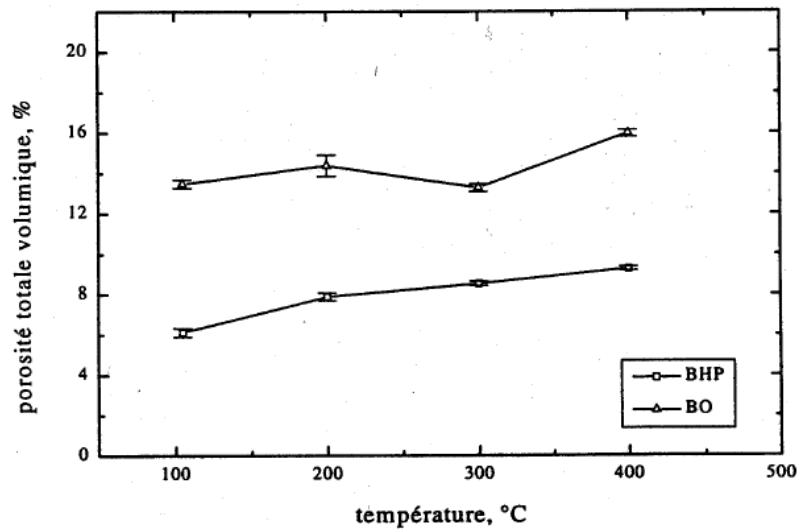


Figure I.21. Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement [KALIFA.1998].

$$\text{À } 105^{\circ}\text{C} \left\{ \begin{array}{l} \varphi_0 = 6,1\% \text{ du BHP} \\ \varphi_0 = 13,5\% \text{ du BO} \end{array} \right. \quad \varphi_0 : \text{Porosité totale}$$

Entre 105°C et 400°C, la porosité augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée.

Kalifa[KALIFA.1998] explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice.

Sur la Figure I.22. on observe la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par Noumowé [NOUMOWE .1995] sur le BO ($R_c = 38,1 \text{ MPa}$) et le BHP ($R_c = 61,1 \text{ MPa}$). Cet essai a été réalisé à l'aide du porosimètre à mercure.

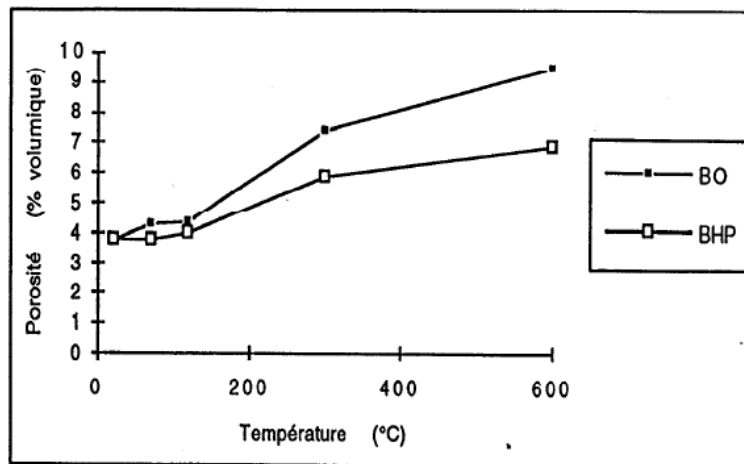


Figure I.22. Porosité en fonction de la température de conditionnement [NOUMOWE.1995].

Entre 22 et 120°C, la porosité augmente très peu. Ceci confirme le fait qu'à cette température, l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée.

La Figure I.23 montre la courbe expérimentale mesurée par Noumowé [NOUMOWE.1995] de la variation de poids en pourcentage du poids initial des BO et BHP en fonction de la température en surface.

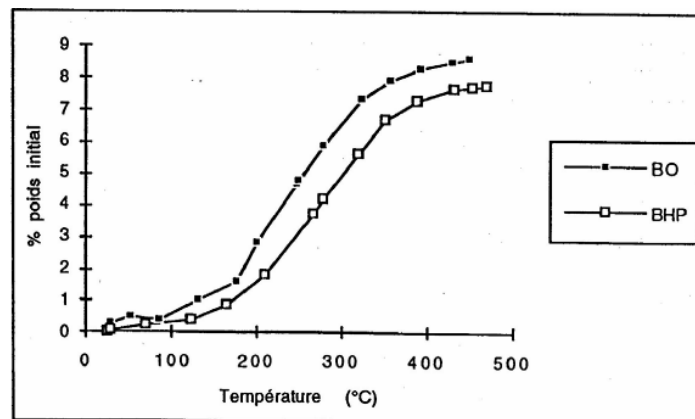


Figure I.23. Variation de poids en fonction de la température [NOUMOWE.1995].

Noumowe [NOUMOWE-1995] a remarqué que la variation de poids est très légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton. Ce qui laisse penser qu'en plus de l'eau, il y a d'autres constituants qui se sont échappés des deux bétons.

De même, la Figure I.24 montre l'évolution de la perte de masse par rapport à la température mesurée par Kalifa [KALIFA.1998]. Les courbes obtenues montrent que la perte de masse du BO est plus faible que la perte de masse d'un BHP.

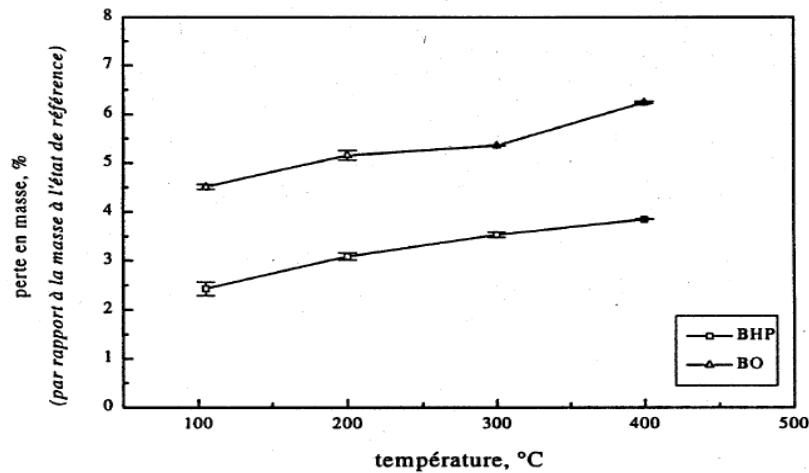


Figure I.24. Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement [KALIFA.1998].

La Figure I.25 présente l'évolution de la distribution porosimétrique mesurée par la technique d'intrusion au mercure d'un béton ordinaire et d'un béton à hautes performances [NOUMOWE et al. 1996]

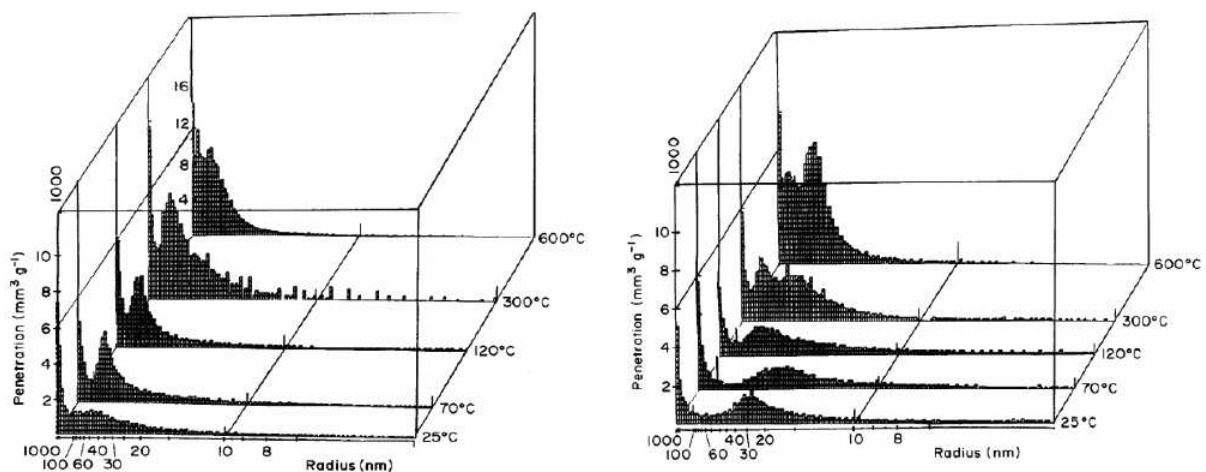


Figure I.25. Évolution de la distribution porosimétrique en fonction de la température mesurée par la technique d'intrusion de mercure par Noumowe [NOUMOWE et al. 1996].

A gauche, béton ordinaire, à droite, béton à hautes performances.

Pour les deux types de béton, nous observons un déplacement de la distribution porosimétrique vers les plus gros diamètres avec l'augmentation de la température. Ceci peut être attribué :

- à la perte d'eau du matériau,
- à l'endommagement de la matrice du fait de sa déshydratation,

- à l'endommagement de la matrice du fait des gradients thermiques,
- à l'endommagement de la matrice du fait de l'incompatibilité de dilatation thermique pâte/granulat.

Pour illustrer ce dernier point, la Figure I.26 présente la distribution porosimétrique d'un mortier en distinguant le réseau poreux lié à la pâte de ciment et celui lié à l'interface pâte/granulat. Jusqu'à 450 °C, la distribution porosimétrique de la pâte évolue peu. A partir de 450 °C, le système poreux se déplace légèrement vers les plus gros pores. En revanche, le système poreux lié à l'interface pâte/granulat subit des modifications importantes, et ceci dès 150 °C. Le déplacement du système poreux du béton vers les plus gros pores semble donc essentiellement lié aux incompatibilités de déformation entre la pâte et le granulat [ALONSO et al. 2003].

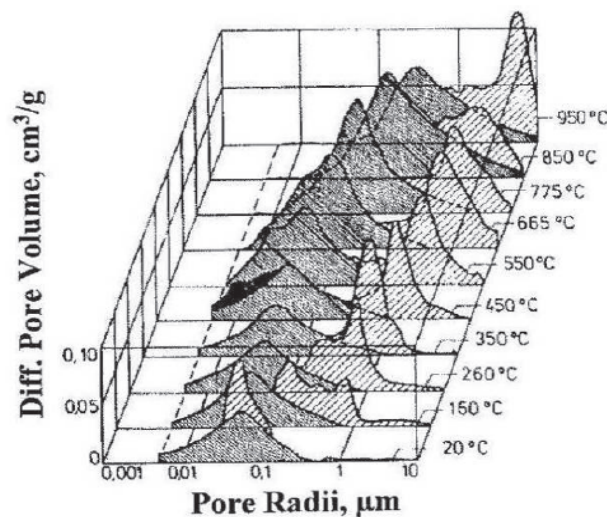


Figure I.26. Évolution de la distribution porosimétrique d'un mortier selon [alonso et al.2003]. Distinction entre la pâte de ciment durcie (zones sombres) et l'interface pâte/granulat (zones hachurées).

