

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Thèse de Doctoraten Sciences

Présentée à l'Université 8 mai 1945 - Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

Présentée par : AIDOU Assia

Thème : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES BETONS ET DES BHP AUX HAUTES TEMPERATURES

Sous la direction de : Pr. BENOUIS Abdelhalim

Devant le jury :

Pr. BENMALEK M. Larbi	Université du 8 mai 1945 - Guelma	Président
Pr. BENMARCE Abdelaziz	Université du 8 mai 1945 - Guelma	Examineur
Pr. REDJEL Bachir	Université Badjimokhtar / Annaba	Examineur
Pr. BEROUAL Ahmed	Université Mentouri / Constantine 1	Examineur
Pr. BOUDAUD Zineddine	Université Larbi Benmehidi / O.E.Bouaghi	Examineur

2018

Remerciements et Dédicaces

Dieu merci pour le pouvoir dont vous m'avez fait part, pour terminer ce travail.

Ce travail a été mené au Laboratoire de Génie Civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 Guelma.

Mes premiers remerciements vont à mon encadreur, le **Pr. BENOUIS Adelhalim.**, qui m'a dirigé tout au long de ce travail. J'ai eu la chance de travailler au côté d'un chercheur qui a beaucoup de passion pour la recherche et beaucoup de disponibilité. Il a su me transmettre la capacité à surmonter les difficultés dans la recherche. Sans lui, ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitudee.

Je présente au **Pr. BENMALEK M. Larbi** mes respectueux remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance. Je remercie vivement le **Pr. BENMARCE Abdelaziz**, le **Pr. REDJEL Bachir**, le **Pr. BEROUAL Ahmed** et le **Pr. BOUDAUD Zineddine** qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à mon travail et d'être membres du jury.

Je remercie Monsieur le **Pr. GUENFOUD Mohamed**, ex. directeur du laboratoire LGCH, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et d'avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires pour réaliser mes essais.

Je remercie aussi mes collègues de travail soit à l'université de Guelma, soit à l'université de Batna et avec qui j'ai pu beaucoup apprendre de la vie d'enseignement. Je remercie amicalement tous les amis et tous ceux qui ont été à mes côtés pendant les moments difficiles.

Je ne remercie jamais assez mon mari pour son aide physique et morale, à qui je dédie ce travail ainsi qu'à ma mère et à ma défunte belle mère, à mon frère et mes beaux frères, à mes sœurs et ma belle sœur, et surtout à mes enfants ainsi qu'à toute ma famille pour leur soutien et leurs encouragements incessants.

Un grand merci et une grande dédicace à mon défunt père, à qui je dois ce que je suis devenue.

RESUME :

Cette étude s'intéresse à l'évolution des propriétés résiduelles de cinq bétons ordinaires et trois BHP ainsi qu'à l'évolution de l'écaillage. Les éprouvettes (15x15x15) cm³ pour les bétons ordinaires et (16x32) cm² pour les BHP ont été soumises à différentes températures : 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de 2°C/min suivi d'un palier de trois heures à la température cible puis refroidissement jusqu'à la température ambiante.

L'évolution des différentes propriétés s'est manifestée, comparativement à la température d'ambiance (20°C) par une chute maximale des résistances en compression de 48% pour les bétons ordinaires et 79% pour les BHP. La perte de résistance en traction est de 65% pour les BO et 62% pour les BHP. Les pertes de masses et les diminutions des modules élastiques dynamiques sont respectivement de 5% et 97% pour les BO ainsi que 6% et 89% pour les BHP. Les pertes de masses sont relativement faibles et se rapportent à l'évacuation de l'eau libre. Il a été observé un éclatement explosif d'un des BHP entre 400°C et 600°C provoqué par une situation hygrométrique importante. Les bétons ordinaires n'ont présenté aucun éclatement.

Mots clés:

Bétons ordinaires, BHP, hautes températures, résistances, pertes de masse, module d'élasticité dynamique, écaillage.

ABSTRACT

The main objective of this experimental study is to focus on the evolution of the residual properties of five ordinary concretes (OC) and three high performance concretes (HPC) and the evolution of the deterioration of hydrated material. The specimens were $(15*15*15)\text{cm}^3$ of ordinary concretes and $(16*32)\text{cm}^2$ of (HPC) and were subjected to temperatures of (200°C) , (400°C) , and (600°C) with a rate of $(2^\circ\text{C}/\text{min})$ for three hours, followed by cooling at room temperature.

The deterioration of various properties was evident compared with a room temperature of (20°C) , with a maximum loss of compressive strength of (48%) for the ordinary concrete whereas (79%) for HPC. The loss of tensile strength was (65%) for OC (62%) for HPC. The loss in density and the dynamic modulus elastic were (5%) and (97%) respectively for (OC) and (6%) and (89%) respectively for (HPC). Mass losses are relatively low and relate to the evacuation of free water. An explosive burst of one (HPC) between (400°C) and (600°C) was observed, it was caused by a important hygrometrical situation. The ordinary concretes did not present any explosive spalling.

Keywords:

Ordinary concrete, HPC, High temperatures, Strength, mass losses, Dynamic elastic modulus, spalling.

ملخص

تتناول هذه الدراسة تطور الخواص المتبقية لخمسة خرسانات عادية وثلاثة خرسانات عالية المقاومة إضافة عن تطور التقشر. و لهذا تم إخضاع عينات اختبار ذات (15x15 x15) سم³ بالنسبة للخرسانة العادية وعينات اختبار ذات (32 x16) سم² بالنسبة للخرسانة عالية المقاومة إلى درجات حرارة مختلفة: 200 درجة مئوية و 400 درجة مئوية و 600 درجة مئوية وبسرعة 2 درجة مئوية / دقيقة متبوعة بمجال راحة من ثلاث ساعات في درجة الحرارة المستهدفة و بعد ذلك تبريد تلقائي إلى درجة حرارة الغرفة.

و قد تبين تطور مختلف الخصائص، مقارنة مع درجة حرارة المحيطة (20 درجة مئوية) و ذلك بانخفاض الحد الأقصى في قوة الانضغاط ب 48% للخرسانة العادية و 79% للخرسانة عالية المقاومة. فقدان قوة الشد هو 65% للخرسانة العادية و 62% للخرسانة عالية المقاومة. إن نقصان الكتلة و نقصان معامل المرونة الديناميكي هي على التوالي 5% و 97% للخرسانات العادية و 6% و 89% للخرسانات عالية المقاومة. فالحسائر في الكتلة كانت منخفضة نسبيا و ناجمة عن إجلاء المياه الحرة. و قد لوحظ انفجار واحد للخرسانة عالية المقاومة بين 400 درجة مئوية و 600 درجة مئوية بسبب حالة الرطوبة الزائدة و لا انفجار بالنسبة للخرسانة العادية.

الكلمات المفتاحية:

الخرسانة العادية، الخرسانة عالية المقاومة، ارتفاع درجات الحرارة، المقاومة، خسائر الكتلة، معامل المرونة الديناميكي، التقشير.

SOMMAIRE

RESUME	i
ABSTRACT	ii
ملخص	iii
SOMMAIRE	iv
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	x
PRINCIPALES NOTATIONS ET ABREVIATIONS	xiv
INTRODUCTION GENERALE	xvi

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : NOTIONS GENERALES SUR LE BETON

INTRODUCTION	1
I.1. DESCRIPTION ET MICROSTRUCTURE DU BETON	2
I.1.1. Description du béton	2
I.1.1.1. Le ciment:	2
I.1.1.2. Granulats	3
I.1.1.3. Additions minérales	4
I.1.1.4. Adjuvants	5
I.1.1.5. L'eau	6
I.1.2. Microstructure du béton durci	9
I.1.2.1. Microstructure de la pâte de ciment	10
I.1.2.2. Structure et morphologie des gels de (CSH)	11
I.1.3. Particularité de l'hydratation des BHP	14
I.2. LA MICROSTRUCTURE DE L'INTERFACE PATE-GRANULATS.	14
I.3. CONCLUSION	17

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE

II.1. INTRODUCTION	19
--------------------	----

II.2. ÉVOLUTION DES PHASES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	19
II.2.1. Quelques conditions de réalisations des essais	20
II.2.1.1 Cycles thermiques utilisés	20
II.2.1.2 Influence des conditions de la réalisation des essais	21
II.2.2 Instabilité thermique du béton	21
II.2.2.1 Différentes formes d'endommagement thermique	21
II.2.2.2 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton à haute température	22
II.2.2.3 Paramètres favorisant l'instabilité thermique	24
II.2.3 Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé	25
II.2.3.1 Matrice cimentaire	26
II.2.3.2 Les granulats	27
II.2.3.3 l'interface pâte granulats	29
II.3 PROPRIETES MECANIKES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	30
II.3.1. Résistance à la compression	30
II.3.2 Résistance à la traction	32
II.3.3 Module d'élasticité	34
II.4 CONCLUSION	35

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III. 1. INTRODUCTION	37
III.2. ESSAIS DE CARACTERISATION	37
III.2.1. Caractérisation des constituants	37
III.2.1.1. Ciment et additions minérales	37
III.2.1.2. Granulats	38
III.2.1.3. Adjuvants	39
III.2.2. Caractérisation du béton à l'état frais	39
III.2.3. Traitement thermique	40
III.2.3.1. Description	40
III.2.4. Essais de caractérisation des bétons à l'état durci	41
III.2.4.1. Auscultation dynamique	41

III.2.4.2. Performances mécaniques	42
III.3. CARACTERISTIQUES DES MATIERES UTILISES	43
III.3.1. Ciment	43
III.3.2. Additions minérales	44
III.3.3. Granulats	44
III.3.4. Adjuvant	45
III.4. FABRICATION DES BETONS ET CONDITIONNEMENT:	46
III.4.1. Compositions des bétons	46
III.4.2. Confection	47
III.4.2.1. Gâchage du béton	47
III.4.2.2. Confection et conservation des éprouvettes	48
III.4.3. Traitement thermique et programme des essais	48
III.4.3.1. Dispositif expérimental	48
III.4.3.2. Cycle de chauffage – refroidissement	49
III.4.3.3. Disposition dans le four	50
III.4.3.4. Programme des essais	50
III.4.3.5. Essais réalisés à l'âge de 28 jours (20°C)	51
III.5. CONCLUSION	52

CHAPITRE IV: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV.1. INTRODUCTION	53
IV.2. LES BETONS ORDINAIRES	53
a- Résistance à la compression	54
b- Résistance à la traction.	57
c- Perte de la masse :	59
d- Vitesse ultrasonique :	61
e- Module d'élasticité dynamique :	63
IV.3. LES BETONS AUX HAUTES PERFORMANCES	64
a- Résistance à la compression	65
b- Résistance à la traction.	67
c- Perte de la masse :	69
d- Vitesse ultrasonique :	70
e- Module d'élasticité dynamique :	71

IV.4. COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES RAPPORTS DES PROPRIETES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	73
IV.4. 1. Résistance à la compression	73
IV.4. 2. Résistance à la traction	74
IV.4. 3. Module d'élasticité dynamique	75
IV.5. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR L'EVOLUTION DES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DES BETONS	76
IV.5. 1. Effet de la température	76
IV.5. 2. Effet de la composition	79
IV.6. CONCLUSION	81
<hr/>	
CONCLUSION GENERALE	82
PERSPECTIVES	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
Annexes	93
<hr/>	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1	Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions	41
Tableau III.2	Propriétés du ciment utilisé	43
Tableau III.3	Compositions chimiques du ciment, de l'addition minérale et des sables	44
Tableau III.4	Propriétés générales des matériaux	45
Tableau III.5	Caractéristiques des adjuvants utilisés	46
Tableau III.6	Composition des BHP et BO étudiés	46
Tableau III.7	Nombre d'éprouvettes fabriquées pour chaque type de béton testé	51
Tableau III.8	Caractérisation des BHP à 28 jours (20 °C)	51
Tableau III.9	Caractérisation des BO à 28 jours (20 °C)	51
Tableau IV.1	Evolution des propriétés résiduelles des BO en fonction de la température	53
Tableau IV.2	Evolution des rapports de la résistance à la compression des BO (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température	55
Tableau IV.3	Evolution des rapports de la résistance à la traction des BO (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température	57
Tableau IV.4	Evolution des rapports de la masse des BO (M_T/M_{20}) en fonction de la température	59
Tableau IV.5	Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique des BO (V_T/V_{20}) en fonction de la température	61
Tableau IV.6	Evolution des rapports du module dynamique des BO (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	63
Tableau IV.7	Evolution des propriétés des BHP en fonction de la température	64
Tableau IV.8	Evolution du rapport de la résistance à la compression des BHP (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température	65
Tableau IV.9	Evolution du rapport de la résistance à la traction des BHP (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température	68
Tableau IV.10	Evolution du rapport de la perte en masse des BHP (M_T/M_{20}) en fonction de la température	69

Tableau IV.11	Evolution du rapport de la vitesse ultrasonique des BHP (V_T/V_{20}) en fonction de la température	70
Tableau IV.12	Evolution du rapport du module d'élasticité dynamique des BHP (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	72
Tableau IV.13	Evolution des rapports de la résistance à la compression des différents bétons (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température	73
Tableau IV.14	Evolution des rapports de la résistance à la traction des différents bétons (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température	74
Tableau IV.15	Evolution des rapports du module d'élasticité dynamique des différents bétons (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des CSH. A et B sont deux exemples possibles	9
Figure I.2	La diversité des formes du gel CSH	12
Figure I.3	Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon le modèle de Feldman et Sereda (1968).	13
Figure I.4	Modèle de Munich 1976 de gonflement du gel C-S-H en trois différents états d'humidité	14
Figure I.5	Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de Ca(OH)_2 , 2 - couche de CSH, 3 - couche de Ca(OH)_2 , 4 - zone poreuse, 5 - pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite	16
Figure I.6	Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat	17
Figure I.7	Evolution de la zone de transition dans un BHP ($e/c=0,23$ et $s/c=0,15$) pendant l'hydratation	17
Figure II.1	Influence des conditions de la réalisation des essais sur la résistance en compression. Essais : « à chaud » et « résiduelles », « chargés » et « non charges ».	21
Figure II.2	Mécanisme d'écaillage du béton	24
Figure II.3	Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes (libres, liée, adsorbée).	26
Figure II.4	Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température	27
Figure II.5	Analyse thermogravimétrique des granulats calcaires (a), siliceux (b) et silex (c)	29
Figure II.6	Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et EUROCODE 2	30
Figure II.7	Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP	31
Figure II.8	Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage	33
Figure II.9	Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage des BO et BHP	33
Figure II.10	Evolution de module élastique proposée par les normes.	34

Figure II.11	Évolution du module d'élasticité résiduel relatif	35
Figure III.1	photo de la tamiseuse utilisée	40
Figure III.2	Malaxeur de béton utilisé	40
Figure III.3	Appareil utilisé pour l'essai d'ultrasons	43
Figure III.4	Presse utilisé pour les essais de performances	43
Figure III.5	Courbes granulométriques des granulats utilisés	45
Figure III.6	Photo de la cage de protection utilisée	49
Figure III.7	Courbe de chargement thermique	50
Figure III.8	Four électrique utilisé.	50
Figure IV.1.	Résistance à la compression des BO en fonction de la température	54
Figure IV.2.	Evolution des rapports de la résistance à la compression des BO (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température	55
Figure IV.3.	Changement de couleur à 400°C	56
Figure IV.4.	Apparition des fissures très visibles à 600°C	57
Figure IV.5.	Résistance à la traction des BO en fonction de la température	57
Figure IV.6:	Evolution des rapports de la résistance à la traction des BO (f_{tT}/f_{t20}) en fonction de la température	58
Figure IV.7.	Perte de masse des BO en fonction de la température	59
Figure IV.8	Evolution des rapports de la masse des BO (M_T/M_{20}) en fonction de la température	60
Figure IV.9.	Vitesses des ultrasons des BO en fonction de la température	61
Figure IV.10.	Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique dans les BO (V_T/V_{20}) en fonction de la température	62
Figure IV.11.	Modules d'élasticité dynamique des BO en fonction de la température	63
Figure IV.12.	Evolution des rapports du module dynamique des BO (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	63

Figure IV.13.	Résistance à la compression des BHP en fonction de la température	65
Figure IV.14.	Evolution des rapports de la résistance à la compression des BHP (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température	65
Figure IV.15.	Changement de couleur à 400°C	67
Figure IV.16.	Eclatement explosif du BHP2 à 544°C	67
Figure IV.17.	Apparition des fissures visibles à 600°C	67
Figure IV.18.	Résistance à la traction des BHP en fonction de la température	67
Figure IV.19.	Evolution des rapports de la résistance à la traction des BHP (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température	68
Figure IV.20.	Evolution de la perte de la masse des BHP en fonction de la température	69
Figure IV.21.	Evolution des rapports de la masse des BHP (M_T/M_{20}) en fonction de la température	69
Figure IV.22.	Evolution de la vitesse ultrasonique dans les BHP en fonction de la température	70
Figure IV.23	Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique dans les BHP (V_T/V_{20}) en fonction de la température	71
Figure IV.24	Evolution du module dynamique des BHP en fonction de la température	71
Figure IV.25.	Evolution des rapports du module dynamique des BHP (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	72
Figure IV.26.	Evolution des rapports de la résistance à la compression des différents bétons (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température	73
Figure IV.27.	Evolution des rapports de la résistance à la traction des différents bétons (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température	74
Figure IV.28.	Evolution des rapports du module d'élasticité dynamique des différents bétons (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température	75
Figure IV.29.	Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction des BO	77

Figure IV.30.	Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction des BHP	77
Figure IV.31.	Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique des BO	78
Figure IV.32.	Relation entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique des BHP.	78
Figure IV.33.	Relations entre les rapports des propriétés pour chaque température	79
Figure IV.34.	Relations entre les rapports des résistances à la compression et des résistances en traction pour chaque béton	80
Figure IV.35.	Relations entre les rapports des résistances à la compression et des modules d'élasticité dynamique pour chaque béton	80

PRINCIPALES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

NOTATIONS

E_d -Module d'élasticité dynamique
 f_c -Résistance mécanique caractéristique à la compression
 f_t -Résistance mécanique caractéristique en traction
 V -Vitesse ultrasonique
 M -Masse
 M_f - Module de finesse des sables
 ρ_{abs} -Masse volumique absolue
 ρ_{app} -Masse volumique apparente
 L_A -Coefficient los-Angeles
SSB -Surface spécifique de Blaine

NOMENCLATURE et ABREVIATIONS

BO - Béton Ordinaire
BHP - Béton à Hautes Performances
BOi - Béton ordinaire de la série "i"
BHPi -Béton à hautes performances de la série "i"
BPE - Béton près à l'emploi
Mint - Masse initiale
Mfin - Masse finale
Vint - Vitesse ultrasonique initiale
Vfin - Vitesse ultrasonique finale
Edint - Module d'élasticité dynamique initial
Edfin - Module d'élasticité dynamique final
T -Température
C - Ciment
SC - Granulats silico-calcaires
C/S - Rapport massique CaO sur SiO₂
E/C - Rapport massique eau sur ciment
E/L - Rapport massique eau sur liant
G/S - Rapport massique gravier sur sable
C₂S - Silicate bicalcique
C₃A - Aluminate tricalcique
C₃S - Silicate tricalcique
C4AF - Aluminate ferrite tétracalcique
Ca(OH)₂, CH - Portlandite, hydroxyde de calcium ou chaux hydratée
CaCO₃ – Calcaire (carbonate de calcium)
CaO- Chaux libre
SiO₂ - La silice
Al₂O₃ - L'alumine
Fe₂O₃ - L'oxyde de fer
CO₂ - Dioxyde de carbone
CSH - Silicate de calcium hydraté
CH - La portlandite
CV - Cendre volante
FS - Fumée de silice
HD - Haute densité (High Density)
LD - Faible densité (Low Density)

BNC - Bayonet Neill–Concelman
E/C - Rapport massique Eau sur Ciment
E/L - Rapport massique Eau sur Liant (ciment + fumée de silice ou autres additions)
MEC - Modèle d'Empilement Compressible
ITZ - Interfacial Transition Zone
PAF -Perte au feu
ESV -Equivalent de sable visuel
ESP - Equivalent de sable par piston

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil. Les évolutions actuelles que connaissent les bétons sont liées aux connaissances acquises sur ce matériau grâce aux nombreuses recherches menées. Ces recherches ont prouvé que les bétons en général, et les bétons à haute performance (BHP) en particulier, possèdent des caractéristiques mécaniques intrinsèques satisfaisantes. En effet, les bétons à haute performance sont différenciés des bétons ordinaires par leurs forte densification et leurs faible porosité ce qui leurs donne des bonnes caractéristiques mécaniques et une meilleure durabilité. Pour cette raison que les (BHP) sont plus utilisés dans des structures de grande envergure comme les ponts, les tunnels, les centrales nucléaires et les bâtiments.

En effet, la vaste étendue d'utilisation du béton pour la construction des infrastructures et des bâtiments l'expose à des situations accidentelles d'incendies sans qu'il soit toujours possible de prévoir le comportement du matériau et d'assurer ainsi une meilleure sécurité des usagers et des ouvrages. À titre d'exemple, les incendies enregistrés dans le tunnel sous la manche en France (18/11/1996, 11/09/2008), Le tunnel de Tauern en Autriche ou la tour Windsor en Espagne (14/02/2005).

Lorsque les (BHP) sont soumis à des températures élevées, ces bétons denses et compacts peuvent présenter certaines instabilités thermiques conduisant à l'écaillage ou à l'éclatement. Donc, il est important de pouvoir déterminer le danger que peut représenter un tel phénomène pour la bonne tenue de la structure durant et après un incendie.

Le comportement du béton à haute température est lié à la formation de pression (phénomène thermo-hydrique) et aux contraintes qui se développent dans le matériau chauffé (phénomène thermo-mécanique). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine de l'instabilité thermique du béton : le type de béton (béton ordinaire, béton à hautes et très hautes performances), l'état hydrique, la nature des granulats, le type de sollicitation thermique, le chargement mécanique...

Cette thèse consiste à étudier l'évolution des caractéristiques résiduelles des bétons et des (BHP) aux hautes températures. L'objectif en est l'étude de l'effet de la montée de la température sur les propriétés physiques tel que la perte de la masse donc la masse volumique ainsi que les propriétés mécaniques tel que la résistance (compression, traction), la vitesse ultrasonique donc le module d'élasticité dynamique, ainsi que la prospection des causes du phénomène d'éclatement explosif des (BHP).

Ce document s'articule sur deux parties. La première partie est une synthèse bibliographique qui est scindée en deux chapitres et la deuxième partie, en deux chapitres aussi est une étude expérimentale réalisée au laboratoire du génie civil et hydraulique (LGCH) de l'Université de Guelma.

Dans le premier chapitre, on a présenté les notions générales du béton qui a pour but principal de décrire le béton comme milieu poreux dans son état sein. En présentant dans un premier temps un rappel de la microstructure du béton, de ses principales caractéristiques à la température ambiante et les différentes formes d'eau présente dans le béton.

Le deuxième chapitre est une analyse bibliographique de différents travaux de recherche sur le béton soumis à une température élevée. Il porte sur les différentes formes d'instabilité thermique, le mécanisme d'écaillage ou d'éclatement et les paramètres favorisant l'instabilité thermique. Ensuite, une synthèse est faite sur le comportement de la matrice cimentaire, des granulats, les propriétés thermiques, physiques et mécaniques du béton chauffé.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les éléments constitutifs de nos bétons, les formulations retenues, la méthode de confection et le mode de conservation des matériaux testés au cours de cette étude. Nous présentons également les différents matériels utilisés pour caractériser les propriétés thermiques des matériaux avant et après sollicitation thermique.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés et leurs interprétations, en comparant ces derniers aux règles normatives et aux résultats de la littérature. Suivi des corrélations entre les caractéristiques aux différentes températures.

Enfin une conclusion générale permet de faire un bilan sur les apports des principaux résultats vis-à-vis des problématiques posées.

PREMIERE PARTIE :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite, les phases granulaires sont enrobées par du ciment hydraté qui sert de liant. Ce dernier est un matériau poreux, avec des pores qui sont plus ou moins connectés. La présence de l'eau est nécessaire pour faire hydrater le ciment et former une pâte durcie [Haniche 2011].

Un Béton à Hautes Performances (BHP) peut être défini comme étant un béton qui a une porosité réduite. Cette minimisation de la porosité est généralement obtenue en utilisant des rapports Eau/Ciment ou Eau/Liant plus faibles que dans le cas des Bétons Ordinaires (BO), associé à l'ajout d'adjuvants afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante. Ainsi, plus le béton est compact et meilleures sont ses résistances [Ladaoui 2010].

Ainsi le béton est un matériau complexe, à la recherche permanente d'un équilibre hydrique avec son environnement. Aussi lorsque cet environnement est brusquement modifié par un refroidissement rapide ou une brusque élévation de température, des mouvements hydriques ont lieu au sein du matériau. Les processus induits par ces mouvements peuvent parfois endommager le matériau béton et bien sûr la sensibilité à s'endommager ou non est liée à la structure même du matériau [Haniche 2011]. La première difficulté de l'étude du comportement du béton à haute température réside dans la complexité de sa structure et son caractère fortement hétérogène. Toutefois, la matrice cimentaire constitue la composante essentielle de par son rôle de liant entre les granulats, de par sa porosité et aussi de par sa transformation permanente avec l'élévation de la température [Kanema 2007].

L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation chimique progressive du béton qui modifie sa microstructure. Pour comprendre le comportement de ce matériau à haute température, il est nécessaire de connaître les principales modifications physico-chimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats). L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats [Menou 2004].

Cette partie présente, dans un premier temps, le matériau béton. Elle précise dans un deuxième temps le comportement des (BO) et (BHP) à haute température.

CHAPITRE I : NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE BÉTON

I.1. DESCRIPTION ET MICROSTRUCTURE DU BÉTON

I.1.1. Description du béton

On appelle un béton tout mélange contenant ciment, eau, sable et granulats ainsi que différentes additions minérales (adjuvant, fumée de silice...). Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment et d'eau. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats [Haniche 2011].

Le changement des propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons qui s'opèrent au cours d'un cycle thermique nécessite la connaissance des phases qui constituent la pâte de ciment à température ambiante [Kanema 2007].

I.1.1.1. Le ciment :

La préparation du clinker consiste à cuire un mélange de calcaire (80%) et de d'argile (20%) dans un four porté à une température d'environ 1450°C. Ce clinker sorti du four est essentiellement constitué de silicates et d'aluminates de calcium. Son broyage et son mélange avec le gypse donne le ciment Portland pur dont la composition minéralogique est constituée essentiellement de [Kanema 2007]:

- Silicate tricalcique Ca_3SiO_3 (noté C_3S) : 60-65 %
- Silicate bicalcique Ca_2SiO_4 (noté C_2S) : 20-25 %
- Aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ (noté C_3A) : 8-12%
- Aluminate ferrite tétracalcique $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ (noté C_4AF) : 8-10%
- Gypse : 3-8 %

Le ciment doit permettre au béton d'atteindre une classe de résistance donnée, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité [Aïtcin 2001]. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seuls quelques uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, etc.) [Ladaoui 2010].

I.1.1.2. Granulats

Les granulats constituent le squelette du béton, ils sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent :

- Sables : les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm,
- Gravillon : ceux dont les dimensions sont comprises entre 4 mm et 25 mm
- Cailloux : ceux de dimensions supérieures à 25 mm.

Les granulats doivent avoir les caractéristiques adéquates permettant :

- de résister aux contraintes transmises par la pâte de ciment ;
- d'optimiser la densité du squelette granulaire final pour un béton compact ;
- d'obtenir une zone de transition pâte-granulats de bonne qualité.

Pour cela, les critères de sélection des granulats portent sur :

- a) **La nature minéralogique** : son incidence sur la qualité de l'ITZ (Interfacial Transition Zone) et sur les risques de développement de l'alcali-réaction semble avérée mais aussi sur les déformations différées du béton [Neville 1996] [Ladaoui 2010].
- b) **Dimensions, volume et forme des granulats** : la taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [Gonilho Pereira et al. 2008]. Nicholsa établi que, pour chaque résistance de béton et donc pour chaque rapport eau/ciment, il existe une dimension maximale optimale pour le granulat. De même, le volume des granulats possède un effet sur les propriétés mécaniques du béton [Nichols 1982]. D'après Stocks [Stocks et al 1979], les propriétés mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) augmentent avec la proportion de granulats, du moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulats (60-75% en volume). Le même constat a été fait sur les déformations différées. Le fluage est d'autant plus faible que le volume relatif des granulats est conséquent. Il a été observé que le passage de la teneur volumique en granulat de 65 à 75% entraîne une diminution du fluage de 10 % [Pons et al 2009], [Ladaoui 2010]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés ou semi-concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées [Mallier 1992], [Ladaoui 2010].
- c) **L'optimisation de la distribution granulaire** : elle permet d'augmenter la densité du squelette granulaire final et par conséquent d'obtenir un béton compact ayant de

bonnes propriétés mécaniques. Parmi les méthodes d'optimisation de la répartition granulaire d'un béton, on peut citer [Powers 1968], [Bolomey 1935], [Caquot 1937], [Fauray 1953] et plus récemment le modèle d'empilement compressible (MEC) [de Larrard 1999 ; 2000] mis au point au LCPC. [Ladaoui 2010]

I.1.1.3. Additions minérales

De nombreuses additions minérales contiennent de la silice vitreuse réactive qui, au contact de l'eau et en présence de chaux, développe une réaction pouzzolanique pour former des (CSH) [Dron et al 1982]. Il est important de noter que la vitesse à laquelle se développe la réaction pouzzolanique dépend de la température et de la finesse de la pouzzolane. Cette réaction peut être lente et peut parfois se développer sur plusieurs semaines. La réaction pouzzolanique existe non seulement avec la fumée de silice, mais aussi avec les cendres volantes ainsi que certains constituants des laitiers de haut fourneau [Ladaoui 2010]. Leur rôle cimentaire est d'améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais, pour faciliter sa mise en œuvre, ou à l'état durci pour augmenter sa résistance et sa durabilité. Parmi les principales additions [Haniche 2011]:

- ❖ **Filler calcaires** : Les fillers calcaires sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils permettent d'améliorer les propriétés du béton (meilleure pompabilité et résistance à la ségrégation, augmentation de la résistance en compression, réduction de la porosité, meilleure qualité de surface, ...).
- ❖ **Cendres volantes(CV)**: Ce sont des particules très fines récupérées par le système de dépoussiérage des centrales thermiques. L'effet le plus notable de ces additions est l'augmentation de la résistance à long terme par réaction pouzzolanique [Hassan et al. 1998]. Selon [Felekoglu et al 2003], l'utilisation de cendres volantes entraîne une réaction pouzzolanique entre la phase vitreuse des cendres et la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation de gel de(CSH), et donc à l'augmentation de la résistance en compression surtout à long terme [Ladaoui 2010].
- ❖ **Fumée de silice** : C'est un sous-produit, composé essentiellement de silice, issu de la fabrication du silicium et de différents alliages de silicium. Ce sont des ultrafines de silice récupérées par dépoussiérage des fumées. La silice représente environ 90% de la

composition chimique, les particules ont une forme sphérique de diamètre compris entre 0,1 μm et 2 μm . La dimension moyenne est 100 fois plus faible que celle des grains de ciment. La fumée de silice se caractérise par une extrême finesse 15000-25000 m^2/kg . La fumée de silice a des effets bénéfiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton qui sont dus à l'effet filler et à la réaction pouzzolanique qui se traduit par une pâte de ciment durcie dense [Persson 1998]. Les principaux résultats des réactions pouzzolaniques de la fumée de silice sont : la plus faible libération de chaleur et le développement de résistance, la consommation de la chaux et une petite distribution de taille des pores [Mazloom et al 2004]. En outre, sa grande finesse procure un effet physique de remplissage [Khayat1996]. L'incorporation de la fumée de silice réduit le ressuage interne et externe. La combinaison des différents modes d'action de la fumée de silice dans le béton contribue à la formation d'une microstructure très dense [Durekovic 1995], [Haniche 2011].

– ***Influence de la fumée de silice sur les propriétés du béton frais***

Les particules fines de fumée de silice agissent par leur effet filler en remplissant les microspores, ce qui conduit à une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. Ceci libère l'eau qui a été emprisonnée dans les pores et permet une réduction de la demande en eau pour une consistance fixe. D'autre part, compte tenu de leur surface spécifique élevée, il peut y avoir une adsorption d'eau et par contre une augmentation de la demande en eau dépendant du rapport (E/L), de la présence de superplastifiant, de la teneur en ciment et de la concentration en fumée de silice [Amouri 2009].

Certains chercheurs ont montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m^3 , on peut ajouter respectivement jusqu'à 2, 4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Ceci est attribué à l'amélioration du dosage supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines. Le béton devient très riche, très collant et très cohésif [Amouri 2009].

En général, les fumées de silice réduisent considérablement les phénomènes de ressuage et de ségrégation, ce qui accélère la finition des surfaces [Amouri 2009].

I.1.1.4. Adjuvants

L'utilisation des adjuvants dans les bétons se fait généralement en faible quantité ne dépassant pas 5% de la masse du ciment. On les trouve sous forme de composés organiques aqueux

formulés spécialement pour les applications béton. Les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci [Haniche 2011].