I.5.5. Perte de masse

La figure I.27. qui Montre les résultats d'analyse thermo gravimétriques (ATG) menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Ils permettent globalement de suivre l'évolution de la perte de masse au cours du chauffage, on observe ainsi une perte de l'eau libre entre 20°C et 200°C, une perte de l'eau liée chimiquement entre 200 et 500°C et une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats au delà de 500°C.

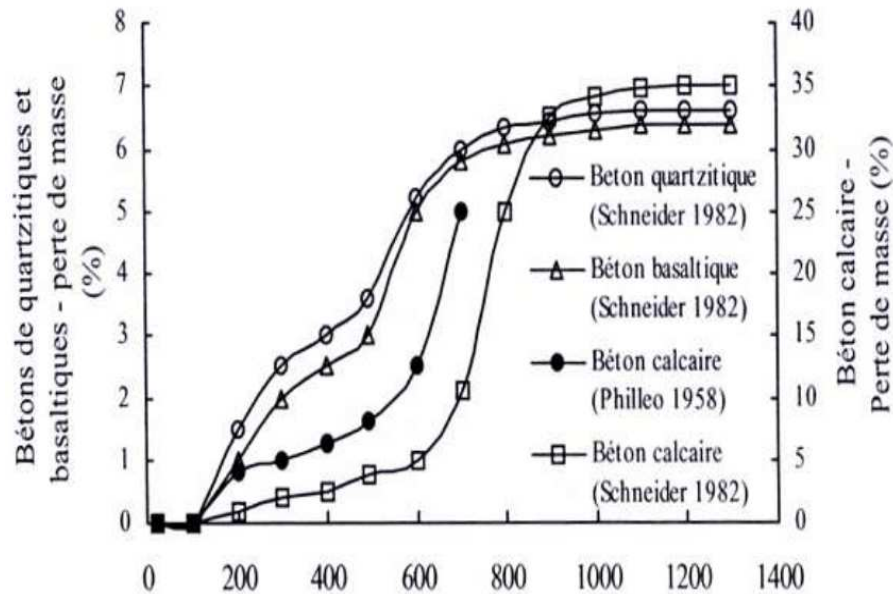


Figure I.27. Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la Température [SCHNEIDER.1982].

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la figure I.28 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

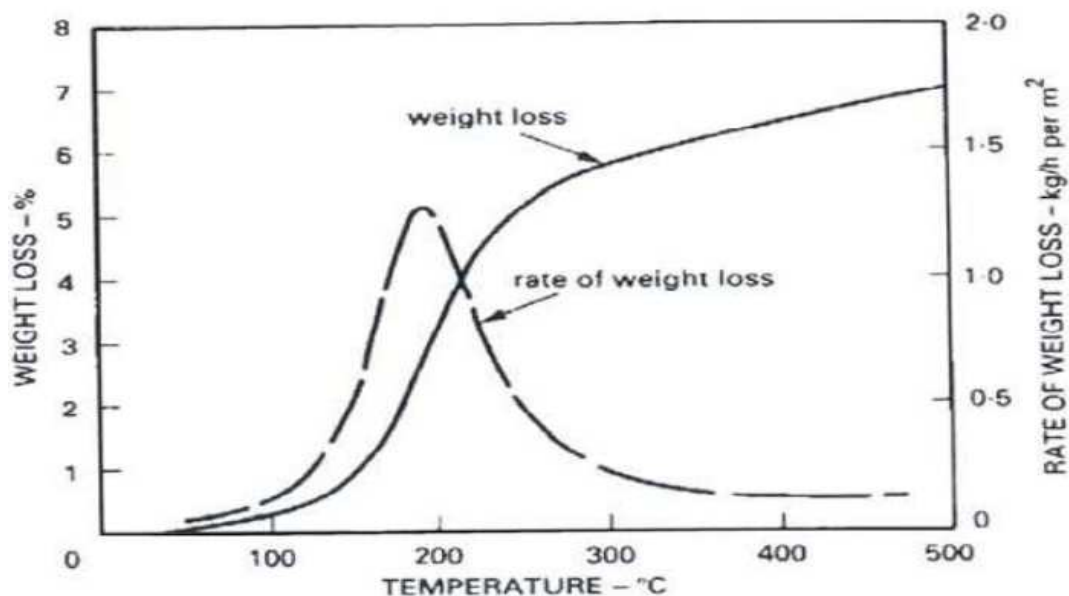


Figure I.28. Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [KHOURY.1992].

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

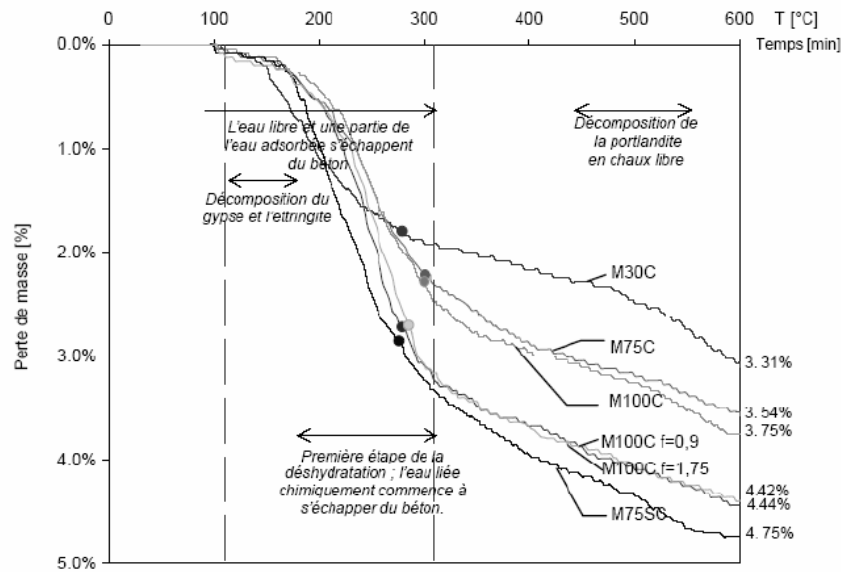


Figure I.29. Perte de masse des bétons chauffés à la vitesse de 1°C/min [GAWESKA.2004].

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau. Il est possible d'étudier la cinétique du processus de séchage et de déshydratation. Sur la figure I.29, on observe la perte de masse en phase transitoire, c'est-à-dire durant le traitement thermique.

Dans ce cas, la vitesse de chauffage est de 1°C/min jusqu'à 600°C. Mais, la perte de masse ne débute qu'à partir de 100°C. L'auteur [GAWESKA.2004] observe que la perte de masse commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Puis progressivement, les gaz et fluides présents dans le matériau sont mis en mouvement

I.6. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES AVEC LA TEMPERATURE

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

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

I.6.1 Résistance en compression à haute température:

Plusieurs facteurs combinés peuvent influencer la résistance du béton. En effet, on peut observer une importante dispersion des résultats pour un chauffage à 150°C. Les bétons peuvent présenter un gain de résistance de l'ordre de 20% ou une perte de résistance allant jusqu'à 30%.

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

La figure I.30 regroupe les valeurs de la résistance à la compression en fonction de la température de chauffage de différents auteurs (quel que soit le type de béton : BAP, BV avec ou sans addition minérale). On observe pour la plupart des bétons une diminution de la résistance avec l'augmentation de température, Ou les résultats sont comparés avec la réglementation [EUROCODE et DTU]. L'enveloppe globale des résultats se situe en dehors des limites préconisées par ces normes.

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

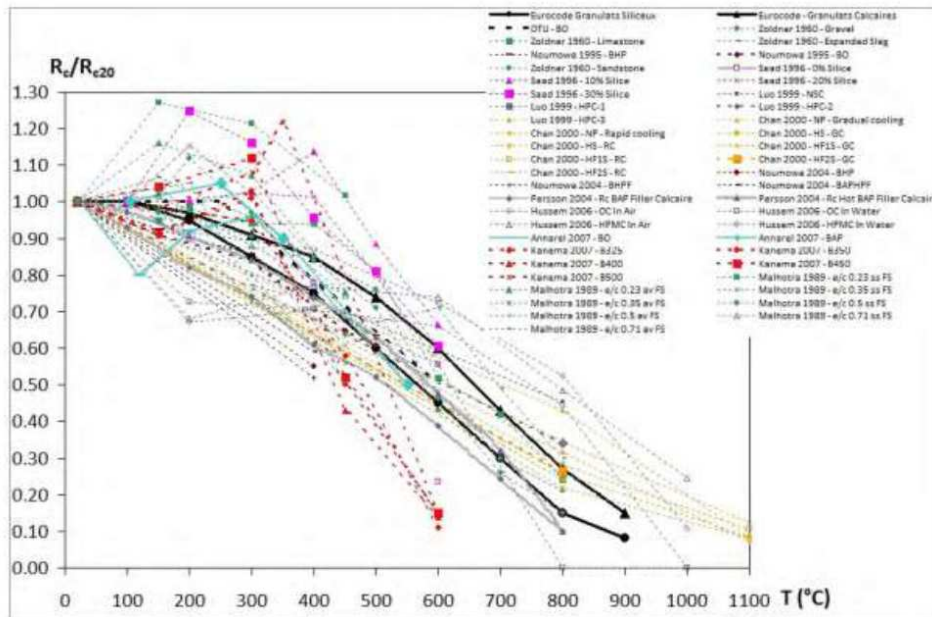


Figure I.30. Différents résultats de résistance à la compression obtenue d'après différents auteurs [FARES.2009].

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

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

Au delà de 350°C, la résistance en compression chute très rapidement. Cela est expliqué par la décomposition des hydrates de ciment comme la portlandite, les CSH et enfin la transformation allotropique du quartz qui fragilise les granulats [FELICETTI.2000]. Mais, également, l'apparition des fissures permet d'expliquer cette diminution [NOUMOWE.1995].

D'autres études montrent que l'utilisation de différents granulats conduit à des performances différentes. Abrams [ABRAMS.1971] rapporte que des bétons réalisés à partir de granulats légers et de carbonates présentent des résistances à chaud plus élevées que des bétons réalisés à partir de granulats siliceux suite à un chauffage à 600°C (Voir figure I.31).

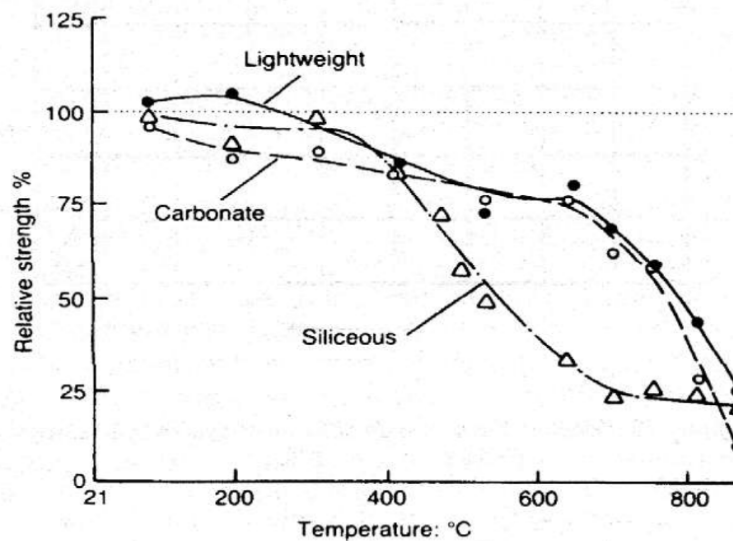


Figure I.31. Résistance à la compression à chaud [ABRAMS.1971].

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

Les valeurs de la résistance en compression et les courbes de la résistance en compression relative à la valeur observée à 20°C obtenues par Gaweska [GAWESKA.2004] sont regroupées sur la Figure I.32.

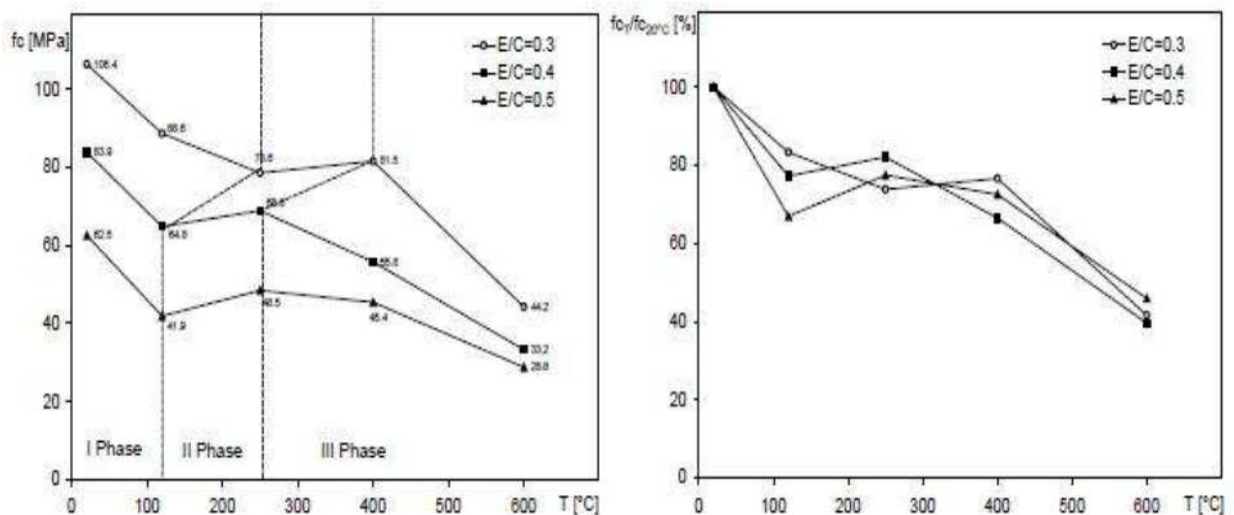


Figure I.32. Résistance en compression et résistance en compression relative déterminées à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures [GAWESKA.2004].

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

- Dans la **phase I**, entre 20 °C et 100 °C, la résistance relative diminue d'environ 20-30%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau qui peut entraîner un écartement des feuillets du gel CSH. L'écartement des feuillets provoque une diminution des forces d'attraction entre ces feuillets. De plus dans les BHP les pressions de la vapeur d'eau qui se créent dans le matériau induisent des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette solide.
- Puis, dans la **phase II** entre 100°C et 250°C, les valeurs de la résistance augmente par rapport à la valeur plus faible à 120°C. Cette augmentation peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau ré-augmentant les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH. Pour un béton de rapport E/C faible (0.3) la phase de récupération de la résistance est significativement retardée. Ce n'est qu'aux alentours de 400°C ou il ya une augmentation de la résistance pour ce béton. Ceci peut s'expliquer par la perméabilité plus faible de ces bétons plus compacts. Par conséquent le départ de l'eau est ralenti d'où une augmentation de la résistance retardée. Cette récupération de résistance paraît être dépendante de la durée du palier de la stabilisation de la température.
- A partir de 400°C, pour le béton de rapport E/C égale à 0.3 et 250°C pour le béton de rapport E/C égale à 0.4 et 0.5, les résistances relatives diminuent de façon monotone (**phase III**). Il n'y a plus d'eau libre dans le matériau, mais la déshydratation du gel CSH continue et la portlandite se décompose aux alentours de 450°C. Gaweska [GAWESKA.2004] a également observe les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats qui se dilatent et la pâte qui, elle, subit un retrait important.

Dans le Tableau I.2 les hypothèses concernent l'apparition de ces phases son regroupé.

Phase	Plage des températures, environ :	Effet sur la résistance en compression	Hypothèses concernant l'explication du phénomène
I phase	de 20 °C à 120°C	diminution	<ol style="list-style-type: none"> dilatation thermique de l'eau ($\alpha_w = 70 \times 10^{-6}$) qui peut entraîner un écartement des feuillets du gel CSH et ainsi diminuer les forces d'attraction un affaiblissement des liaisons entre les hydrates pressions de la vapeur d'eau qui créent des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette
II phase	de 100 °C à 250 °C pour BHP de E/C faible 100°C- 400°C	augmentation	<ol style="list-style-type: none"> départ d'eau – séchage rapprochement des feuillets du gel CSH – renforcement des liaisons entre les hydrates
III phase	> 250°C pour BHP de E/C faible >400°C	diminution	<ol style="list-style-type: none"> déshydratation du gel CSH décomposition de la portlandite endommagement par la fissuration due à la différence de la dilatation thermique entre la pâte et les granulats

Tableau I.2. Les phases de l'évolution des résistances en compression en fonction de la température [GAWESKA.2004].

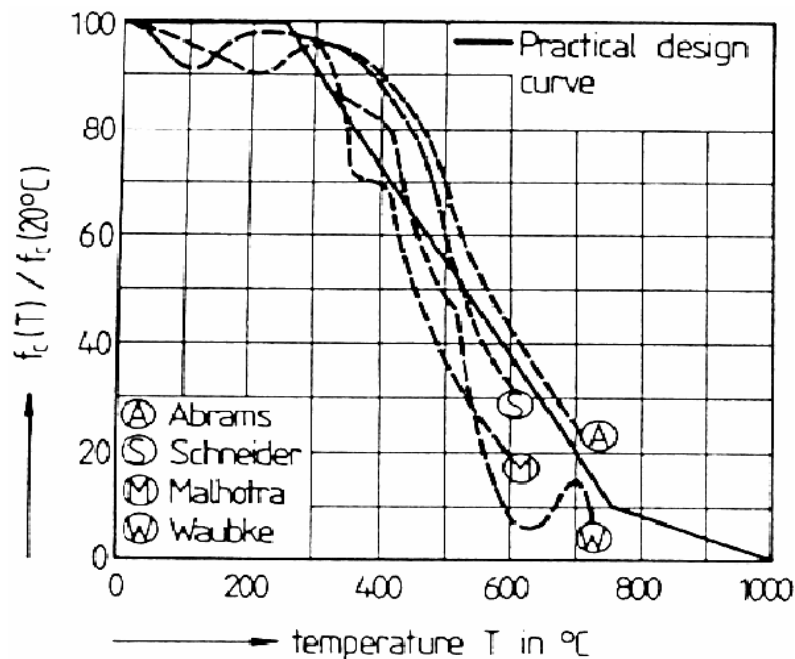


Figure I.33. Rapport de la résistance en compression sur la résistance initiale en fonction de la température [MALHOTRA. 1989].

Notons ici que l'analyse des résultats obtenus par Malhotra et al [MALHOTRA. 1989] montre un effet défavorable de la fumée de silice sur la résistance en compression pour les BHP de E/C=0,5 et un effet favorable pour les BHP de E/C=0,5 testés entre 150 et 450°C. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de Diederichs et al [DIEDERICHS.1992] qui montrent une faible sensibilité de la résistance vis-à-vis de la nature des additifs.

I.6.2. Résistance en traction à haute température

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

Sur la figure I.34, plusieurs résultats de résistance à la traction ont été collectés. On observe en général une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température. Jusqu'à 300°C, les valeurs sont assez dispersées avec des résistances relatives allant de 35% à 100%. Par contre, les valeurs fournies par l'Eurocode [EUROCODE2.2005] représentent plutôt des valeurs moyennes. Au delà de 300°C, les résultats sont tous supérieurs aux valeurs données par l'Eurocode.

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

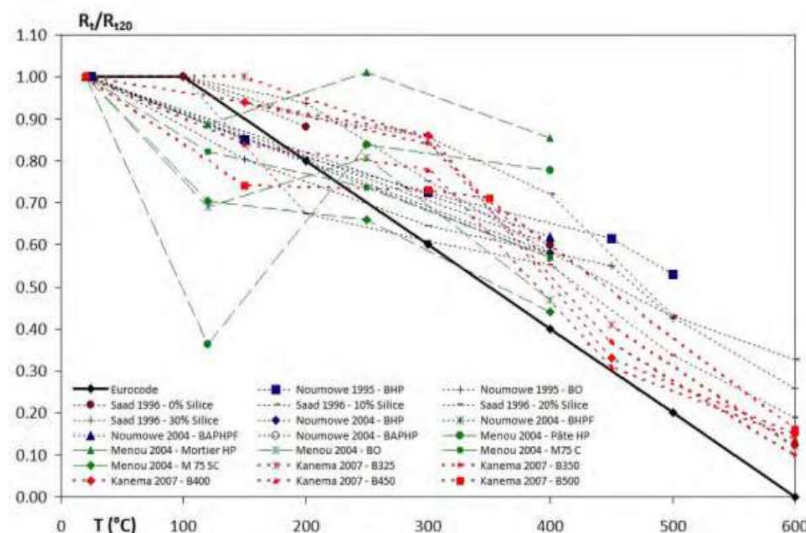


Figure I.34. Différents résultats de résistance à la traction obtenue auteurs [FARES.2009].