- **Plastifiants et superplastifiant**: Ils sont utilisés pour fluidifier un mélange ou pour réduire la quantité d'eau utilisée (jusqu'à 30% au moins dans le cas d'une bonne compatibilité entre l'adjuvant et le ciment) [Haniche 2011].
- **Accélérateur / Retardateur de prise** : Les retardateurs de prise sont utilisés pour ralentir la vitesse de prise du matériau. Ils sont pratiques pour des transports de bétons frais sur de longues distances [Haniche 2011]. Les accélérateurs de prise ont un effet inverse de celui des retardateurs. Ils sont utilisés par temps froid ou en usine de préfabrication où il est parfois nécessaire d'accélérer la prise du béton pour procéder à un démoulage plus rapide.
- **Entraîneurs d'air** : Le béton, une fois malaxé et mis en place, contient un certain volume d'air résiduel dont la fraction volumique est généralement de 2 à 5%. Le rôle d'un entraîneur d'air est de créer un volume d'air occlus supplémentaire (sous forme de pores de petites tailles voisines les unes des autres), jusqu'à une fraction de l'ordre de 5%, avec pour objectif de rendre le matériau résistant à l'action du gel [Haniche 2011].

I.1.1.5. L'eau

L'eau est une des composantes les plus importantes du béton. Elle permet d'une part, lors du gâchage, d'accroître la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau et d'autre part de favoriser, lors de la prise, la liaison entre les éléments solides présents dans le matériau. Elle est aussi connue pour favoriser l'apparition des pores dans la structure, ce qui a pour conséquence d'atténuer la durabilité et les résistances mécaniques du béton. Elle se présente sous des formes différentes suivant sa localisation et le type de lien qu'elle entretient avec les éléments solides du béton. Elle fait l'objet de nombreuses classifications, certaines basées sur des considérations structurales, et d'autres sur des considérations énergétiques. La classification retenue la présente selon l'ordre des liaisons croissantes [Kanema 2007]. Tous les vides de la matrice sont plus ou moins remplis d'eau. La présence d'eau dans le matériau, mais surtout son mouvement au cours de la vie de l'ouvrage, est responsable de l'apparition de phénomènes comme : retraits de dessiccation, gonflement, fissuration du béton lors des cycles gel – dégel, etc. Nous allons voir dans la suite quel sera son rôle sur le comportement du béton à la haute température.

L'eau va donc jouer un rôle essentiel dans le comportement de matériau durci non seulement du point de vue de son comportement mécanique mais aussi de la durabilité. Dans le béton presque la moitié de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40% se trouve dans les pores des hydrates, 10% se loge dans les vides présents dans la matrice. L'état hydrique dépend essentiellement de l'humidité relative, du degré d'hydratation, donc de l'âge et du type et de la taille des pores [Hager 2004].

a) L'eau libre et capillaire

L'eau soustraite des forces d'attraction superficielle à la surface des solides est appelée eau capillaire ou libre et obéit aux lois de la capillarité. Elle se situe généralement dans les pores de dimension supérieure à 10 μm , où la phase liquide est séparée de la phase gazeuse par un ménisque.

[Khoury et al 1985] démontre que pour une vitesse de montée en température fixée à 1°C/min, seulement 3 % d'eau s'évapore à 100°C, alors qu'elle augmente à 9 % lorsque cette vitesse est réduite à 0,2°C/min. Ainsi on observe que la vitesse de chauffage joue un rôle important dans le phénomène de dessiccation du béton. Cette eau fortement ionisée par rapport aux autres éléments présents dans le béton est la première à migrer et à s'éliminer [Baroghel-Bouny 1994], [Kanema 2007], [Hager 2004].

b) L'eau adsorbée

L'eau est dite adsorbée lorsqu'il apparaît des forces intermoléculaires ou des forces électrostatiques entre la molécule d'eau et la surface solide. Elle est dite physique ou chimique suivant le type de liaison qu'elle entretient avec la particule solide [Kanema 2007].

Eau adsorbée physiquement

L'eau adsorbée physiquement est le résultat de l'apparition d'une liaison de type Van de Waals entre les granulats, les grains de ciments et l'eau, suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau [Oberholster 1986]. L'apparition de cette liaison ne modifie pas la structure de la molécule d'eau d'où le terme d'absorption physique. Cette eau s'empile sur la surface solide sous forme de couches successives, de moins en moins ordonnées, du fait de la décroissance de l'énergie de liaison au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides [Baroghel-Bouny 1994]. Le nombre de couches adsorbées n'excède pas cinq et dépend du taux d'humidité relative présent dans les pores capillaires. Dès l'augmentation de la température, les liaisons se détruisent et les molécules d'eau se libèrent [Kanema 2007].

Le diamètre d'une molécule d'eau étant d'environ 2,6 Å, il faudrait que l'espace inter – lamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace n'étant en réalité de 17 Å, l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption empêchée. L'eau y est présente sous une forte pression, de l'ordre de 130 MPa [Bazant et al 1972], dite de disjonction. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction qui s'exerce entre particules solides des (CSH) et qui permettent le maintien de la structure du squelette solide. Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes [Kanema 2007].

Eau adsorbée chimiquement

Elle est constituée de l'eau hydroxylique, faisant partie de la structure des hydrates et de l'eau contenue dans les nano pores du gel [Haniche 2011]. L'eau est adsorbée chimiquement lorsqu'elle est combinée à d'autres composants dans les hydrates. [Baroghel-Bouny 1994]. Sa structure s'en trouve alors modifiée par la dissociation de la liaison covalente (O-H). Contrairement à l'eau adsorbée physiquement, l'adsorption chimique s'effectue uniquement sur des sites privilégiés (par exemple sur les défauts cristallins) et sur une couche de molécule d'eau [Kanema 2007].

c) **Eau de constitution**

L'eau de constitution représente l'eau qui a chimiquement réagi avec les éléments anhydres du ciment pour former de nouveaux éléments, tels que le silicate de calcium hydraté et la Portlandite. C'est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates. D'après les études menées sur la structure des (CSH), [Sierra 1980] identifie trois grandes classes d'eau dans les (CSH), et les présente suivant l'ordre décroissant des énergies de liaisons. Ainsi nous retrouvons l'eau hydroxylique, l'eau inter - feuillet et l'eau inter – lamellaire [Kanema 2007].

L'eau hydroxylique est liée à des atomes de silice ou de calcium présents sur la surface interne et externe des feuillets par une association d'un groupement hydroxyle. Cette eau est parfois appelée eau chimiquement liée [Kanema 2007].

L'eau inter – lamellaire est l'eau contenue dans les micropores, liée à la surface externe des feuillets ou à des molécules d'eau par des ponts hydrogènes. Cette eau est structurelle car elle est liée à des groupements hydroxyliques ou à d'autres molécules d'eau [Kanema 2007].

L'eau inter - feuillet se situe dans l'espace interfolière et possède un très faible degré de liberté. Ces molécules d'eau interfolières sont liées triplement par des ponts hydrogènes

comme dans la structure de la glace et interviennent directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle. D'après [Diamond1986] seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible [Kanema 2007].

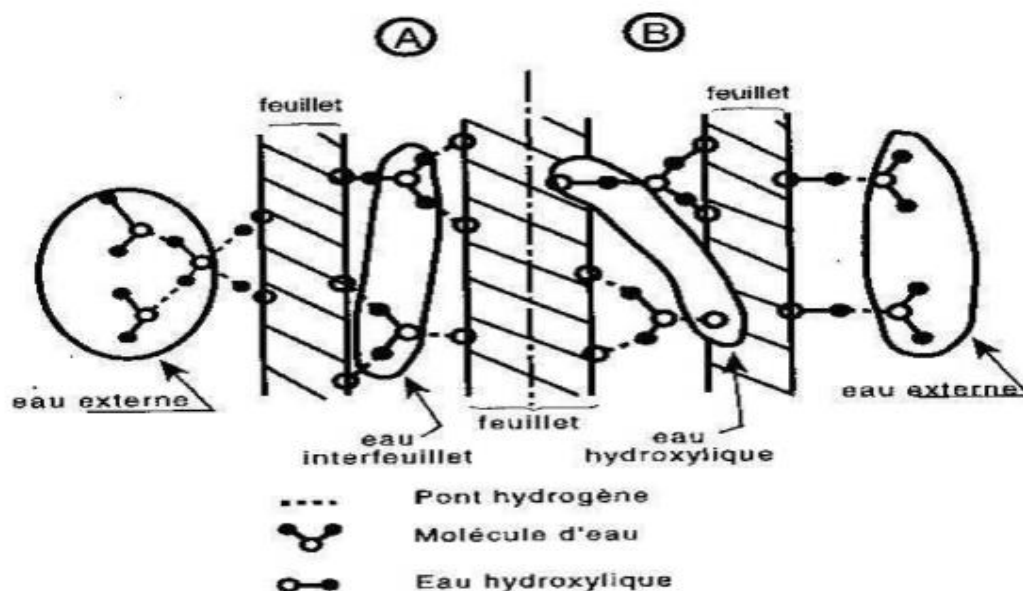


Figure I.1. Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des (CSH). A et B sont deux exemples possibles [Baroghel-Bouny 1994], [Haniche 2011].

Il faut cependant noter que cette distinction de l'eau en catégories n'est pas très bien définie et même parfois purement fictive. [Brouwers2004] quant à lui, fait une distinction entre eau évaporable (dite : « libre ») et eau non - évaporable (dite : « liée »). Eau non - évaporable étant l'eau qui reste dans le matériau après un séchage suivant la méthode de D-drying (évaporation sous vide à très basse température -79°C). L'eau évaporable provient pour une part, des pores capillaires et d'autre part, des pores du gel. De même, il est courant de distinguer deux types d'eau sur des courbes d'analyses thermiques en considérant une température seuil autour de 100°C [Alonso et al 2004]. La perte d'eau en dessous de cette température correspond à l'évaporation d'eau libre, alors que la perte d'eau entre 100°C et 200°C correspond à l'eau liée des (CSH). Toutefois, certains produits hydratés telle que l'ettringite perdent la majorité de leur eau structurelle dès 80°C [Kanema 2007].

I.1.2. Microstructure du béton durci

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 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 proposée par [Diamond 1986], [Fedman et al 1968] ainsi que la structure de l'interface pâte/granat (appelé auréole de transition) [Hager 2004].

I.1.2.1. Microstructure de la pâte de ciment

La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton. Elle est obtenue en mélangeant le ciment portland anhydre, avec de l'eau. La principale caractéristique de ce liant c'est sa capacité de s'hydrater avec de l'eau en formant une pâte solide. Dès que le ciment entre en contact avec des molécules d'eau, il y a un ensemble de processus chimiques (dissolution, saturation, précipitation...) qui apparaissent et aboutissent à l'hydratation du ciment [Haniche 2011].

Un ciment anhydre est composé principalement du clinker, de gypse et d'ajouts éventuels (laitier, cendre volante, filler...). Les constituants principaux du clinker sont les silicates et aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Lors de l'hydratation du ciment, les produits d'hydratation les plus importants sont :

- Les silicates de calcium hydratés (50 à 70%), CaO, SiO₂, H₂O (C S H) : appelés aussi «gel» de (CSH) à cause de leur structure colloïdale.
- La portlandite (25 à 27%) : Ca(OH)₂ : qui se cristallise en plaquettes hexagonales.
- Les aluminates de calcium et sulfo-aluminates de calcium (7 à 10%).

Au cours du temps, les produits d'hydratation se forment en diminuant la porosité initiale et en créant un réseau poreux. Quelques heures après le gâchage, le matériau fait prise : il passe, de l'état de suspension à celui de solide. L'hydratation continue longtemps après la prise, ce qui permet le durcissement ; l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques, très rapide dans les heures qui suivent la prise, continue pendant plusieurs mois, mais de plus en plus lentement.

La quantité de (CSH) est plus importante dans les bétons à haute performance (BHP) que dans un béton ordinaire (BO). Les quantités de (CSH) et de Ca(OH)₂ dépendent essentiellement de la quantité de l'eau de gâchage [Haniche 2011].

Pour un ciment donné, les quantités de silicate de calcium hydraté (CSH) et de Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dépendent essentiellement du rapport eau sur liant (E/C) et du temps de réaction [Diamond 2004], [Bentz 2006]. Dans une pâte de ciment ordinaire durcie, on retrouve en moyenne, 50 à 70 % de silicate de calcium hydraté (CSH) et 25 à 27 % de Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [Baroghel-Bouny 1994]. Il est communément observé une plus forte proportion de (CSH) dans le béton à haute performance que dans le béton ordinaire [Menou 2004]. Cette présence plus importante de (CSH) favorise l'augmentation de résistance du béton. En effet, la Portlandite a peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique car ses cristaux sont de taille plus importante et forment des agglomérats possédant des plans de clivage caractéristique qui interfèrent défavorablement à la résistance mécanique du béton. Afin de limiter les effets de la Portlandite, [Xu 2001] et [Sanjayan et al 1993] rajoutent de la fumée de silice pour qu'elle réagisse suivant la réaction pouzzolanique avec la Portlandite pour former du gel de (CSH). Ce (CSH) de forme lamellaire est observable sous microscope électronique à transmission [Kanema 2007].

I.1.2.2. Structure et morphologie des gels de (CSH)

Les observations microscopiques des particules de (CSH) ont permis de les classer en quatre types morphologiques (classification de [Diamond 1986]) citée par [Hager 2004]:

Type I – feuilletés 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, et sont constitués de fibres de 2 μm au plus.

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 d'environ 300 nm. On les observe majoritairement à long terme.

Type IV – structure dense et amorphe moins remarquable que les précédentes, et que l'on observe en général sur des pâtes de ciment vieilles.

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.2):

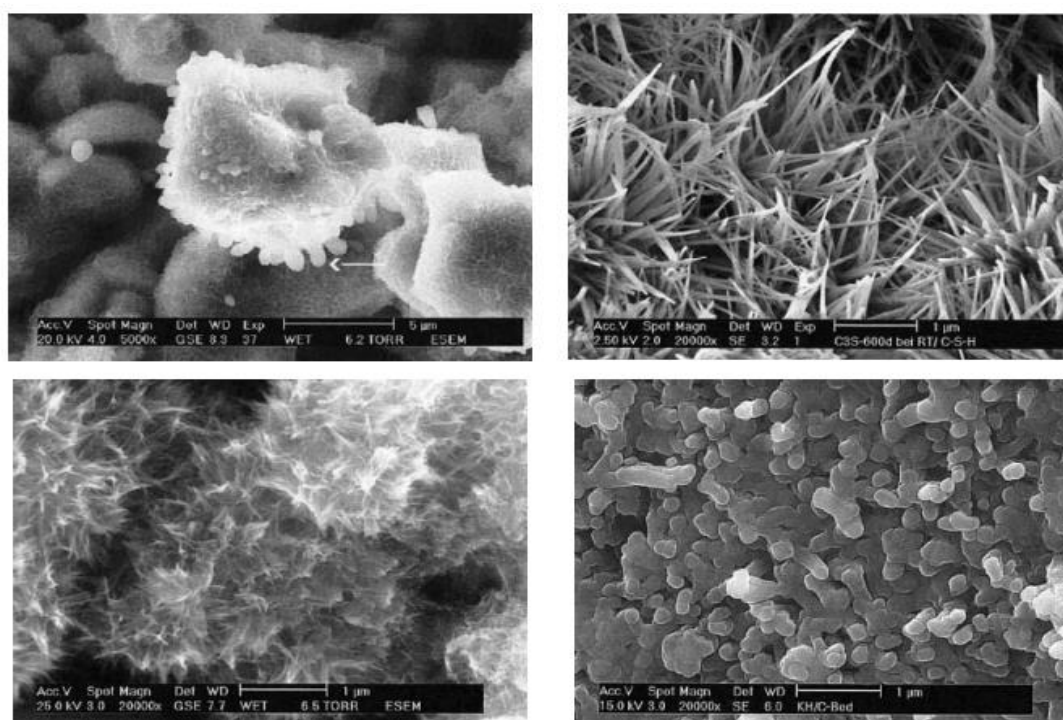


Figure I.2. La diversité des formes du gel CSH. [Hager 2004]

Bien que ces types de silicates de calcium hydratés (CSH) aient une morphologie différente, ils semblent néanmoins avoir la même structure sous-jacente à l'échelle nanométrique. La différence morphologique des (CSH) dépend d'après [Glasser et al 2003] et [Chen 2004] du rapport (C/S) (CaO/SiO_2), de la température et de la pression. [Glasser et al 2003] observe ainsi que dans une solution de rapport (C/S) de 0,83 conservée en condition isobare, la formation à 25°C de (CSH) amorphe et à 55°C la formation de tobermorite.

[Klur 1996] indique, quant à lui, la formation de silicate de calcium de type I, pour un rapport oxyde de calcium sur silice (C/S) compris entre 0,7 et 1, la formation de silicate de calcium de type III, pour un rapport (C/S) compris entre 1 et 1,5, et la formation de silicate de calcium de type II, pour un rapport (C/S) supérieur à 1,8 [Kanema 2007].

Dans la structure proposée par [Sierra1980], l'eau peut apparaître sous trois formes: **interfeuille**, **interlamellaire** et **hydroxylique**. L'eau est également adsorbée sur les faces externes des lamelles et se trouve à l'état libre ou quelque peu structurée dans les pores interlamellaire qui peuvent atteindre quelques dizaines d'Angströms. La valeur avancée est d'environ 20Å. La molécule d'eau a une dimension de 2.6 Å, ce qui implique qu'il ne peut pas y avoir plus de 6 à 7 molécules d'eau remplissant l'espace entre les feuillets [Hager 2004].

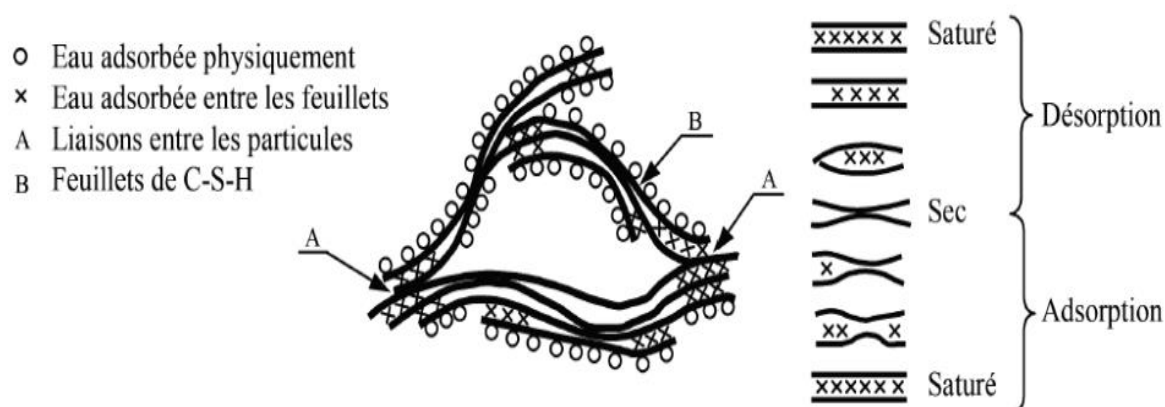


Figure I.3. Représentation schématique de la microstructure du gel de (CSH) selon le modèle de [Fedman et al 1968], [Tognevi 2012].

Les feuillets sont liés entre eux par des forces superficielles ou parfois par des liaisons ioniques covalentes rigides. Ces liaisons se renforcent au cours du séchage, mais elles seraient détruites lors de l'humidification [Baroughel-Bouny 1994]. Ce phénomène expliquerait en partie que la résistance mécanique du béton à l'état humide soit plus faible que celle du matériau sec. Les forces physiques qui s'exercent entre les feuillets de nature hydrophile, séparés par une mince couche d'eau, sont les suivantes : [Hager 2004], [Kanema 2007], [Ladaoui 2010].

- Forces de Van-der-Waals (attractives) ;
- Forces électrostatiques (répulsives) ;
- Les interactions stériques et les forces dues à la structuration de l'eau (répulsives).

Le modèle de la structure du gel (CSH) proposé par Feldman et Sereda permet d'interpréter l'influence de l'humidité relative sur les propriétés physiques et mécaniques de la pâte de ciment. La (figure I.3) présente de façon simplifiée les phénomènes de désorption et d'adsorption de l'eau qui sont principalement liés aux mouvements de l'eau interfeuille. De la même façon, dans le modèle de Munich (1976) (figure I.4), les mécanismes de retrait et de gonflement sont attribués aux mouvements de l'eau dans la structure du gel (CSH). Dans le gel (CSH) sec, les particules sont à l'état de contraction, du fait des forces de tension superficielle. Les forces de tension sont réduites par l'eau absorbée sur les particules.

L'augmentation du volume est évidente. Le gonflement complémentaire est provoqué par la pression de disjonction [Hager 2004].

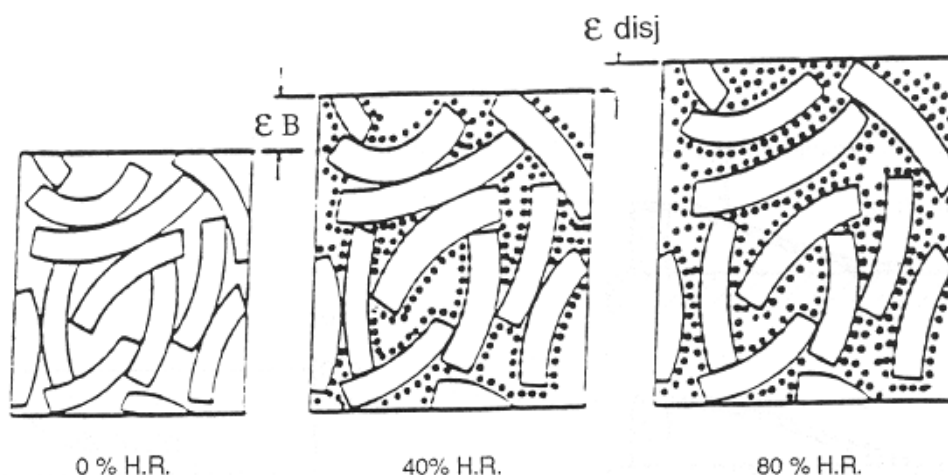


Figure I.4. Modèle de Munich 1976 de gonflement du gel (CSH) en trois différents états d'humidité source [Wittmann 1987].

I.1.3. Particularité de l'hydratation des BHP

Etant donné que les (BHP) sont formulés à partir des mêmes ciments que les bétons usuels (bétons ordinaires BO), les réactions chimiques, processus d'hydratation et hydrates formés, sont par conséquent analogues. La différence réside dans le volume ainsi que dans la compacité des hydrates produits : produits internes de haute densité (High Density HD) ou externes de faible densité (LowDensity LD). La nature de ces derniers est étroitement liée au rapport (E/L) [Tennis et al 2000]. En effet, en réduisant le rapport (E/L) (cas des BHP) de la pâte de ciment, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres laissant ainsi moins d'espace pour les produits externes [Mehta et al 1993]. En conséquence, la principale caractéristique des gels de (CSH) issus d'un faible rapport(E/L) réside dans leur compacité et une plus grande proportion de gels HD que dans le cas de gels issus d'un rapport (E/L) grand [Ladaoui 2010].

I.2. LA MICROSTRUCTURE DE L'INTERFACE PÂTE-GRANULATS.

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte granulat, appelée aussi **l'auréole de transition** ou « **zone de transition interfaciale** » est d'une importance capitale car elle assure le lien entre la matrice et les granulats. Cette interface pâte/granulat est mécaniquement plus faible et présente une porosité plus importante et mieux cristallisée que le reste de la pâte, les pores plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transports de masse [Mouret et al 1999], [Diamond 2004]. Il existe des modèles de la zone de transition proposés par [Monteiro 1986]. Nous présentons sur la (figure I.5) le modèle de [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 μm , est composée de feuillets de (CSH). Après la deuxième couche de Ca(OH)_2 , nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance 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 [Diamond 1986], [Diamond2004], [Perratonet al 1999 (b)]. Nous distinguons les granulats réactifs et les granulats neutres au contact de la pâte de ciment. Pour les granulats calcaires (dit : réactifs), on observe une amélioration de la liaison pâte–granulats du fait de leur réaction chimique continue avec les éléments de la pâte de ciment. En effet le carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans les granulats calcaires réagit avec l'aluminat tricalcique et les aluminosilicates tétracalciques pour former des monocarboaluminates de calcium $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_1$.

Ainsi la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible [Kanema 2007]. L'augmentation de la résistance du matériau béton réalisée avec les granulats de cette nature a été observée [Mallier 1992], [Hager 2004]. A l'opposé, les granulats de type siliceux sont neutres vis-à-vis de la pâte de ciment et l'interface qu'il forme avec la pâte présente une résistance mécanique plus faible et une perméabilité aux gaz plus accrue. Il est à souligner également que la forme des granulats joue un rôle très important car on observe des liaisons plus rigides, au niveau de l'auréole de transition, pour des granulats concassés que pour des granulats roulés [Metha 1986], [Kanema 2007].

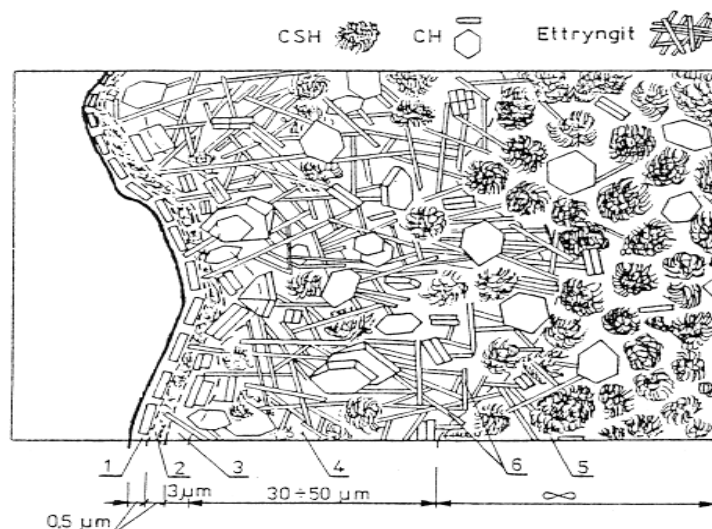
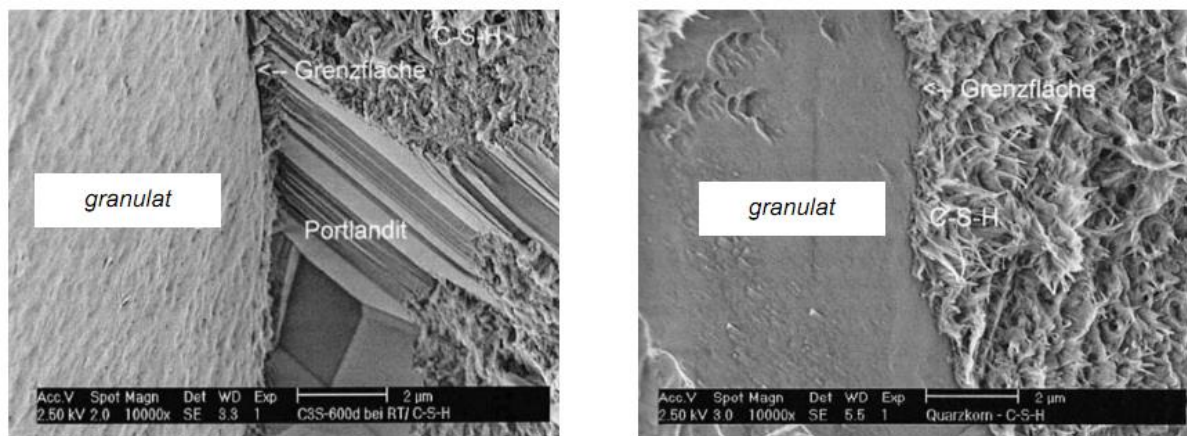


Figure I.5. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de Ca(OH)_2 , 2 - couche de CSH, 3 - couche de Ca(OH)_2 , 4 - zone poreuse, 5 - pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite, [Diamond 1986]

Pour les bétons à haute performance, modifiés par l'ajout de fumée de silice, on a 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 $50 \mu\text{m}$, son épaisseur pour les (BHP) est limitée à $12 \mu\text{m}$. Certaines sources [Aïtcin 2003],[Hager 2004], signalent absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (figure I.6) 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[Hager 2004]en réduisant considérablement la porosité et en améliorant la liaison entre la pâte et les granulats [Vivekanandam et al 1997], [Savva et al 2005], [Kanema 2007].

L'influence du rapport (E/C) sur l'hydratation des pâtes se reflète par la porosité de l'auréole de transition et la quantité totale de la Portlandite qui diminuent avec l'augmentation de l'âge du béton [Chaussadent et al 2001].

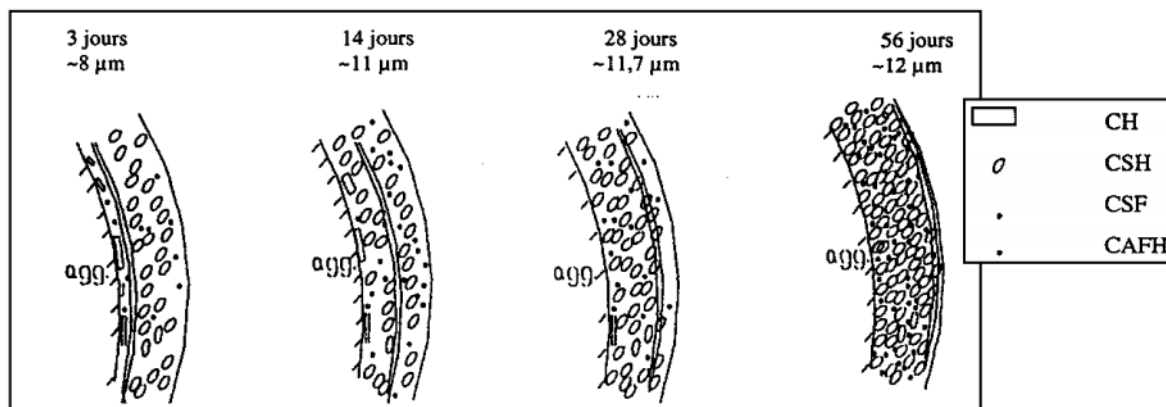


(a) béton sans fumée de silice

(b) béton avec fumée de silice

Figure I.6. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat

[Hager 2004].

**Figure I.7.** Evolution de la zone de transition dans un BHP ($e/c=0,23$ et $e/c=0,15$)

pendant l'hydratation [Vivekanandam et al 1997], [Kanema 2007].

I.3. CONCLUSION

L'objectif de ce premier chapitre a été de présenter les notions générales sur les bétons ordinaires et les (BHP), il a permis de mettre en exergue leur caractère hétérogène et multi-échelle. A travers une brève analyse de l'hydratation du ciment et du béton durci ainsi que les mécanismes chimiques qui s'opèrent au cours de cette hydratation.

Le passage de la microstructure de la pâte de ciment au granulat et au béton est lié à la microstructure de l'interface pâte-granulats. Nous avons également passé en revue certains composants comme l'eau dans les matériaux cimentaires et ces différentes formes. Ainsi que certains ajouts. Ce chapitre a englobé les connaissances de bases nécessaires pour

appréhender le comportement du béton aux hautes températures et qui fera l'objet du deuxième chapitre.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE

II.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau complexe, à la recherche permanente d'un équilibre hydrique avec son environnement. Aussi lorsque cet environnement est brusquement modifié par un refroidissement rapide ou une brusque élévation de température, des mouvements hydriques ont lieu au sein du matériau. Les processus induits par ces mouvements peuvent parfois endommager le matériau béton et bien sûr la sensibilité à s'endommager ou non est liée à la structure même du matériau [Haniche 2011]. La première difficulté de l'étude du comportement du béton à haute température réside dans la complexité de sa structure et son caractère fortement hétérogène. Toutefois, la matrice cimentaire constitue la composante essentielle de par son rôle de liant entre les granulats, de par sa porosité et aussi de par sa transformation permanente avec l'élévation de la température [Kanema 2007].

L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation chimique progressive du béton qui modifie sa microstructure. Ce comportement du matériau à haute température est lié principalement aux modifications physico-chimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats). L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats [Menou 2004].

II.2. ÉVOLUTION DES PHASES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

La transformation des différentes du béton avec l'élévation de la température dépendra de l'évolution des propriétés thermiques, hydriques et mécaniques du béton. Cette évolution est induite par les processus physico-chimiques qui prennent place dans la pâte de ciment et les granulats [Kanema 2007].

Le choix du type des essais est défini en fonction des conditions réelles qu'ils doivent représenter. Ainsi les essais réalisés à chaud, permettent d'évaluer le comportement en cours d'incendie et ceux réalisés après refroidissement indiquent les valeurs « post incendie », importantes de point de vue d'étude des propriétés résiduelles du matériau testé [Hager 2004] [Nguyen 2013].

II.2.1. Quelques conditions de réalisations des essais:

II.2.1.1 Cycles thermiques utilisés

Dans les essais qui étudient l'influence de la température sur les propriétés d'un matériau, les échantillons subissent un échauffement préalable aux essais. Nous pouvons classer les essais selon les conditions de la mesure : en régime transitoire d'échauffement ou en température stationnaire dans l'échantillon [Hager 2004].

– **Régime transitoire:** les essais réalisés en régime transitoire sont caractérisé par la vitesse de montée en température (du four, de la surface d'échantillon) dT/dt exprimés en $[^{\circ}C/min]$. Les essais en régime transitoire de la température peuvent être réalisés sous charge mécanique [Hager 2004].