Selon Bamonte et al. [BAMONTE.2007], la meilleure manière de mesurer la résistance en traction est d'utiliser la traction directe avec encastrement des bords, car avec une rotation libre de l'éprouvette, la résistance est sous-estimée. Concernant l'essai par fendage (ou essai brésilien), il est considéré comme une bonne alternative aux essais de traction. Par contre, la résistance à la traction par flexion est trop affectée par l'augmentation de la ductilité d'éprouvettes prismatiques d'épaisseur fine (appelé poutre fine dans la figure I.35).

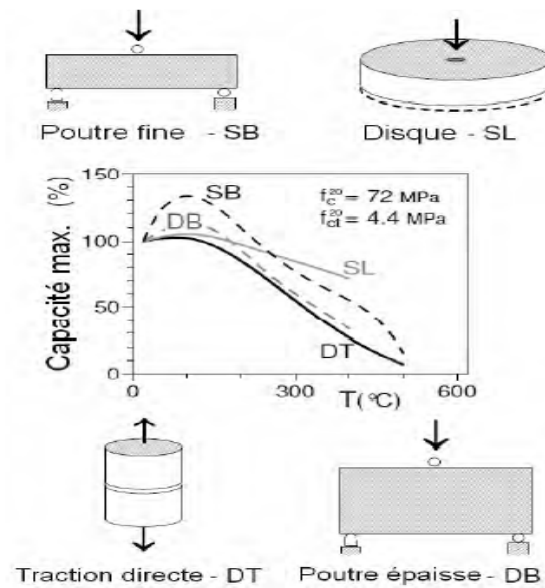


Figure I.35. Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction [BAMONTE et al.2007].

Gaweska[GAWESKA, 2004] 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 I.36.). Ces résultats semblent corroborer ceux de Khoury [KHOURY, 1988] obtenus par des essais de flexion à haute température.

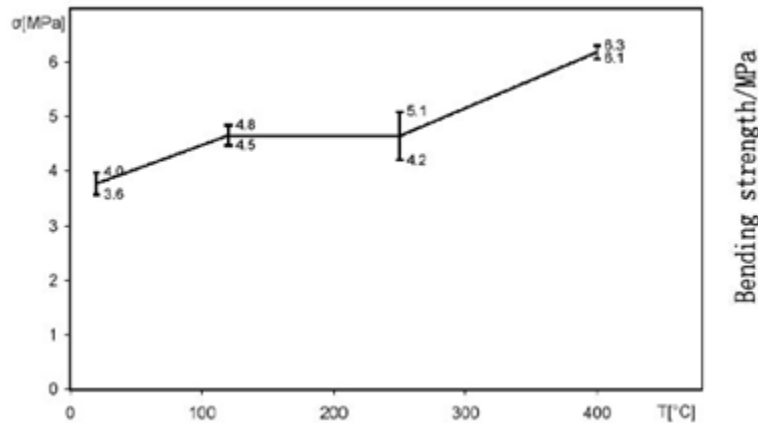


Figure I.36. Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [GAWESKA, 2004]

Les essais menés par Chang [CHANG.2006] 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.

Min Li [MIN LI, 2004] 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 I.37.).

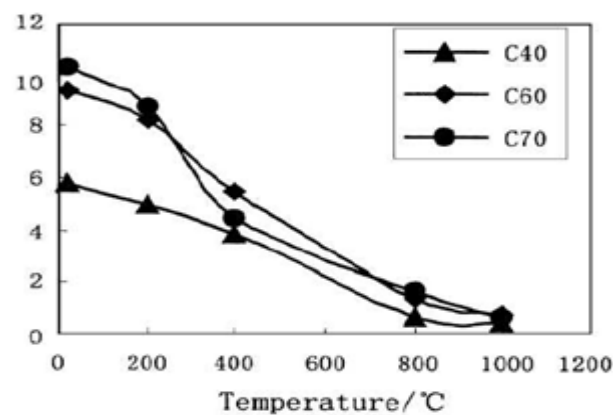
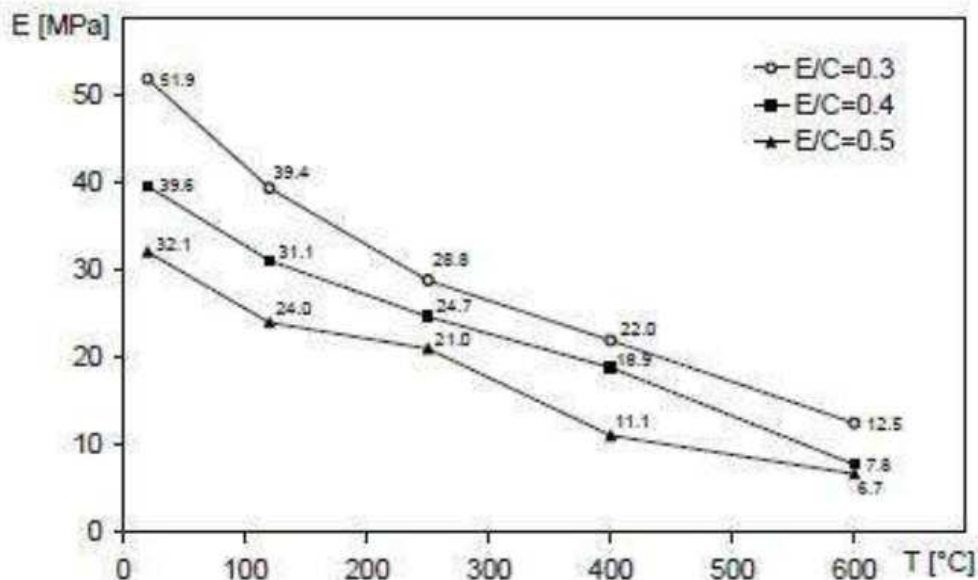


Figure I.37. Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température [MIN LI, 2004]

I.6.3. Module d'élasticité du béton

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

Sur la figure I.38., Nous observons une diminution progressive du module d'élasticité apparent au cours de l'échauffement ce qui se traduit par une décroissance de la pente des courbes $\sigma(\varepsilon)$ avec la température. Les modules d'élasticité apparents diminuent de façon monotone dans toute la gamme de températures. A 120° C, la réduction du module est d'environ 20%. Dans la suite le module diminue. Cette diminution atteint environ 80% à 600°C. Il semblerait que le rapport E/C n'influence pas d'évolution du module d'élasticité relatif. Les trois courbes sont confondues et diminuent avec à peu près la même intensité avec la température. Autrement dit l'eau au cours de la montée en température n'influence pas le module, où cette influence est négligeable [GAWESKA.2004].



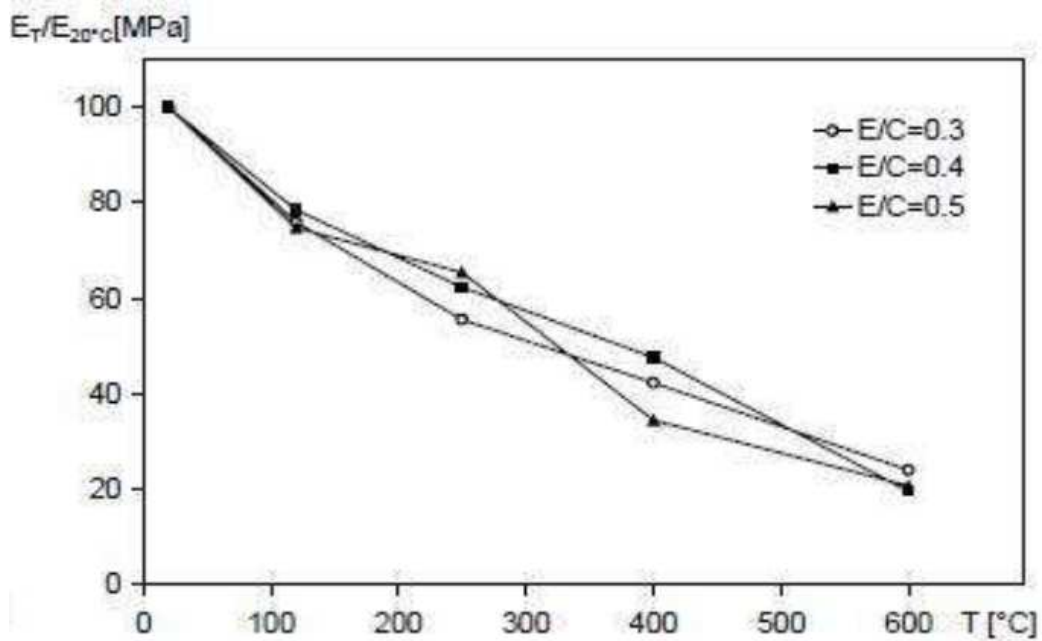


Figure I.38. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud sur les bétons de E/C= 0.3 ; 0.4 ; 0.5 à différentes températures [GAWESKA.2004].