– **Régime stationnaire:** dans ce cas les essais sont réalisés après un certain temps de stabilisation de température pour éviter les perturbations provoquées par les gradients thermiques présents dans l'échantillon. La durée du palier dépend de la taille de l'éprouvette, de la température de stabilisation mais aussi de la spécification de l'essai. Les essais peuvent être réalisés « à chaud », après refroidissement ou après un certain temps suivant le refroidissement [Hager 2004].

Les essais à chaud donnent une réponse du matériau plus précise, concernant la valeur mesurée à la température donnée. La réalisation des essais est plus complexe et les mesures plus difficiles à effectuer (contrainte de protection du matériel métrologique de la température) [Hager 2004].

Les essais durant la phase de refroidissement permettent de suivre l'évolution de la propriété étudiée durant la phase de refroidissement. Ainsi l'influence des conditions de refroidissement : vitesse de refroidissement ou l'effet d'un choc thermique peuvent être analysés [Hager 2004].

Les essais après refroidissement, nommées aussi « essais résiduels » : résistance résiduelle, perméabilité résiduelle, module d'élasticité résiduel. Ils sont effectués après le cycle d'échauffement jusqu'à la température d'essais et refroidissement jusqu'à la température ambiante. Le fait de refroidir le matériau peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel (CSH) mais aussi la réaction de la (CaO) avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton [Hager 2004].

Les essais après un certain temps après le refroidissement peuvent être réalisés immédiatement après refroidissement, mais aussi peuvent être menés après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Khoury indique [Khoury 1992] que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène est généralement attribué à la réhydratation des grains de ciment non hydratés présents dans les bétons caractérisés par un rapport (E/C) très faible.

II.2.1.2 Influence des conditions de la réalisation des essais

Généralement les résistances déterminées à froid « résiduelles » sont inférieures à celles déterminées à chaud comme l'indiquent plusieurs études aussi bien pour les bétons ordinaires que pour les BHP [Abrams 1971] [Felicetti et al 1999].

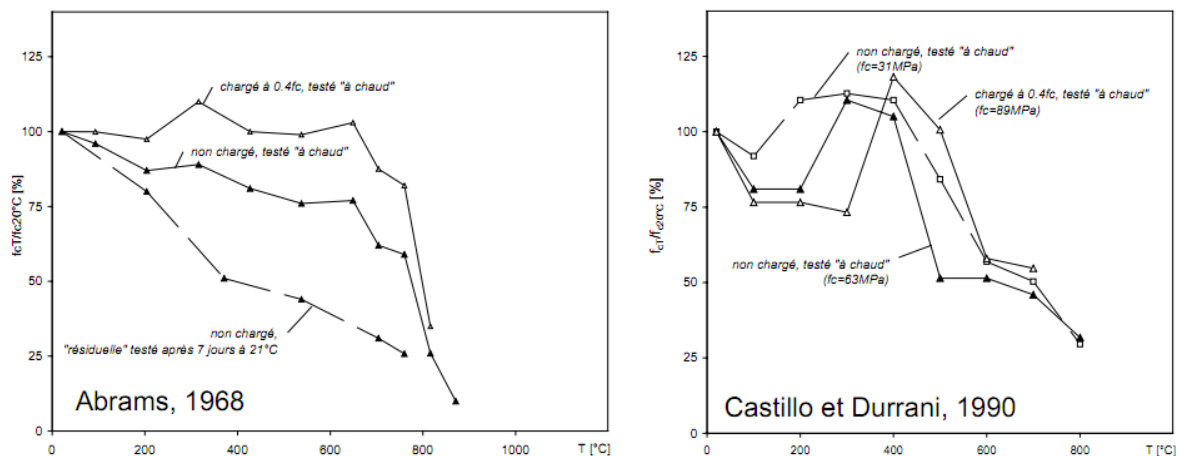


Figure II.1. Influence des conditions de la réalisation des essais sur la résistance en compression. Essais : « à chaud » et « résiduelles », « chargés » et « non chargés ».

[Abrams 1968], [Castillo et Durrani 1990] [Hager 2004]

II.2.2 Instabilité thermique du béton

II.2.2.1 Différentes formes d'endommagement thermique

Le béton peut présenter une instabilité thermique au delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes [Arupfire 2005], [Nguyen 2013] :

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 300°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.

- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement [Nguyen 2013].

II.2.2.2 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton à haute température

Les accidents survenus dans les tunnels ces dernières années ont montré une certaine sensibilité à l'écaillage et à l'éclatement des bétons. Le phénomène est plus marqué pour les bétons à hautes performances [Diederichs et al 1992], [Sanjayan et al 1993]. En effet, leur microstructure plus dense réduit la migration de l'eau et de la vapeur d'eau et engendre donc l'apparition des problèmes d'instabilité. Ces phénomènes semblent se produire de façon aléatoire et de manière non reproductible. Le phénomène d'écaillage et d'éclatement est encore au stade de la prospection [Phan et al 2001] [Kanema 2007] mais deux phénomènes sont souvent avancés pour expliquer les phénomènes d'écaillage et d'éclatement. Elles s'appuient d'une part sur le rôle des contraintes thermiques et d'autre part sur celui des pressions des vapeurs d'eau [Kanema 2007]:

L'hypothèse d'un écaillage résultant de la dilatation thermique empêchée est soutenue par [Bazant et al 1997] et [Ulm et al 1999]. Ils considèrent que la destruction du matériau est due à des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée. Ces contraintes de compressions entraînent une destruction du matériau par délaminage parallèle à la surface. D'après [Bazant et al 1997] les pressions de vapeur internes amorceraient simplement le développement des fissurations. [Menou 2004].

L'hypothèse d'un écaillage résultant de la pression proche de la surface chauffée est décrite par Andenberg [Anderberg1997].

D'autres études avancent le couplage de ces deux phénomènes pour expliquer cet écaillage [Kalifa et al 2000], [Consolazio et al 1997] [Nguyen 2013], le phénomène est principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique

– **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée [Bazant et al 1997]. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent [Bazant et al 1997], [Khoury 1995], [Khoury 1992], [Schneider et al 1982], tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation [Diederichs et al 1989]. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression [Nguyen 2013]. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [Kalifa et al 2000], [Consolazio et al 1997], [Nguyen 2013].

– **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La (figure II.2) montre le mécanisme d'éclatement [Consolazio et al 1997] lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement [Nguyen 2013].

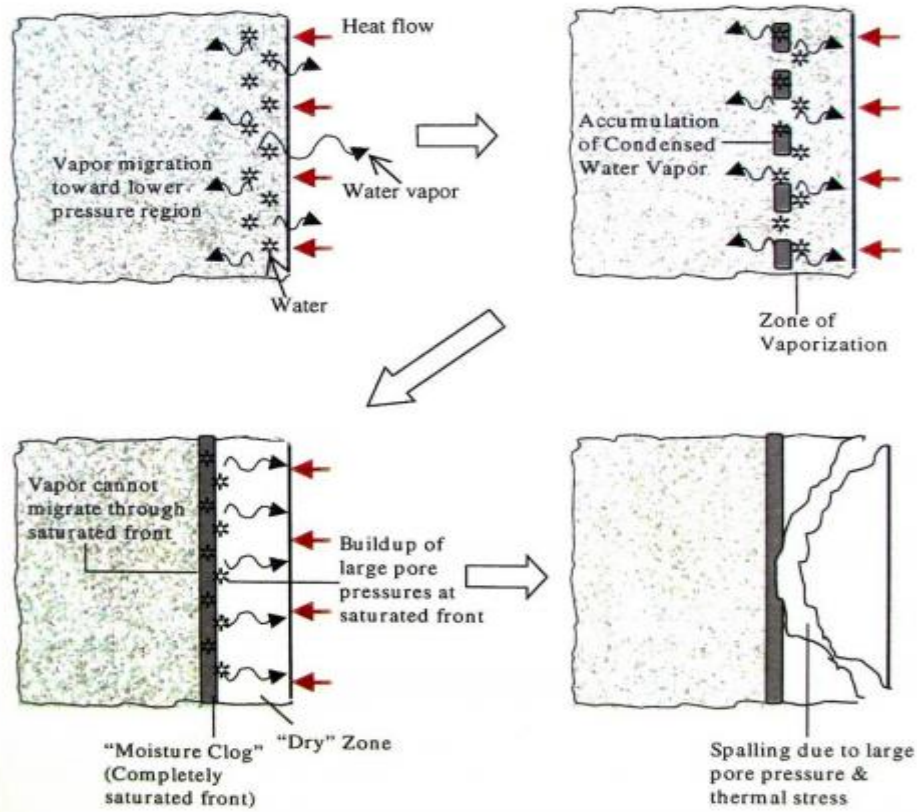


Figure II.2. Mécanisme d'écaillage du béton [Kanema 2007]

II.2.2.3 Paramètres favorisant l'instabilité thermique

Beaucoup d'études se sont intéressées à ce phénomène pour définir les paramètres responsables [Zhukov 1994], [Hertz 2003], [Diederichs et al 1992], [Noumowé 1995], [Khoury 2003]. Il s'avère que la teneur en eau joue un rôle prépondérant dans l'apparition de l'écaillage mais d'autres paramètres jouent aussi un rôle [Phan et al 2001], [Nguyen 2013]. Donc ces paramètres sont :

– **Teneur en eau** : elle joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur. Des travaux [Robert et al 2008], [Hertz 2003], [Harmathy 1964], montrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement. D'autres travaux [Li et al 2004] ont montré, qu'une teneur en eau inférieure à 2.6% provoque une faible fissuration des BHP.

– **Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité, résistances)** : les bétons de faible rapport eau/liant sont plus sensibles à l'éclatement [Phan et al 2001], [Andeberg 1997], [Consolazio et al 1997]. La faible porosité rend difficile le transfert de fluide engendrant de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température [Kanema 2007], [Nguyen 2013].

– **Vitesse de chauffage** : L'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton [Nguyen 2013]. Les contraintes thermiques, créent des contraintes de compression et de traction dans la structure susceptible de générer un écaillage du béton.

Noumowé précise qu'à la vitesse de chauffage de 1°C/min, des éprouvettes cylindriques (16x32)cm² ont éclaté à une température du surface voisine de 300 – 350°C. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté [Noumowé 1995]. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement [Nguyen 2013].

– **Taille des éprouvettes** : Des tests de chauffage réalisés par [Kanema 2007] sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² et (11x22) cm², ont montré plus d'éclatement avec les éprouvettes (16x32) cm². La mesure de la perte de masse des éprouvettes au cours du chauffage a conduit à un séchage plus rapide des échantillons (11x22) cm². Cette perte de masse peut atténuer la pression de vapeur et limiter l'éclatement [Nguyen 2013].

– **Nature des granulats** : Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [Xing 2011], [Mindeguia 2009], [Arupfire 2005], [Nguyen 2013].

L'éclatement est donc lié à plusieurs processus (thermiques, hydriques et mécaniques) avec des paramètres favorisant qui induisent plus de complexité au phénomène.

II.2.3 Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques et physiques se produisent. Ces phénomènes peuvent concerner la pâte de ciment durci, les granulats ainsi que la zone interfaciale pâte-granulats [Hanche 2011]. Les principales réactions chimiques susceptibles de se produire au cours d'échauffement ont lieu dans la pâte ou les granulats [Diederichs et al 1992].

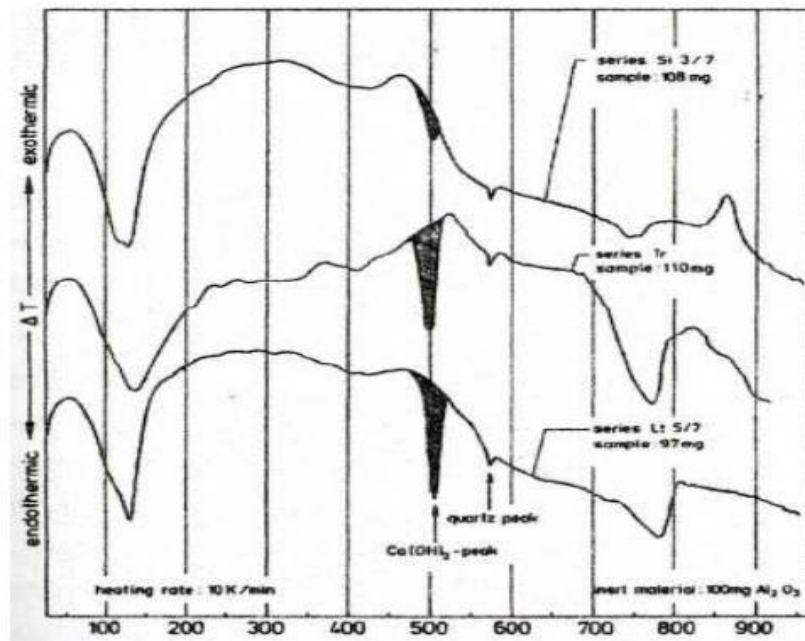


Figure II.3. Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes (libres, liée, absorbée) [Haniche 2011].

II.2.3.1 Matrice cimentaire

Le processus d'hydratation conduit à la formation de l'hydrosilicate de calcium (CSH), de l'ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26(\text{H}_2\text{O})$), de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le (CSH) confère au ciment hydraté sa résistance [Nguyen 2013].

L'eau joue, avec l'augmentation de la température, se dilate puis s'évapore en entraînant une déshydratation des hydrates formés [Nguyen 2013].

Les principales transformations de la matrice cimentaire décrites par plusieurs auteurs [Toumi 2010], [Alonso et al 2004], [Castellote et al 2004], [Noumowé 1995], [Schneider et al 1982], avec l'augmentation de la température sont :

- **20 - 120°C** : le départ de l'eau libre s'opère de façon marquée vers 100°C. Autour de 120°C, l'eau libre s'échappe complètement
- **130 - 170°C** : la réaction endothermique de décomposition du gypse s'observe.
- La destruction du (CSH) observée avant 100°C se poursuit jusqu'à **400°C**
- **450 - 550 °C** : La décomposition de la portlandite en chaux se produit et relâche de l'eau : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- **Autour de 570 °C**: Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
- **600 - 700°C** : la seconde décomposition des (CSH) et la formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ s'opère

- **Entre 700 et 900 °C** : Le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose en chaux libre (CaO) et en gaz carbonique à partir de la température de 600°C et autour de 800°C
- **A dessus de 1300-1400 °C** : Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment [Menou 2004].
- Durant la phase de refroidissement, Alonso et Fernandez [Alonso et al 2004] ont montré un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de (CSH). De plus, une nouvelle formation de la portlandite est observée [Nguyen 2013].

Des travaux ont été menés sur le processus de déshydratation et de réhydratation de la pâte cimentaire soumise à différents cycles de chauffage-refroidissement [Alonso et al 2004] [Castellote et al 2004]. La figure II.4 montre l'évolution des composants de la matrice en phases de chauffage (a) et de refroidissement (b).

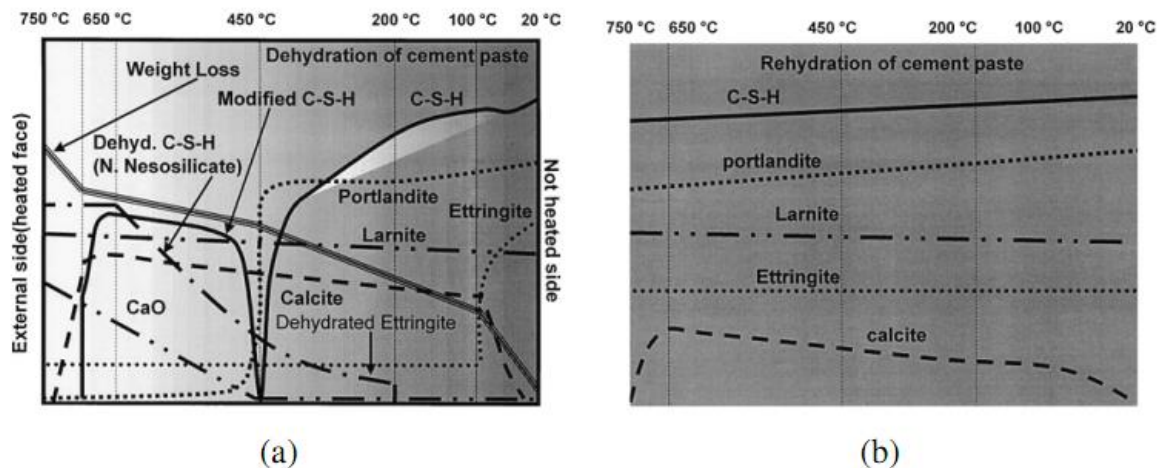


Figure II.4. Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température [Alonso et al 2004], [Castellote et al 2004].

La (figure II.4-a) montre la disparition de l'ettringite avant les 100°C et. La déshydratation des (CSH), qui est progressive avant même les 100°C .

II.2.3.2 Les granulats

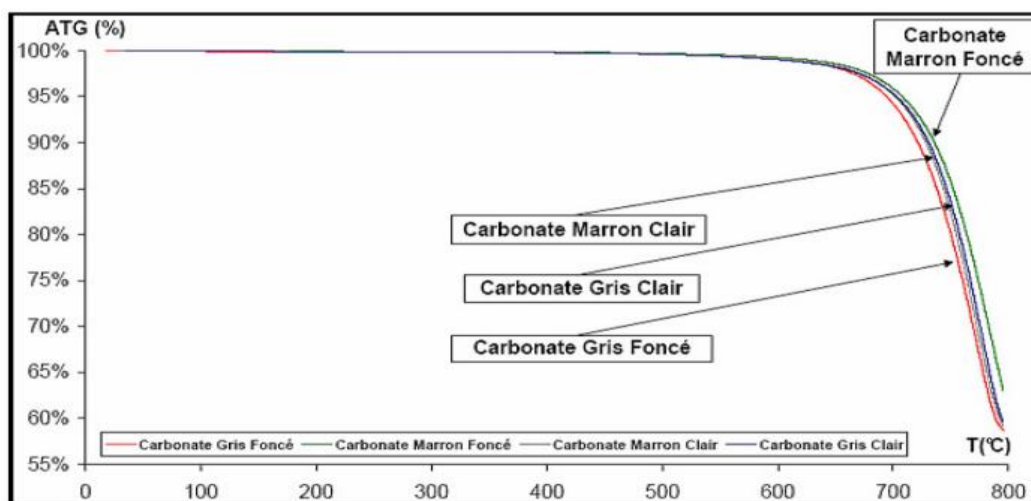
Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels, artificiels) ou recyclés. Les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurelles du matériau pendant l'élévation de température [Menou 2004].

Les granulats calcaires sont assez stables jusqu'à la température 650°C où l'on observe ensuite une perte de masse de l'ordre de 40% (figure II.5-a). Cette perte est liée à la

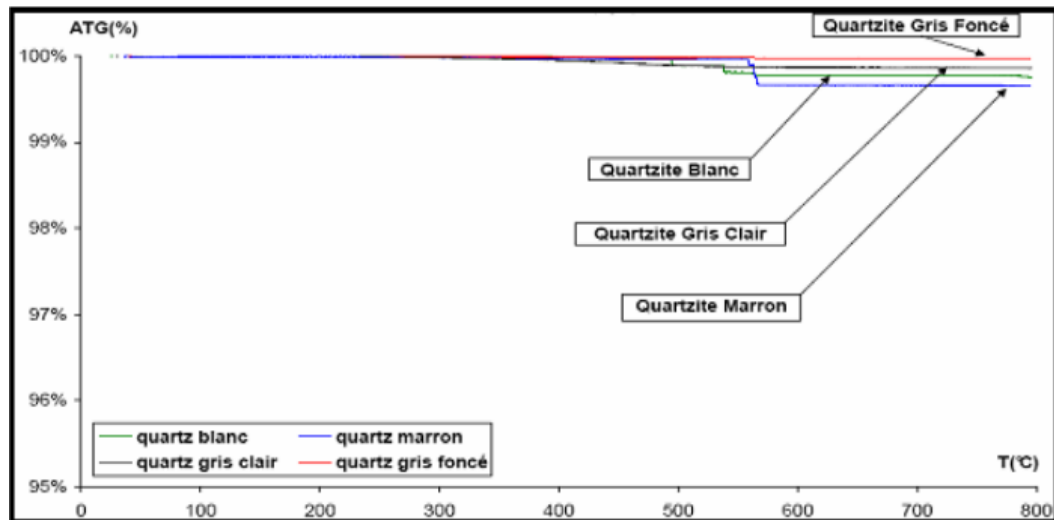
décarbonatation de la calcite (CaCO_3) conduisant à la formation de gaz (CO_2) et de la chaux libre (CaO). La chaux (CaO) ainsi formée peut réagir avec l'humidité de l'air durant la phase de refroidissement et générer de la portlandite. La formation d'une nouvelle portlandite entraîne un accroissement de fissures dans le béton qui engendrerait une baisse de ses performances mécaniques résiduelles [Dias et al 1990], [Schneider et al 1982], [Nguyen 2013].

Les granulats de quartzite (siliceux) (figure II.5-b), ont un comportement physique relativement instable vis-à-vis de la température. Le quartz présent dans ces granulats, est sous forme d'édifice tétraédrique qui, à partir d'une température de 575°C . Ce changement de phase du quart α en quart β est suivi d'un changement de volume de 1% à 5.7%. Cette variation de volume pourrait engendrer un endommagement dans le béton [Schneider et al 1982]. La perte de masse des granulats de quartzite est deux fois plus faible que celle du silex [Nguyen 2013].

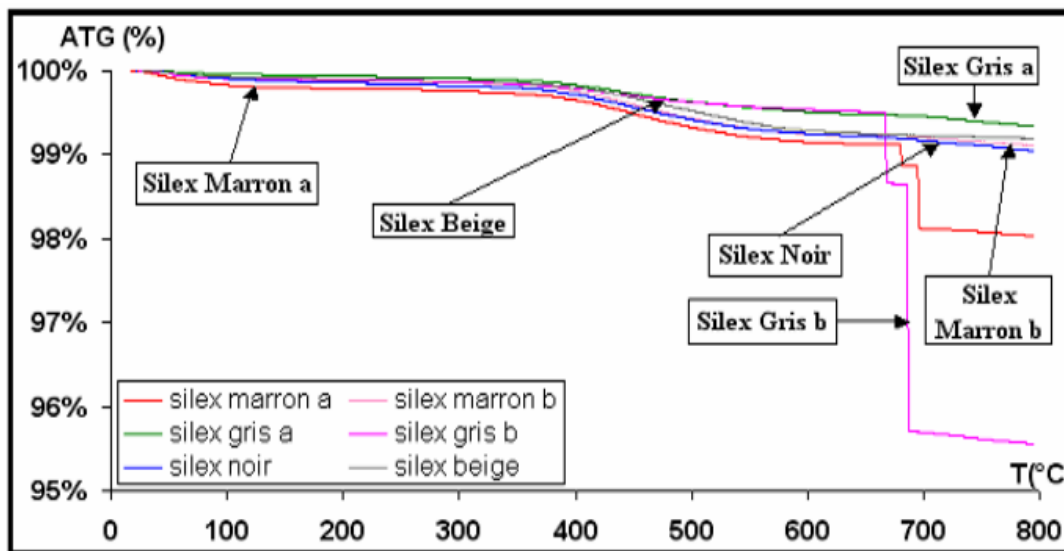
Les granulats de silex ont perdu environ 1% de leur masse (figure II.5-c). L'instabilité thermique de ces granulats est observée dès $110 - 165^\circ\text{C}$ pour les travaux de [Mindeguia 2009] et $150 - 450^\circ\text{C}$ pour [Xing 2011]. Le caractère instable à relativement faible température semble être lié à la présence d'eau piégée dans les micropores ou provenant de la déshydroxylation des groupes silanols [Nguyen 2013].



(a)



(b)



(c)

Figure II.5. Analyse thermogravimétrique des granulats calcaires (a), siliceux (b) et silex(c) [Xing 2011], [Nguyen 2013]

II.2.3.3l'interface pâte granulats

L'interface pâte-granat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la moins riche en gel de (CSH) [Menou 2004].

Cette 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. 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). Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés [Diederichs et al 1992] [Menou 2004].

II.3 PROPRIETES MECANQUES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Le béton se caractérise mécaniquement par la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'Young. Ces propriétés sont fortement influencées par la montée en température. On synthétise dans cette partie l'évolution de ces propriétés relevée par plusieurs travaux.

II.3.1. Résistance à la compression

Les courbes d'évolution de la résistance en compression avec la température dans les documents codificatifs telles que le DTU (Document Technique Unifié) et l'EUROCODE 2 sont mentionnées par les courbes de la (figure II.6). Ces courbes ont été établies en se basant sur les résultats expérimentaux, obtenus sur les bétons de compositions variées par différentes équipes des chercheurs [Hager 2004].

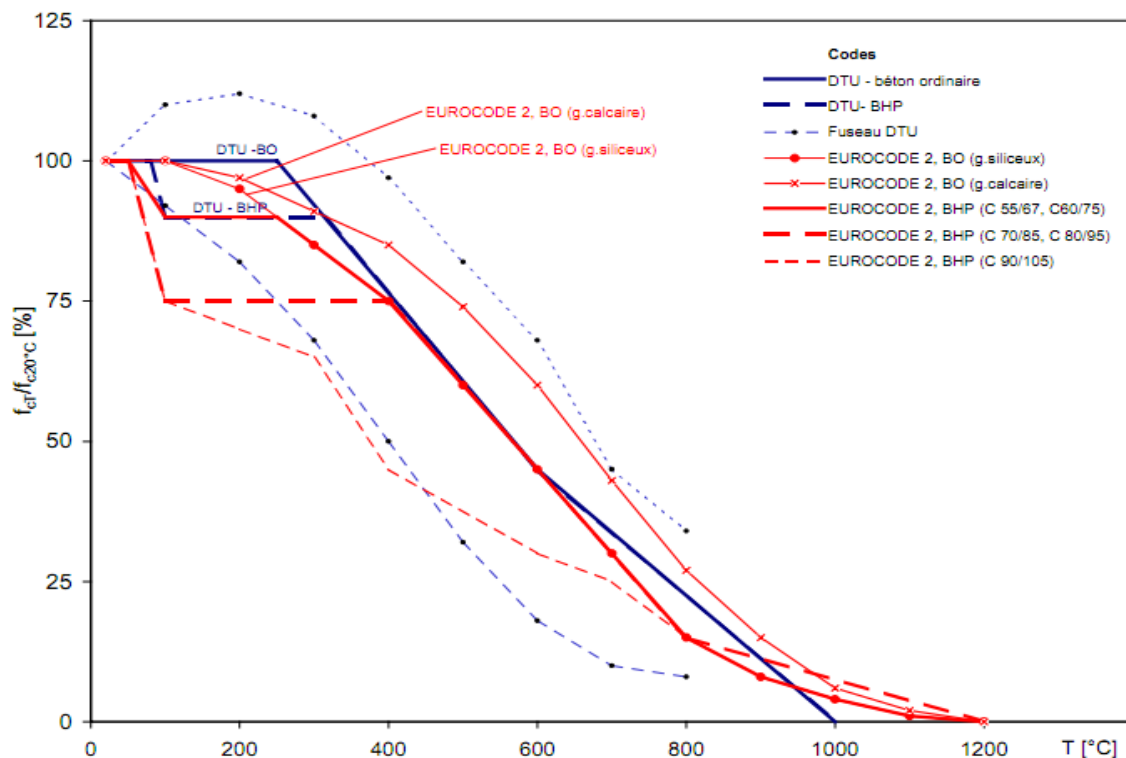


Figure II.6. Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et EUROCODE 2, [Hager 2004]

La résistance en compression à haute température dépend essentiellement de la composition initiale du matériau (type de granulat, rapport eau/ciment, liant, ajouts, ...).

Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de la température sur la résistance à la compression [Diederichs et al 1992], [Noumowé 1995], ... [Menou 2004].

La (figure II.7) montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons autoplaçants [Fareset al. 2009], de bétons ordinaire et à hautes performances [Xing 2011], [Pliya 2010], [Mindeguia 2009]. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température. L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines [Nguyen 2013].

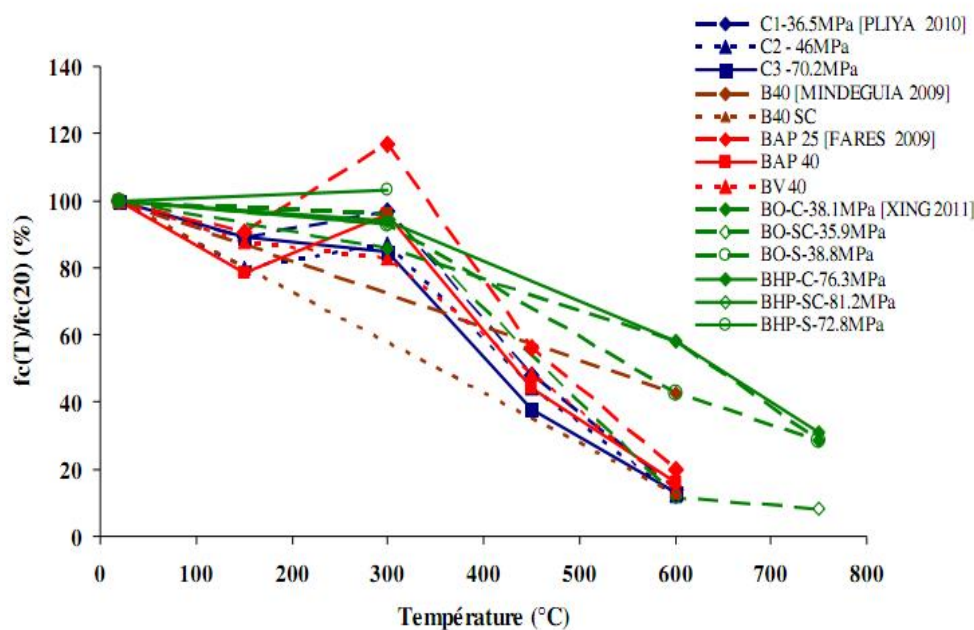


Figure II.7. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [Xing 2011], [Pliya 2010], [Fareset al 2009], [Mindeguia 2009] source [Nguyen 2013]

– **Le premier domaine**, de la température ambiante à 300°C - 400°C, est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. La baisse de résistance est observée autour de 100°C – 150°C suivant les auteurs. Cette légère baisse de résistance est liée au départ de l'eau qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuillets du gel. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion. Jusqu'à la température de 300°C - 400°C, un gain de résistance est remarqué et peut être retardé avec les (BHP) compte tenu de leur faible perméabilité qui ralentit le départ de l'eau [Pimienta 2005], [Castillo 1987]. Le départ de l'eau peut entraîner une augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface [Dias et al 1990], [Castillo 1987], [Nguyen 2013].

– **Le second domaine**, au delà de la température 300°C – 400°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques [Schneider 1988], [Nguyen 2013].

L'influence des additions minérales sur l'évolution des résistances mécaniques à hautes températures varie d'une étude à une autre. Selon certains auteurs le type de ciment peut avoir un impact important sur la résistance [Sarchar et al 1993], alors que d'autres auteurs indiquent que le comportement des bétons est peu influencé par la nature des additions minérales en dessous de 600°C [Poon et al 2001], [Haniche 2011].

L'influence de la nature des granulats sur la résistance en compression n'est pas significative à des températures inférieures à 400°C. Cependant, pour des températures supérieures à 400°C, l'influence des granulats est plus que visible, comme dans le cas des granulats silico-calcaire où la résistance en compression est quasi nulle dès 600°C [Ladaoui 2010].

II.3.2 Résistance à la traction

La plupart des observations de l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température sont réalisées après le refroidissement par fendage [Noumowé 1995]. Des essais de traction directe, après l'exposition à haute température et refroidis ont été réalisés par [Noumowé 1995]. Les valeurs obtenues en traction directe restent les plus proches de la réalité [Hager 2004], [Menou 2004], [Kanema 2007].

La figure II.8 montre les résultats d'essais de résistance résiduelle à la traction par fendage de bétons ordinaires et de bétons à hautes performances [Noumowé 1995], [Li et al 2004], [Kanema 2007] et [Behnood et al 2009]. La résistance résiduelle à la traction diminue avec la température. Une légère baisse s'observe jusqu'à la température de 350°C, puis une chute de résistance plus importante [Behnood et al 2009], [Kanema 2007], [Li et al 2004], [Noumowé 1995], [Nguyen 2013].

Les bétons à faible rapport E/C présentent une baisse plus significative de résistance que les bétons à rapport E/C élevé dès la température 150°C [Kanema 2007], [Nguyen 2013].

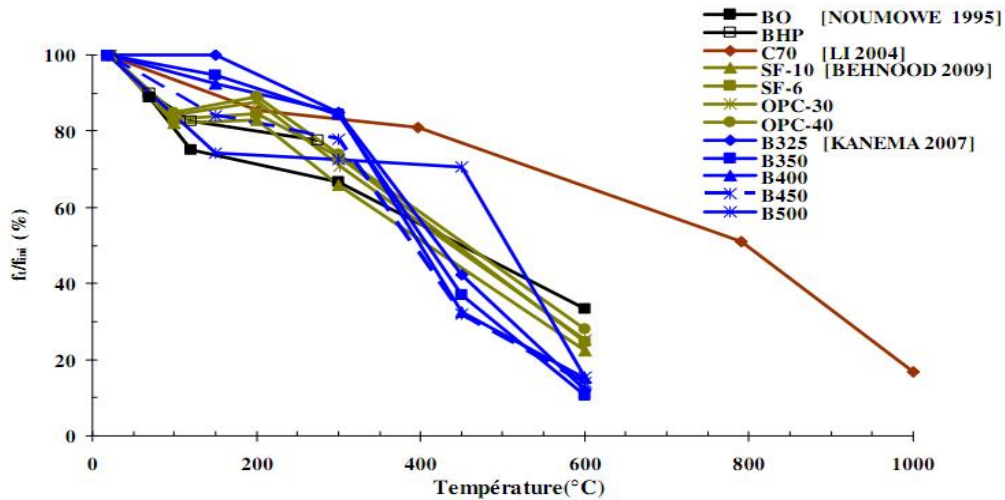


Figure II.8. Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage [Behnood et al 2009], [Kanema 2007], [Li et al 2004], [Noumowé 1995] source [Nguyen 2013]

Xing note une plus grande accélération de la perte de résistance entre 300 et 600°C des bétons de granulats siliceux et de granulats de silex [Xing 2011]. La perte de résistance des bétons de granulats siliceux, de silex et calcaire est respectivement de 87%, 71% et 48% à 600°C. Au delà de cette température, la perte de résistance des bétons de granulats calcaires devient plus importante et est liée à la décarbonatation [Nguyen 2013].

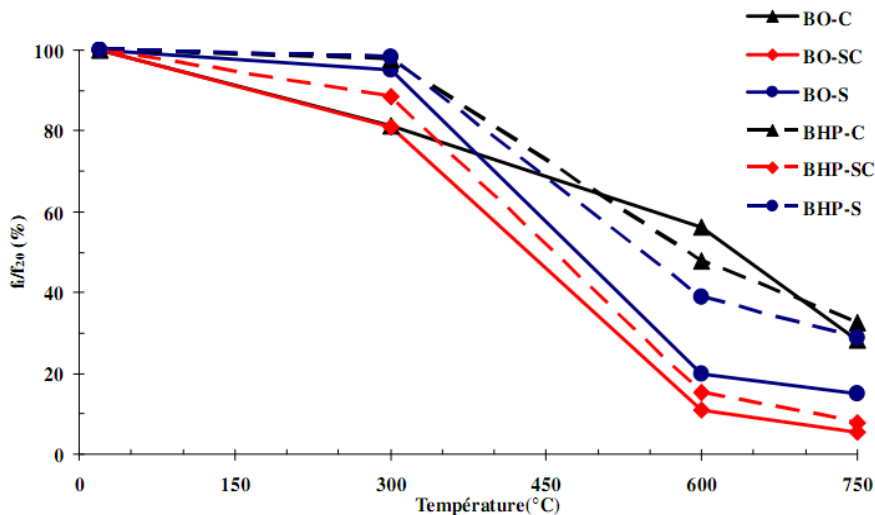


Figure II.9. Évolution de la résistance résiduelle relative à la traction par fendage des BO et BHP [Xing 2011] source [Nguyen 2013]

La variation du rapport E/C du béton a un effet négligeable sur la résistance résiduelle des bétons de granulats calcaire et silico-calcaire entre 600°C – 750°C. La résistance des bétons ordinaires contenant des granulats siliceux est respectivement de 11% et 5% de la résistance initiale à 600°C et 750°C, tandis que celle des bétons à hautes performances avec le même granulats est de 15% et 8% de la résistance initiale. De la même manière avec les bétons de granulats calcaire, la résistance résiduelle varie peu pour les deux bétons ordinaires (56% et 28% à 600°C et 750°C) et bétons à hautes performances (48% et 33% à 600°C et 750°C). La résistance résiduelle relative à la traction entre 600°C et 750°C du béton à hautes performances de granulats siliceux est deux fois plus élevée que celle du béton ordinaire avec le même granulats [Xing 2011], [Nguyen 2013].

II.3.3 Module d'élasticité

L'évolution en fonction de la température du rapport du module élastique sur le module initial selon le DTU et l'Eurocode 4, qui diminue plus rapidement que le rapport des résistances en compression [Menou 2004]

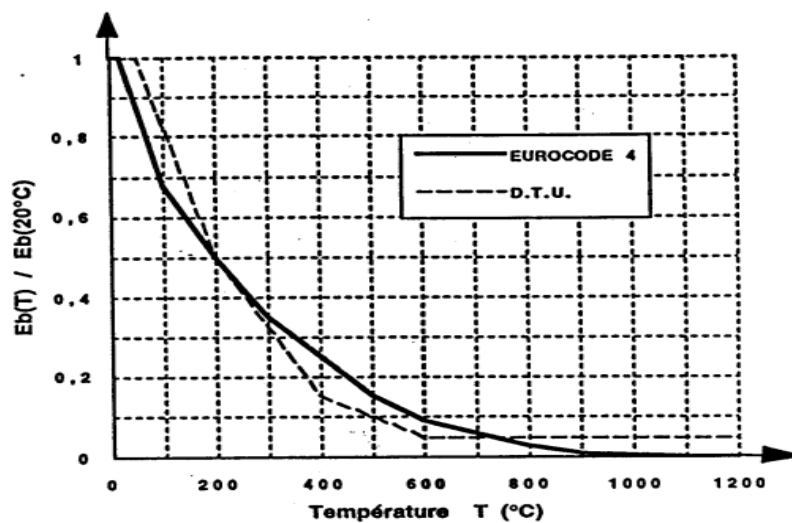


Figure II.10. Evolution de module élastique proposée par les normes [Menou 2004].

Le module d'élasticité résiduel diminue d'une manière progressive et identique en fonction de la température et quel que soit le rapport eau/ciment. Le type de béton n'influe pas sur l'évolution du module d'élasticité [Pliya 2010], [Kanema 2007], [Hager 2004]. Kanema [Kanema 2007] a observé une rigidité presque nulle (2%) à la suite d'un chauffage à 600°C. La forte baisse de rigidité du béton chauffé est liée aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire, de la déformation des granulats avec l'interface pâte – granulats et l'augmentation du volume poreux [Pliya 2010], [Hager 2004], [Noumowé 1995], [Nguyen 2013].

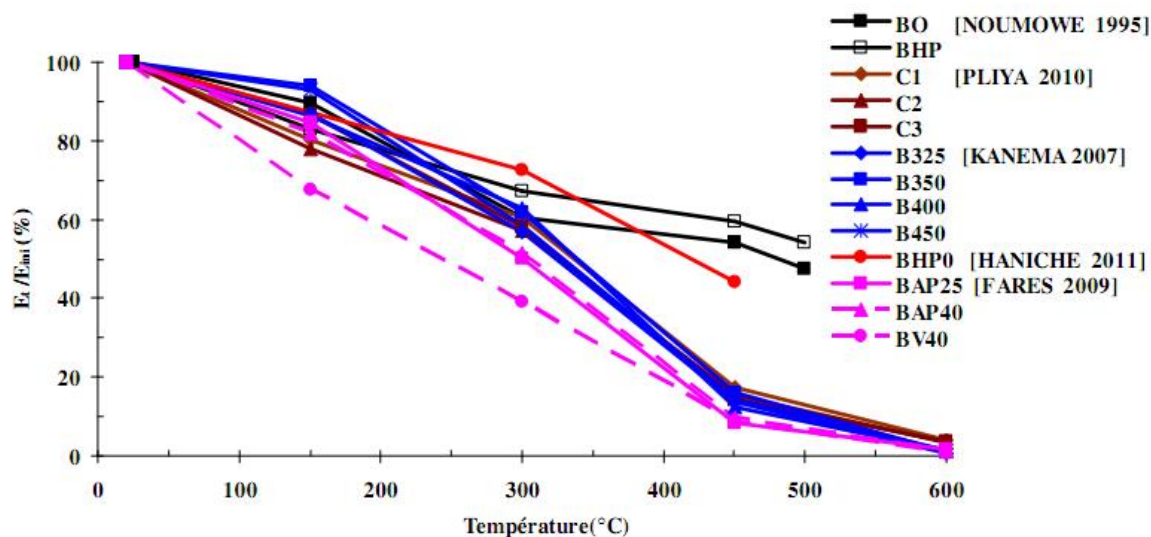


Figure II.11. Évolution du module d'élasticité résiduel relatif [Haniche 2011], [Pliya 2010], [Fares 2009], [Kanema 2007], [Noumowé 1995] source [Nguyen 2013]

Noumowé [Noumowé1995] a constaté que la baisse du module d'élasticité s'effectue de manière linéaire avec l'augmentation de la température et que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du (BHP) reste très proche de celle du béton ordinaire. D'après Kanema [Kanema 2007], Saber et al [Sabeuret al 2007] ont abouti à la même constatation pour des mesures de module d'élasticité réalisé à chaud. Hager [Hager 2004] a conclu, que le rapport (E/C) n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température.

II.4 Conclusion

L'objectif du premier chapitre a été de présenter on premier lieu des notions générales sur les bétons ordinaires et les (BHP), en deuxième lieu de faire la synthèse des résultats expérimentaux et des connaissances existantes mettant en scène l'évolution du comportement du béton à haute température.

Lorsque le béton est soumis à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et a produit une déstructuration de la pâte de ciment et des granulats qui affecte directement les propriétés mécaniques.

L'eau qui se présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, lors de la montée en température, s'échappe du béton, et entraîne la déstructuration de la matrice. Celle-ci

se traduit sur le plan macroscopique par une modification de la résistance en compression, de la résistance en traction, du module d'élasticité.

Les BHP perdent plus de résistance que les BO mais leur résistance reste supérieure à celle des BO. En termes d'instabilité thermique, le BHP est plus susceptible que le BO du fait de sa forte densité et une très faible perméabilité. L'instabilité thermique du béton se traduit par un comportement explosif ou un écaillage. Trois hypothèses sont avancées pour expliquer le comportement instable du béton : la première est attribuée à la pression d'eau liquide et de vapeur, la seconde aux contraintes thermiques et la dernière, la combinaison des deux premières hypothèses. La vitesse de chauffage, les propriétés physico-mécaniques du béton, la taille du spécimen, la teneur en eau, la nature des granulats, la charge mécanique sont des paramètres influençant l'instabilité thermique du béton.

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

Cette étude expérimentale présente la deuxième partie du travail, dont elle est divisée en deux chapitres, le chapitre III présente les matériaux utilisés et les techniques expérimentales suivies pour leurs caractérisations. Le chapitre IV concerne la présentation et l'analyse des résultats expérimentaux.

CHAPITRE III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III. 1. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la montée de la température dans les bétons ordinaires (BO) et les bétons à hautes performances (BHP). Des éprouvettes de différentes compositions de béton ont été confectionnées, conservées, puis soumises à un traitement thermique. Des mesures de la perte de masse, de la vitesse ultrasonique, de la résistance à la compression et à la traction ont été effectuées avant chauffage et après refroidissement. Afin d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques des deux type de béton aux hautes températures.

Nous commençons par présenter les caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des bétons testés avant de décrire les dispositifs expérimentaux utilisés dans le cadre de cette étude.

III.2. ESSAIS DE CARACTERISATION

Tous les essais ont été réalisés au niveau du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique "LGCH" de l'université de Guelma

III.2.1. Caractérisation des constituants

Les méthodes d'essais de caractérisation des constituants sont décrites dans ce chapitre. Certains modes opératoires s'appuient sur des textes normatifs tandis que d'autres sont issus de protocoles expérimentaux publiés dans la littérature scientifique. Dans les deux cas, un renvoi à la norme ou la publication concernée est effectué.

III.2.1.1. Ciment et additions minérales

Toutes les données utilisées dans cette étude, comme celles du ciment (C) ou des additions minérales (FS) utilisées sont issues des analyses d'autocontrôle effectuées par les fournisseurs.

III.2.1.2. Granulats

Les essais mis en œuvre pour déterminer les caractéristiques des granulats (sables et graviers) sont:

a. Masse volumique

La masse volumique, est une caractéristique de base des granulats pour bétons. Cette caractéristique est définie selon la norme [NF P 18-554] pour la masse volumique apparente et la norme [NF P 18-555] pour la masse volumique absolue.

b. Granulométrie

Cet essai s'effectue selon la norme [NF P 18-560]. Il permet de déterminer la proportion massique du passant cumulé d'un échantillon de matériau divisé (sable ou graviers) selon la taille de l'ouverture des tamis. Les résultats sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique. On a effectué le tamisage par voie sèche selon la norme [NF P18-560], à l'aide d'une tamiseuse électrique à chocs (de marque CONTROLS Model: 15-D0411) (figure III.1).

c. Module de finesse

Le module de finesse M_f d'un granulat, déterminé selon la norme [NF P18-560], est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5-10-20-40-80 mm. C'est un facteur très important, qui nous permet généralement de juger la grosseur du sable utilisé. La norme indique que M_f doit être compris entre 1.8 et 3.2. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8; au dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau; au dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- **Pour $1.8 < M_f < 2.2$** le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- **Pour $2.2 < M_f < 2.8$** le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **Pour $2.8 < M_f < 3.2$** le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- **Pour $M_f > 3.2$** le sable est à rejeter.

d. Equivalent de sable

La mesure de l'équivalent de sable a pour but d'évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, il consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, il s'effectue sur la fraction des sols passants au tamis de 5 mm. Généralement, il caractérise la nature et la qualité des sables.

e. Impureté (ou propreté pour les graviers)

La norme P18-301 [Dreux et al 1998] prescrit que dans les granulats (graviers) le pourcentage des impuretés ne doit pas excéder 5%. George Dreux avise qu'elle ne doit pas dépasser 2% dans les granulats pour bétons de qualité. La propreté des graviers a été déterminée conformément à la norme NF P18-591 [Kedjour 2010] Généralement, elle permet de juger la propreté des granulats et de prendre décision de lavage ou non.

f. La dureté

L'essai Los Angeles peut être effectué sur des granulats de différentes granulométries. Le même principe est appliqué mais la masse de l'échantillon, la charge de billes d'acier et le nombre de tours, sont dans chaque cas, définis en fonction de la classe granulométrique utilisée. La dureté a été déterminée conformément à la norme [NF P18-573].

III.2.1.3. Adjuvant

Deux adjuvants ont été utilisés dans cette étude, le premier est un superplastifiant MEDAFLOW 30 répondant aux exigences de la norme [EN 934-2], le deuxième est un plastifiant VISCOCRETE® 3045 répondant aux exigences de la norme [EN 934-2] Tableau 2. Les informations concernant les caractéristiques de ces produits ont été mises à disposition par les fournisseurs; il s'agit de la nature chimique, de la densité de l'extrait sec, etc.

III.2.2. Caractérisation du béton à l'état frais

Les essais à l'état frais sont primordiaux pour la connaissance du béton frais. En effet, les cinq bétons ordinaires (BO) possède une consistance qui diminue proportionnellement avec l'augmentation du rapport E/C, de l'état fluide à l'état plastique et doit être mis en place avec le serrage préconisé pour chaque état. Le béton à haute performances (BHP) possède une consistance fluide et sa mise en place s'effectue sans vibration (léger piquage). Les mélanges des bétons ont été préparés dans un malaxeur de type laboratoire (figure III.2) à axe incliné de marque GUYNOEL avec cuve tournante; sur les parois intérieures sont fixées des palettes hélicoïdales assurant le

brassage du mélange et permettant la vidange par inversion du sens de rotation. La procédure de malaxage de chaque type de béton (BO ou BHP) est décrite dans la section III.4.2.1.

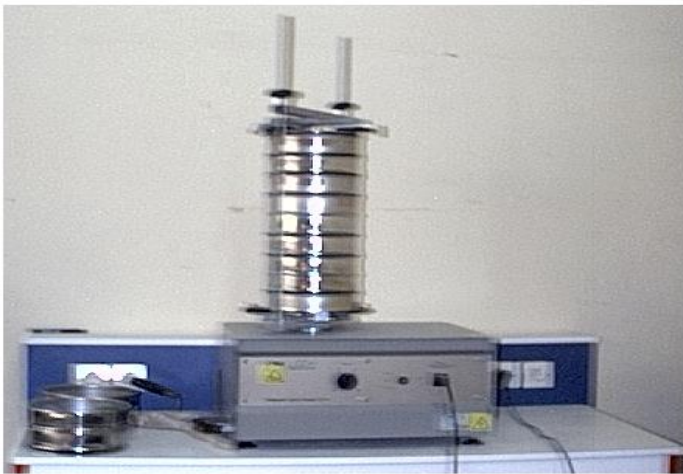


Figure III.1. Photo de la tamiseuse utilisée



Figure III.2. Malaxeur de béton utilisé

III.2.3. Traitement thermique

Le cycle de traitement thermique adopté a été réalisé en utilisant un four électrique à chambre de marque NABERTHERM model LH60-20 (figure III.8), il peut atteindre une température maximale de 1100°C.

III.2.3.1. Description

- a) **Chambre de chauffe:** composée d'éléments modulaires en fibre céramique de haute résistance à l'écrasement ($>40 \text{ kg/cm}^2$). La résistance de sol protégée par une dalle réfractaire.
- b) **Isolation:** en matériaux de haute qualité et à faible conductibilité thermique, réduisant les pertes et le rayonnement extérieur au minimum. L'absence de ponts thermiques entre la chambre de chauffe et l'ossature du four élimine toute déperdition et optimise le rendement.
- c) **Régulation de la température:** configurable et programmable par l'intermédiaire d'un régulateur numérique avec visualisation simultanée de la mesure et de la consigne de température.
- d) **Protection des résistances :** assurée par une unité d'alarme.
- e) **Ossature et Porte :** l'ossature est en tôle d'acier, la porte est à ouverture rectangulaire et à verrouillage par deux vis de pression. Son étanchéité est assurée par le maintien en pression constante d'un joint résistant aux hautes températures.

III.2.4. Essais de caractérisation des bétons à l'état durci

III.2.4.1. Auscultation dynamique [NF P 18-418]

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Il s'agit d'un essai non destructif. Les mesures ultrasoniques peuvent être interprétées selon les critères décrits dans le tableau III.1 ci-dessous.

Tableau III.1: Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions

Qualité	Vitesse de propagation des impulsions m/s
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660-4575
Douteuse	3050-3660
Mauvaise	2135-3050
Très mauvaise	inférieure à 2135

Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel de contact est indispensable.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.
- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

- Description de l'appareil

L'appareil utilisé (figure III.3) comprend un testeur ultrasonique de marque CONTROLS model 58-E0048, une tête de transmission et une de réception (54 kHz), deux câbles de connexion (BNC), un barreau de calibrage et un flacon de gel de contact.

- Estimation du module élastique

A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module dynamique E_d selon la formule :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \text{Où :}$$

V = vitesse en km/s

γ = masse volumique du béton en kg/m^3

ν = coefficient de Poisson (pour béton haute résistance $\nu=0.15$; pour béton faible résistance $\nu=0.30$)

E_d = Module d'élastique dynamique en MPa.

III.2.4.2. Performances mécaniques

L'essai de résistance résiduelle, est l'un des essais les plus couramment utilisés pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec la température. Il a l'avantage de se pratiquer sur un matériel simple (une presse hydraulique) et ne nécessite pas un personnel qualifié, à la différence de l'essai à chaud.

Nos essais de résistance résiduelle ont concerné la détermination de la résistance en compression, la résistance en traction (par fendage). Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques (16*32) cm^2 pour les (BHP) et celles qui concerne les bétons ordinaires ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques (15*15*15) cm^3 en prenant en considération le facteur de la forme pour remettre les résultats compatibles aux normes pour toute fin comparative. Les essais de compression et de traction ont été réalisés sur une presse de 2000 kN avec des vitesses respectivement de 0.5 MPa/s et 0.05 MPa/s [EN 12309-3 2003] (figure III.4). Toutes les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à la température ambiante du laboratoire jusqu'à 28 jours, puis à l'air libre au laboratoire.



Figure III.3. Appareil utilisé pour les essais ultrasoniques



Figure III.4. Presse utilisé pour les essais de compression et de traction

III.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

III.3.1. Ciment

Le ciment employé est un ciment CPJ CEM II/A 42.5 de la cimenterie de Hadjar Soud (wilaya de Skikda, nord algérien). Sa composition minéralogique fournie par le laboratoire de la cimenterie est: C3S = 55 à 65 %, C2S = 10 à 18 %, C3A = 10 à 12 %, C4A = 10 à 12 %.

Les caractéristiques physiques et la composition chimique du ciment utilisé sont présentées dans les Tableaux III.2 et III.3 ont été fournies par le laboratoire de la cimenterie.

Tableau III.2. Propriétés du ciment utilisé (fiche technique [Drabla 2015])

CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE		
NORME NA			NORME NA	EN Mpa	
NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION	
NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		02 jours	≥ 12.50
NA230	FIN DE PRISE	150 - 250		07 jours	25 - 35
NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours	42.5 - 52.5
NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	NA 234	FLEXION	
NA231				02 jours	3,0-4,0
				07 jours	5,0-6,5
NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours	6,5-8,5

III.3.2. Additions minérales

L'addition minérale utilisée pour les deux BHP (BHP1 et BHP3) est une fumée de silice MEDAPLAST HP (voir annexe) produite par la société Granitex (Oued Smar, wilaya d'Alger). C'est un ajout à base de micro silice conforme à la norme [NFP 18-502]. Il est sous forme de poudre et de couleur grise et il se caractérise par une densité apparente de 0.5, d'une surface massique supérieure à $15 \text{ m}^2/\text{gr}$, d'une humidité par étuve à 105°C inférieure à 1% avec une taille des particules inférieure à 0.1 microns. Sa composition chimique est présentée dans le tableau III.3 et ses caractéristiques physiques sont indiquées dans le tableau III.4.

III.3.3. Granulats

Trois sables et quatre graviers ont été utilisés :

- un sable siliceux de classe granulaire 0/1 (noté S_{mer}) de la région de Oued Zhor (wilaya de Skikda),
- un sable calcaire concassé de classe granulaire 0/5 (noté $S_{\text{carrière}}$) de la carrière de Boucelba (wilaya de Guelma, nord algérien),
- un sable siliceux de classe granulaire 0/1 de la région de M'sila (noté S_{dune}) de la carrière de Bou Saada.
- deux graviers de classe granulaire: 5/12.5 (noté $G_{5/12.5}$) et 12.5/20 (noté $G_{12.5/20}$), d'origine calcaire issus de la carrière de Bou Saada wilaya de M'sila.
- deux graviers de classe granulaires: 5/15 (noté $G_{5/15}$) et 15/25 (noté $G_{15/25}$), d'origine calcaire issus de la carrière de bendjerrah (SARL SAPAM) wilaya de Guelma.

La figure III.5 présente les courbes granulométriques des trois sables et des quatre graviers. Le tableau III.4 donne les caractéristiques générales des granulats. Elles sont nécessaires pour effectuer la formulation des bétons par la méthode de Dreux-Gorrissen.

Tableau III.3. Compositions chimiques du ciment, de l'addition minérale et des sables

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl-	PAF
C	59-62	22-24	5.3-6.0	3-4	1.5-	<0.9	<0.7	1.8-2.2	-	-
FS	0.2	93.7	0.6	0.3	0.2	0.5	0.2	<2.5	<0.2	2.9
S_{mer}	0.62	95.21	1.12	0.55	0.04	0.46	0.10	0.00	-	-
S_{carrière}	56.73	3.71	0.23	0.20	1.18	0.02	0.07	0.09	-	37.77
S_{dune}	1.63	90.46	1.38	1.92	0.39	0.22	0.00	0.2	-	2.56

Tableau III.4. Propriétés générales des matériaux

	Unité	Smer	Scarrière	Sdune	G(5 /12,5 . 5/15)	G (12,5/20 ., 15/25)	C	FS
M_f	(%)	1.77	3.51	0.84	-	-	-	-
ESV	(%)	71.42	76.29	80.37	-	-	-	-
ESP	(%)	67.46	70.97	78.65	-	-	-	-
ρ_{abs}	(g/cm ³)	1.70	1.49	1.63	1.58	1.58	1.12	0.5
ρ_{app}	(g/cm ³)	2.67	2.56	2.6	2.72	2.63	3.16	-
Impureté	(%)	-	-	-	1	1.32	-	-
L _A	(%)	-	-	-	27	32	-	-
SSB	(cm ² /g)	-	-	-	-	-	3630	>1500

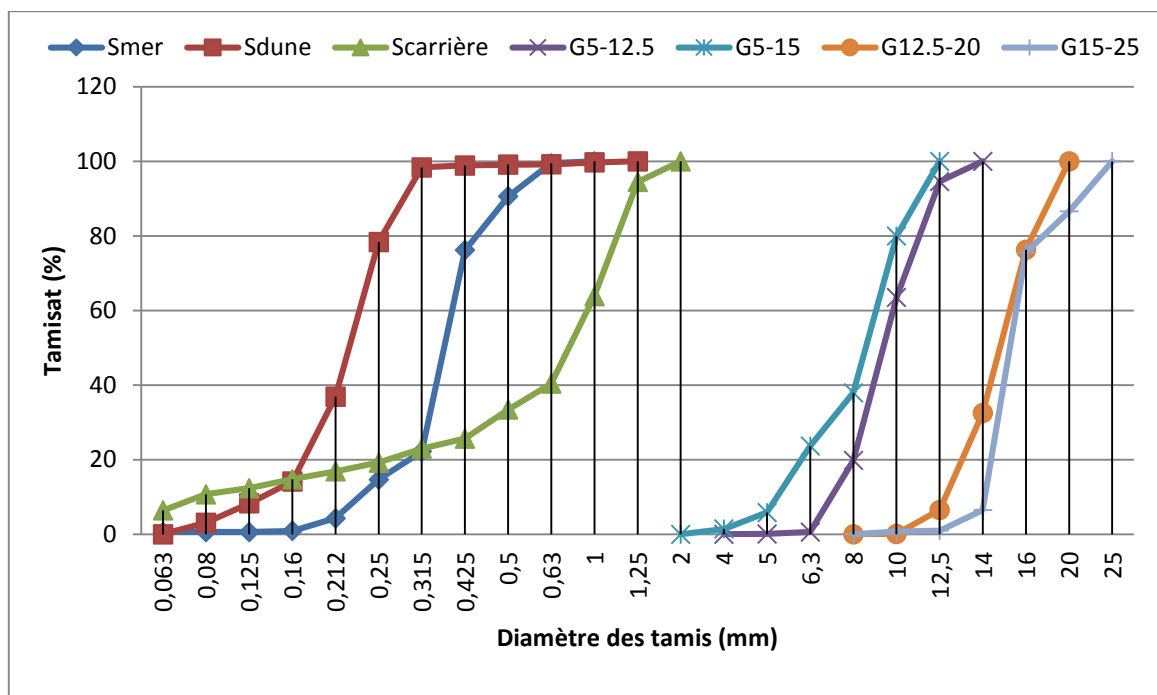


Figure III.5. Courbes granulométriques des granulats utilisés

III.3.4. Adjuvants

- Le superplastifiant MEDAFLOW 30 produit par la société Granitex (Oued Smar, wilaya d'Alger) a été utilisé pour la confection du BHP1. C'est un haut réducteur d'eau de la troisième génération à base de polycarboxylates qui améliore considérablement les propriétés des bétons pour obtenir une très haute qualité.
- Le plastifiant VISCOCRETE 3045 réducteur d'eau de nouvelle génération produit par la société SIKA a été utilisé pour la confection du BHP3. C'est un plastifiant réducteur d'eau non chloré à base de polycarboxylates modifiés.

Leurs caractéristiques sont données dans le tableau III.5 ci-dessous.

Tableau III.5: Caractéristiques des adjuvants utilisés

Superplastifiant/plastifiant	Médaflow 30	Viscocrete A 3045
Forme	Liquide	Liquide
Couleur	Jaunâtre	marron
pH	6 - 6.5	5 ± 1
Densité	1.07 ± 0.01	1,11 ± 0,02
Teneur en chlore	1.07 ± 0.01	< 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq	-	< 2,5 %
Extrait sec	30 %	(36 ± 1)%

III.4. FABRICATION DES BETONS ET CONDITIONNEMENT:

III.4.1. Compositions des bétons

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause. Notre choix s'est porté sur la méthode pratique Dreux-Gorisse [Dreux et al 1998], qui est fondée sur deux hypothèses principales :

- a) résistance souhaitée fixée au départ.
- b) Affaissement et dosage en ciment fixés.

Remarque : l'eau utilisée est celle du robinet au niveau du LGCH. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est de 1000 kg/m³. Les trois compositions du BHP et les cinq compositions des BO sont récapitulées dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Composition des (BHP) et (BO) étudiés.

Béton Comp (kg/m ³)	BHP			BO				
	BHP 1	BHP 2	BHP 3	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
Smer	575,12	/	243	607.31	602.54	596.92	582.77	586.13
Scarrière	/	492	492	/	/	/	/	/
Sdune	/	243	/	/	/	/	/	/
G5 /12,5	/	461	/	/	/	/	/	/
G5/15	630,76	/	461	589.58	584.97	579.52	565.79	569.04
G12,5/20	/	448	/	/	/	/	/	/
G15/25	649,32	/	448	626.44	621.52	615.72	601.13	604.50
C	500	500	500	300	345	398	450	500
E	172,5	173	173	208.33	206.60	208.38	209.30	210.08

FS	75	/	75	/	/	/	/	/
Sup	10	3,4	3,4	/	/	/	/	/
E/L	0.495	0,346	0.496	0.69	0.59	0.52	0.46	0.42
$\Delta H(\text{cm})$	18	14	08	16	14	11	09	06
$\Delta_0(\text{t/m}^3)$	2,6127	2,3204	2,3954	2.03	2.015	2.00	1.96	1.97

III.4.2. Confection

III.4.2.1. Gâchage du béton

Le nombre important d'essais retenus pour caractériser le comportement à haute température des bétons nécessite la préparation d'une quantité conséquente de bétons. Il est donc important de s'assurer de la reproductibilité des gâchées à différentes périodes de la journée ou de l'année. Pour y parvenir, nous avons mis en place un protocole précis basé essentiellement sur la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams, pour assurer la similarité des gâchées.

Nous rappelons ci-après la procédure de fabrication tout en respectant les références normatives [NF EN 12390-1]; [NF EN 12390-2].

Nous débutons notre processus de coulage par un calcul des teneurs en eau des matériaux. Celles-ci permettent d'ajuster la quantité d'eau à introduire dans le malaxeur. Le protocole de fabrication des bétons est le suivant :

a) Pour les BO

- Prémouillage du malaxeur pour éviter une absorption d'eau par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il a été utilisé auparavant.
- Introduction des gravillons et du sable.
- Malaxage des granulats (30 secondes).
- Introduction du ciment.
- Malaxage à sec (1 minute).
- Introduction progressive de l'eau.
- Malaxage mouillé (2 à 3 minute).
- Vérification des propriétés d'ouvrabilité et ajustement si nécessaire.
- Vidange du malaxeur (15 secondes).

b) Pour le BHP1 et BH3

- Prémouillage du malaxeur pour éviter une absorption d'eau par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il a été utilisé auparavant.
- Introduction des gravillons et du sable, Malaxage des granulats (30 secondes),

- Introduction du ciment et le fumé de silice, Malaxage à sec (1 minute),
 - Introduction progressive de la moitié de la quantité de l'eau, Malaxage à sec (1 minute),
 - Introduction progressive de l'autre moitié de l'eau mélangée avec le superplastifiant,
 - malaxage mouillé (2-3 minute), tout en surveillant la consistance du mélange.
 - Vérification des propriétés d'ouvrabilité et ajustement si nécessaire,
 - Vidange du malaxeur (15 secondes).
- c) **Pour le BHP2** : Le protocole de fabrication est le même que les deux autres BHP en éliminant les étapes d'adjuvant.

III.4.2.2. Confection et conservation des éprouvettes

On remplit les moules, qui sont préalablement huilés afin de permettre un décoffrage plus facile, en trois couches pour les éprouvettes cylindriques (16*32) cm² des BHP, et en une seule couche pour les éprouvettes cubiques (15*15*15) cm³ des BO, vibrées suivant le serrage conseillé pour chaque ouvrabilité.

Ils sont démoulés après 24 heures puis conservés à l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours débuts des essais, de cette date et au-delà la conservation est au milieu ambiant du laboratoire.

III.4.3. Traitement thermique et programme des essais

III.4.3.1. Dispositif expérimental

Pour étudier le comportement du béton spécialement le BHP à haute température, il est nécessaire de prendre les précautions en cas d'éclatement explosif. Pour cela nous avons construit une cage métallique perforée sur ses six faces (figure III.6) pour protéger le four.

Les trous ont un diamètre d'environ 10mm pour assurer les transmissions thermiques aux éprouvettes. Cette cage a été utilisée pour les deux types de béton (BO et BHP) afin que les conditions de mise en température soient identiques.



Figure III.6 : Photo de la cage de protection utilisée

III.4.3.2. Cycle de chauffage – refroidissement

Le chargement thermique se fait en trois phases : la phase de montée en température à la vitesse de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à la température de consigne, le palier à température constante pendant trois heures, et la phase de refroidissement.

Le palier à température constante permet d'uniformiser la température au sein de l'éprouvette et de stabiliser la masse de l'éprouvette. Le refroidissement des éprouvettes se fait naturellement à l'intérieur du four maintenu fermé. La (figure III.7) montre les phases du chargement thermique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi trois cycles de chauffage – refroidissement de la température ambiante jusqu'à la température de 200°C , 400°C et 600°C . Afin de déterminer la résistance en compression, la résistance en traction, la vitesse des ultrasons (le module d'élasticité dynamique), ainsi que la perte de la masse des bétons étudiés en fonction de la température. Ces températures ont été choisies car elles contiennent les principales transformations de la matrice cimentaire, 200°C l'élimination de l'eau libre (à 150°C), 400°C la déshydratation des (CSH) (à 300°C), 600°C début de la décomposition de la portlandite (à 450°C), et à la limite de stabilité des granulats (à 600°C).