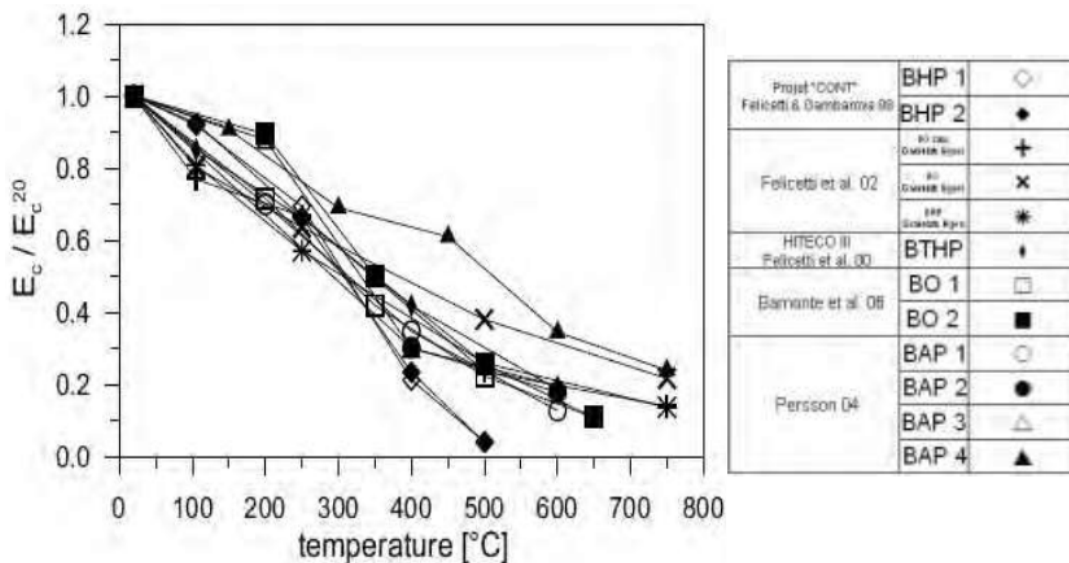


Figure I.39. Evolution du module d'élasticité [BAMONTE.2007].

La figure I.39, présente des variations de modules d'élasticité en fonction de la température d'après une étude réalisée par Bamonte et al. [BAMONTE.2007]. La diminution du module est due à l'endommagement de la microstructure du béton [GROSS.H.1973].

I.7. CONCLUSION

Le béton est un matériau essentiel dans la composition des ouvrages, il est influé par les agressions chimiques et par les problèmes d'incendies, la haute température est l'un des phénomènes influant énormément sur la microstructure de la pâte de ciment, spécialement les hydrates qui compose cette matière (CH, CSH, aft,...), ainsi que l'influence sur les caractéristiques mécaniques de cette matière. Dans cette partie on a travaillé sur la reconnaissance du phénomène de haute température et de son effet néfaste sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du béton, et pour ce la l'analyse de béton semis à la haute température est nécessaire pour comprendre précisément ce matériau et son comportement.

Partie II

**ETUDE EXPERIMENTALE DU BETON SOUS
HAUTES TEMPERATURES**

II.1. INTRODUCTION

Le béton et notamment celui à haute performance, grâce à sa porosité limitée, sa grande durabilité, ses qualités rhéologiques et ses propriétés mécaniques remarquables, a un emploi qui se développe fortement. Cependant, lorsqu'il est soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie ou d'un accident nucléaire, malgré ses bonnes performances à température ambiante, le béton, peut présenter un comportement critique à haute température. Les feux récents qui se sont produits dans les tunnels. Soulignent les risques sérieux d'endommagement des structures exposées aux hautes températures et la mise en péril de leur stabilité. Les bétons à hautes performances (BHP) sont considérés comme des matériaux nouveaux mais leur comportement n'est pas complètement maîtrisé lorsqu'ils sont exposés aux hautes températures. Les différents incendies survenus dans les tunnels et construction ont montré que les caractéristiques mécaniques des bétons sont fortement influencées par les hautes températures cela a donc une importance capitale sur la qualité du béton et essentiellement sur sa durabilité en cas d'incendie.

Pour examiner de béton à hautes températures, nous avons formulé trois bétons (ordinaire, haute résistance et haute performance) avec et sans adjuvants avec des granulats de brique concassé, et on les soumit à différents cycles de chauffages ayant une température allant de 20 à 900°C.

II.2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.2.1. Matériaux étudiés, composition et fabrication

II.2.1.1. Formulations

Trois séries de béton ont été fabriquées dans le cadre de cette étude.

- **La première série** : béton ordinaire de granulats de brique concassé (**BOBC**)
- **La deuxième série** : béton de haute résistance de granulats de brique concassé (**BHRBC**)
- **La troisième série** : bétons à haute performance de granulats de brique concassé (**BHPBC**).

La composition de ces bétons est présentée dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Composition du béton testé.

Composants	BOBC	BHRBC	BHPBC
Gravier 15/25 (kg/m ³)	452,48	452,48	452,48
Gravier 5/15 (kg/m ³)	273,35	273,35	273,35
Gravier recycle 15/25 (kg/m ³)	193,92	193,92	193,92
Gravier recycle 5/15 (kg/m ³)	117,15	117,15	117,15
Sable (kg/m ³)	715,20	715,20	715,20
Ciment (kg/m ³)	328,93	474,71	610,84
Eau (l/m ³)	199,50	199,50	168,00
E/C	0,606	0,420	0,275
Adj. (l/m ³)	----	----	8,81

II.2.1.2. Caractéristiques des constituants utilisés

II.2.1.2.1.Ciment : Tous les bétons ont été fabriqués avec le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, provenant de la cimenterie de Ain Touta (wilaya de Batna).

Tableau II.2. Composition chimique de ce ciment CPJ CEM II/ A 42,5 Ain-TOUTA et Composition minéralogique du clinker [BENDIB.2005]

Composition chimique [%]	
SiO ₂	21,91
Al ₂ O ₃	5,19
Fe ₂ O ₃	2,94
CaO	60,41
MgO	1,60
SO ₃	2,19
CL	0,02
K ₂ O	0,54
Na ₂ O	0,16
Chaux libre	1,01
Perte au feu	3,83
Résidus insolubles	3,57

Composition minéralogique(%)	
C3S	57,44
C2S	17,36
C3A	9,52
C4AF	9,75

Les caractéristiques mécaniques et physique de ciment sont présente le tableau II.3.

Tableau II.3. Caractéristiques mécaniques de ciment. [BENDIB.2005]

Caractéristiques mécaniques	
Résistance a la compression [MPa]	
A 2 jours	24,01
A 7 jours	7,03
A 28 jours	8,14
Résistance a la flexion [MPa]	
A 2 jours	5,01
A 7 jours	7,03
A 28 jours	8,14
Retrait [g/cm ³]	584 ,46
Masse volumique absolue [g/cm ³]	3,00
Masse volumique apparente [g/cm ³]	1,04
Début de prise [h: mn]	2 h : 06 '
Fin de prise [h: mn]	3 h : 03 '

II.2.1.2.2. Granulats :

Le sable utilisé pour la formulation du béton est un sable alluvionnaire de fraction 0/5 provenant de Lioua (wilaya de Biskra).

Le type de granulats utilisé dans le béton est un granulats concassé et gravier recyclé de brique concassé de fraction 5/15 et 15/25.



Figure : Gravier naturel (GN) 15/25

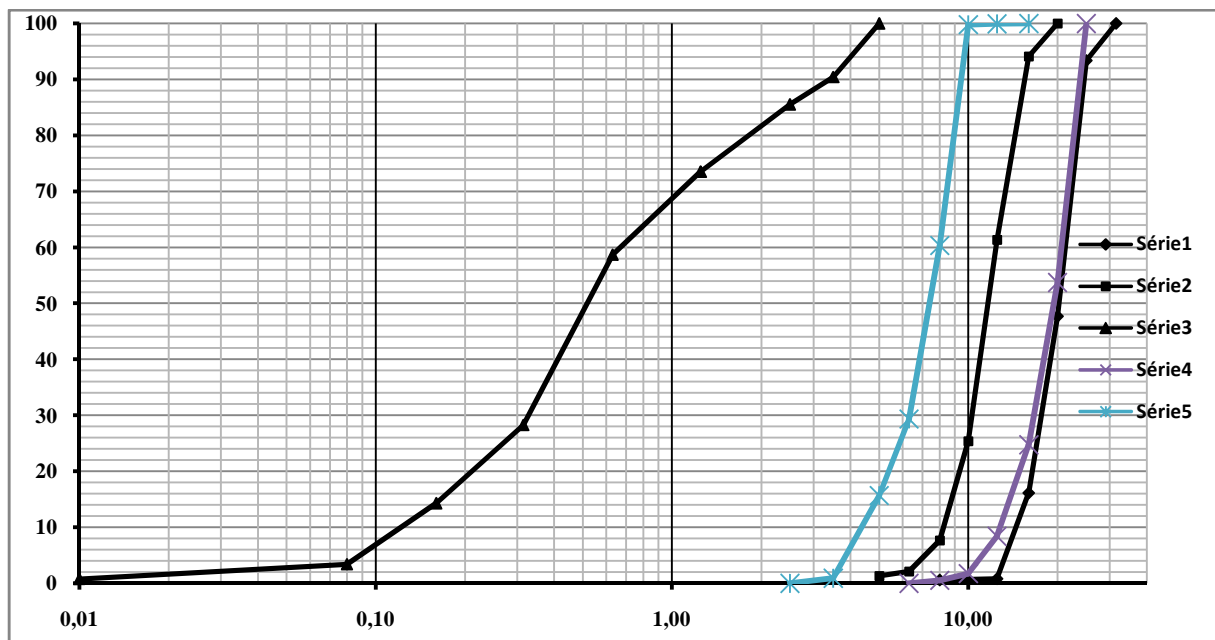


Figure : Gravier recyclé de brique concassé (BC) 15/25

Figure II.1. Photo présenté les granulats (naturels et recyclés).

Tableau II.4. Propriétés physique des granulats.

Propriétés		GN 5/15	GN15/25	BC 5/15	BC 15/25	S 0/5
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2,5	2,5	2,12	1,6	2,53
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1,4	1,4	1,19	1,19	1,84
Equivalent de sable (%)	Esv	–	–	–	–	70,24
	Esp	–	–	–	–	67,76
Coefficient los Anglos(%)		21.98	21.98	61.61	61.61	–
Module de finesse		–	–	–	–	2,65

**Figure II.2.** Analyse granulométrique des granulats (GN 5/15, GN 15/25 et BC 5/15, BC15/25, S 0/5)

Adjuvant

Le plastifiant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau SIKAPLAST BV 40+. Il est utilisé dans la série 3(BHPBC). Ces caractéristiques sont indiquées dans le tableau II.6. Le dosage conseillé est de 0.3 à 1.5 % du poids de ciment.

Tableau II.5. Caractéristiques de l'adjuvant.

Forme	Couleur	Densité	PH
Liquide	Marron	1.04 ± 0.015	$4,7 \pm 1$

II.2.1.3. Fabrication et cure appliquée

II.2.1.3.1. Fabrication :

Des moules cubiques (10x10x10) cm³ ont été réalisés pour les essais par la vitesse des ondes soniques pour les deux types du béton. les étapes de fabrication sont comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur.
- Introduction des constituants du béton dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie.
- Malaxage a sec des constituants solides (granulats et ciments) pendant 30 secondes.
- Introduction de l'eau et le malaxage poursuivi pendant 3 minutes.
- pour en ajoute adjuvant un notre mélange dans la série troisième (BHPBC).
- Le béton et coulé dans les moules métalliques en deux couches, chaque couche a été vibrée sur une table vibrante.

II.2.1.3.2. Cure Appliquée

La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique a été à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage sont conservées dans l'eau à 20°C pendant 28jours.



Figure II.3. Photo présente le malaxeur d'une capacité maximale de 50L.

II.2.2. Essais expérimentaux

II.2.2.1. Cycles de chauffage – refroidissement

Pour étudier le comportement du béton à haute température cinq cycles de chauffage-refroidissement ont été appliqués de 20 °C à différentes températures de palier : 150 °C, 250 °C, 400 °C, 600 °C et 900 °C dans un four. Les éprouvettes ont été chauffées avec une vitesse de montée en température constante égale 3 °C/mn.

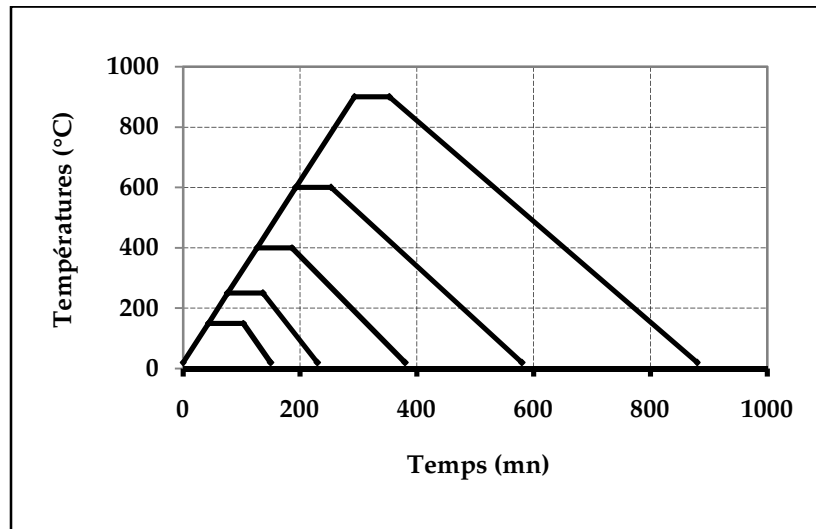


Figure II.4. Cycles de chauffage-refroidissement

II.2.2.2. Essai la vitesse des ondes soniques

Cette technique standardisée par la norme NF18-418, L'équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est le (*portable ultrasonic non destructive digital indicating 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 côté du béton à être mesuré et un transducteur réception placé directement en face de l'autre côté. Nous avons 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 mesurée avec précision. Les vitesses des ondes « V » peuvent être calculées par l'expression 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 II.5. Photo présenté appareil les ondes sonique

II.3 – PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans un premier temps, nous présentons les résultats des mesures de la vitesse des ondes soniques effectuées après refroidissement des éprouvettes.

II.3.1. évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés avec la température

Les valeurs de la vitesse des ondes soniques obtenues à température ambiante et après les différents traitements thermiques sont présentées dans le tableau II.6.

Tableau II.6. Valeurs de vitesse des ondes soniques avec la température.

Température d'essai	20 °C	150 °C	250°C	400 °C	600 °C	900 °C
BOBC	4512,79	4279,38	3960,49	3548,96	2514,59	1216,69
BHRBC	4559,97	4346,37	4158,53	3710,53	2749,71	1557,01
BHPBC	4798,15	4618,94	4258,53	3868,96	2838,82	1583,28

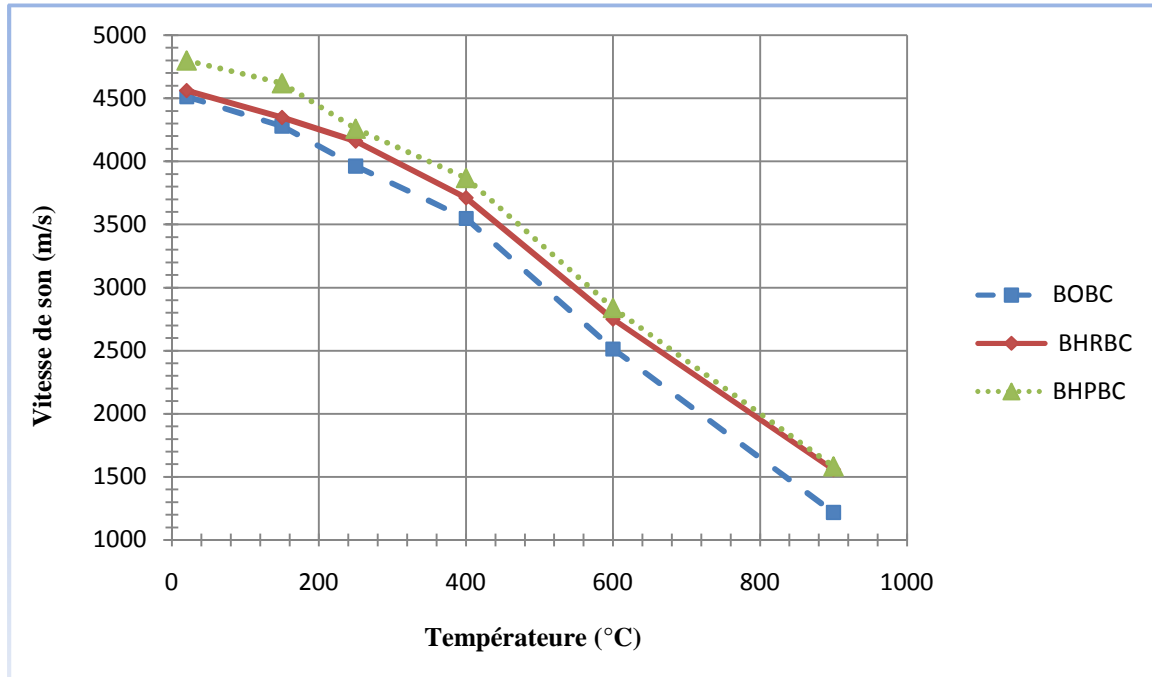


Figure II.6. Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température.

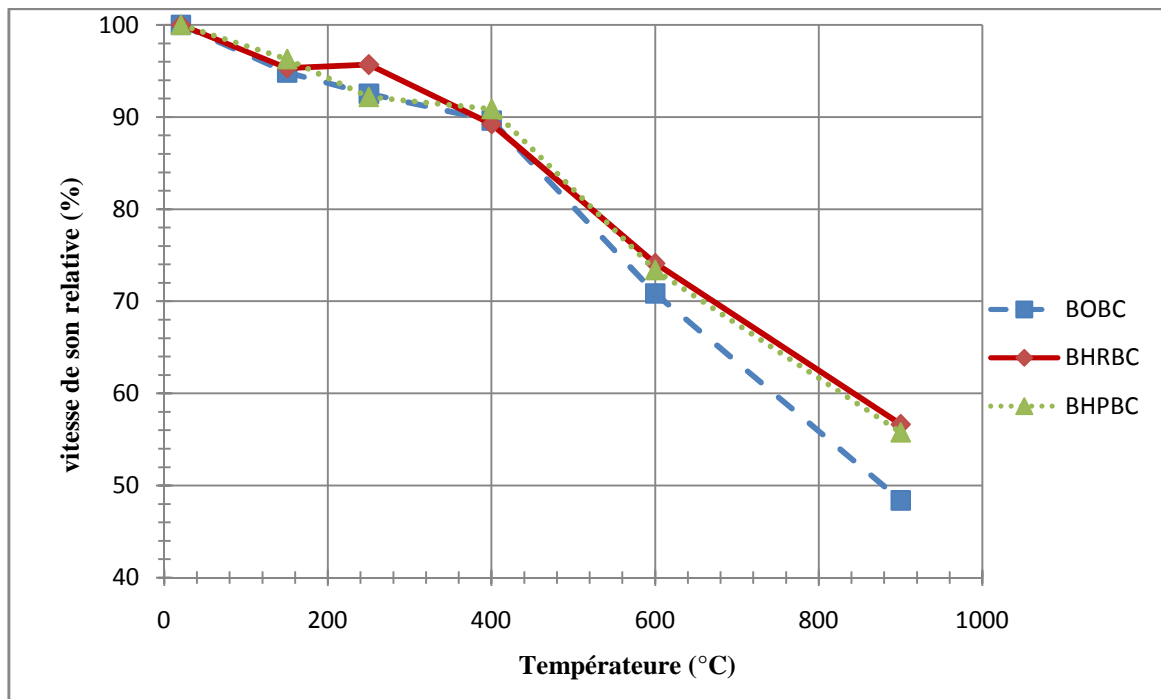


Figure II.7. Évolution de la vitesse des ondes soniques relative avec la température.

A partir de la figure II.6, et II.7 nous pouvons observer une diminution de la vitesse des ondes avec l'augmentation de la température. Cette baisse de la vitesse résulte de l'endommagement produit par le chauffage du béton. On distingue deux domaines de température :

- De 20°C jusqu'à 400°C

Nous observons une diminution progressive de la vitesse des ondes avec l'augmentation de la température pour les trois types du béton

A 150°C nous observons une diminution de 3.74% et 7.81% dans la température 250°C. A 400°C la vitesse des ondes soniques atteint la valeur de 9.15% pour le BHPBC.

À 150% nous observons une diminution de 4.69%. Et de 4.33% dans la température 250°C. À 400°C la valeur de la vitesse des ondes soniques est de 10.78% pour le BHRBC.

À 150% la diminution est de 5.18%. Et nous observons une diminution de 7.46% à 250°C. À 400°C la perte devient 10.4% pour le BOBC.

Cette baisse de la vitesse des ondes résulte de l'endommagement produit par le chauffage.

Cette diminution peut s'expliquer par la microfissuration engendrée dans les éprouvettes testées et bien entendu par la déshydratation qui entraîne une augmentation de la porosité contribuant à l'endommagement du béton et l'évaporation de l'eau liée.

- A partir de 400°C jusqu'à 900°C

Dans cet intervalle il ya une chute de la vitesse des ondes.

Pour BHPBC, la perte de la vitesse les ondes soniques est de 26.63% à 600°C et de 44.23% à 900°C.

À 600°C Nous observons une diminution de 25.9% et de 43.38% à 900°C. Pour le BHRBC.

À 600°C une diminution de 29.15% et 51.62% à 900°C pour BOBC.

Cette diminution peut être interprété par la seconde étape de la déshydratation du gel CSH [NOUMOWE.1995], la dégradation de l'interface pâte-granulats et la décomposition du carbonate de calcium.

II.3.2. Comparaison de l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés (brique concasse) avec celles du béton de granulats naturels.

Dans cette partie on compare notre résultat avec celles obtenus par Aiche et Merad [AICHE et MERAD.2012] qui ont étudié l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de 100% granulat naturel.

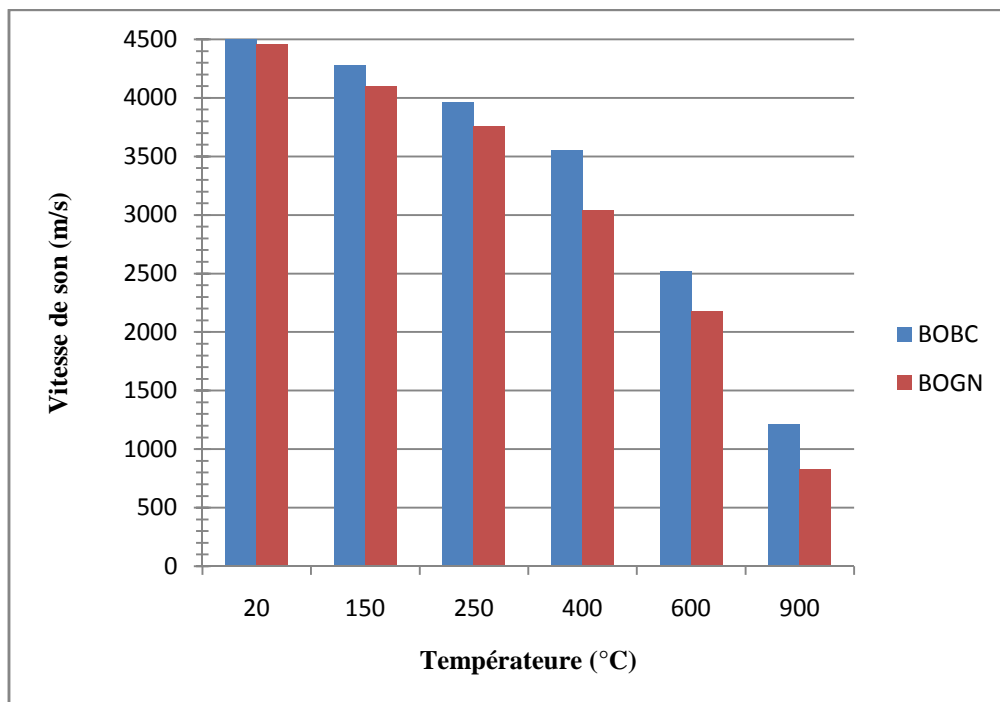


Figure II.8. Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton ordinaire de granulat brique concassé BOBC avec celles du béton ordinaire granulat naturel BOGN.

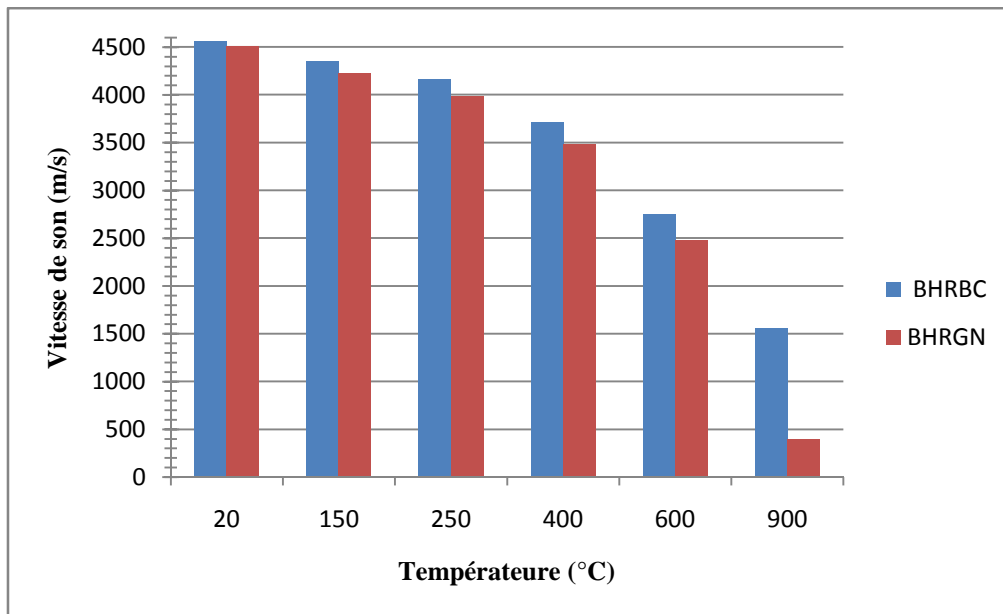


Figure II.9. Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton haut résistance de granulat brique concassé BHRBC avec celles du béton haut résistance de granulat naturel BHRGN.

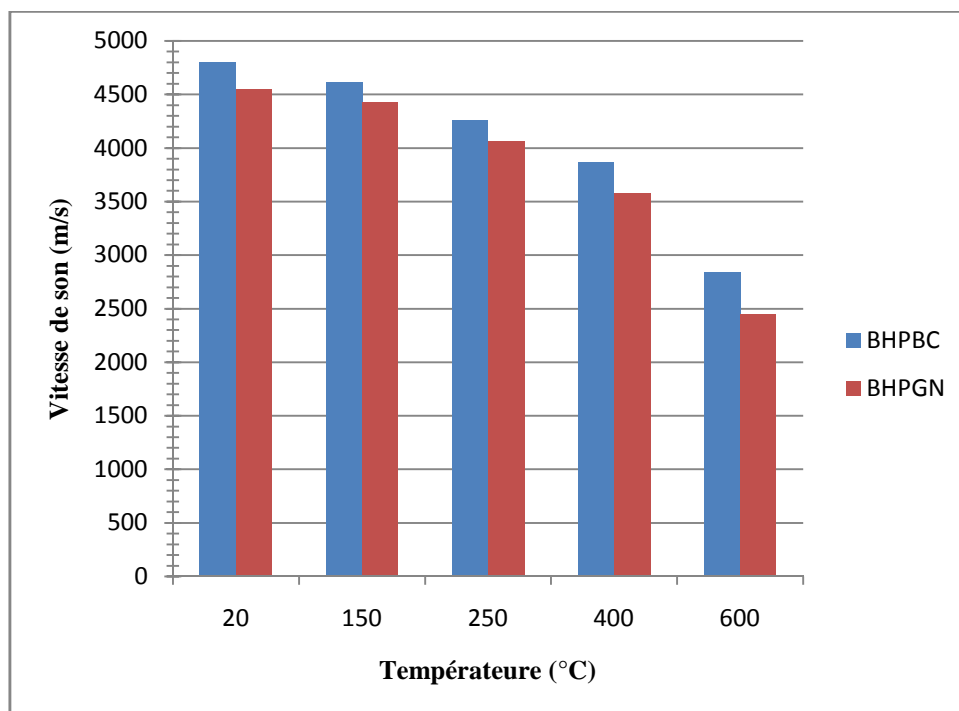


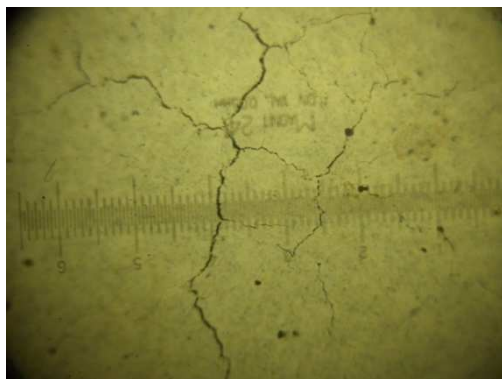
Figure II.10. Évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température du béton haut performance de granulat brique concassé BHPBC avec celles du béton haut performance de granulat naturel BHPGN.

-A partir des figures II.8, II.9 et II.10, on constate que les valeurs des vitesses des ondes soniques pour les trois types du béton contiens 30% des granulats en brique concassé sont supérieures à celles des différents types du béton contiens 100% des granulats naturel.

Les résultats montre aussi que les granulats en brique concassé est meilleures à celles des granulats naturels a cause de sa résistance a la température élevée par rapport a celle de granulats naturel a cause de sa fabrication par une cuisson jusqu'a 1450°C et par sa petite dilatation par rapport aux granulats naturels.

De plus, nous observons les premières microfissures liées à la déformation différentielle entre les granulats BC et GN, qui se dilatent, et la pâte de ciment qui subit un retrait important.

A 400°C Nous observons début fissurations toutes les éprouvette et augmentation fissurations avec la température 600°C et 900°C.



400 °C

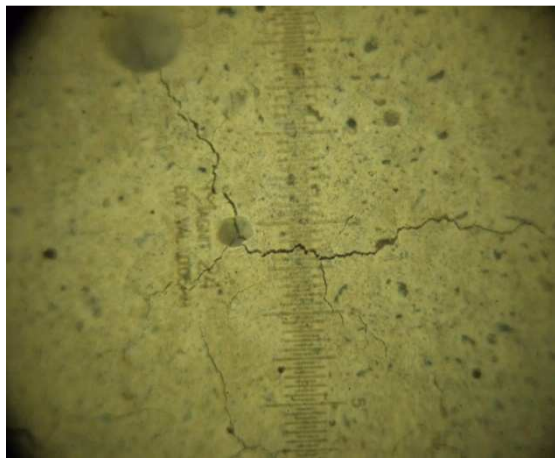


600 °C

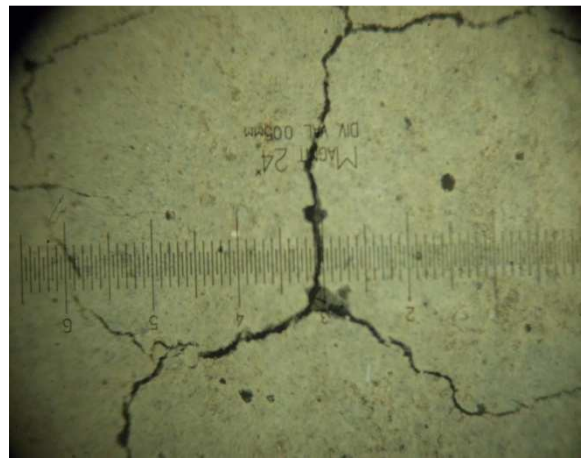


900 °C

Figure II.11. Apparition des microfissures dans le béton BOBC après chauffage (x24).



400 °C



600 °C

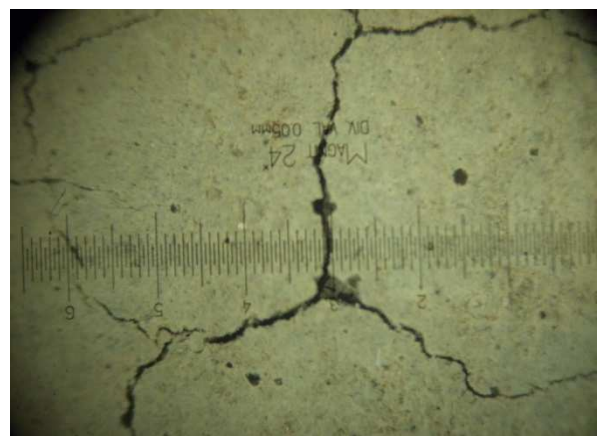


900 °C

Figure II.12. Apparition des microfissures dans le béton BHRBC après chauffage(x24).



400 °C



600 °C

Figure II.13. Apparition des microfissures dans le béton BHPBC après chauffage(x24).

II.4. CONCLUSION

Dans cette partie on a présentés les résultats de nos essais expérimentaux sur trois types de béton qui contiennent 30% des granulats en brique concassée (BOBC, BHRBC, BHPBC). Les résultats des essais par la vitesse des ondes soniques montrent que :

La première phase de 20°C à 400°C, est caractérisée par la diminution progressive de la vitesse des ondes avec l'augmentation de la température pour les trois types de béton.

La deuxième phase de 400°C à 900°C, est caractérisée par une chute très importante de la vitesse des ondes, ce qui signifie que la résistance du béton est diminuée jusqu'à 51.62% pour le BOBC et 44.23% pour le BHPBC et 43.38% pour le BHRBC à 900°C.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude est de caractériser les effets de la température sur les vitesses des ondes soniques de trois types de béton (BOBC, BHRBC, BHPBC).

Les matériaux qui font l'objet de cette étude sont : le béton ordinaire, le béton de haute résistance et le béton de haute performance. Les vitesses des ondes soniques de ces matériaux ont été établies à l'état de référence à 20°C jusqu'à 900°C après le refroidissement.

Sur la base des résultats obtenus, On peut conclure, dans un premier temps que les vitesses diminuent progressivement avec l'augmentation de la température. L'évolution de La vitesse des ondes soniques se déroule en deux phases.

La première phase de 20°C à 400°C, est caractérisée par la diminution progressive de la vitesse des ondes avec l'augmentation de la température pour les trois types du béton. La deuxième phase de 400°C à 900°C, est caractérisée par une chute très importante de la vitesse des ondes, que signifie que la résistance du béton est diminuée jusqu'à 51.62% pour le BOBC et 44.23% pour le BHPBC et 43.38% pour le BHRBC a 900°C.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abdellah MENOU.** Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : approche multi échelles de l'endommagement thermique. Thèse docteur. Université de Pau et des pays de l'Adour. 2004.
- ABRAMS, M.** Compressive strength of concrete at temperature to 1600 F°. ACI Special Publication, SP 25, Détroit, 1971.
- AITCIN, P.C.** „The durability characteristics of high performance concrete: a review” Cement and Concrete Composites, 25 (2003) pp. 409-420.
- ALONSO, C., C. Andrade, et Khoury G.A.** Porosity & Microcracking. Course on effect of heat on concrete. Udine, Italy. 2003.
- BAMONTE et R. FELICETTI.** On the tensile behavior of thermally-damaged concrete. Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure - FraMCoS6, Vol. 3:8 pages, 2007.
- Bazant, Z.P et Kaplan, M.** Concrete at high temperature: material behaviour and mathematical modelling. London lonman concerte design and conconstruction series, 1996. 412 p.
- BENDIB.A.** historique du ciment et situation de la production du ciment en algerie 2005.
- BILLARD.** Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en Béton : application au cas des enceintes de confinement en conditions d'épreuve et Accidentel, thèse de doctorat, instuit national des sciences appliquées de LYAN ,2003.
- BRANDT, A.M.et MATBUD** “Wpływ warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych (BWW)”, II Konferencja Naukowo Techniczna Kraków Mogilany, 17-19 czerwca 1998, pp.21-30. 1998.
- CASTELLOTEA,M., ALONSOA, C., ANDRADEA, C., TURRILLASA, X., CAMPOC, J.,** ‘Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction’, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1633–1644
- C. De Sa.** Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton : Inuence desgradients et des incompatibilités de déformation. In Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan. 2007.
- DEJONG MJ. et FJ. ULM.** The nanogranular behavior of c-s-h at elevated temperatures (up to 700°C). Cement and Concrete Research, Vol. 37, N°1 :1{12,2007}.

- DEGHFEL, M.** «Application de l'essai de la dureté pour la caractérisation de béton». Mémoire de magister. Université de Msila. Département de génie civil. Msila. (2010).
- DIAMOND.S.** „The microstructure of Cement Paste in Concrete“. VIII International Cong. Chem.Cem., vol I, Rio de Janeiro 1986, pp 113-121.
- Divet. L.** Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie. In Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, page 114. 2005.
- Eurocode2.** Calcul des structures en béton-partie1-2 : Règles générales, calcul du comportement au feu. AFNOR, NF EN 1992-1-2, Octobre 2005.
- FARES. H.** Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés a une température élevée. THESE DOCTEUR. Université de Cergy-Pontoise.2009.
- FELDMAN R.F. SEREDA P.J.,** A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption vn-length change and mechanical properties, Materials and Structures ,1968, pp 509-519.
- FELICETTI, PG. GAMBAROVA, MN. SORA, and GA. KHOURY.** Mechanical behavior of hpc and uhpc in direct tension at high temperature and after cooling. Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes, N°5 - France, Lyon: 749-758, 2000.
- FIB.** Fire design of concrete structures - Materials, structures and modelling.
- GAWESKA. H.** Comportement à haute température des bétons à haute performance. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, école Polytechnique de Cracovie. gradients et des incompatibilités de déformation. 2004.
- GROSS .H.** On high temperature creep of concrete. International Conference on Structural Mechanics in reactor Technology - 2nd SMIRT, Vol. 3, 1973.
- HARADA, T., TAKEDA, J., YAMANE, S., FURUMURA, F.** Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. Concrete for nuclear reactors, Detroit: American Concrete Institute, 1973, pp. 179-203. SP-39.
- HACHANA .A** etude des bétons à base des agrégats de démolition. université mohamed khider- 2008.
- 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 1965. Canada.

HANDOO .S.K, . AGARWAL et S.K. AGARWAL. « *Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures* ». Dans : *Cement and Concrete Research* 32 (2002), p. 1009–1018.

JM. LABANI and PJM. SULLIVAN. The performance of lightweight aggregate concrete at elevated temperature. Imperial College : Concrete Structure and Technology, Reports CSTR N°73/2 :100 pages, 1974.

KALIFA, P. et TSIMBROVSKA, M. Comportement des BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux. Cahier de CSTB n° 3078.1998.

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

MALHOTRA, V.M., WILSON, H.S. ET PAINTER, K.E., 'Performance of gravelstone concrete incorporating silica fume at elevated temperatures'. Proc. of 1989 Trondheim (Norway) Conference, pp 1051-1076.

M. CASTELLOTE, C. ALONSO, C. ANDRADE, X. TURRILAS, and J. CAMPO. *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, Cement and Concrete Research*, .Vol. 34 :1633-1644, 2004.

MINDEGUIA, J. C. 2005. Etude de l'éclatement du béton soumis à de hautes températures, Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

MALIER, Y. Sous la direction d' ; „Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications“. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992. p.674.

MEFTAH. H et ARABLI.N. : les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis P 407-409. 2011

MERAD.R et AICHE.N. Etude du comportement des bétons à haute température : Evolution des résistances mécaniques. université mohamed khider- 2012.

MONTEIRO P.J.M., 8th ICCR Rio de Janeiro 1986, 3, s.433

NECHNECH.w. Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées : Une approche thermo-élasto-plastique en dommageable. Thèse doctorat.

L'institut national des sciences appliquées de Lyon.2000.

Normale Supérieure de Cachan. 2007.

NOUMOWE A.N. "Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. (1995).

- NOUMOWE, A., P. CLASTRES, DEBICKI G. et COSTAZ J.L.** *Thermal stresses and water vapour pressure of high performance concrete at high temperature. 4th International symposium on utilization of high-strength/high-performance concrete.* Paris, France. (1996).
- PIASTA, J. HEAT.** Deformations of cements phases and microstructures of cement paste, *Matériaux et Constructions*, N°102, pp.415-420. 1984.
- PIASTA, J. et PIASTA, W.G.** *Beton zwykly : dobor kruszyw i cementow, projektowanie betonu, trwalosc betonu, odpornosc chemiczna i termiczna*. Warszawa, Arkady 1994
- QUEBAUD, M.** Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat, Département de génie civil, Université d'Artois, Artois, France. 250 p(1996).
- SCHNEIDER, U.** , 'Behaviour of concrete at high temperatures'. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Vertrieb Durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1982.
- STARK J., WICHT B.,** *Dauerhaftigkeit von Beton Der Baustoff als Werkstoff.* Bau Praxis, Weimar 2001.
- State-of-art report, Bulletin 38 :106 pages, 2007.
- TC44-PHT. Rilem Technical Committees 44-PHT - Behaviour of Concrete at high temperature.** Technical Report Ed. by, U. Schneider, Dept. of Civil Engineering. Germany : 122 pages, 1985.
- U. Schneider.** Concrete at high temperature: A general review. *Fire safety Journal*, Vol.13:55-68, 1988.
- VERBECK, G., COPELAND, L.E.** 'Some physical and chemical aspects of high pressure steam curing'. Menzel symp. on high pressure steam curing. AC I publication 1972. SP-32, p.1-13.
- WPS. Dias, GA. Khoury, and PJE. Sullivan.** Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C. *ACI Material Journal*, no 87 :160-166, 1990.
- Xu, YL. Wong, and M. Poon, CS. ans Anson.** Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31:1065-1073, 2001
- ZIMBELMAN R.,** *Cem. Concr. Res.*, Vol. 17, nr 4 1987, s.651.