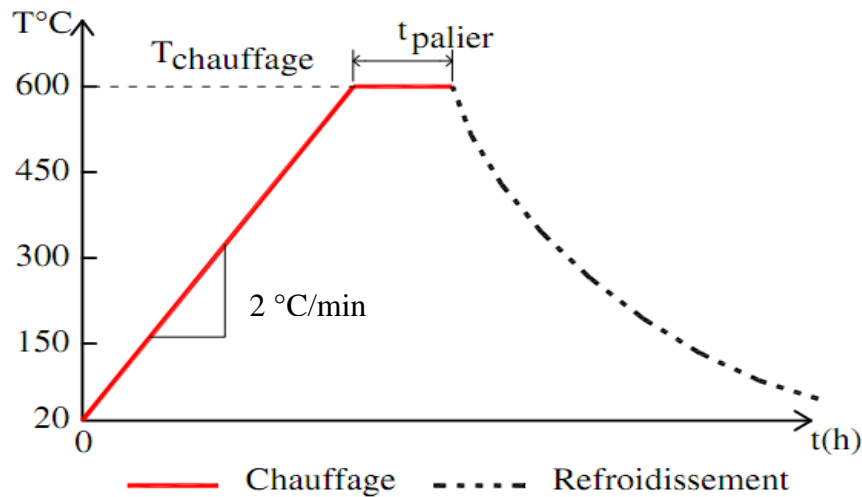


Figure III.7: Courbe de chargement thermique

III.4.3.3. Disposition dans le four

Les dimensions intérieures du four utilisé sont une largeur de 400 mm, une longueur de 600 mm et une hauteur de 430 mm (figure III.8). Pour réaliser un essai de chauffage, nous ne pouvons mettre dans le four pour un seul cycle thermique que douze éprouvettes de BO (15*15*15) cm³ ou trois éprouvettes de BHP (16*32) cm².



Figure III.8 : Four électrique utilisé.

III.4.3.4. Programme des essais

Chaque composition de béton et chaque cycle thermique (20°C, 200°C, 400°C et 600°C) nécessite l'utilisation de trois éprouvettes

Le tableau III.7 présente le nombre d'éprouvettes fabriquées pour chaque composition de béton testé avec les propriétés étudiées.

Tableau III.7 : Nombre d'éprouvettes fabriquées pour chaque béton

Essai	Forme	Béton	Température (°C)				Total
			20	200	400	600	
Compression	15x15x15 cm ³	BO1	6	6	6	6	24
		BO2	6	6	6	6	24
Traction		BO3	6	6	6	6	24
BO4		6	6	6	6	24	
BO5		6	6	6	6	24	
Perte de masse	Total		30	30	30	30	120
Vitesse ultrasonique	16/32	BHP1	6	6	6	6	24
		BHP2	6	6	6	6	24
		BHP3	6	6	6	6	24
Total		18	16	16	15	72	

III.4.3.5. Essais réalisés à l'âge de 28 jours (20°C)

Avant la réalisation des essais programmés à haute température, il faut caractériser les deux bétons (BO, BHP) à l'âge de 28 jours à la température d'ambiance (20°C). Cette caractérisation est la référence pour l'étude de l'évolution des caractéristiques des deux bétons en fonction de la variation de la température. Les résultats de ces essais sont regroupés dans les deux tableaux qui suivent :

Tableau III.8 : Caractérisation des BHP à 28 jours et à 20 °C

	BHP 1	BHP 2	BHP 3
f_{C28} (MPa)	54.60 ± 3.45	65.80 ± 0.87	69.73 ± 0.36
f_{t28} (MPa)	2.99 ± 0.33	3.59 ± 0.09	3.86 ± 0.11
M_{moy28} (g)	15765 ± 270	15242 ± 58	15501 ± 81
V_{moy28} (m/s)	5127 ± 412	4639 ± 21	4781 ± 29
E_{dyn28} (MPa)	54770 ± 9197	43078 ± 311	46531 ± 801

Tableau III.9 : Caractérisation des BO à 28 jours et à 20 °C

	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
f_{C28}(MPa)	20.28 ± 1.91	22.3 ± 1.12	27.76 ± 1.77	39.42 ± 2.97	44.43 ± 2.12
f_{t28}(MPa)	1.10 ± 0.05	1.25 ± 0.03	1.62 ± 0.18	1.75 ± 0.09	1.68 ± 0.33
M_{moy28} (g)	7651 ± 156	7745 ± 87	7915 ± 91	7982 ± 91	7974 ± 74
V_{moy28} (m/s)	3945 ± 190	3978 ± 131	4109 ± 58	4225 ± 46	4216 ± 44
E_{dyn28} (MPa)	33619 ± 3789	34538 ± 2454	37635 ± 1391	40116 ± 1159	39900 ± 904

III.5. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation des BO et des BHP, leurs propriétés physico-chimiques ont été déterminées et les procédures expérimentales exposées.

Les méthodes de formulations des bétons utilisés prennent en compte les caractéristiques des matières premières utilisées. Les compositions des deux types de béton ont été formulées selon la méthode de Dreux Gorisse. La confection des mélanges a été effectuée selon les normes en vigueur. Après caractérisation des BO et des BHP, le chapitre suivant discutera les résultats obtenus.

CHAPITRE IV: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre consiste à présenter les résultats de l'étude expérimentale, les essais ont tous été réalisés au laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université 8 mai 1945 Guelma.

A partir des essais non destructifs et destructifs faisant suite au traitement thermique des deux types de bétons (BO et BHP), nous tentons par cette étude, en première étape d'interpréter les résultats obtenus pour les différents bétons aux différentes températures étudiées et en deuxième étape d'exploiter ces résultats pour en tirer les conclusions adéquates. On procèdera à des comparaisons du comportement des deux bétons utilisés et à des corrélations entre les propriétés résiduelles des deux bétons aux différentes températures cibles. On s'intéressera aussi à l'effet de la composition des bétons sur l'évolution des propriétés et des corrélations entre elles.

IV.2. LES BETONS ORDINAIRES

Les résultats des essais effectués après les trois cycles thermiques et à la température d'ambiance (béton de référence) sont regroupés dans les tableaux qui suivent et illustrés par les figures ci-dessous. Ces résultats concernent la masse, les résistances à la compression et à la traction ainsi que la vitesse ultrasonique et le module élastique dynamique.

Tableau IV.1: Evolution des propriétés résiduelles des BO en fonction de la température

$T (^{\circ}C)$	$M (g)$	$f_c (MPa)$	$f_t (MPa)$	$V (m/s)$	$E_d (MPa)$
BO1					
20	7712 ± 100	20.28 ± 1.91	1.10 ± 0.05	3913 ± 131	33289 ± 2565
200	7555 ± 138	16.15 ± 0.59	0.93 ± 0.22	3323 ± 159	23568 ± 2648
20	7668 ± 109	20.28 ± 1.91	1.10 ± 0.05	3883 ± 98	32836 ± 1516
400	7402 ± 102	14.85 ± 2.65	0.77 ± 0.06	2059 ± 350	9055 ± 3018
20	7674 ± 67	20.28 ± 1.91	1.10 ± 0.05	3942 ± 110	33590 ± 1904
600	7353 ± 76	7.34 ± 1.7	0.36 ± 0.05	241 ± 184	178 ± 284
BO2					
20	7674 ± 106	22.3 ± 1.12	1.25 ± 0.03	4016 ± 172	34922 ± 3209
200	7578 ± 88	18.49 ± 1.29	1.19 ± 0.21	3499 ± 55	26129 ± 879
20	7731 ± 85	22.3 ± 1.12	1.25 ± 0.03	4012 ± 60	35030 ± 1142
400	7461 ± 93	16.37 ± 1.55	0.65 ± 0.11	2131 ± 168	9582 ± 1476

20	7693 ± 94	22.3 ± 1.12	1.25 ± 0.03	3964 ± 111	34048 ± 1984
600	7363 ± 86	9.42 ± 1.87	0.43 ± 0.13	514 ± 291	697 ± 697
B03					
20	7886 ± 53	27.76 ± 1.77	1.62 ± 0.18	4181 ± 100	38873 ± 1990
200	7753 ± 102	26 ± 0.11	1.51 ± 0.24	3511 ± 175	26989 ± 2967
20	7868 ± 54	27.76 ± 1.77	1.62 ± 0.18	4175 ± 99	38626 ± 1779
400	7543 ± 60	24.28 ± 3.25	0.84 ± 0.09	2186 ± 93	10161 ± 802
20	7912 ± 64	27.76 ± 1.77	1.62 ± 0.18	4081 ± 180	37141 ± 3042
600	7514 ± 60	16.37 ± 0.85	0.44 ± 0.06	598 ± 97	773 ± 242
B04					
20	7977 ± 89	39.42 ± 2.97	1.75 ± 0.09	4231 ± 75	40204 ± 1574
200	7883 ± 87	32.55 ± 1.19	1.42 ± 0.45	3781 ± 213	31816 ± 3634
20	7957 ± 64	39.42 ± 2.97	1.75 ± 0.09	4136 ± 102	38345 ± 2047
400	7593 ± 73	29.57 ± 1.32	1.22 ± 0.14	2506 ± 269	13552 ± 2758
20	7936 ± 58	39.42 ± 2.97	1.75 ± 0.09	4127 ± 93	38075 ± 1886
600	7501 ± 64	24.13 ± 3.26	0.68 ± 0.11	1093 ± 310	2687 ± 1597
B05					
20	7967 ± 84	44.43 ± 2.12	1.68 ± 0.33	4153 ± 184	38751 ± 3580
200	7848 ± 39	39.68 ± 2.39	1.59 ± 0.38	3716 ± 95	30518 ± 1532
20	7963 ± 60	44.43 ± 2.12	1.68 ± 0.33	4270 ± 45	40874 ± 962
400	7578 ± 61	30.91 ± 1.83	1.4 ± 0.23	2705 ± 204	15679 ± 2286
20	8055 ± 59	44.43 ± 2.12	1.68 ± 0.33	4270 ± 98	41358 ± 1809
600	7551 ± 70	27.35 ± 1.44	0.72 ± 0.17	1057 ± 221	2466 ± 1011

a- *Résistance à la compression*

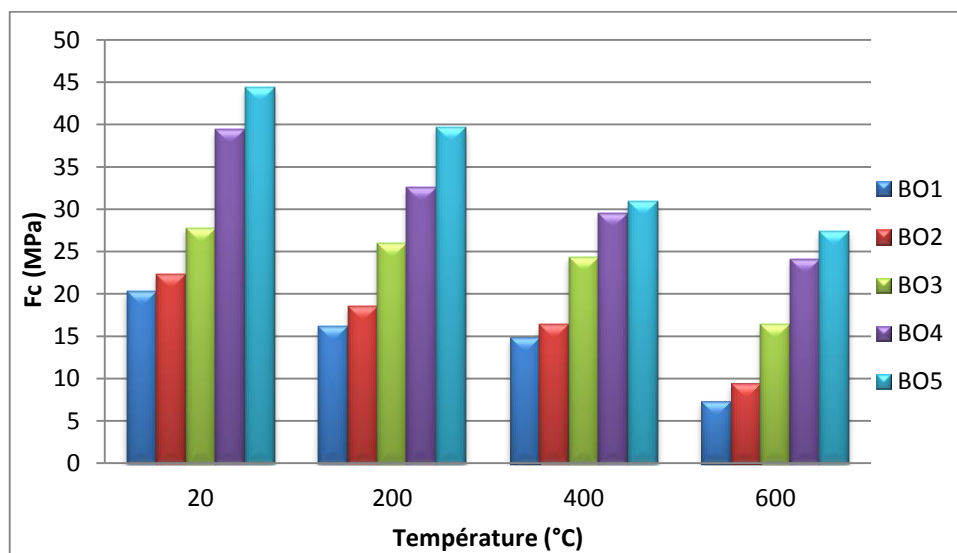


Figure IV.1. Résistance à la compression des BO en fonction de la température

Pour une meilleure interprétation, les résultats sont présentés sous forme de rapports des différentes propriétés aux différentes températures par rapport aux résultats du béton de référence à 20°C. Les rapports obtenus sont regroupés dans les tableaux qui suivent et illustrés par les figures ci-dessous.

Tableau IV.2: Evolution des rapports de la résistance à la compression des BO (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
200	0.80±0.03	0.83±0.06	0.94±0.004	0.83±0.03	0.89±0.05
400	0.73±0.13	0.73±0.07	0.87±0.11	0.75±0.03	0.70±0.04
600	0.36±0.08	0.42±0.08	0.59±0.03	0.61±0.08	0.62±0.03

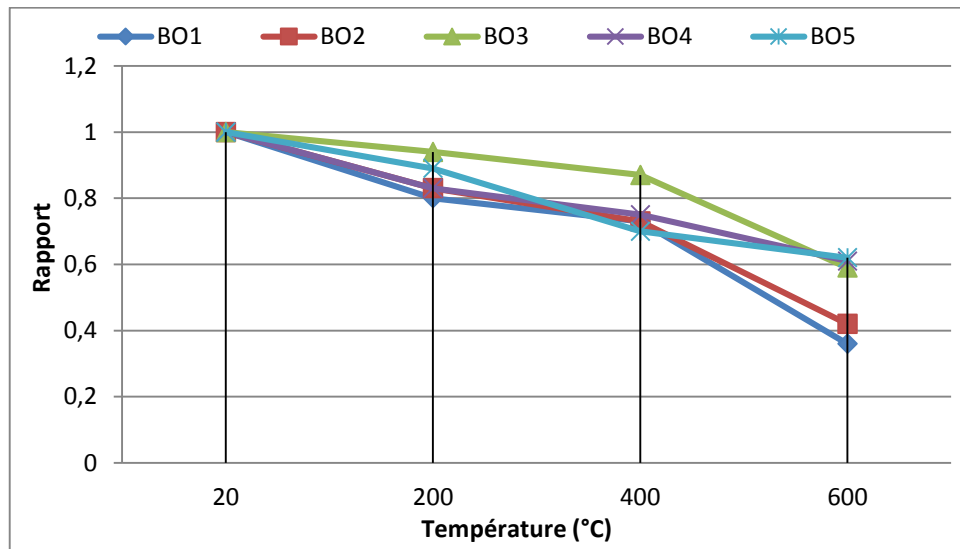


Figure IV.2. Evolution des rapports de la résistance à la compression des BO (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température

Les BO1 et le BO2 présentent les chutes les plus importantes à 200°C, 400°C et 600°C, respectivement 20 %, 27% et 64% pour le BO1 et 17 %, 27% et 58% pour le BO2. Ces deux bétons présentent des rapports E/C plus importants que les autres bétons. Cette fluidité engendre une porosité plus importante conduisant à un départ rapide de l'eau libre. D'après Missemmer [Missemmer 2006], l'évolution de la porosité est principalement liée à la pâte de ciment et à l'interface granulats/pâte. Les pores évoluent de 0.05 μm à température ambiante à une un diamètre de 0.1 μm pour les températures jusqu'à 400°C. Puis une nouvelle classe de pores apparait, autour de 0.5 μm . Cette classe serait due à la déshydratation de la Portlandite qui se produit entre 450°C et 550°C, d'après Alarcon [Alarcon 2002]. Ces deux bétons (BO1 et BO2) contiennent plus de gravier, ce qui résulte à plus d'interface granulats/pâte.

- La pâte de ciment se trouve facilement endommagée par la montée en température surtout pour la température de 600°C.

- Les résistances résiduelles à la compression des trois bétons BO3, BO4 et BO5 chutent au maximum à 200°C, 400°C et 600°C respectivement de 11% (BO5), 30% (BO4) et 41% (BO3).
- On remarque que la température de 400°C provoque des chutes des résistances proches pour les cinq bétons. Ce implique qu'à partir de cette température que l'endommagement s'accroît. Car la diminution de la résistance à 200°C serait due à une dégradation de la cohésion des forces de Van der Waals entre les feuillets des (CSH) [Khoury 1997]. D'autres chercheurs [Pimienta et al 2002] [Hager 2004], avancent que c'est la dilatation thermique de l'eau qui est responsable à cause de l'écartement des feuillets de (CSH). Au delà de 200°C, la chute est due à la décomposition de la portlandite, la déshydratation des (CSH) et l'incompatibilité des dilatations thermiques entre pâte et granulats [Pimienta et al 2002].
- Ces chutes de résistances à cause des hautes températures s'accompagnent d'un changement de couleur dans les bétons. On remarque un léger changement de couleur, après 200°C provoqué par l'effet de séchage de la pâte. et qui est dû essentiellement à la présence de certains composés à base de fer [Kameche et al 2009]. Ce changement est dû à la destruction des (CSH).
- A 400°C le changement de couleur est presque la même que celle à 200°C avec apparition des légères fissures. Ce qui signifie la poursuite de la destruction du(CSH).
- Par contre à 600°C le changement de couleur est vraiment remarquable, elle a changé de la couleur grise (celle du ciment) au marron avec une apparition des fissures très visibles (fig. IV.3 et IV.4). [Dias 1990] avance que cette fissuration importante est sans doute issue du phénomène de recristallisation de la portlandite Ca(OH)_2 au cours de la réhydratation de la pâte de ciment.



Figure IV.3. Changement de couleur à 400°C



Figure IV.4. Apparition des fissures très visibles à 600°C

- On observe que la chute de résistance pour les BO est influencée par le rapport E/C. Une augmentation de ce rapport de 60% (BO5 à BO1) provoque une chute de la résistance respectivement de 10% à 200°C et 42% à 600°C. Cette chute est provoquée par la proportion excessive de l'eau car le dosage en ciment n'affecte pas cette chute comme souligné par Ergun [Ergun et al 2013].

b- Résistance à la traction.

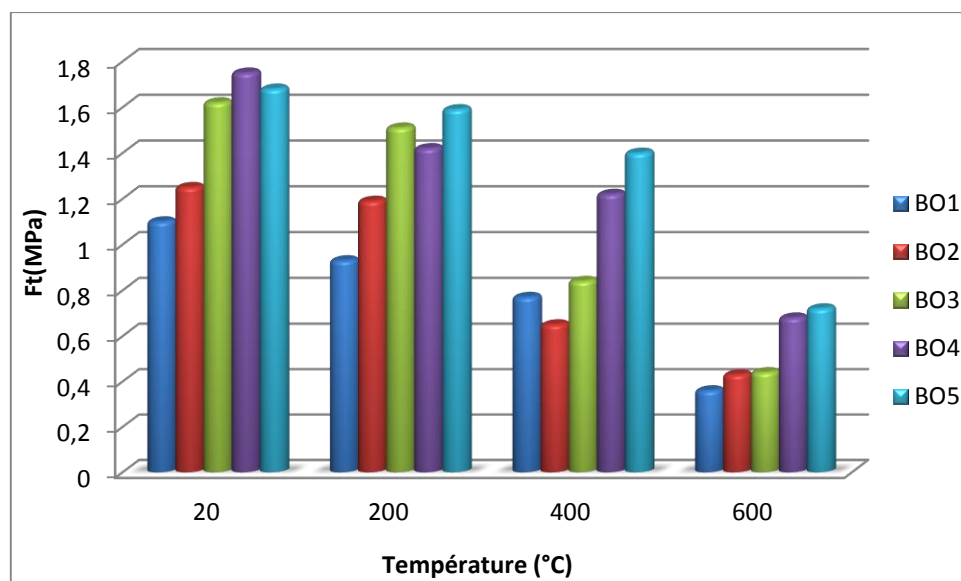


Figure IV.5. Résistance à la traction des BO en fonction de la température

Tableau IV.3: Evolution des rapports de la résistance à la traction des BO (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
200	0.85±0.20	0.95±0.17	0.93±0.14	0.81±0.25	0.95±0.23
400	0.70±0.05	0.52±0.08	0.52±0.05	0.70±0.08	0.83±0.13
600	0.33±0.04	0.34±0.08	0.27±0.04	0.39±0.06	0.43±0.1

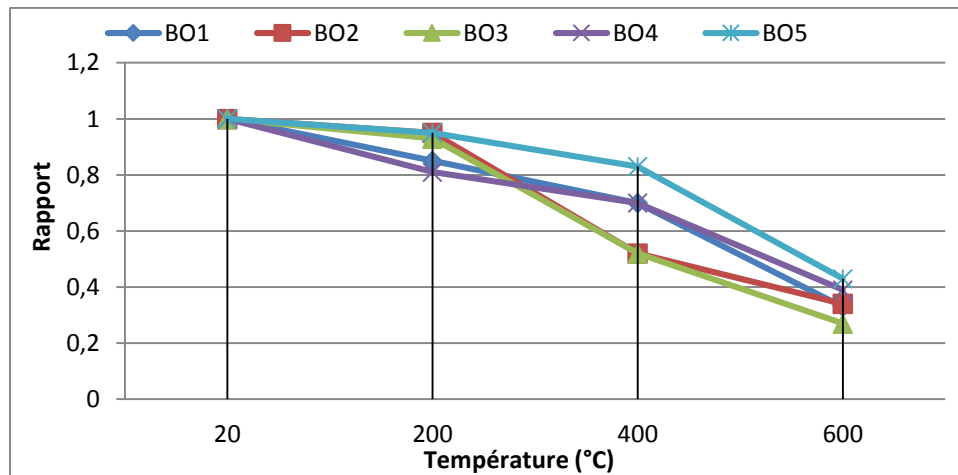


Figure IV.6. Evolution des rapports de la résistance à la traction des BO (f_{IT}/f_{I20}) en fonction de la température

- Pour le BO1 on remarque une chute presque régulière de la résistance à la traction après chaque température jusqu'à 400°C c'est-à-dire qu'à chaque montée de la température la chute est d'environ 15% par rapport à la résistance qui la précède. Par contre à 600°C la chute atteint 67% par rapport à la résistance initiale donc elle a dépassé la moitié de la résistance à la traction à 400°C.
- Pour le BO2 on remarque clairement que la chute de la résistance à la traction est plus importante à 400°C (48%) et plus faible à 200°C (5%) avec une chute de 66% à 600°C par rapport à la résistance initiale.
- Alors on peut dire pour les deux premiers BO, que la résistance à la traction est plus influencée par la montée de la température que la résistance à la compression.
- Pour le BO3, on remarque une légère chute de 7% à 200°C par rapport à la résistance à la traction initiale presque la même chute que la résistance à la compression par contre à 400°C elle atteint 48% par rapport à la résistance initiale c'est-à-dire sept fois la première chute contrairement à la chute de la résistance à la compression, puis la chute continue linéairement pour atteindre 73% à 600°C. On remarque que la résistance à la traction est plus influencée thermiquement à l'intervalle [400°C-600°C] contrairement aux bétons précédents.
- Pour le BO4 on remarque une chute vraiment régulière d'une pente d'environ 0.2% qui est confirmé par les chutes suivantes : 18.86% à 200°C, 30.28% à 400°C et 61.14% à 600°C par rapport à la résistance de traction initiale. On dit que la diminution de la résistance à la traction par traitement thermique est uniforme.

- Le BO5 présente les chutes des résistances à la traction les plus faibles de tous les bétons. on obtient 5%, 17% et 57 % respectivement à 200°C 400°C et 600°C.

On remarque une augmentation non régulière de la perte de la résistance à la traction après chaque température pour chaque BO, c'est-à-dire qu'à chaque montée de la température la perte est différente d'un béton à un autre par exemple à 200°C la perte la plus importante est 19% pour BO4, à 400°C elle est de 48% pour (BO2 et BO3) pour atteindre 73% pour BO3 à 600°C. Ce qui se résume à une perte de la résistance à la traction d'environ un cinquième à 200°C puis une diminution de la moitié à 400°C pour atteindre les trois quarts à 600°C par rapport à la résistance initiale. Donc on peut dire que la résistance à la traction est plus influencée par la montée de la température en comparaison avec la résistance à la compression. Toutefois cette différence dans les pertes de résistances à la traction est plus visible à 400°C et s'accroît à 600°C, comme le souligne Kanema [Kanema 2007] en avançant qu'à partir de 450°C, les bétons présentent une baisse de résistance à traction quasi-identique indépendamment de leur rapport E/C.

c- Perte de la masse :

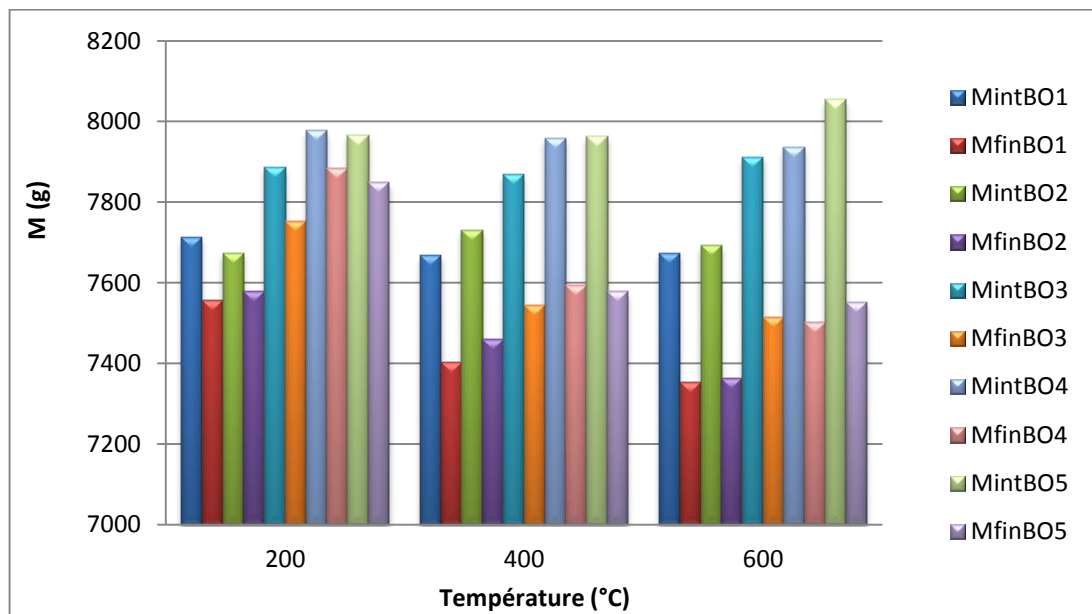


Figure IV.7. Perte de masse des BO en fonction de la température

Tableau IV.4: Evolution des rapports de la masse des BO (M_T/M_{20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
200	0.98±0.05	0.99±0.05	0.98±0.008	0.99±0.005	0.99±0.007
400	0.97±0.001	0.97±0.002	0.96±0.002	0.95±0.002	0.95±0.003
600	0.96±0.002	0.96±0.003	0.95±0.03	0.94±0.002	0.94±0.003

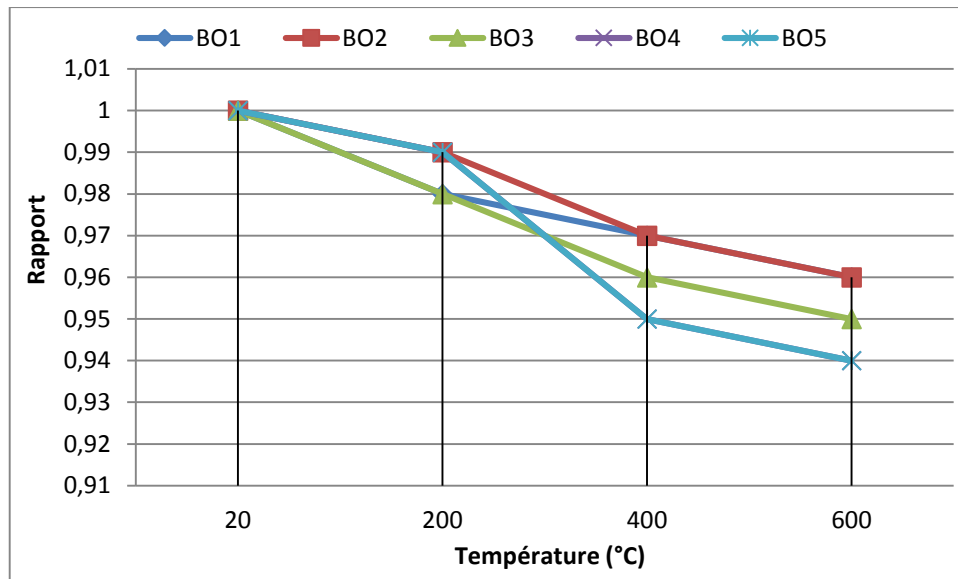


Figure IV.8. Evolution des rapports de la masse des BO (M_T/M_{20}) en fonction de la température

- Pour les deux premiers bétons (BO1 et BO2), la perte de la masse à 200°C est relativement faible, elle ne dépasse pas les 2% (BO1) et elle atteint 1% (BO2). Elle ne présente que le départ de l'eau libre sans aucune incidence sur la pâte de ciment ou les granulats, Le départ de l'eau libre et celle physiquement absorbée se situe à 105°C comme il est souligné à la littérature. Puis elle augmente progressivement jusqu'à 3% (BO1, BO2) à 400°C, et 4% (BO1, BO2) à 600°C, ce qui explique le changement de couleur c'est-à-dire l'eau la plus fortement liée qui participe à la constitution des hydrates, commence à s'évaporer.
- Alors on peut dire aussi que pour (BO1 et BO2) la masse est plus influencée par la montée de la température surtout à l'intervalle entre [200°C - 400°C] comme la résistance à la traction.
- Les pertes de masse du BO4 est convergente aux celles du BO3 pour les trois cycles thermiques, 1,7 % (BO3), 1,18 % (BO4) à 200°C qui est relativement faible, puis elle augmente jusqu'au 4% (BO3), 4,57% (BO4) à 400°C et 5% (BO3), 5,48% (BO4) à 600°C avec changement de couleur et apparition de fissures comme les deux premiers bétons (BO1, BO2). De 400°C à 600 °C la masse a tendance à se stabiliser.
- Les pertes de masse du BO5 sont les plus élevés par rapport aux autres bétons pour les trois cycles thermiques, 1,49 % à 200°C, 4,83% à 400°C et 6,26% à 600°C. Ce qui signifie qu'il y a endommagement de la matrice cimentaire.

- À 200°C la perte de masse est relativement faible, elle ne dépasse pas les 2%. Elle ne présente que le départ de l'eau libre sans aucune incidence sur la pâte de ciment ou les granulats, Le départ de l'eau libre et celle physiquement absorbée se situe à 105°C comme le souligne [Feraille et al 2000]. Par contre elle atteint les 5% à 400°C ce qui explique le changement de couleur c'est-à-dire l'eau la plus fortement liée qui participe à la constitution des hydrates, commence à s'évaporer [Haniche 2011].
- Donc pour des températures ne dépassant pas les 600°C la perte de masse est essentiellement liée à la perte de l'eau [Kanema 2007]. Cette eau se trouve sous forme liée dans les hydrates, adsorbée à la surface des éléments solides et libre dans les pores et elle est facilement perdue lors des variations thermiques [Baroghel-Bouny et al 1999].

d- Vitesse ultrasonique :

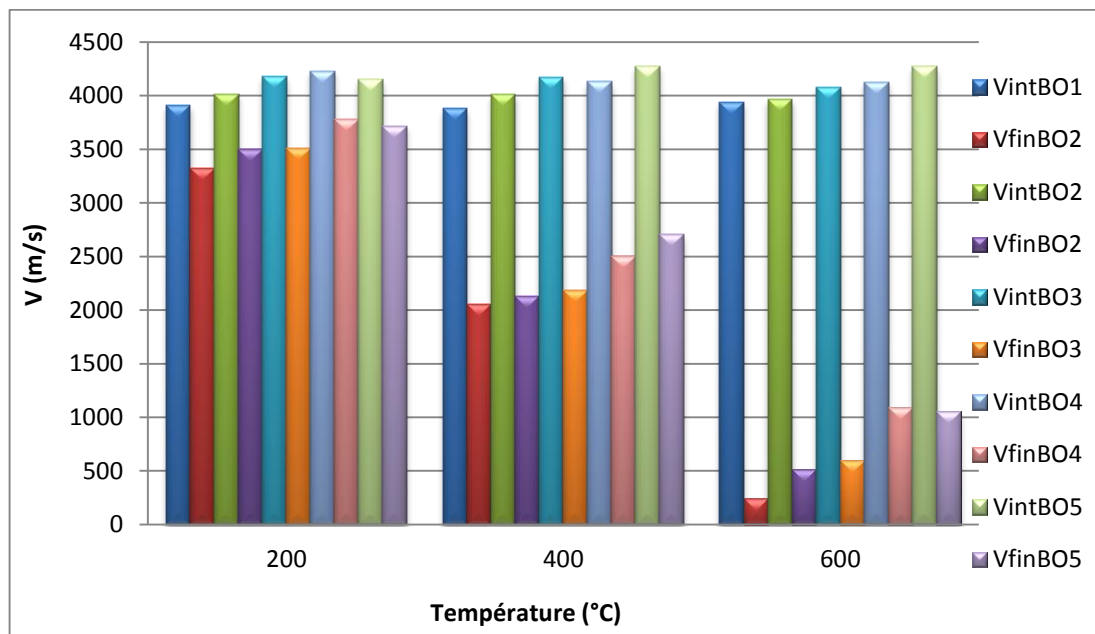


Figure IV.9. Vitesses des ultrasons des BO en fonction de la température

Tableau IV.5: Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique des BO (V_T/V_{20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
200	0.85±0.04	0.87±0.04	0.84±0.03	0.89±0.04	0.89±0.04
400	0.53±0.08	0.53±0.04	0.52±0.02	0.61±0.06	0.63±0.05
600	0.06±0.04	0.13±0.07	0.15±0.02	0.26±0.08	0.25±0.05

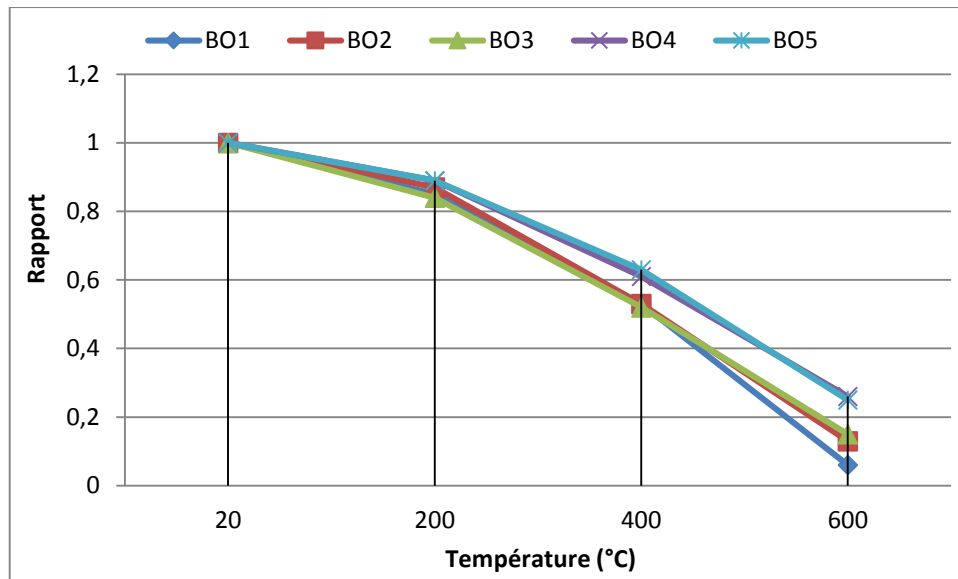


Figure IV.10. Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique dans les BO (V_T/V_{20}) en fonction de la température

- A 200°C, les pertes des vitesses ultrasoniques varient entre 11% (BO5) et 16% (BO3). Cette chute est liée au départ de l'eau libre, ce qui résulte à réduire la vitesse sachant que cette dernière est plus importante dans l'eau que dans l'air.
- A 400°C et avec l'apparition des premières microfissures, les vitesses sont plus affaiblies. Cette chute se situe entre 37% (BO5) et 48% (BO1 et BO2).
- Les bétons présentent des vitesses ultrasoniques très faibles à 600°C, elles chutent de 74% (BO4) à 94% (BO1). Ce qui confirme un état diffus de fissuration très préjudiciable à la rigidité du matériau.
- On remarque aussi clairement que la chute des vitesses des ultrasons diminue avec la diminution du rapport E/C. donc elle est proportionnelle au rapport E/C.

e- *Module d'élasticité dynamique :*

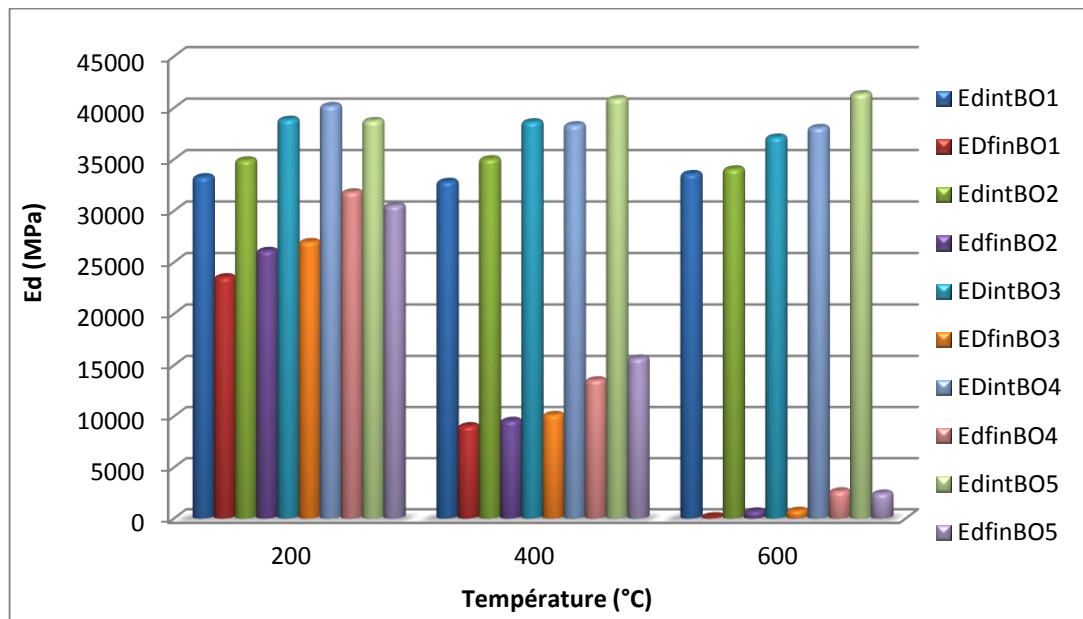


Figure IV.11. Modules d'élasticité dynamique des BO en fonction de la température

Tableau IV.6: Evolution des rapports du module dynamique des BO (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5
200	0.71±0.06	0.75±0.06	0.69±0.05	0.79±0.07	0.79±0.08
400	0.28±0.08	0.27±0.04	0.26±0.02	0.35±0.06	0.38±0.06
600	0.01±0.008	0.02±0.006	0.02±0.006	0.03±0.004	0.06±0.02

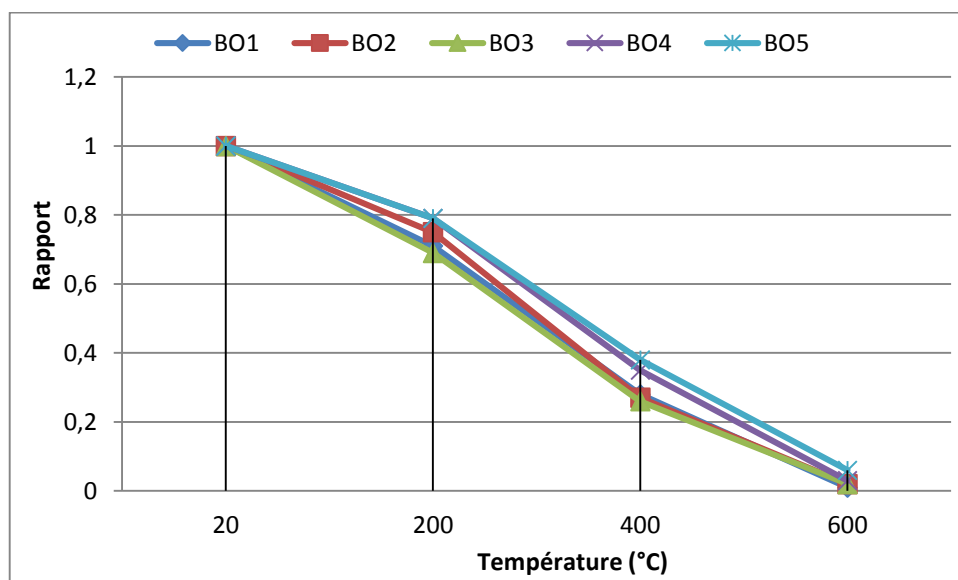


Figure IV.12. Evolution des rapports du module dynamique des BO (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

- On remarque sur la figure IV.12 que la chute du module d'élasticité est presque linéaire pour tous les bétons. Cette chute est faible au premier palier de température (200°C), elle varie de 21% à 31%. Donc, elle est plus faible que celle donnée par l'Eurocode et le DTU qui est de 50% mais proche des chutes observées par plusieurs chercheurs [Haniche 2011, Pliya 2010, Fares 2009, Kanema 2007, Noumowé 1995].
- A 400°C, on observe des chutes plus importantes qui dépassent les 70% et à 600°C les modules d'élasticité tendent à s'annuler. On obtient des chutes de 99% pour le BO1 et 94% pour le BO5. Cette très forte baisse de rigidité est dû aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire, de la déformation des granulats avec l'interface pâte/granulats et l'augmentation du volume poreux comme avancé par Pliya [Pliya 2010].

IV.3. LES BETONS AUX HAUTES PERFORMANCES

Pour la procédure de l'étude de l'évolution des caractéristiques résiduelles des bétons à hautes performances en fonction de la température, elle est la même que celle suivie pour les BO. Les résultats des essais effectués après les trois cycles thermiques et ceux à température ambiante (béton de référence) sont regroupés dans les tableaux et les figures qui suivent.

Tableau IV.7: Evolution des propriétés des BHP en fonction de la température

T (°C)	M (g)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	V (m/s)	E_d (MPa)
BHP1					
20	15593 ± 179	54.60 ± 3.45	2.99 ± 0.33	4745 ± 76	46127 ± 1835
200	15328 ± 230	40.71 ± 7.6	2.83 ± 0.19	4321 ± 111	37621 ± 2291
20	15703 ± 110	54.60 ± 3.45	2.99 ± 0.33	4841 ± 45	48329 ± 706
400	14875 ± 106	40.4 ± 3.29	2.69 ± 0.07	3243 ± 179	20608 ± 2350
20	15599 ± 180	54.60 ± 3.45	2.99 ± 0.33	4690 ± 229	44174 ± 4566
600	14558 ± 231	10.64 ± 1.14	1.36 ± 0.02	404 ± 128	340 ± 213
BHP2					
20	15035 ± 52	65.80 ± 0.87	3.59 ± 0.09	4876 ± 189	46987 ± 3677
200	14844 ± 66	35.92 ± 9.43	2.69 ± 0.16	4356 ± 74	36988 ± 1239
20	15205 ± 120	65.80 ± 0.87	3.59 ± 0.09	4257 ± 263	36304 ± 4870
400	14503 ± 109	27.37 ± 2	2.42 ± 0.11	3553 ± 186	24076 ± 2392
20	15130 ± 120	65.80 ± 0.87	3.59 ± 0.09	4619 ± 93	42390 ± 1590
600	*	*	*	*	*
BHP3					
20	15370 ± 95	69.73 ± 0.36	3.86 ± 0.11	4736 ± 43	45100 ± 1114
200	15155 ± 95	33.36 ± 0.79	3.58 ± 0.36	4243 ± 32	35827 ± 662
20	15603 ± 155	69.73 ± 0.36	3.86 ± 0.11	4670 ± 117	44703 ± 1957
400	14965 ± 176	32.53 ± 0.8	3.33 ± 0.06	3312 ± 113	21576 ± 1523
20	15445 ± 109	69.73 ± 0.36	3.86 ± 0.11	4302 ± 275	37654 ± 4561

600	14618 ± 99	13.62 ± 0.1	1.2 ± 0.04	1297 ± 146	3267 ± 759
-----	------------	-------------	------------	------------	------------

* Eclatement explosif des éprouvettes.

a- **Résistance à la compression**

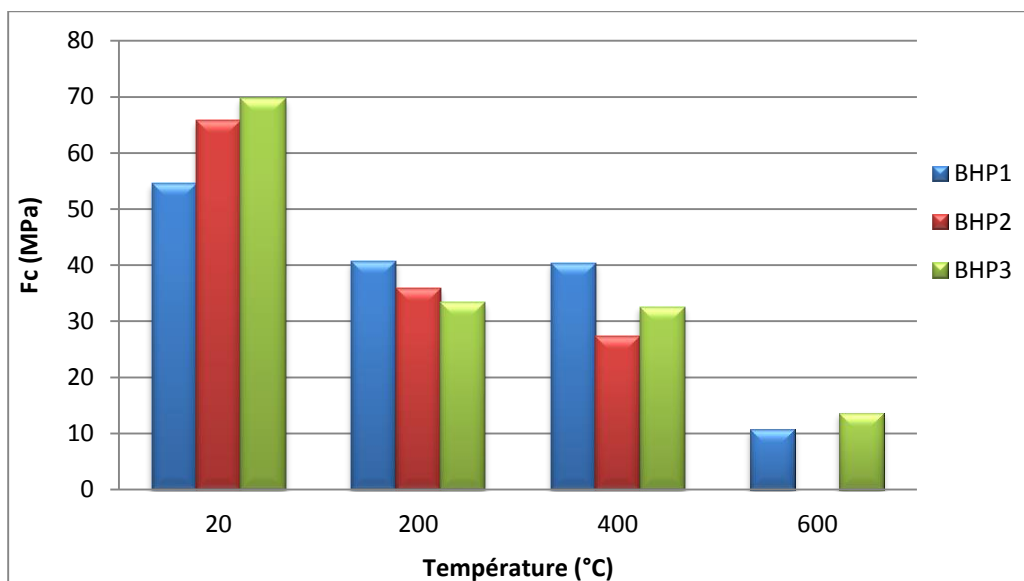


Figure IV.13. Résistance à la compression des BHP en fonction de la température

Tableau IV.8: Evolution du rapport de la résistance à la compression des BHP (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température

Température (°C)	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.76±0.139	0.55±0.03	0.48±0.011
400	0.74±0.06	0.42±0.203	0.47±0.011
600	0.19±0.021	*	0.20±0.002

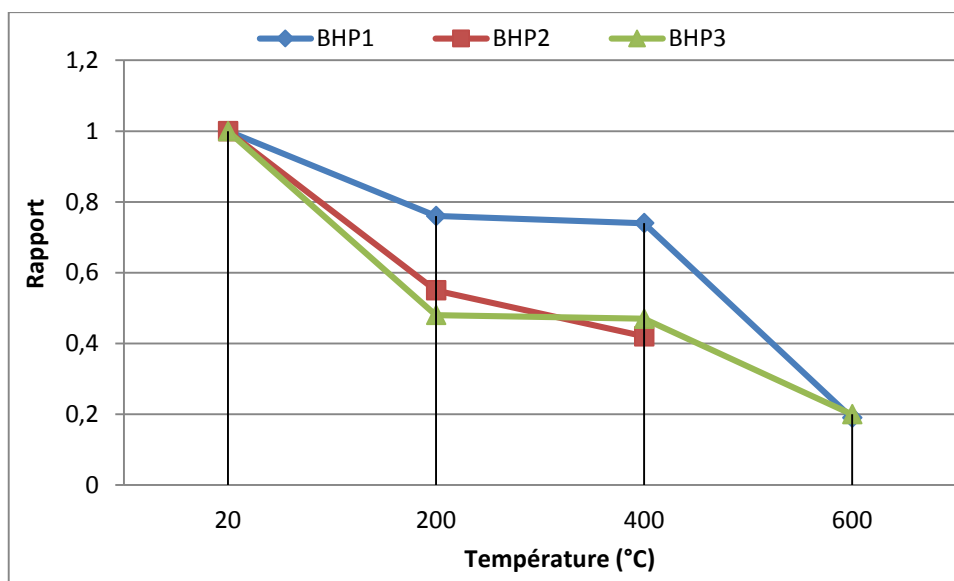


Figure IV.14. Evolution des rapports de la résistance à la compression des BHP (f_{CT}/f_{C20}) en fonction de la température

- Les trois BHP présentent, à 200°C, des chutes de résistances à la compression relativement importantes. pour ce niveau de température. Elles atteignent les 62 % pour le BHP3. Ces chutes sont relativement importante comparativement ceux avancées par l'Eurocode où elles ne dépassent pas les 25%.
- A 400°C, on a une quasi-stabilité des résistances pour les BHP1 et BHP3 ainsi q'une légère chute de celle du BHP2 par rapport à 200°C. Cette observation a été aussi faite par plusieurs chercheurs qui ont observée une baisse modéré voir même une légère amélioration dans le palier 350-400°C [Xing 2011, Fares 2009, Mindeguia 2009]
- Les trois bétons perdent presque leur résistance à 600°C, elles ne présentent que 20% de leur résistance initiale. Tous ces bétons présentent des fissures importantes à 600°C.Cette baisse de résistance est causée par à une dégradation de la matrice cimentaire et des granulats causant une fissuration du béton [Kanema 2007, Pimienta 2000].
- Le BHP1 présente les chutes de résistances les plus faibles à 200°C et à 400°C. Ce béton présentele plus important rapport G/S avec un sable de dune contrairement aux deux autres bétons (BHP2 et BHP3) qui contiennent un mélange de sable siliceux et de sable calcaire. Donc, on suppose que la quantité de la matrice importante par rapport aux deux autres est responsable de cette différence de chute.
- Le BHP2 a subit un éclatement explosif à 544°C, cet éclatement a causé des dégâts au four (figure IV.16). Deux processus sont généralement avancés pour expliquer les causes de cet éclatement [Kalifa et al 1998] et ils sont encore discutés. Ces deux processus concernent l'établissement des gradients de dilatation thermique et des gradients de pression de vapeur dans le réseau poreux. Ce dernier processus est le plus soupçonné dans l'apparition de ce phénomène d'écaillage, donc l'état d'humidité et la compacité du matériau sont les principaux paramètres influents. Le BHP2 présente le volume de pâte cimentaire le plus important ($G/S=1.24$) des trois BHP. Ce qui cause un volume sous pression plus important et donc une plus grande probabilité d'éclatement que les autres. En plus, la composition de ce BHP ne contient pas de la fumée de silice conduisant à une compacité moindre et donc plus de vides pouvant contenir plus d'humidité. Ceci conduit à des préssions importantes lors de l'échauffement causant ainsi l'éclatement du béton.



Figure IV.15. Changement de couleur à 400°C



Figure IV.16. Eclatement explosif du BHP2 à 544°C



Figure IV.17. Apparition des fissures visibles à 600°C

b- Résistance à la traction

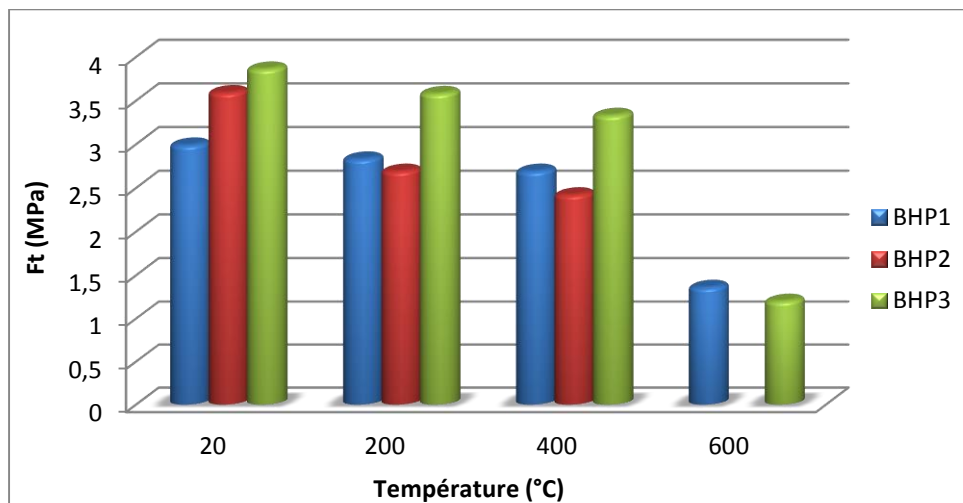


Figure IV.18. Résistance à la traction des BHP en fonction de la température

Tableau IV.9: Evolution du rapport de la résistance à la traction des BHP (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température

Température (°C)	BHP1	BHP 2	BHP 3
20	0.95±0.063	0.75±0.031	0.93±0.094
400	0.90±0.023	0.67±0.045	0.86±0.015
600	0.45±0.005	/ *	0.31±0.011

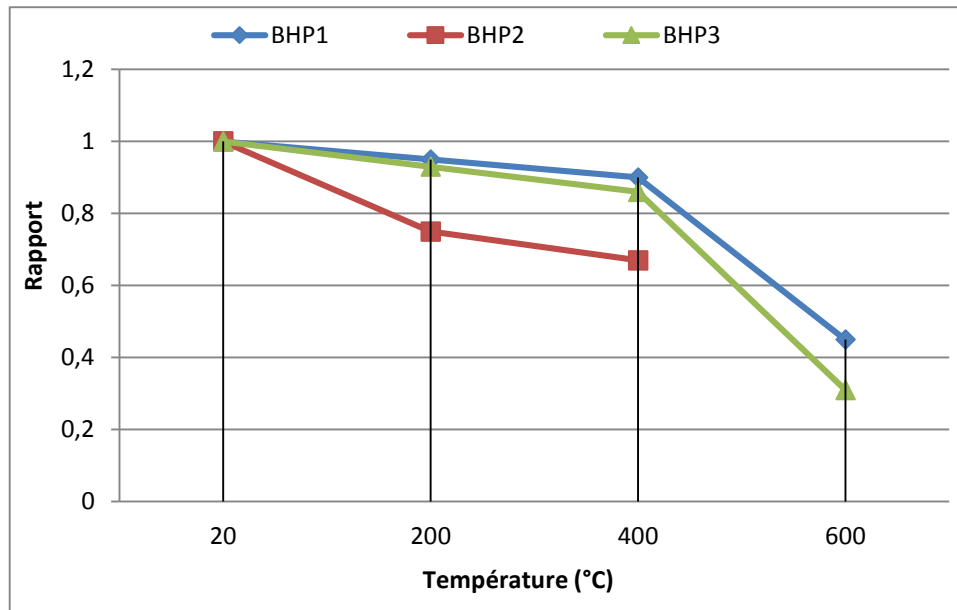


Figure IV.19. Evolution des rapports de la résistance à la traction des BHP (f_{iT}/f_{i20}) en fonction de la température

- La diminution des résistances est beaucoup moins importante qu'en compression sauf pour le BHP2. La chute de la résistance à la traction des BHP1, BHP3 à 400°C ne dépasse pas 15% de la résistance initiale mais à 600°C elle dépasse la moitié pour le BHP1 et les deux tiers pour BHP3 par rapport à la résistance initiale. Ces résistances resistent dans les mêmes tendances que celles citées dans d'autres travaux [Xing 2011]. Pour le BHP2, il a éclaté à la température de 544°C, après une chute d'un quart à 200°C et d'un tiers à 400°C. Ce béton a présenté la résistance à la traction la plus faible, à 400°C, des trois BHP.

Donc on peut dire que la résistance à la traction est différemment influencée par la montée de la température d'un BHP à un autre en comparaison avec la résistance en compression.

c- Perte de la masse

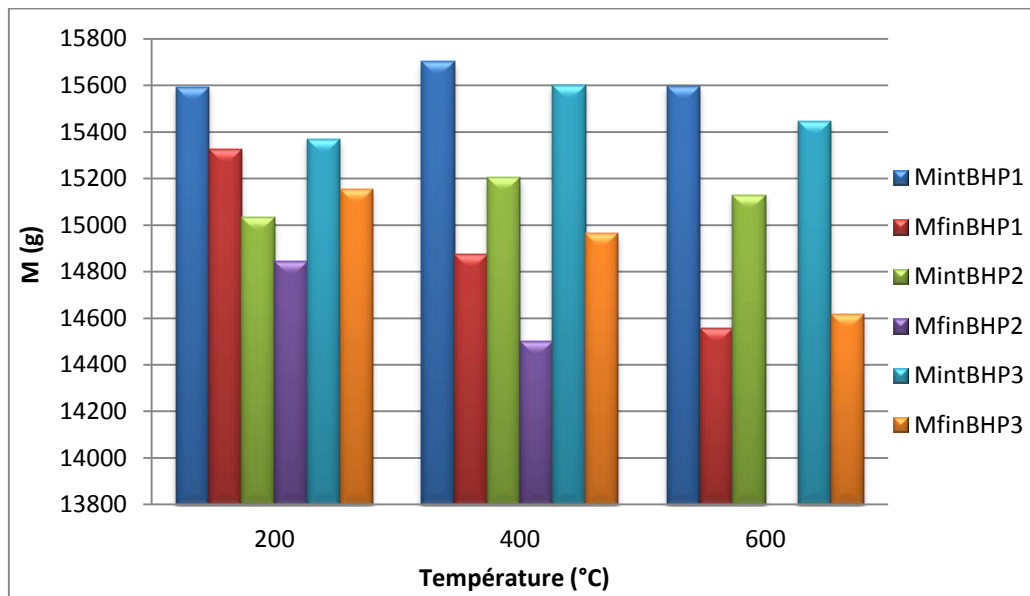


Figure IV.20. Evolution de la perte de la masse des BHPen fonction de la température

Tableau IV.10: Evolution du rapport de la perte en masse des BHP (M_T/M_{20}) en fonction de la température

Température (°C)	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.98±0.004	0.99±0.003	0.99±0.0006
400	0.95±0.003	0.95±0.0006	0.96±0.005
600	0.93±0.005	*	0.95±0.001

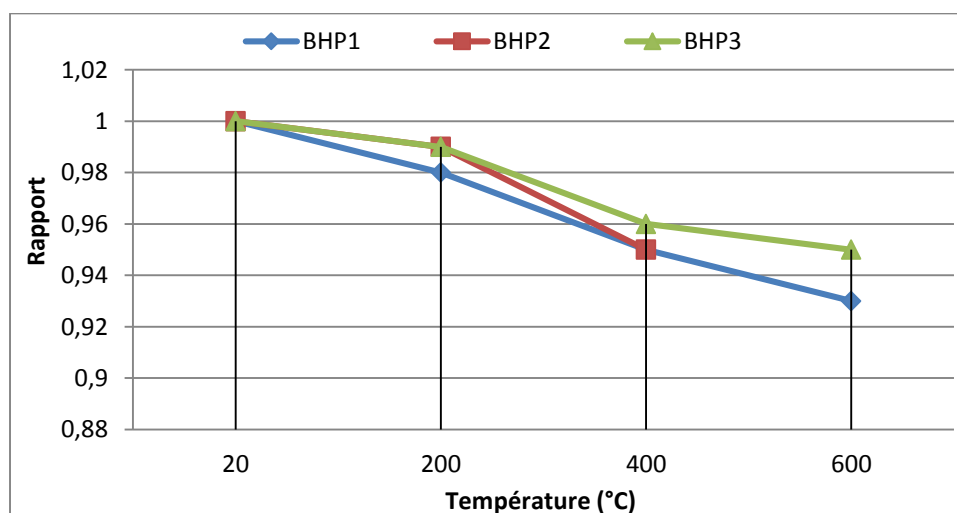


Figure IV.21. Evolution des rapports de la masse des BHP (M_T/M_{20}) en fonction de la température

- La perte de masse est presque nulle à 200°C, elle n'a pas dépassée les 3% pour les trois BHP, ceci est dû à la meilleure compacité de ces bétons et à leur porosité très faible résultant d'un rapport E/C faible. Même à 400°C, elle reste toujours faible car elle n'a pas dépassée les 6% pour les trois BHP, pour atteindre 7% à 600°C (BHP1). Certains auteurs discute cette perte due à l'eau et l'impute aussi à la décarbonatation du béton ou d'autres gaz qui s'échappent du béton pendant l'échauffement [Gargouri et al 2000].

d- *Vitesse ultrasonique :*

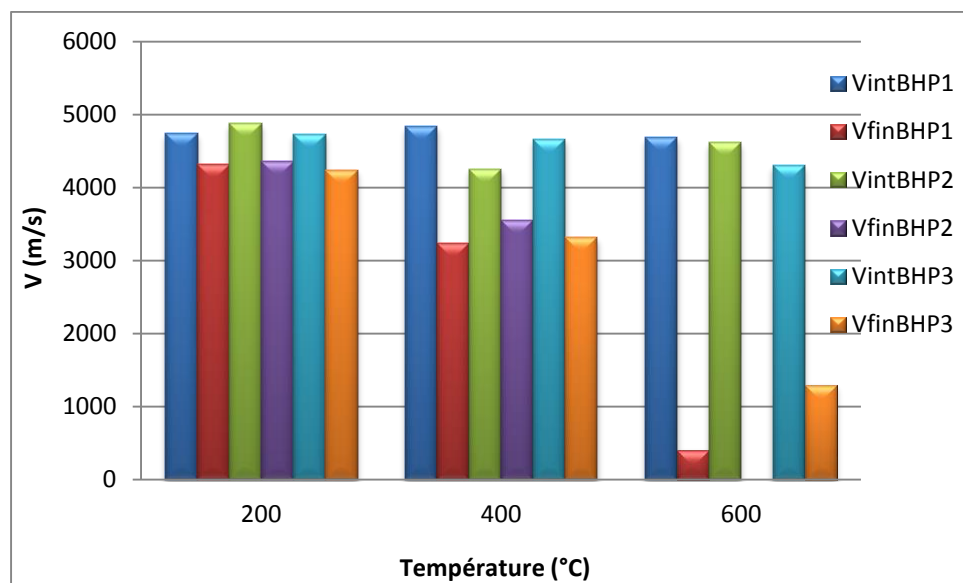


Figure IV.22. Evolution de la vitesse ultrasonique dans les BHP en fonction de la température

Tableau IV.11: Evolution du rapport de la vitesse ultrasonique des BHP (V_T/V_{20}) en fonction de la température

Température (°C)	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.91±0.02	0.89±0.02	0.90±0.01
400	0.67±0.04	0.83±0.07	0.71±0.03
600	0.09±0.03	*	0.30±0.05

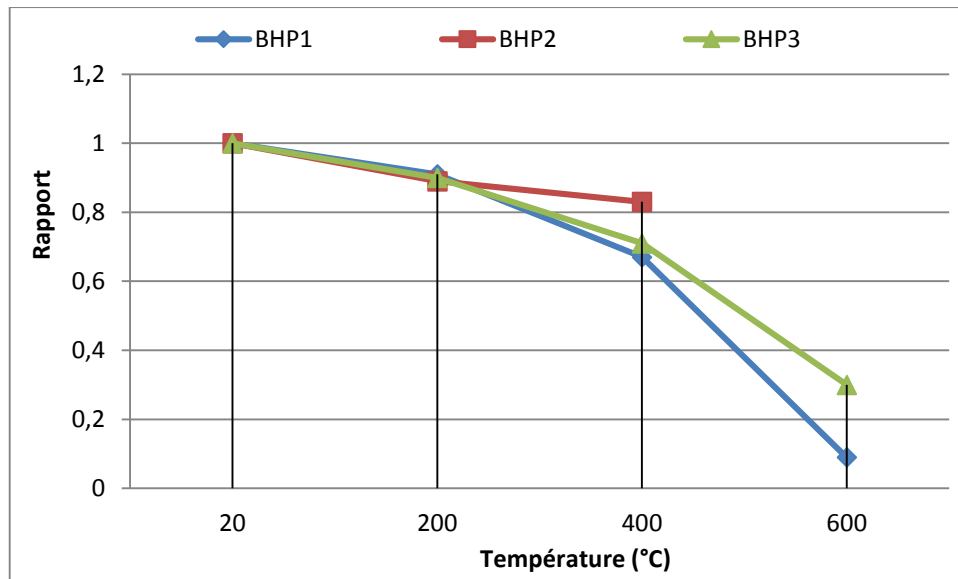


Figure IV.23. Evolution des rapports de la vitesse ultrasonique dans les BHP (V_T/V_{20}) en fonction de la température

On note une chute des vitesses des ultrasons très proche à 200°C variant de 9% (BHP1) à 11% (BHP2), à 400°C l'écart entre les chutes commence à s'apercevoir de 17% (BHP2) à 33% (BHP1). La température de 600°C fait carrément chuter les vitesses des ultrasons à 91% (BHP1).

e- Module d'élasticité dynamique

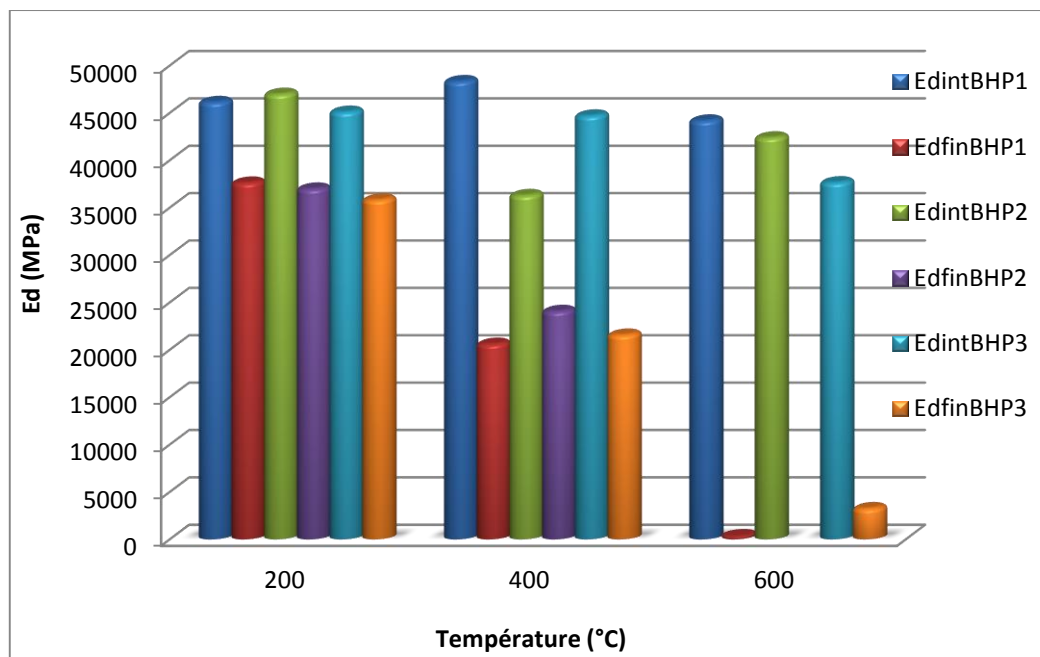


Figure IV.24. Evolution du module dynamique des BHP en fonction de la température

Tableau IV.12: Evolution du rapport du module d'élasticité dynamique des BHP (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

Température (°C)	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.82±0.035	0.79±0.045	0.79±0.024
400	0.43±0.047	0.66±0.118	0.48±0.042
600	0.01±0.004	*	0.03±0.03

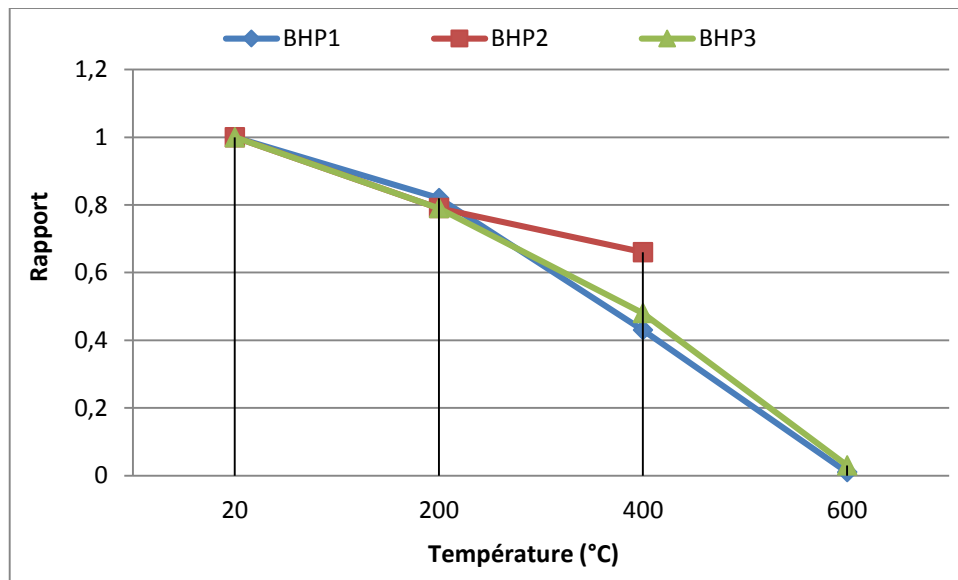


Figure IV.25. Evolution des rapports du module dynamique des BHP (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

- On remarque une perte similaire du module d'élasticité dynamique des trois bétons à 200°C (20%) et une perte autour de la moitié à 400°C. par rapport au module dynamique initial pour les trois BHP. Ces pertes représentent jusqu'à cette température le double de celles des vitesses des ultrasons tout en respectant la proportionnalité avec elles. Mais à 600°C on remarque des pertes très importantes 99% (BHP1), 97% (BHP3). Donc une perte totale de la rigidité des bétons.

A travers les résultats des différentes propriétés des ces bétons (bétons ordinaires et BHP), on remarque que leurs évolutions avec l'élévation de la température présentent des différences. On prospecte dans le paragraphe suivant une comparaison entre l'évolution de ces propriétés en fonction du type de béton d'une part et avec l'évolution donnée par les documents techniques et normatifs (DTU et EC) d'autre part.

IV.4. COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES RAPPORTS DES PROPRIETES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

A travers les résultats précédents, on a pu remarquer que les différentes propriétés des bétons évoluent généralement de la même manière avec l'élévation de la température mais à des proportions différentes. On procède dans cette partie à une étude comparative entre les différents bétons ainsi qu'avec les évolutions prescrits par les documents réglementaires (EC, DTU).

IV.4. 1. Résistance à la compression

L'ensemble des résultats des essais de compression sont donnés par le tableau IV.13 et illustrés par la figure IV.26.

Tableau IV.13 : Evolution des rapports de la résistance à la compression des différents bétons (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.80±0.0	0.83±0.06	0.94±0.004	0.83±0.03	0.89±0.05	0.76±0.139	0.55±0.03	0.48±0.011
400	0.73±0.1	0.73±0.07	0.87±0.11	0.75±0.03	0.70±0.04	0.74±0.06	0.42±0.203	0.47±0.011
600	0.36±0.0	0.42±0.08	0.59±0.03	0.61±0.08	0.62±0.03	0.19±0.021	*	0.20±0.002

* Eclatement explosif des éprouvettes.

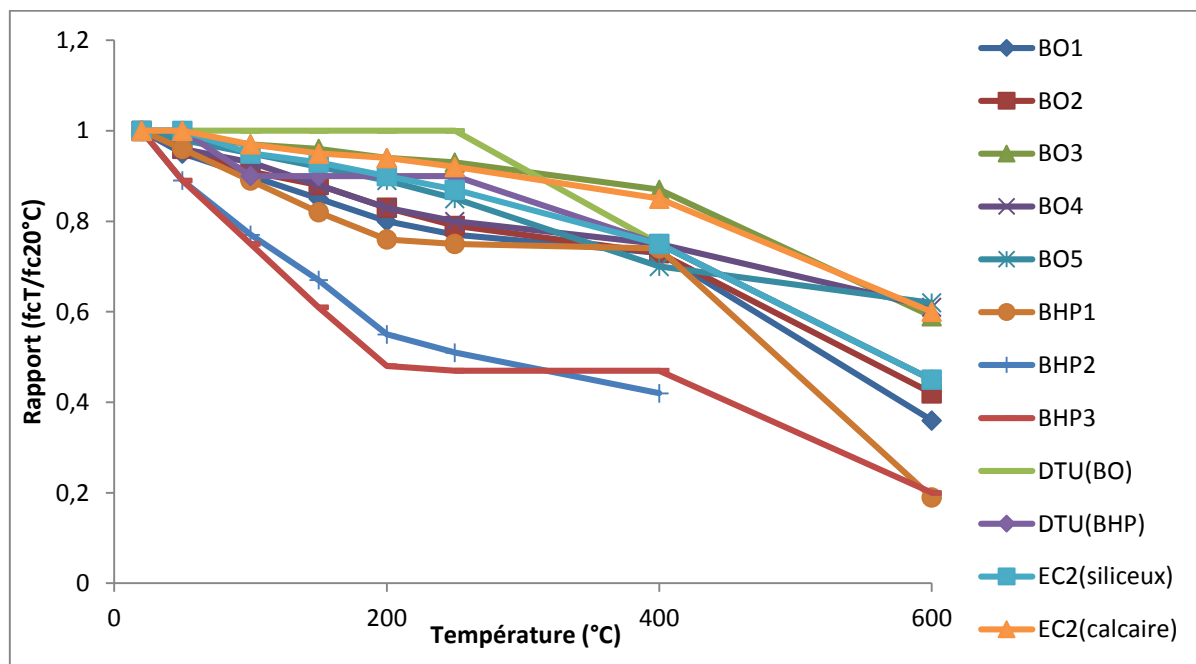


Figure IV.26. Evolution des rapports de la résistance à la compression des différents bétons (f_{cT}/f_{c20}) en fonction de la température

- On remarque bien que la chute de la résistance à la compression des BHP est toujours supérieure à celle des BO pour les trois paliers de température. La différence des chutes des résistances varie en moyenne de 30% à 200°C à plus de 60% à 600°C.
- Les valeurs des rapports déterminées pour les trois BHP se situent au-dessous de celles du Document Technique Unifié DTU [DTU 2007] et de l'EUROCODE 2 [ENV 1992-1-2] pour les deux types de granulats (siliceux ou calcaires). Pour les BO, les rapports déterminés se situent au-dessous de celles du DTU (BO) et de l'EC2 pour les bétons jusqu'à 400°C mais au delà de cette température, les rapports se situent au-dessus de celles du DTU (BO) et de l'EC2 tout en restant à l'intérieur du fuseau DTU (BO). Les chutes des deux BHP (80%) à 600°C sont plus importantes que celles données par les codes réglementaires (moins de 50%).

IV.4. 2. Résistance à la traction

Tableau IV.14 : Evolution des rapports de la résistance à la traction des différents bétons (f_{tT}/f_{t20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.85±0.20	0.95±0.17	0.93±0.14	0.81±0.25	0.95±0.23	0.95±0.063	0.75±0.031	0.93±0.094
400	0.70±0.05	0.52±0.08	0.52±0.05	0.70±0.08	0.83±0.13	0.90±0.023	0.67±0.045	0.86±0.015
600	0.33±0.04	0.34±0.08	0.27±0.04	0.39±0.06	0.43±0.1	0.45±0.005	*	0.31±0.011

* Eclatement explosif des éprouvettes (figure IV.16)

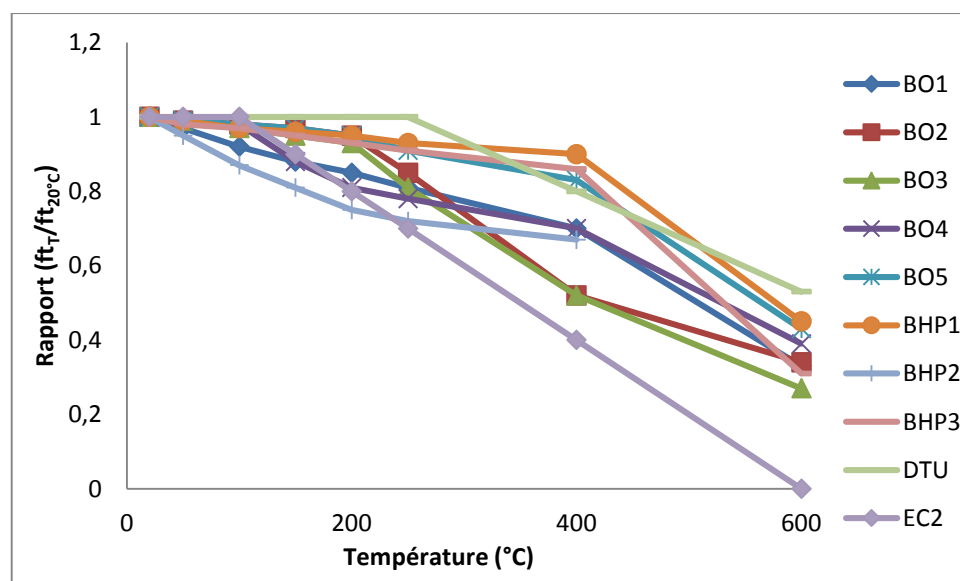


Figure IV.27. Evolution des rapports de la résistance à la traction des différents bétons (f_{tT}/f_{t20}) en fonction de la température

- On remarque qu'à 200°C la perte de la résistance à la traction est relativement similaire à celle à la compression pour tous les bétons à l'exception des BO5 et BHP3 qui a subit une chute remarquable de la résistance à la compression à cette température tandis qu'à la traction leurs chutes sont de moindres importances. Les chutes varient de 5% à 19% pour les BO et 5% à 25% pour les BHP. A 400°C, la perte est plus importante pour les BO comparativement aux BHP. Elle atteint les 42% pour les premiers et juste 33% pour les deuxièmes, tandis qu'à 600°C les pertes sont proches et varient de la moitié aux deux tiers de la résistance initiale.
- Les bétons testés présentent en général des chutes se situant en moyenne au-dessous de celles du DTU et au-dessus de celles de l'EC2.

IV.4.3. Module d'élasticité dynamique

Les résultats de la diminution des modules résiduels relatifs d'élasticité dynamiques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.15 : Evolution des rapports du module d'élasticité dynamique des différents bétons (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

Température (°C)	BO 1	BO 2	BO 3	BO 4	BO 5	BHP1	BHP 2	BHP 3
200	0.71±0.06	0.75±0.06	0.69±0.05	0.79±0.07	0.79±0.087	0.82±0.035	0.79±0.045	0.79±0.024
400	0.28±0.08	0.27±0.04	0.26±0.02	0.35±0.06	0.38±0.06	0.43±0.047	0.66±0.118	0.48±0.042
600	0.01±0.008	0.02±0.006	0.02±0.006	0.07±0.004	0.06±0.02	0.01±0.004	*	0.03±0.03

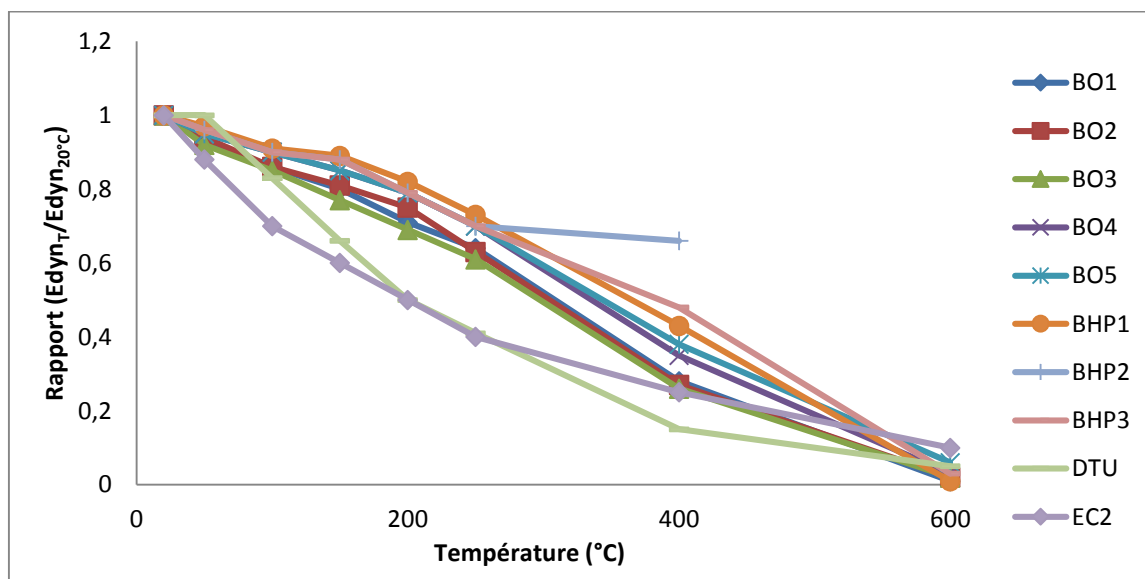


Figure IV.28. Evolution des rapports du module d'élasticité dynamique des différents bétons (E_{dT}/E_{d20}) en fonction de la température

- Les chutes des modules d'élasticité dynamiques à 200°C sont importantes. Elles atteignent 31% pour les BO et 21% pour les BHP du module d'élasticité dynamique initial. A 400°C, les chutes s'accroissent pour atteindre les 74% pour BO et 57% pour les BHP, presque une augmentation de la chute linéaire comme il a été signalé par Noumowé [Noumowé 1995]. On remarque bien que les chutes des modules d'élasticité dynamiques des BO sont plus importantes que celles des BHP malgré la similitude de leur évolution. Cette différence est à cause de la compacité élevée des BHP, ces pertes représentent pour ces derniers le double de celles des vitesses des ultrasons tout en respectant la proportionnalité avec elles. A 600°C, tous les bétons présentent des modules presque nuls. Ceci implique une microfissuration importante (figure IV.17). On peut dire alors qu'au-delà de 600°C le module d'élasticité dynamique tend à s'annuler.
- La plupart des rapports déterminés pour tous les bétons se situent en général au-dessus de celles du DTU et de l'EC pour les deux premières températures (200°C et 400°C). A 600°C, les bétons (BO et BHP) subissent des chutes de leurs modules similaires à celles des DTU et EC. Il faut remarquer que nos modules élastiques sont déduits à partir des vitesses des ultrasons (modules dynamiques) donc les résultats dépendent aussi des modes opératoires et formules utilisées comme l'indiquent Pimenta et al. [Pimenta et al 2012].

IV.5. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR L'EVOLUTION DES RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DES BETONS

Les relations entre les résistances (à la compression et à la traction) et entre les résistances en compression et les modules d'élasticité peuvent être influencées par l'élévation de la température. On a pu remarquer à travers les résultats de ces propriétés qu'elles peuvent présenter des évolutions différentes. Dans cette partie du travail, on prospecte l'effet de la température sur l'évolution de ces relations, entre les résistances en compression et celles en traction d'une part et entre les résistances en compression et les modules élastiques d'autre part. Ces relations entre propriétés vont aussi être situées par rapport à celles données par les règlements.

IV.5. 1. Effet de la température

L'effet de la température sur l'évolution des relations entre les propriétés des différents bétons est donné par les figures suivantes :

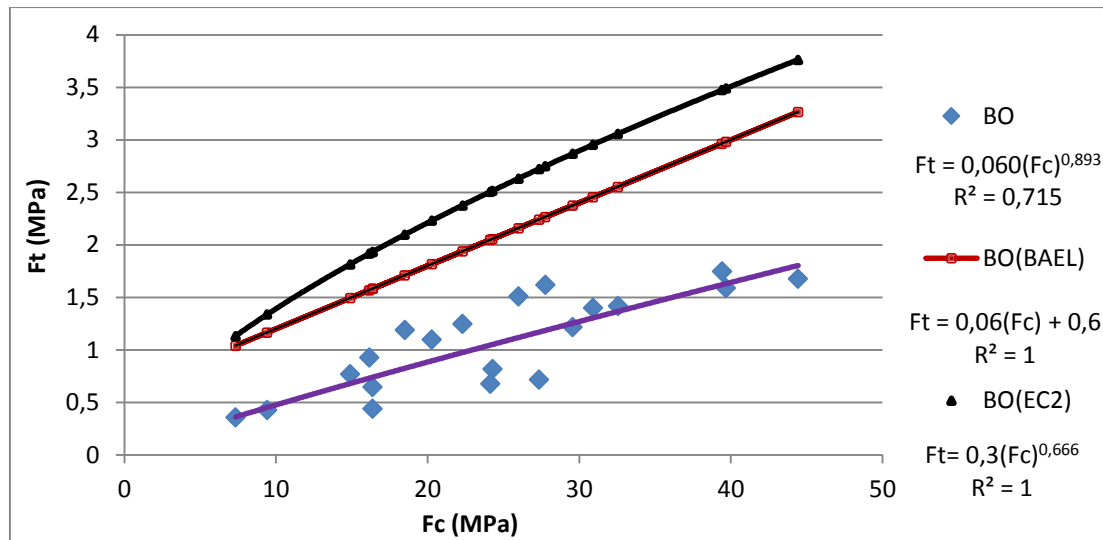


Figure IV.29. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction des BO

On remarque (figure IV.29) que la courbe Ft-Fc est au-dessous de celle du BAEL et de celle de l'EC2, avec une pente inférieure à celle du BAEL. On a donc une sous estimation de Ft à partir de Fc en comparaison avec la réglementation. La relation entre les deux résistances de nous bétons comporte une importante incertitude ($R^2=0.715$).

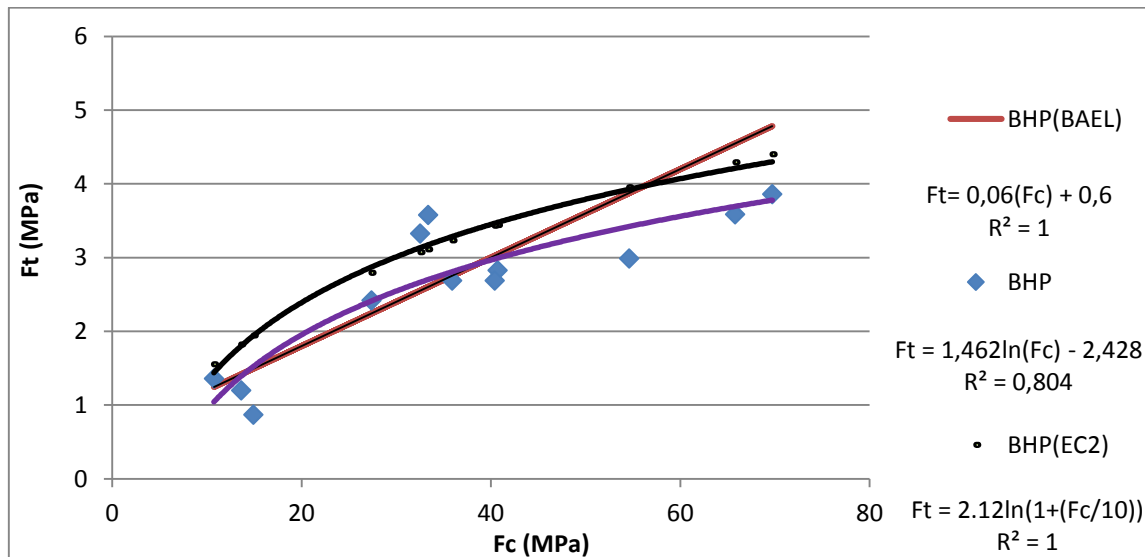


Figure IV.30. Relations entre les résistances à la compression et les résistances à la traction des BHP

Les courbes précédentes présentent les relations Ft-Fc pour les BHP. On remarque que l'écart entre les courbes réglementaires et la courbe expérimentale des BHP n'est pas aussi important que dans le cas des BO. La même remarque est à avancer pour la qualité de la régression Ft-Fc ($R^2=0.804$).

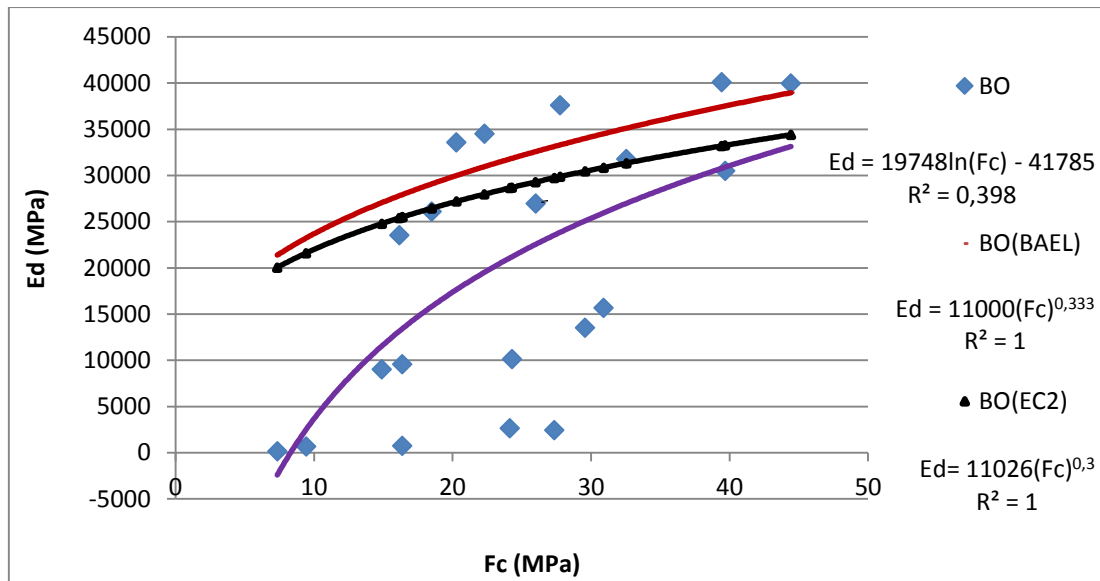


Figure IV.31. Relations entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique des BO

On ne peut parler de relation entre le module d'élasticité et la résistance en compression pour nos bétons ordinaires (figure IV.31). Ce qu'on peut remarquer est que la majorité des points reliant E_d à F_c sont situés en dessous des courbes données par les règlements (BAEL et EC).

On a par contre une amélioration de la relation pour les BHP ($R^2=0.840$), avec un rapprochement de l'estimation de E_d avec celles de règlements pour des résistances en compression avoisinant les 50 MPa.

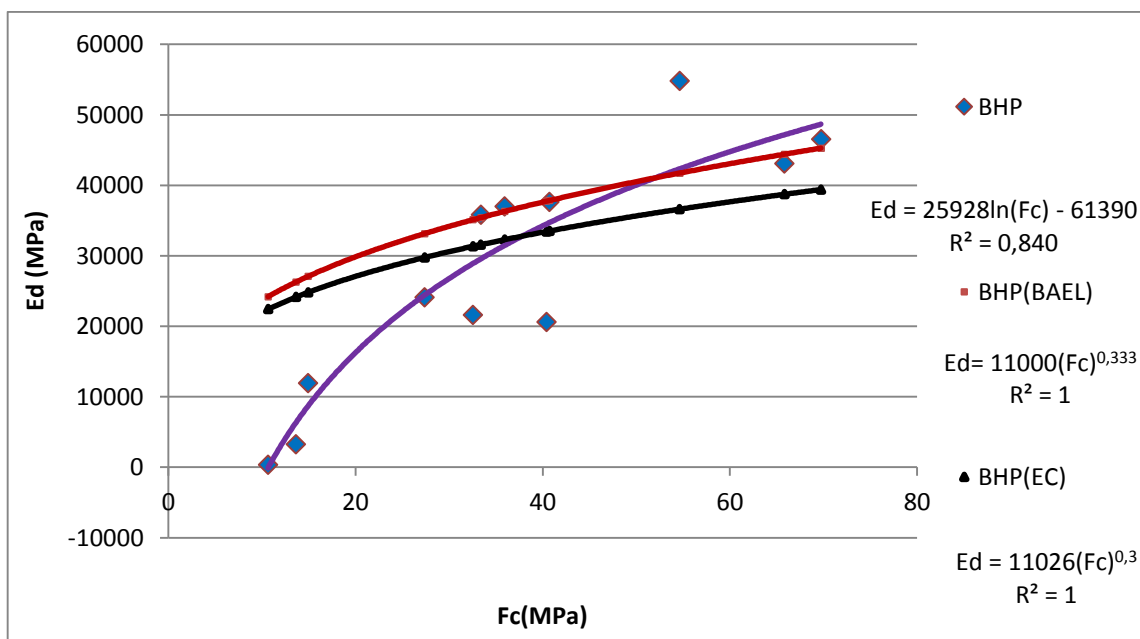


Figure IV.32. Relation entre les résistances à la compression et les modules d'élasticité dynamique des BHP.

On remarque ainsi que les relations entre la résistance en compression et celle en traction d'une part et entre la résistance en compression et le module élastique dynamique d'autre part pour toutes les températures présentent de grandes dispersions (figure IV.29 au figure IV.32). Ce qui implique qu'elles sont influencées par d'autres paramètres dont le type et la composition.

En se fondant sur l'évolution des rapports $f_t(T)/f_t(20^\circ\text{C})$ et de $E_d(T)/E_d(20^\circ\text{C})$, en fonction de $f_c(T)/f_c(20^\circ\text{C})$, on remarque que ces relations présentent aussi des corrélations moins précises pour les BO ($R_t^2 = 0.58$ et $R_E^2=0.60$) et pour les BHP ($R_t^2 = 0.73$ et $R_E^2=0.68$) en considérant les compositions des BO d'une part et celles des BHP d'autre part (figure IV.33).

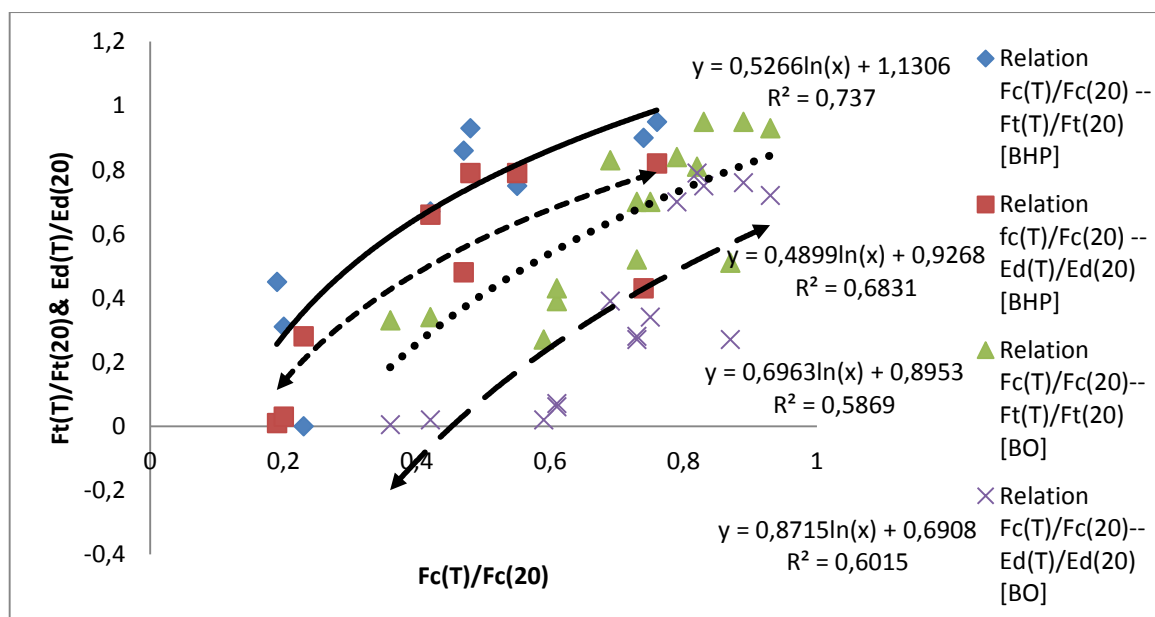


Figure IV.33. Relations entre les rapports des propriétés des deux types de béton

IV.5. 2. Effet de la composition

Le fait de s'intéresser à chaque composition de béton conduit à de meilleures corrélations entre les propriétés résiduelles relatives même en considérant toutes les températures (figure IV.34 et figure IV.35). Ce implique que le paramètre composition est à considérer dans l'établissement des relations entre les propriétés des bétons soumis à des hautes températures. Les formules permettant l'estimation de la résistance à la traction et le module d'élasticité à température ambiante ne permettent pas cette estimation aux hautes températures.

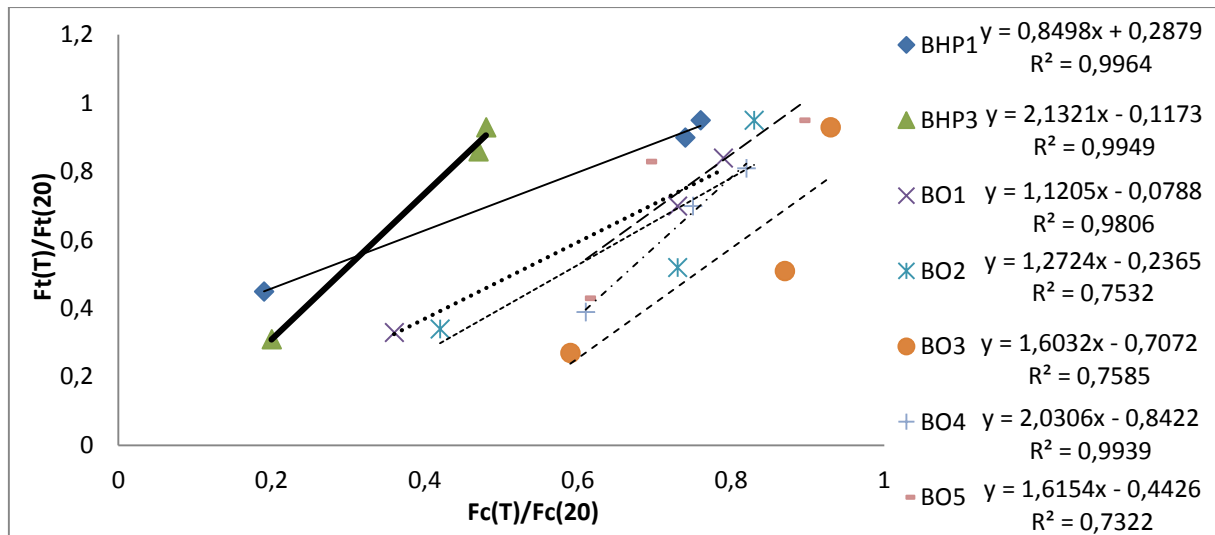


Figure IV.34. Relations entre les rapports des résistances à la compression et des résistances en traction pour chaque béton

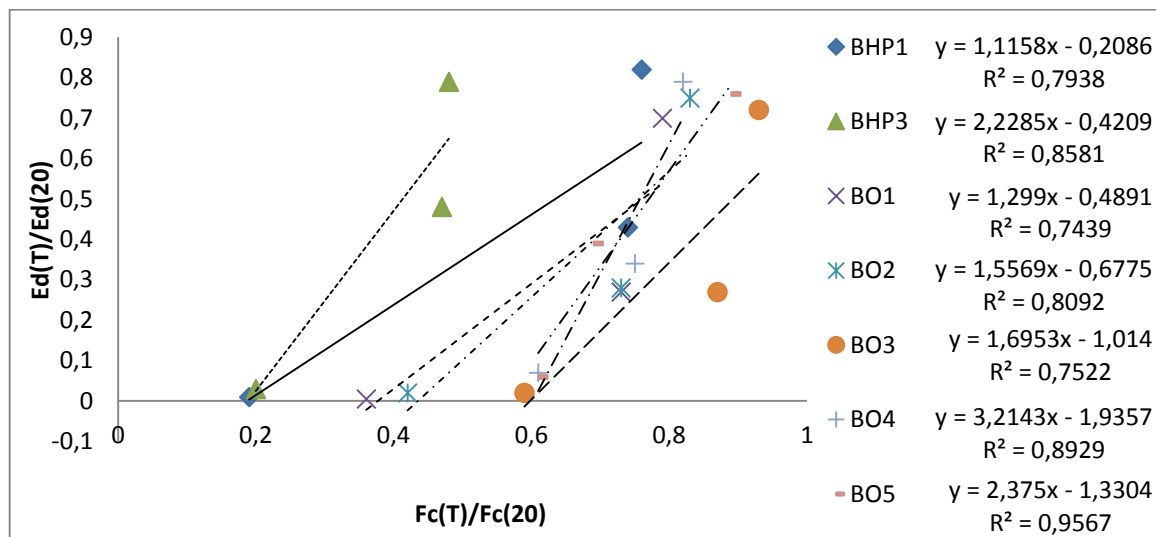


Figure IV.35. Relations entre les rapports des résistances à la compression et des modules d'élasticité dynamique pour chaque béton

Il est remarqué que l'évolution de la pente des courbes reliant les rapports $f_t(T)/f_t(20)$ et $E_d(T)/E_d(20)$ aux rapports $f_c(T)/f_c(20)$ pour les deux types de béton (BO, BHP) est proportionnelle à la résistance à la traction pour la première relation et au module d'élasticité dynamique pour la deuxième relation. La courbe reliant les rapports $f_t(T)/f_t(20)$ et $E_d(T)/E_d(20)$ aux rapports $f_c(T)/f_c(20)$ du BHP3 est plus importante que celle du BHP1. Mais on remarque aussi que pour les BO, la pente des courbes la plus importante est celle du béton BO4, ce dernier présente le module d'élasticité le plus important ($E_d=40116$ MPa). La courbe reliant les rapports $f_t(T)/f_t(20)$ aux rapports $f_c(T)/f_c(20)$ du BHP3 est plus importante que celle du BHP1.

IV.6. CONCLUSION

A travers les résultats des différentes propriétés des ces bétons (bétons ordinaires et BHP), on remarque que leurs évolutions avec l'élévation de la température présentent des différences.

Les bétons soumis aux températures de 200°C, 400°C et 600°C ont mis en exergue un endommagement qui commence graduellement par l'évacuation de l'eau libre, l'endommagement de la matrice cimentaire et les zones de transition.

La déshydratation des (CSH) dans la pâte de ciment des bétons exposés aux hautes températures est la cause des dommages dans les zones de transition. L'endommagement des zones d'interface pâte-granulats augmente avec l'augmentation du dosage en ciment. Ce qui résulte à des chutes des résistances en compression résiduelles plus importantes dans BHP que des BO. Ces chutes passent d'une faible chute comprise entre la température d'ambiance et 200°C à une chute importante et qui commence au alentour de 400°C jusqu'à 600°C.

On remarque qu'à 200°C la perte de la résistance à la traction est relativement similaire à celle à la compression. Les chutes varient de 5% à 19% pour les BO et 5% à 25% pour les BHP. A 400°C, la perte est plus importante pour les BO comparativement aux BHP. Elle atteint les 42% pour les premiers et juste 33% pour les deuxièmes, tandis qu'à 600°C les pertes sont proches et varient de la moitié aux deux tiers de la résistance initiale.

Les modules dynamiques présentent des chutes importantes dès la température de 200°C, avec des chutes des BO plus importantes que celles des BHP. Au-delà de 600°C, le module d'élasticité dynamique tend à s'annuler pour les deux types de béton.

Les pertes de masse à ces températures restent relativement faibles et sont beaucoup plus liées à l'évacuation de l'eau. Généralement, l'altération des granulats commencent à des températures supérieures à 600°C.

Les bétons testés présentent des différences dans l'évolution de leurs propriétés avec la température comparativement à celles données par les documents techniques et normatifs. Ces différences ont aussi remarquées par beaucoup de chercheurs.

Les corrélations reliant les propriétés des bétons qui figurent dans les documents réglementaires (BAEL, EC) valables à la température d'ambiance ne le sont plus aux hautes températures. On doit considérer dans ces relations d'autres paramètres comme la composition par exemple.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a mis en exergue la différence du comportement vis-à-vis des hautes températures entre les bétons ordinaires et les bétons à haute performance. Ces derniers sont beaucoup plus influencés par l'augmentation de la température. La chute maximale de la résistance en compression a dépassé les 50% pour les BO à 600°C alors que cette chute a été dépassée pour les BHP à 200°C pour atteindre presque 80% à 600°C. En traction, elle atteint pour les BO, les 20% à 200°C puis la moitié à 400°C pour dépasser les deux tiers à 600°C par rapport à la résistance initiale et pour les BHP elle ne dépasse pas les 15% à 400°C de la résistance initiale mais à 600°C elle atteint les deux tiers. Ce qui implique que la résistance à la traction pour les BO est plus influencée par la montée de la température que la résistance en compression. Les BHP présentent des fluctuations de l'évolution des deux résistances d'un BHP à un autre. Les chutes des modules d'élasticité dynamiques se situent entre 31% (BO) et 21% (BHP) à 200°C et entre 74% (BO) et 57% (BHP) à 400°C. Donc jusqu'à cette température les modules d'élasticité dynamiques des BO sont plus influencés par la montée de la température que ceux des BHP, pour tendre à s'annuler à 600°C (perte de 99% pour les deux bétons).

Le BHP qui a subi l'éclatement explosif (BHP2) a présenté les chutes les moins importantes des différentes propriétés en comparaison avec les chutes des autres BHP. Ce BHP a aussi présenté moins de fissuration avant l'éclatement, ce qui a favorisé l'augmentation des pressions dans les pores. Donc cette fissuration due à la montée de température, pour les BHP, provoquent deux effets conflictuels, d'une part une baisse de la résistance et d'autre part une limitation de la montée de pressions et donc moins d'écaillage ou d'éclatement. Le risque d'éclatement explosif des bétons est plus accru pour les BHP surtout en présence d'un état hygrométrique favorable.

Le béton soumis à des hautes températures subit donc des chutes irréversibles des résistances et des rigidités. Ce comportement est la conséquence de transformations physico-chimiques provoquées par la montée de la température par le biais de plusieurs processus (thermique, hydrique, chimique et même mécanique)

Les relations entre la résistance en compression et celle en traction des BO présentent des évolutions similaires jusqu'à 200°C tandis qu'à 400°C, la relation présente une pente plus importante. Cette température provoque les modifications majeures dans le matériau. La perte de résistance en traction est moins importante que celle en compression. A 600°C, la tendance s'inverse où la fissuration excessive du matériau conduit une diminution plus importante de f_t comparativement à f_c .

Les relations entre la résistance en compression et le module élastique dynamique présentent, pour les BO jusqu'à 400°C, des similitudes avec les relations précédentes. A 600°C, la relation f_c - E_d présente une faible pente reflétant une perte quasi totale de la rigidité du matériau. Cette différence avec les mesures des résistances reflète un état diffus de fissuration qui influence plus la propagation des ondes ultrasoniques pour la détermination du module élastique dynamique. Par contre pour les BHP les relations $f_c - E_d$ présentent des évolutions différentes à chaque température avec des faibles. L'évolution de la pente des courbes reliant les rapports $f_t(T)/f_t(20)$ et $E_d(T)/E_d(20)$ aux rapports $f_c(T)/f_c(20)$ pour les deux types de béton est proportionnelle à la résistance à la traction pour la première relation et au module d'élasticité dynamique pour la deuxième relation.

Si les relations entre les différentes propriétés des deux types de bétons sont similaires dans les premiers paliers de températures, elles ne le sont pas dans les derniers paliers. Les bétons testés présentent des différences dans l'évolution de leurs propriétés avec la température comparativement à celles données par les documents techniques et normatifs. Les corrélations reliant les propriétés des bétons qui figurent dans les documents réglementaires (BAEL, EC) valables à la température d'ambiante ne le sont plus aux hautes températures. On doit considérer dans ces relations d'autres paramètres comme la composition par exemple.

PERSPECTIVES

Au travers de ce travail, on remarque que plusieurs paramètres influencent le comportement des bétons aux hautes températures. Leurs propriétés présentent des évolutions différentes et qui ne concordent pas toujours avec celles données par les textes réglementaires et qui restent insuffisants.

Les perspectives de ce travail concerneront trois aspects :

Le premier sera la prospection détaillée des relations entre les différentes propriétés des bétons aux hautes températures. Afin de prendre en compte le paramètre température dans ces relations réglementaires.

Le second aspect est le passage du comportement du matériau à celui de la structure, car l'effet d'échelle et les conditions aux limites ont des influences non négligeables (volume de l'élément, mise en charge, dilatation empêchée, ...).

Le troisième est l'étude de l'influence de la montée de la température sur la microstructure du matériau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [Abrams 1971] Abrams M., Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 F. *ACI Special Publication SP 25*, Détroit (1971).
- [Aïtcin 2001] Aïtcin P.C., *Bétons Haute Performance*, Editions Eyrolles, (2001) 683p.
- [Aïtcin 2003] Aïtcin P.C., The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25 (2003) pp. 409-420
- [Alarcon 2002] Alarcon-Ruiz L., Galle C., Massieu E. Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température. *Premier congrès interdisciplinaire sur les matériaux en France, 2002*.
- [Alonso et al 2004] Alonso C, Fernandez L., Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of materials sciences*, vol. 39, (2004) pp. 3015-3024.
- [Amouri 2009] Amouri C., Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité). *Thèse de doctorat*, université Mentouri Constantine, (2009).
- [Andeberg 1997] Andeberg Y, *international workshop on fire performance of high-strength concrete*, NIST, Gaithersburg, (1997).
- [Arupfire 2005] Arupfire, fire resistance of concrete enclosures, (2005).
- [Baroghel-Bouny 1994] Baroghel-bouny V., Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthode, analyse, interprétation. *LCPC*, (1994) 468 p.
- [Baroghel-Bouny et al 1999] Baroghel-Bouny V., Maiguy M., Lassabatere T., Coussy O., characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high – performance cementitious materials. *Cement and concrete research*, Vol. 29, (1999), p.1225-1238.
- [Bazant et al 1972] Bazant Z.P., Najjar L.J., Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials et constructions*, vol. 5, (1972) pp. 3-20.
- [Bazant et al 1983] Bazant Z. P., Oh B. H., Crack band theory for fracture of concrete . *Materials and structures*, Vol. 16, n° 193, (1983) pp. 155-177
- [Bazant 1996] Bazant Z. P., Kaplan M. F., Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models, *Pearson Education*. (1996).
- [Bazant et al 1997] Bazant Z.P., Kaplan M.F., Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models. *Longman House*, Burnt Mill, England, (1997).
- [Behnood et al 2009] Behnood A., Ghandehari M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, *Fire Safety Journal*, vol. 44, n°8, (2009) pp. 1015-1022.
- [Bentz 2006] Bentz D. P., Influence of water – to – cement ratio on hydration kinetics: simple models based on spatial considerations. *Cement and concrete research*, vol. 36, (2006) pp.238-244.

- [Billard et al 2003] Billard Y., Debicki G., Coudert L., Numerical study on behaviour of a non-crack concrete wall in accidental conditions. *Transactions of the 17th international conference on structural mechanics in reactor technology (SMIRT 18)*, Prague, République Tchèque (2003).
- [Bolomey 1935] Bolomey J., Granulation et prévision de la résistance globale des bétons. *Travaux*, vol. 19, n°30, (1935) pp. 228-32.
- [Brouwers 2004] Brouwers H.J.H., The works of powers and Brownyard revisited: part1. *Cement and concrete research*, vol. 34, (2004) pp. 1697-1716.
- [Caquot 1937] Caquot A., Le rôle des matériaux inertes dans le béton. *Mémoire de la Société des ingénieurs civils de France*, Fascicule n°4, juillet-août, (1937) pp. 562-582.
- [Carles-Gibergues et al 1992] Carles-Gibergues A., Pigeon M., La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse, Paris, Ed. *Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, (1992).
- [Castellote et al 2004] Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillas X., Campo J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°9, (2004) p. 1633-1644.
- [Castillo 1987] Castillo C., Effect of transient high temperature on high strength concrete, *Master of Science*, Rice University, 1987.
- [Castillo et al 1990] Castillo C., Durrani A.J., Effect of transient high temperature on high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, Jan-Feb, (1990) pp 47-53.
- [Chaussadent et al 2001] Chaussadent T., Baroghel-Bouny V., Rafäi N., Ammouche A., Hornain H., Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciment durcies. *Revue Française de génie civil*, vol. 5, n°2, (2001) pp.217-230.
- [Chen 2004] Chen J.J., Thomas J.J., Taylors H.F.W., Jennings H.M., Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and concrete research*, vol. 34, (2004) 1499-1519.
- [Consolazio et al 1997] Consolazio G. R., Mcvay M. C. Rish J. W. Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature, *International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, (1997) pp. 125-148.
- [de Larrard 1999] De Larrard F., Concrete Mixture Proportioning – A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series No. 9, *édité par S. Mindess et A. Bentur*, E & FN Spon, Londres, mars, (1999) 421p.
- [de Larrard 2000] De Larrard F., Structures granulaires et formulation des bétons. *Etudes et Recherches des Laboratoires des Pons et Chaussées*, traduit de l'anglais par A. Lecomte, No OA 34, (2000) 420p.
- [Demirel et al 2010] Demirel B., Kelestemur O., Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*. vol. 45, (2010) pp. 385–391.

- [**Diamond 1986**] Diamond S., The microstructure of cement paste in concrete, in *procceding of the 8th international congress on the chemistry of cement*, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 1, (1986) pp.122-147.
- [**Diamond 2004**] Diamond S., The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement & concrete composites*, vol. 26,(2004) pp. 919-933.
- [**Dias et al 1990**] Dias W. P. S., Khoury G. A., Sullivan.P. J. E. Mechanical Properties of Hardened Cement Paste Exposed to Temperatures up to 700°C (1292°F), *ACI Materials Journal*, vol. 87, n°2, (1990) pp. 160-166.
- [**Diederichs et al 1989**] Diederichs U., Jumppanen U. M., Penttala V. Behaviour of high strength concrete at high temperatures, *Report n°92, Helsinki, University of Technology*, Department of structural engineering, (1989).
- [**Diederichs et al 1992**] DiederichS U., Jumppanen U.M., High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete. Verlog für architektur und techn.wissencheften, *Ernst & schn*, (1992) pp.191-197.
- [**Drabla 2015**] Derabla R., Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement. *Thèse de doctorat*, Université 8 Mai 1945 – Guelma, (2015).
- [**Dreux et al 1998**] Dreux G., Festa J., *New concrete guide*, ISBN 13: 978-2-212-10231-4 (1998) p 418.
- [**Dron et al 1982**] Dron R., Voinovitch I.A., L’activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes, dans le béton hydraulique, édité par J. Baron et R. Sauterey, *Presses de l’Ecole nationale des Ponts et chaussées*, ISBN 2-85978-033-5, (1982) pp. 237-245.
- [**DTU 2007**] Document Technique Unifié (DTU) 1987. ‘Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton+ Amendement A1’. Règles de calcul FB. AFNOR DTU P92-701 Octobre 1987, décembre 1993, décembre 2000, CD-DTU V2 - Edition 150 - Décembre (2007).
- [**Durekovic 1995**] Durekovic A., Cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume. *Cement and Concrete Research*. vol. 25, (1995) pp. 365-375.
- [**EN 934-2**] Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, Septembre (2002).
- [**ENV 1992-1-2**] EUROCODE 2: Calcul des structures en béton, Partie 1-2: Règles générales – calcul du comportement au feu. Février (2001).
- [**Ergun et al 2013**] Ergun A., Kürklüa G., Bas-pınarb M.S., Mansou M., The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures, *Fire Safety Journal*. vol. 55, (2013) 160–167.
- [**Fares et al 2009**] Fares H., Noumowé A., Rémond S. Self-consolidating concrete subjected to high temperature: Mechanical and physicochemical properties, *Cement and Concrete Research*, vol. 39, n°12, (2009) pp. 1230-1238.

- [Faury 1953] Faury J., Le béton, influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers. 3^e édition, Dunod, Paris, (1953) pp. 66-67.
- [Fedman et al 1968] Fedman R.F., Serada P.J., A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Matériaux et constructions*, vol. 1, (1968) p. 509-519.
- [Felekoglu et al 2003] Felekoglu B., Yardimci M., Baradan B., A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete. *Proceeding of Third international symposium on SCC: Reykjavik*, (2003) pp.446-455.
- [Felicetti et al 1999] Felicetti R., Gambarov A. P.G., Semiglia M. Residual Capacity of HSC Thermally Damaged Deep Beams. *Journal of Structural Engineering*, March, (1999) pp. 319-327.
- [Feraille et al 2000] Feraille A., Fresnet A., Le rôle de l'eau dans le comportement à haute température des bétons, *thèse de doctorat*, ENPC Paris, (2000).
- [Gargouri et al 2000] Gargouri A., Masmoudi A., Comportement des bétons spéciaux au feu. *Annales de l'Equipement* 43, (2000).
- [Glasser et al 2003] Glasser F.P., Hong S.Y., Thermal treatment of C-S-H at 1 bar H₂O pressure up to 200°C. *Cement and concrete research*, vol. 33, (2003) pp. 271-279.
- [Gonilho Pereira et al 2008] Gonilho Pereira C., Castro-Gomez J., de Oliveira L.P. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete, *Construction and Building Materials*. vol. 23, (2009) pp. 602-608.
- [Hager 2004] Hager I.G., Comportement à haute température des bétons à haute performance -évolution des principales propriétés mécaniques, *thèse de doctorat ENPC*, Paris, 2004.
- [Haniche 2011] Haniche R., Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement, *thèse de doctorat (LGCIE) de l'INSA*, Lyon, 2011.
- [Harada et al 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*, SP-39, (1973) pp. 179-203.
- [Harmathy 1964] Harmathy T.Z., Effect of moisture on the fire endurance of building elements. *ASTM special technical publication*, n° 385, (1964) pp. 74-95.
- [Hassan et al. 1998] Hassan K.E., Cabrera J.G., Head M.K., The influence of aggregate characteristics on the properties of high performance, high strength concrete. In: Rangan B, Patnaik A, editors. *Proceedings of the International Conference*. Perth, Australia, (1998) pp. 441-455.
- [Hertz 2003] Hertz K.D., Limits of spalling of fire – exposed concrete. *Fire safety journal*, vol. 38, (2003) pp. 103-116.

- [Jahren 1989] Jahren P. A., Fire Resistance of High Strength/Dense Concrete With Particular Reference to the Use of Condensed Silica Fume-A Review, *Report n°SP 114-50*, Trondheim, Norway, (1989).
- [Kalifa et al 1998] Kalifa P., Tsimbrosa M., Comportement des BHP à hautes températures : Etat de la question et résultats expérimentaux, *Cahiers du CSTB*, n° 3078, novembre (1998), France.
- [Kalifa et al 2000] Kalifa P., Menneteau F.D., Quenard D., Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n°12, (2000) pp. 1915-1927.
- [Kameche et al 2009] Kameche Z.A., Kazi Aoual F., Semcha A., Belhadji M., Effets des hautes températures sur le comportement du béton: Application au revêtement des tunnels, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Algeria, (2009) pp 199-206.
- [Kanema 2007] Kanema Tshimanga M., Influence des paramètres de formulations sur le comportement à haute température des bétons, *thèse de doctorat*, l'université de Cergy-pontoise, décembre 2007.
- [Kedjour 2010] Kedjour N. E., *Le Laboratoire du Béton*, ISBN: 978-9961-0-0596-5 (2010) OPU, 308p.
- [Khayat 1996] Khayat K., Effect of silica fume on fresh and mechanical properties of concrete. *CANMET-ACI Intensive Course on Fly Ash, Slag, Silica Fume, Other Pozzolanic Materials and Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, (1996) 34p.
- [Khoury et al 1985] Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan G.P.E., Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents. *Magazine of concrete research*, vol. 37, (1985) pp. 131-144.
- [Khoury 1992] Khoury G.A., Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*. vol. 44, (1992) pp 291-309.
- [Khoury 1995] Khoury G. A., Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 156, n°1-2, (1995) p. 313-321.
- [Khoury 2003] Khoury G.A, Effect of heat on concrete. *International centre for mechanical sciences* (2003).
- [Klur, 1996] Klur I., étude par la R.M.N de la structure des silicates de calcium hydratés. *Thèse de doctorat*, Université Paris 6 (1996).
- [Ladaoui 2010] Ladaoui W., Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs. *Thèse de doctorat*, l'université de Toulouse, décembre 2010.
- [Li et al 2004] Li M., Qian C., Sun W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°6, (2004) pp. 1001-1005.
- [Malhotra et al 1989] Malhotra V.M., Wilson H.S., Painter K.E. Performance of Gravelstone

Concrete Incorporating Silica Fume at Elevated Temperature. Detroit: *American Concrete Institute*, (1989), pp 1051-1076. SP 114-51.

- [Mallier 1992] Malier Y., Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications'. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, (1992) 674p.
- [Manai 1995] Manai K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [Masmoudi et al 2004] Masmoudi A., Ben Jdidia M., Formulation des bétons de sable autoplaçants, *actes du colloque MS²*, LGC de l'ENIT Hammamet, (2004).
- [Mazloom et al 2004] Mazloom M., Ramezani pour A.A., Brooks J.J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. vol. 26, (2004) pp. 347–357.
- [Mehta et al 1993] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., Concrete: Structure, Properties and Materials. *Englewood Cliffs, NJ; Prentice Hall*, (1993) 548p.
- [Menou 2004] Menou A., Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température Approche multi échelle de l'endommagement thermique. *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des Pays de l'Andour. 2004.
- [Metha 1986] Metha P.K., Concrete. Structure, properties, and materials. *Englewood cliff, New Jersey: Prentice-Hall*, (1986).
- [Mindeguia 2009] Mindeguia J-C., Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [Missemer 2006] Missemer L., Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV, *Thèse de Doctorat*, Université de Grenoble, 2006.
- [Monteiro 1986] Monteiro P.J.M., Mehta P.K., Improvement of the Aggregate-Cement Paste Transition Zone by Grain Refinement of Hydration Products, *Proceedings, 8th International Congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, 1986, pp. 433-437.
- [Mouret et al 1999] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G., Microstructural features of concrete in relation to initial temperature-SEM and ESEM characterization. *Cement and concrete research*, vol. 29, (1999) pp. 369-375.
- [NF P 18-418] Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Décembre (1989).
- [NF P 18-554] Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, Indice de classement P18-554, Décembre (1990).
- [NF P 18-555] Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, Indice de classement P18-555, Décembre (1990).

- [NF P 18-560] Granulats - Analyse granulométrique par tamisage. Septembre (1990).
- [NF P18-573] Granulats - Essai de Los Angeles, Décembre (1990).
- [NFP 18-502] Additions pour béton hydraulique - Fumées de silice (1992)- (remplacée ultérieurement par les normes NF EN 13263-1 de septembre 2005 et NF EN 13263-2 d'octobre 2005).
- [NF EN 12390-1] Essais pour béton durci - Partie 1: forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules. Indice de classement: P18-430-1, Novembre (2012).
- [NF EN 12390-2] Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance - Indice de classement P18-430-2: Avril 2012.
- [Neville 2000] Neville A.M., *Propriété des bétons*, Eyrolles, Paris, France, (2000) 806p.
- [Nguyen 2013] Nguyen V.T., Comportement des bétons ordinaires et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions. *Thèse de doctorat*, l'université de Cergy-pontoise (2013).
- [Nichols 1982] Nichols F.P., Manufactured sand and crushed stone in Portland cement, *Cement and Concrete International*, vol. 4, n° 8, (1982) pp. 56-63.
- [Norme AFNOR] Granulats pour bétons hydrauliques. Mai (1994).
- [Noumowé 1995] Noumowé N.A., Effet de hautes températures sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. *Thèse de doctorat*, INSA de Lyon (1995).
- [Oberholster 1986] Oberholster R.E., Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: status and prospects. *Int. cong. Chim. Cim. Rapport principal 4.1-Vol. 1*, (1986) pp.323-335.
- [Perraton et al 1999 (b)] Perraton D., Aïtcin P.C., Carles-Gilbergues A., Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Partie II – étude de l'influence de la taille des éprouvettes et de la variabilité des résultats dans le cas d'un BHP. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 221, (1999) pp. 79-87.
- [Persson 1998] Persson B. Seven-Year Study on the Effect of Silica Fume in Concrete, *Advanced Cement Based Materials*. vol. 7, (1998) pp. 139–155.
- [Phan et al 2001] Phan L.T, Lawson J.R., Davis F.L. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Materials and Structures*, vol. 34, (2001) pp.83-91.
- [Pimienta et al 2002] Pimienta P., Hager I., Mechanical behaviour of HPC at high temperature. In *6th International Symposium on Utilisation of High Strength/high Performance Concrete*, Leipzig, 16-20 June (2002).
- [Pimienta 2005] Pimienta P., Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Paris, Ed. *Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, (2005).
- [Pimienta et al 2012] Pimienta P., Mindeguia J-C., Simon A., Behloul M., Felicetti R., Bamonte R., Gambarova P-G., Performances du béton soumis à haute température, du

matériau à la structure, *Colloque*, 23 oct. 2012, Université Cergy-Pontoise, France, (2012).

- [Pliya 2010] Pliya P., Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, *Thèse de Doctorat*, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise (2010).
- [Pons et al 2009] Pons G., Torrenti J.M. Chapitre 5: Retrait et Fluage. Dans *La Durabilité des Bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ed), (2009) pp. 167-216.
- [Poon et al 2001] Poon C.S., Azhar S., Anson M., Wong Y.L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, (2001) pp. 1291–1300.
- [Powers 1968] POWERS T.C., The thermodynamics of volume change and creep, *Materials and Structures, Research and testing* (Paris), vol. 1, no, 6, (1968) pp. 487-507.
- [Robert et al 2008] Robert F., Colina H., Debicki G. La durabilité des bétons face aux incendies, Paris, Ed. *Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées*, (2008).
- [Sabeur et al 2007] Sabeur H., Colina H., Bejjani M., Elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete. *Magazine of concrete research*, vol. 59, n°8, (2007) pp. 559-566.
- [Sanjayan et al 1993] Sanjayan G., Stocks L., Spalling of high-strength silica fume concrete in fire. *ACI materials journal*, vol. 90, (1993) pp.170-173.
- [Sarchar et al 1993] Sarchar R., Khoury G. A. Materials and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazine of Concrete Research*. vol.45, (1993) pp. 51-61.
- [Savva et al 2005] Savva A., Manita P., Sideris K. K., Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, (2005) p.239-248.
- [Schneider et al. 1982] Schneider U., Diederichs U., Ehm C., Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 67, n°2, (1982) pp. 245-258.
- [Schneider 1988] Schneider U., Concrete at high temperatures-A general review, *Fire Safety Journal*, vol. 13, (1988) pp. 55-68.
- [Sierra 1980] Sierra R., Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures des C₃S et de ciment Portland. *Actes du 7^{ème} congrès int. de la chimie des ciments*, Paris, (1980) pp.210-206.
- [Stocks et al 1979] Stock A.F., Hannat D.J., Williams R.I.T. The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete. *Magazine of Concrete Research*, vol. 31. n° 109, (1979) pp. 225-234.

- [**Tennis et al 2000**] Tennis P.D., Jennings H.M., A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, (2000) pp. 855-863.
- [**Tognevi 2012**] Tognevi A., Modélisation multi-échelle et simulation du comportement thermo-hydro-mécanique du béton avec représentation explicite de la fissuration. *Thèse de doctorat*, université de Paris VI (2012).
- [**Toumi 2010**] Toumi B., Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton, *Thèse de doctorat*, Matériaux, Université Mentouri Constantine, (2010).
- [**Ulm et al 1999**] Ulm F-J., Coussy O., Bazant Z.P., The Chunnel fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete. *Journal of engineering mechanics*, vol. 125, n°3, (1999) pp. 272-282.
- [**Vivekanandam et al 1997**] Vivekanandam K., Patnaikuni I., Transition zone in *high performance concrete during hydration*, vol. 27, 1997, pp. 817 – 823.
- [**Wittmann 1987**] Wittmann F.H., Creep and shrinkage mechanisms. dans Bazant Z.P., Wittmann F.H. (Eds.), *Creep and Shrinkage in concrete Structures*, Wiley, Chi Chester, (1987) pp. 129-161.
- [**Xing 2011**] Xing Z., Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, *Thèse de Doctorat*, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise (2011).
- [**Xu 2001**] Xu Y, Wong Y.L, Poon C.S, Anson M, Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and Concrete research*, vol. 31, (2001) pp.1065-1073.
- [**Zeiml et al 2006**] Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A., how do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? *Cement and concrete research*, Vol. 36, (2006) pv. 929-942.
- [**Zhukov 1994**] Zhukov V.V., reasons of explosive spalling of concrete by fire. *Scientific research institute for concrete and reinforced concrete*, Moscow, 1994.



شركة صناعة الإسمنت
FICHE TECHNIQUE CIMENT

F03-01/1000

Date : 31/05/ 2009

Version : 02

Page 1 sur 1

CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ-CEMII/A 42,5

MARS 2011

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA			NORME NA	EN Mpa
AF 975°C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	-NA 442	COMPRESSION
CaO	55 - 65	NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		
SiO2	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250	NA 234	02 jours ≥ 12.50
Al2O3	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		07 jours 25 - 35
Fe2O3	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000		28 jours 42.5 - 52.5
MgO	1 - 2	NA231			FLEXION	02 jours 3,0-4,0
K2O	0,3 - 0,6					07 jours 5,0-6,5
Na2O	0,1 - 0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours 6,5-8,5
SO3	1.8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS		
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	55 - 65	CLINKER	≥ 74	
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	10 - 25	GYPSE	4 - 6	
		C3A	8 - 12	CALCAIRE	0	
		C4AF	9 - 13	LAITIER	≤ 20	

DOMAINE D'UTILISATION

Utilisation courante de notre ciment :

- Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux non agressifs).
- Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
- Dallage en béton, Montage de mure et maçonnerie et Scellemnts de carrelage (Dalles, pierres et carrelage)
- Chape (mortier de ciment)

RECAUTION D'EMPLOI

Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Ouvrages en milieux agressifs (terrains gypseux, sulfates, eaux industriels) emploi obligatoire de ciment
- pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
- Travaux à la mère (emploi obligotoire de ciment PM pour travaux à la mer).
- Bétonnage au dessous de 5° C (il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

STOCKAGE :

Eviter :

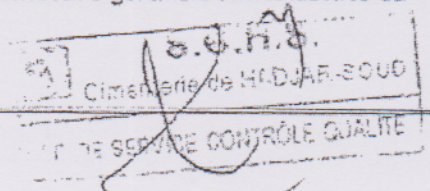
- Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
- Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :

Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du

ATTENTION

- Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.



MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

DESCRIPTION

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

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

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Forme Poudre
- Couleur Grise
- Densité apparente 0,5
- Composants SiO₂ > 85(%)
..... SO₃ < 2,5 (%)
..... Cl- < 0,2 (%)
- Aire massique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la cohésion
- d'éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- d'obtenir des bétons possédant une excellente perméabilité
- d'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- d'augmenter la durabilité du béton

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

DOMAINES D'APPLICATION

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

DOSAGE

Le dosage du MEDAPLAST HP varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

MODE D'EMPLOI

Le MEDAPLAST HP est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (toile de jute + arrosage ou MEDACURE) surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST HP est conditionné en sacs de 2kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
شرانیتکس

Zone industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger
Tél: (213) 021 51 66 81 & 82
Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

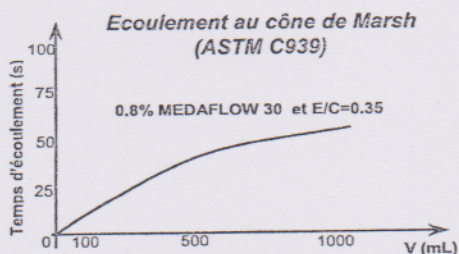
- Forme Liquide
- Couleur Jaunâtre
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1g/L$
- Extrait sec 30%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

غرانتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.5 à 1.850 litre pour 100 Kg de ciment.

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

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

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

MEDAFLOW 30**CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, et en fûts de 210 Kg et 240 Kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Avril 2005.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
فرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél: (213) 021 51 66 81 & 82
Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



SIKA VISCOCRETE® 3045

Plastifiant réducteur d'eau de nouvelle génération pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la Norme EN 934-2 Tableau 2.

Présentation	Le SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.
Domaines d'application	<p>Le SIKA VISCOCRETE 3045 permet d'obtenir un long maintien de rhéologie (>1H30). Il est donc parfaitement adapté à l'industrie du BPE et à l'utilisation sur chantier.</p> <p>Le SIKA VISCOCRETE 3045 permet la fabrication de :</p> <ul style="list-style-type: none">■ bétons plastiques à fluides,■ bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice,■ bétons pompés sur longues distances. <p>Dans les bétons fluides, le SIKA VISCOCRETE 3045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.</p>
Caractères généraux	<p>Le SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau qui confère au béton les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none">■ haute réduction d'eau,■ maintien prolongé de la rhéologie,■ robustesse vis-à-vis de la ségrégation,■ bel aspect de parement au décoffrage.
Caractéristiques	
Coloris	■ marron
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">■ Fût de 225 kg.■ Conteneur perdu de 1000 litres.■ Vrac.
Stockage	<p>Condition de stockage : A l'abri du gel, entre 5 et 35°C.</p> <p>Le SIKA VISCOCRETE 3045 peut geler, mais une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.</p>
Conservation	Délai de conservation en emballage intact : 6 mois.
Données techniques	
densité	1,11 ± 0,02
pH	5 ± 1
Teneur en ions Cl-	< 0,1 %
Teneur en Na₂O Eq	< 2,5 %
Extrait sec (en masse) (%)	36 ± 1
Conditions d'application	
Consommation / Dosage	<p>Plage d'utilisation recommandée 0,25 à 2,5 % du poids de liant selon les performances recherchées.</p> <p>Dosage usuel du SIKA VISCOCRETE 3045 : 0,3 % à 0,8 %.</p>
Mise en œuvre	Le SIKA VISCOCRETE 3045 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Minitel 3613, code SIKASECUR ou sur Internet www.sika.fr



Construction

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France
Switzerland

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr