

Université Mohamed Boudiaf - M'SILA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Numéro de série :

Numéro d'inscription :

Thèse

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

THEME

**Etude de l'influence de la nature des fillers sur
les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et
à l'état durci et soumis aux hautes températures**

Présenté par

Belouadah MESSAOUDA

Soutenue le : 18/12/2018

Devant le jury composé de :

**Dr KHEMISSA Mohamed,
Dr RAHMOUNI Zine-El-Abidine,
Dr BOUDAUD Zine-Eddine,
Dr BENAMARA Dalila,
Dr BELAGRAA Larbi.**

**Professeur Université de M'sila
Professeur Université de M'sila
Professeur Université d'Oum-El-Bouaghi
MCA Université de Djelfa
MCA Université de M'sila**

**Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité**

Année universitaire : 2017/ 2018

Remerciements

De prime abord, je tiens à remercier le Dieu clément et bienveillant de m'avoir donné la force et le courage pour achever à ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire du Génie Civil de l'Université de M'sila. sous Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance au professeur RAHMOUNI Zine-El-Abidine pour m'avoir fait l'honneur de diriger mes travaux durant la thèse en tant que promoteur principal. Je le remercie chaleureusement pour sa confiance, son soutien, ses connaissances scientifiques ainsi que sa qualité d'encadrement.

J'estime avoir énormément appris à son contact. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles. Je voudrais également saluer ses qualités "humaines" de directeur de thèse, son humour mais aussi sa compréhension et son soutien dans les moments difficiles.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur KHEMISSA Mohamed, Professeur à l'université de M'sila, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance. Egalement mes remerciements vont à Monsieur BOUDAUD Zine - Eddine, Professeur à l'Université d'Oum-El-Bouaghi et à madame Dalila Benamara, Maître de Conférences à l'Université de Ziane Achour de Djelfa, qui ont accepté de porter un regard critique à ce mémoire en tant que rapporteurs.

Je voudrais également adresser mes remerciements à ma collègue TEBBAL Nadia pour toute l'aide qu'elle m'a apportée et pour mon soutien dans toutes les crises.

Je voudrais remercier mon cher mari pour son aide et son soutien depuis le début de ce projet

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous le personnel des laboratoires de la Cimenterie "LAFARGE" de Hammam Dalâa . Mes plus sincères remerciements vont aussi à Monsieur Sahnoun Fodail, MCA à l'Université de M'sila département de physique.

Enfin, mes sincères remerciements et ma profonde gratitude sont exprimés pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base de matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures

Résumé

Dans cette étude, nous avons tenté de déterminer la résistance du béton contenant la poudre de verre et la poudre de marbre par le remplacement partiel du ciment dans le béton. La substitution de ciment par ces additions minérales dans la gamme de 5% à 10%. Cette approche est basée sur les propriétés du matériau et son effet sur les propriétés physico mécanique du béton. Plusieurs paramètres sont considérés, à savoir: L'effet de filler, l'effet de l'adjuvant et le rapport E/C, pour aboutir à la confection d'un béton à base des matériaux locaux caractérisé par une bonne résistance, une porosité minimale et une durabilité acceptable.

Une approche expérimentale pour l'étude l'influence de la nature des fillers sur le comportement thermomécanique du béton soumis à une température élevée ont été étudiés. Des bétons formulés avec deux additions minérales (poudre de verre et poudre de marbre) soumis à des cycles de chauffage/refroidissement à 200 °C, 400 °C et 600 °C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min. Des mesures des propriétés physico- mécaniques ont été effectuées. L'évolution de la fissuration, des phases cristallines est suivie par diffraction X et la quantité de Portlandite (Ca(OH)_2) formée après 180 jours a été déterminée de façon indirecte par analyses thermiques gravimétrique et différentielle (ATG et ATD).

Les résultats expérimentaux montrent une corrélation entre l'évolution de la perte de masse et la différence de température au sein de l'élément chauffé. Ils révèlent l'existence de deux grandes zones de comportement des bétons situées avant et après 400°C. Dans la première zone, on note une évolution des résistances à la compression, tandis que dans la seconde on observe une baisse considérable des propriétés mécaniques. d'autres parts les résultats obtenues sont eu concordance avec des recherches antérieures

Mots-Clés : Béton, filler de verre, filler de Marbre, Température élevée, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques.

Study of the influence of the nature of the fillers on the properties of concretes based on local materials in the fresh state and in the hardened state subjected to high temperatures

Abstract

In this study, we attempted to determine the strength of concrete containing glass powder and marble powder by partially replacing cement in concrete. Cement substitution by these mineral additions in the range of 5% to 10%. This approach is based on the properties of the material and its effect on the physical and mechanical properties of concrete. Several parameters are considered, namely: the effect of filler, the effect of the adjuvant and the ratio E / C , to lead to the making of a concrete based on local materials characterized by good strength, porosity minimum and acceptable durability.

An experimental approach for studying the influence of the nature of the fillers on the thermomechanical behavior of concrete subjected to a high temperature was studied. Concretes formulated with two mineral additions (glass powder and marble powder) subjected to heating / cooling cycles at 200 ° C, 400 ° C and 600 ° C with a temperature rise rate of 10 ° C / min. Measurements of the physic-mechanical properties have been made. The evolution of cracking and crystalline phases is followed by X-ray diffraction and the amount of Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formed after 180 days was determined indirectly by gravimetric and differential thermal analyzes (ATG and ATD).

The experimental results show a correlation between the evolution of the mass loss and the temperature difference within the heated element. They reveal the existence of two large zones of behavior of the concretes situated before and after 400 ° C. In the first zone, there is an evolution of the compressive strengths, while in the second one a considerable decrease of the mechanical properties is observed. other parts the results obtained are in agreement with previous research

Keywords: Concrete, glass filler, Marble filler, High temperature, Mechanical properties, Physical properties.

دراسة تأثير طبيعة الحشو على خواص الخرسانة المصنوعة من المواد المحلية في الحالة اللينة و الحالة الصلبة تحت تأثير درجة حرارة عالية

ملخص

في هذه الدراسة حاولنا تحديد قوة الخرسانة التي تحتوي على مسحوق الزجاج باستبدال جزء من الإسمنت بهذه الإضافات جزئياً في حدود 5% الى 10%. هذه الإضافات تعتمد على خصائص المادة وتأثيرها على الخواص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة. عدة نقاط اخذت بعين الاعتبار لمعرفة تأثير الإضافات المعدنية، تأثير الملدنات ونسبة الماء على الإسمنت. للحصول على تصنيع خرسانة جيدة باقل مسامية ومتانة مقبولة.

الدراسة التجريبية لتأثير نوعية الإضافات المعدنية على الهيكل الحراري و الميكانيكي للخرسانة المعرضة لدرجة حرارة المرتفعة تمت دراستها من خلال هذا العمل. عدة خلطات من الخرسانة صنعت بإضافة نوعين من الإضافات المعدنية (مسحوق الزجاج و مسحوق الرخام) عرضت لدورات من التسخين و التبريد في الدرجات التالية 200 درجة مئوية، 400 درجة مئوية و 600 درجة مئوية بسرعة تسخين 10 درجة مئوية في الدقيقة و لقد تم قياس الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية من خلال تطور التشققات، المراحل البلورية باستعمال الأشعة السينية و كمية بورتلاند (Ca (OH)_2) المشكل خلال 180 يوم .

أظهرت النتائج تناسق بين زيادة الضياع في الكتلة بارتفاع درجة الحرارة للعينة المعرضة للتسخين و وجود مجالين لسلوك الخرسانة قبل و بعد التسخين في 400 درجة مئوية . في المجال الاول نلاحظ ارتفاع في المقاومات وبينما في المجال الثاني لوحظ انخفاض معتبر في الخصائص الميكانيكية. كما أن النتائج المحصل عليها توافق نتائج ابحاث سابقة.

كلمات المفتاحية : الخرسانة ، إضافات الزجاج ، إضافات الرخام ، ارتفاع درجة الحرارة ، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية.

Table des matières

Résumé	i
Sommaire	iv
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	iiiv
Introduction générale	01

1^{ère} partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les Bétons

I.1 Introduction	05
I.2 Définition	06
I.3 Constituants du béton	06
I.3.1. Ciments	07
I.3.2. Les granulats	09
I.3.3. Eau de gâchage	09
I.3.4. Adjuvants	10
I.3.5. Les additions	13
I.4. Eau dans la microstructure du béton	13
I.4.1 Eau libre dans les capillaires	13
I.4.2 Eau adsorbée	14
I.4.3 Eau de constitution	15
I.5. Propriétés des bétons	15
I.5.1. Propriétés physiques	15
I.5.2. Propriétés mécanique du béton	17
I.5.2.1. Résistance à la compression	17
I.5.2.2. Résistance à la traction	18
I.6. Méthodes de formulation des bétons	19
I.6.1. Les trois principes de formulation des bétons ordinaires	19
I.6.2. Quelques méthodes de composition des bétons	19
I.6.2. 1. Méthode de Bolomey	20
I.6.2.2. Méthode de Faury	20
I.6.2.3. Méthode de Valette	20
I.6.2.4. Méthode Dreux-Gorisse	20
I.6.2.5. Méthode de Joisel	21
I.7. comportement au feu des structures en béton lors d'incendie	21
CONCLUSION	21

Chapitre II - Les additions minérales

II.1. Introduction	24
II.2. Rôle de l'ajout cimentaire	24
II.2.1 Rôle de la granulométrie de l'ajout	24
II.2.2 Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire	25
II.3. Classification des ajouts minéraux	25
II.3.1 Principaux ajouts minéraux inertes	25
II.3.1.1 Fillers calcaires	26
II.3.1.2 Fillers de Marbre	26

II.3.1.2.1 Composition minéralogique	27
II.3.1.2.2 Utilisation	28
II.3.1.2.3 La poudre de marbre dans les bétons	28
II.3.2 Les ajouts minéraux actifs	28
II.3.2.1 La pouzzolane	30
II.3.2.2 La fumée de silice	30
II.3.2.3 Laitier de haut fourneau	30
II.3.2.4 Les cendres volantes	32
II.3.2.5 La poussière	33
II.3.2.6 Le verre	35
II.3.2.6.1 Définition du verre	35
II.3.2.6.2 Composition du verre	38
II.3.2.6.3 Utilisation du verre dans le béton	39
II.3.2.6.4 Effet du taux de verre	40
II.3.2.6.5 Comportement du verre dans un milieu cimentaire	41
II.3.2.6.6 l'influence de poudre de verre sur les propriétés des bétons	47
II.3.2.6.5 Avantages d'utilisation de la poudre de verre dans le béton	47
II.4 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons	48
II.4.1 L'ouvrabilité	48
II.4.2 Chaleur d'hydratation	49
II.4.3 Résistance mécanique	50
II.4.3 Retrait	51
II.4.4 Module d'élasticité	51
CONCLUSION	

Chapitre III - Effets de la température sur le béton

III.1. Introduction	53
III.2 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées	53
III.2.1 Déformation thermohydrrique libre du béton	53
III.2.2 Evolution de la matrice cimentaire	54
III.2.3 Evolution des granulats	55
III.3 Evolution des propriétés physiques	56
III.3.1 Evolution de la porosité	56
III.3.2 Evolution de la perméabilité	57
III.3.3 Perte de masse	58
III.3.4 Evolution de la masse volumique	59
III.4 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	60
III.4.1 La conductivité thermique	61
III.4.2 Diffusivité thermique	61
III.4.3 Chaleur spécifique	62
III.4.4 Déformation thermique du béton et ses constituants	63
III.4.4.1 Déformation thermique de la pâte cimentaire	63
III.4.4.2 Déformation thermique des granulats	64
III.4.4.3 Déformation thermique du béton	65

III.5 Evolution des propriétés mécaniques avec la température	66
III.5.1 Résistance en compression à haute température	66
III.5.2 Influence du type de béton et de la nature des constituants	68
III.5.2.1 Type de béton : haute performance et ordinaire (E/C)	68
III.5.2.2 Influence des additions minérales	68
III.5.3 Résistance en traction à haute température	70
III.5.4 Module d'élasticité	71
III.6 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	72
III.7 Paramètres favorisant l'instabilité thermique	73
CONCLUSION	

2^{ème} partie : Etude expérimentale

Chapitre IV - Matériaux et procédures expérimentales

IV.1. Introduction	75
IV.2 Caractéristiques des matériaux	76
IV.2.1 Ciment	79
IV.2.2 Ciments composés	79
IV.2.2 Poudre de marbre	81
IV.2.3 Poudre de verre	83
IV.2.4 L'adjuvant	85
IV.2.5 Eau de gâchage	85
IV.2.6 Nature des sables utilisés	86
IV.2.7 Gravier	88
IV.3 Préparation et conditionnement des échantillons de béton	91
IV.3.1 La formulation de la composition des bétons ordinaires	91
IV.3.2 Composition des différents bétons ordinaires	94
IV.3.3 Fabrication et conditionnement des éprouvettes	96
IV.3.4 Cure appliquée	96
IV.4 Programme expérimental	97
IV.4.1 Essais macrostructuraux	97
IV.4.2 Essais microstructuraux	97
IV.5 Essai de chauffage	98
IV.6 Procédure de fabrication des bétons	99
IV.7 Essais à l'état frais	100
IV.8 Essais macrostructuraux	101
IV.8.1 Essai de compression	101
IV.8.2 Essai de flexion	102
IV.5.3 Absorption d'eau	102
IV.5.4 porosité	104
IV.5.6 Estimation de la perte de masse	105
IV.5.7 Volume des éprouvettes	106
IV.5.8 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores	106
IV.6 Essais microstructuraux	106
IV.6.1 L'analyse DRX	107

IV.6.2 L'analyse ATG et ATD	108
Conclusion	
<i>Chapitre V- Résultats et interprétation</i>	
V.1 L'introduction	
V.2 Effet combiné de poudre de verre et de poudre de marbre sur les caractéristiques du béton soumis à température ambiante	111
V.2.1 L'effet de la poudre de verre et de poudre de marbre sur consistance normale	112
V.2.2 L'effet de la poudre de verre et de poudre de marbre sur le temps de prise	113
V.2.3 Caractéristiques du béton à l'état frais	114
V.2.3.1 Effet du pourcentage de la poudre de marbre et verre sur l'ouvrabilité du béton	114
V.2.3.2 La masse volumique	116
V.2.3.3 L'air occlus	117
V.2.4 Caractéristiques du béton à l'état durcis	117
V. 2.4.1 La densité	118
V.2.4.2 Évolution de la résistance à la compression	118
V.2.4.3 La résistance à la traction	120
V.2.4.4 Masse volumique	123
V.2.4.5 Effet de la poudre de verre sur l'absorption d'eau par capillarité	125
V.2.4.6 Effet de la poudre de marbre sur l'absorption d'eau par capillarité	126
V.2.4.7 Porosité en fonction du rapport E/C	127
V.2.4.8 Résistance mécanique en fonction de la porosité	128
V.2.5 Structure interne (analyse par rayons X)	128
V.2.6 Peau des bétons	130
V.2.7 Analyse thermiques gravimétriques et différentielle	133
V.3 Effet de la combinaison poudre de marbre /verre sur le comportement de béton	134
V.3.1 L'ouvrabilité du béton	136
V.3.2 La masse volumique à l'état frais	136
V.3.3 Masse volumique à l'état durci	137
V.3.4 Évolutions de la résistance à la compression	138
V.3.5 La résistance à la traction	139
V.3.6 l'absorption d'eau par capillarité	140
Conclusion	141
V.4 L'influence des hautes températures sur les propriétés du béton	
V.4.1 Mesures des propriétés physiques des bétons	143
V.4.1.1 Masse volumique apparente	143
V.4.1.2 Perte de masse	145
V.4.1.3 Porosité à l'eau	146
V.4.1.4 Volume des éprouvettes	148
V.4.1.5 La vitesse d'ultrason (V)	150
V.4.1.6 Evolution de la surface fissurée des éprouvettes en pâte de ciment et de béton après un cycle chauffage refroidissement	151
V.4.2. Evolution de la résistance en compression	154
V.4.3 Relation entre les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons	156
V.4.3.1 Relation entre la porosité et la résistance en compression	158
V.4.3.2 Relation entre la porosité et la perte de masse	158
V.4.3.3 Relation entre la porosité et variation de volume	160

V.4.3.4 Relation entre la résistance en compression et la perte de masse	161
V.4.3.5 Relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques	162 163
V.4.4 Diffraction des rayons X	
V.4.5 Analyse thermo - gravimétrique et différentielle (TG - ATD)	165
CONCLUSION	166

Conclusion générale et perspective

Références bibliographiques

Liste des tableaux

Tableau I.1. Pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	06
Tableau I .2. Classification des ciments	08
Tableau II. 1. Classification des ajouts selon leur réactivité	25
Tableau II.2. Compositions chimiques de la fumée de silice	32
Tableau II.3. Composition typique de laitier de haut fourneau	33
Tableau II.4. Composition chimique de certains types de la cendre volante	34
Tableau II.5. Composition chimique du verre	39
Tableau III.1. Effet de la température sur le coefficient de dilatation thermique pour les grés, calcaire et granit	65
Tableau IV.1. Composition chimique et minéralogique du ciment	77
Tableau IV.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM II 42,5.	77
Tableau IV.3. Analyse chimique de ciments composés, en (%)	79
Tableau IV.4. Propriétés physiques des ciments préparés.	79
Tableau IV.5. Composition minéralogique des ciments préparés, en %.	80
Tableau IV.6. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre	81
Tableau IV.7 . Composition chimique de la poudre de marbre	81
Tableau IV.8. Composition minéralogique de la poudre de marbre, en%	82
Tableau IV.9 . Composition chimique de la poudre de verre	84
Tableau IV. 10 . Caractéristique physique de la poudre de verre	84
Tableau IV.11. Caractéristiques de MEDAPLAST SP 40	85
Tableau IV.12. Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage	86
Tableau IV.14. Analyse granulométrique du sable de Bousaada	87
Tableau IV.15. Analyse chimique du sable de Bousaada	88
Tableau IV.16. Analyse chimique de la pierre concassée, en (%)	89
Tableau IV.17. Caractéristiques physiques du gravier 3/8	89
Tableau IV.18. Analyse granulométrique du gravier 3/8	89
Tableau IV.19. Caractéristiques physiques du gravier 8/15	90
Tableau IV.20. Analyse granulométrique du gravier 8/15	91
Tableau V.21. La composition d'un m ³ de béton ordinaire	94
Tableau IV.22. Liste des différents bétons étudiés	
Tableau IV.23. Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires	94
Tableau IV.24. Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires (données pour 1 m ³)	95
Tableau V.1. Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes	95
Tableau V.2. Valeurs de la vitesse de propagation des ondes ultrason et qualité des bétons.	152

Liste des figures

Figure. I. 1. Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton	06
Figure. I.2. Nature chimique des différents types de ciment	07
Figure. I. 3. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant	11
Figure. I. 4. Illustration des différents les types de porosité dans un système cimentaire	17
Figure I. 5. Courbe contrainte-déformation en compression simple	18
Figure I. 6. Comportement du béton en traction simple	18
Figure I. 7. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous	22
Figure II.1. Gisement de marbre	27
Figure II.2. Poudre de marbre	27
Figure II.3. a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par Zachariasen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions	36
Figure II.4. (a) L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique	37
Figure II.5. Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na ₂ O différentes	37
Figure II.6. Effet du taux de substitution sur l'ouvrabilité du béton au laitier pour deux taux de verre	40
Figure II.7. Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes	41
Figure II.8. Particule de verre fissurée (classe C2) remplie de gel de RAS (cure 60°C 100% HR)	44
Figure II.9. Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre	44
Figure III.10. Résistances en compression des mortiers conservés à 20°C contenant jusqu'à 40% de verre de différentes finesses	46
Figure II.11 . Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires	49
Figure II.12. Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant	50
Figure II.13. Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les deux taux de substitution de filler calcaire	51
Figure II.14. Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge Pour les deux taux de substitution de cendre volante	52
Figure II.15. Module d'élasticité (E) pour tous les mélanges à différents âges	54
Figure III.1. Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température	56
Figure III.2. Courbes ATD de quatre types de granulats (10 °C/min)	57
Figure III.3. Evolution de la porosité du béton avec la température	58
Figure III.4. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température	59
Figure III.5. Perte de masse des bétons déterminées durant l'échauffement	60
	61

Figure III.6. Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température	61 62
Figure III.8. Evolution de la conductivité thermique de différents bétons avec la température A gauche, l'effet de type des agrégats. À droite, l'effet de type du béton	63 63 64
Figure III.9. Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température	64 66
Figure III.10. Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température	66
Figure III.11. Evolution avec la température de la dilatation longitudinale de différents types de roches a) calcaire ; b) quartz ; d) basalte	66 67
Figure III.12. Déformation thermique de quatre différents bétons confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires	67 69
Figure III.13. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température	69 70 78
Figure III.14. Influence des additions sur la résistance en compression résiduelle en fonction de la température pour des bétons courants et des bétons à hautes performances	78 82 83
Figure III.15. Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction	84 87
Figure III.16. Différents résultats de résistance à la traction obtenue comme ci-dessous	88
Figure II.17. Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température	90 93
Figure II.18. Illustration du mécanisme d'éclatement	96
Figure IV.1 . Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5	97
Figure IV.2. Diffractogramme du ciment anhydre CEM II 42,5	89
Figure IV.3. Diffractogramme de la poudre de marbre	99
Figure. IV.4. Distribution granulométrique de la poudre de marbre	99
Figure IV.5. Distribution granulométrique de la poudre de verre	100
Figure IV. 6. La courbe granulométrique du sable (0/5)	101
Figure IV. 7. Diffractogramme X du du sable	102
Figure IV. 8. La courbe granulométrique des graviers 3/8 et 8/15	102
Figure IV.9. La courbe granulométrique	103
Figure IV.10. Conservation les éprouvettes dans l'eau	104
Figure IV.11. Disposition des éprouvettes dans le four	105
Figure IV. 12. Mesure l'affaissement du béton	105
Figure IV. 13. L'airomètre	105
Figure IV. 14. Mesure de la densité du béton à l'état frais	107
Figure IV. 15. La presse hydraulique	109
Figure.IV.16. Dispositif d'essai de traction par flexion	112
Figure IV.17. Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique	113
Figure IV. 18. Essai d'absorption d'eau par capillarité.	115
Figure IV. 19. Appareil de mise en ébullition des éprouvettes (essais de porosité)	115
Figure IV. 20. Pesé hydrostatique des éprouvettes pour calculé la porosité	115
Figure IV. 21. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité	116
Figure II.22. Pied à coulisse digital	116
Figure II.23. Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements	118
Figure IV. 24. Diffractométrie X'PERT	118

Figure IV. 25. Thermogravimétrie (ATG) et (ATD)	119
Figure V.1. Evolution de la consistance normale en fonction les différents compositions	119 121
Figure V.2. Variation des temps de prises en fonction les différents compositions	121
Figure V.3. L'affaissement des bétons non adjuvantés	123
Figure V.4. L'affaissement des bétons adjuvantés	124
Figure V.5. Evolution de la masse volumique des bétons non adjuvantés à l'état frais	125
Figure V.6. Evolution de la masse volumique des bétons adjuvantés à l'état frais	125
Figure V.7. Evolution de la teneur en air occlus des bétons non adjuvantés	126
Figure V.8. Evolution de la teneur en air occlus des bétons adjuvantés	127
Figure V.9. La masse volumique des bétons non adjuvantés en fonction de l'âge	128
Figure V.10. La masse volumique des bétons adjuvantés en fonction de l'âge	129
Figure V.11. La résistance à la compression des bétons non adjuvantés en fonction de l'âge	129 129
Figure V.12. La résistance à la compression des bétons adjuvantés en fonction de l'âge	129
Figure V.13. La résistance en traction des bétons non adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge	130 130
Figure V.14. La résistance en traction des bétons adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge	130 131
Figure V.15. La masse volumique des bétons non adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge	131 132
Figure V.16. La masse volumique des bétons adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge	132 134
Figure V.17. La variation de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage de verre	134
Figure V.18. La variation de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage de marbre.	135
Figure V.19. La variation de la porosité en fonction du rapport E/C	137
Figure V.20. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 7 jours	138 138
Figure V.21. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 28 jours	139 139
Figure V.22. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 90 jours	141 141
Figure V.23. Diagramme de diffraction X du béton sans ajouts à 180 jours	141
Figure V. 24. Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de marbre à 180 jours	144
Figure V. 25. Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de verre à 180 jours	144
Figure V.26. Diagramme de diffraction X du béton adjuvanté avec ajout de marbre à 180 jours	146 147
Figure V.27. Diagramme de diffraction X du béton adjuvanté avec ajout de verre à 180 jours	148 149
Figure V.28. Observation visuelle de la surface des échantillons	149
Figure V.29. Thermogramme des pâtes durcies CEM II 42.5	150
Figure V.30. Thermogramme des pâtes durcies de CEM II 42.5 avec la poudre de verre	151
Figure V.31. Variation de l'affaissement en fonction du type de béton	152
Figure V.32. Evolution de la masse volumique des bétons à l'état frais	153
Figure V.33. Evolution de la masse volumique à l'état durci des bétons	154
Figure V.34. Evolution de la résistance en compression des différentes compositions en fonction de l'âge	154 155
Figure V.35. Evolution de la résistance en traction des différentes compositions de	

béton en fonction de l'âge	155
Figure V.36. La variation de la d'absorption d'eau en fonction des différentes compositions	156
Figure V.37. Évolution de densité des bétons poudre de verre en fonction de la température	157
Figure V.38. Évolution de la densité des bétons poudre de marbre en fonction de la température	159
Figure V.39. Evolution de la perte de masse des bétons non adjuvantés liée à la température	159
Figure V.40. Evolution de la perte de masse des bétons adjuvantés liée à la température	159
Figure V. 41. Variation de la porosité des bétons en fonction de la température	159
Figure V. 42. Variation de la porosité des bétons non adjuvantés en fonction de la température	159
Figure V. 43. Variation de la porosité en fonction de la température des béton adjuvantés	160
Figure V. 44. Variation du volume des bétons de poudre de verre en fonction de la température	161
Figure V. 45. Variation du volume des bétons de poudre de marbre en fonction de la température	161
FigureV.46. Effet de la température sur la vitesse des ondes des bétons avec le verre	162
FigureV.47. Effet de la température sur la vitesse des ondes des bétons avec le marbre	162
Figure V.48. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des pâtes de ciment après et avant les cycles de chauffage	162
Figure V.49. Échantillons de béton exposés à haute température (200 °C et 600 °C)	162
Figure V. 50. Fissuration des échantillons de béton exposés à haute température (400 et 600 °C)	163
Figure V.51. Résistance à la compression des bétons non adjuvantés en fonction de l'âge	163
Figure V.52. Résistance à la compression des bétons adjuvantés en fonction de l'âge	164
Figure IV.53. Evolution de la résistance en compression des bétons non adjuvanté en fonction de la porosité	164
Figure IV.54. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvanté en fonction de la porosité	164
Figure V.55. Evolution de la porosité des bétons avec ajout en fonction de la perte de masse	164
Figure V.56. Evolution de la porosité des bétons adjuvantés en fonction de la perte de masse	165
Figure V.57. Evolution de la porosité en fonction de la variation de volume (Poudre de verre)	165
Figure V.58. Evolution de la porosité des bétons avec poudre de marbre en fonction de la variation de volume	166
Figure V.59. Evolution de la résistance en compression des bétons sons adjuvant en fonction de la perte de masse	167
Figure V.60. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvantés en fonction de la perte de masse	167
Figure V.61. Evolution de la résistance en compression des bétons sons adjuvant en fonction de la vitesse des ondes	168

Figure V.62. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvantés en fonction de la vitesse des ondes

Figure V.63 . Diagramme de diffraction X du béton sans ajout à 180 jours

Figure V. 64 . Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de marbre à 180 jours

Figure V. 65. Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de verre à 180 jours

Figure V.66. ATG et ATD de poudre du BV10% à 600 °C

Figure V.67. ATG et ATD de poudre du BT à 600 °C

Figure V.68. ATG et ATD de poudre du BM10% à 600 °C

Introduction générale

La fabrication du ciment et du béton, comme c'est le cas pour de nombreux matériaux industriels, consomme une quantité considérable d'énergie, engendre l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre, contribue à l'épuisement progressif des ressources naturelles et entraîne la production de certains résidus que l'on doit éliminer. Afin d'assurer la croissance de ces matériaux de construction indispensables, l'approche du développement durable doit être intégrée à leur production, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales [1].

A cet effet, il est judicieux de penser à incorporer des ajouts cimentaires qui peuvent contribuer au développement durable et améliorer les performances des bétons et particulièrement ceux exposés à haute température.

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont débouché sur la mise au point d'une gamme de bétons aux nouvelles performances. Les résistances, la durabilité, l'ouvrabilité et les qualités esthétiques ont enregistré des avancées considérables. Bien que l'utilisation du béton dans le domaine de la construction ne cesse de croître, la détermination de ses propriétés reste essentiellement appuyée sur des méthodes empiriques. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne le comportement du béton à haute température [24,27].

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. Les exemples récents d'incendies de tunnels sous la Manche et du Mont-Blanc ont mis en évidence des lacunes sur la compréhension des phénomènes d'écaillage et d'éclatement du béton et motivé la communauté scientifique à étudier plus en profondeur le comportement à haute température du béton [2].

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 d'une par de son rôle de liant entre les granulats, et d'autre par de sa porosité et aussi de sa transformation permanente avec l'élévation de la température. Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années sur l'analyse, la compréhension et la modélisation des phénomènes. Cependant, des points de désaccords existent notamment en ce qui concerne les principaux facteurs de dégradation qui sont d'une part la pression de vapeur et

d'autre part les contraintes thermiques reliées à la modification des propriétés physico-chimio-mécaniques du matériau [2] .

Les ajouts cimentaires les plus utilisés sont des coproduits et sous-produits industriels, tels que la fumée de silice, les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes. Ils peuvent être incorporés dans les centrales à béton prêt-à-l'emploi ou mélangés au ciment lors du broyage du clinker pour produire des ciments composés [13]. Certains béton contiennent un volume très élevé des ajouts cimentaires en remplacement partiel du ciment afin d'améliorer la stabilité, d'augmenter le maintien de la fluidité et de limiter le dégagement de la chaleur [3, 4]. Par ailleurs, d'autres produits alternatifs ayant un potentiel pouzzolanique et/ou hydraulique émergent de plus en plus. On retrouve, notamment la poudre de verre (PV). Cette dernière est issue du broyage des déchets de verre mixte provenant de la collecte sélective des bouteilles et contenants en verre coloré [5]. On peut classer la PV comme un ajout alternatif post-consommation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ créant ainsi de nouveau C-S-H, produit essentiel de l'hydratation du ciment et élément responsable de la résistance du béton à jeune et à long terme [7,8] .

L'utilisation de la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire alternatif a fait l'objet de plusieurs recherches depuis une quinzaine d'années [6]. Ils ont montré que la PV a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes [16]. Ainsi que l'incorporation de 20 à 30 % de PV améliore l'ouvrabilité, les résistances mécaniques et la durabilité des bétons ordinaires [23; 17; 9]. Ces derniers sont souvent produits avec des ciments ternaires à base de laitier et fumée de silice ou à base de cendres volantes et fumée de silice. Cependant, on n'a pas assez de données concernant l'effet de la PV sur la rhéologie des pâtes de ciment et sur les performances à l'état frais et à l'état durci des béton ordinaires.

Le marbre est l'un des matériaux les plus importants utilisés dans les bâtiments depuis les temps anciens, en particulier à des fins décoratives. Cependant, sa poudre a de mauvais effets sur l'environnement, le sol, l'eau et les problèmes de santé. La poudre de marbre est produite à partir des usines de traitement scier et polir des blocs de marbre. Certaines usines ont des usines de recyclage d'eau contenant un réservoir de floculation et une unité de filtre-presses. Environ 25% du marbre traité est transformé en poussière ou en poudre. Environ 7000000 tonnes de marbre ont été produites dans le monde. L'élimination du matériau en poudre de marbre de l'industrie du marbre est l'un des problèmes environnementaux dans le monde aujourd'hui. [10, 11]. Comme beaucoup de nombreux chercheurs ont étudié les déchets de marbre en utilisant la poudre de marbre dans la production de ciment et de béton comme matériau de remplacement du sable ou de remplacement du ciment.

Plusieurs de recherches ont étudié le sujet de la pâte de ciment avec les adjuvants ou avec les addition. Cependant, il y a peu d'études rapportées sur l'influence du mode de murissement sur le couple ou triplet ciment-addition-adjuvant.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement la compatibilité entre les constituants de base des bétons.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des additions minérales dans la confection des bétons, et à caractériser la poudre de verre et marbre comme ajout au ciment et d'étudier son effet sur le comportement physique et mécanique du béton.

- ✓ Influence des additions sur les performances des bétons :
 - d'abord on a étudié l'impact des additions pour différents taux de substitution sur la comportement du béton.
 - influence du type et du taux des additions sur l'affaissement, la masse volumique, air occlus et les résistances mécaniques (compression et traction) pour différentes échéances (7, 14, 28, et 90 jours).
- ✓ Influence des adjuvants sur les performances physico-mécaniques des bétons contenant le poudres de verre, poudre de marbre ou les deux au même temps
- ✓ L'influence des hautes températures (20°C, 200°C, 400°C et 600°C) sur les caractéristique du béton à base de la poudre de verre, marbre sera étudiée aussi, en tenant compte de l'effet de la maturité (âge) des éprouvettes soumises aux températures élevées afin d'établir une relation entre la dégradation produite par la température et l'âge du béton. Les âges de durcissement choisis sont : 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement dans un milieu humide.

Ce mémoire s'articule sur deux parties.

La première partie c'est une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement du béton. Cette analyse est organisée en trois chapitres principales. Le premier chapitre renferme des généralités sur les bétons ainsi que les constituants adoptés pour leur formulations, a pour but principal de décrire le béton comme milieu poreux dans son état sein. Nous présentons un rappel de la microstructure du béton, des différentes formes d'eau présentes dans le béton, de l'interface pâte-granulats ainsi que les principales propriétés mécaniques du béton à température ambiante. Dans le chapitre 2, est une synthèse sur l'effet des actions des additions minérales (filler calcaires, pouzzolane, laitier de haut fourneau, verre, marbre et de la fumée de silice) et des adjuvants dans les matériaux cimentaires sont présentées afin d'éclairer en particulier la façon dont elles contribuent à l'activité liante du ciment. Un intérêt particulier a été porté à la troisième chapitre qui est un état de l'art des résultats des travaux menés sur l'étude du comportement des bétons exposés à des températures élevées. Une synthèse sur l'évolution avec la température des propriétés physiques, thermiques et mécaniques est faite en fonction des différents paramètres influençant le comportement du béton.

Dans la deuxième partie, nous présentons les formulations des différents bétons d'étude avec la nature, le dosage et les caractéristiques des constituants utilisés. Le mode

d'élaboration et de conservation de ces bétons ainsi que les différents essais de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux. Ensuite une analyse des résultats est faite dans le dernier chapitre, avec (discussions et commentaires).

Enfin, nous présentons une conclusion générale citant l'aboutissement de nos travaux de recherches ainsi que les perspectives.

Chapitre I - Généralités sur les bétons

I.1 Introduction

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière [4]. Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques [1,5].

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix [4,6] :

- Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre ;
- Sa mise en oeuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'oeuvre rapidement formée ;
- Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes ;
- Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles ;
- Sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en oeuvre ; il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer ; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies ;
- Son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence.

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (graviers et sable). Un béton contient environ (en volume) : eau : entre 14 et 22 % ; ciment : entre 7 et 14 % ; granulats (dont sable) : entre 60 et 78 %.

Pour différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport eau/ciment différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectées [2]. En effet, selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout d'additions et d'adjuvants (cendres volantes, fumées de silice, superplastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées [3].

I.2 Définition

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. Constituer à l'origine de seulement quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau) (figure I.1), leurs méthodes de formulation ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux [8, 9]. Nous abordons dans ce travail un type de béton qui est le béton ordinaire, est un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) un liant. Le liant peut être «hydraulique», il est appelé ciment.

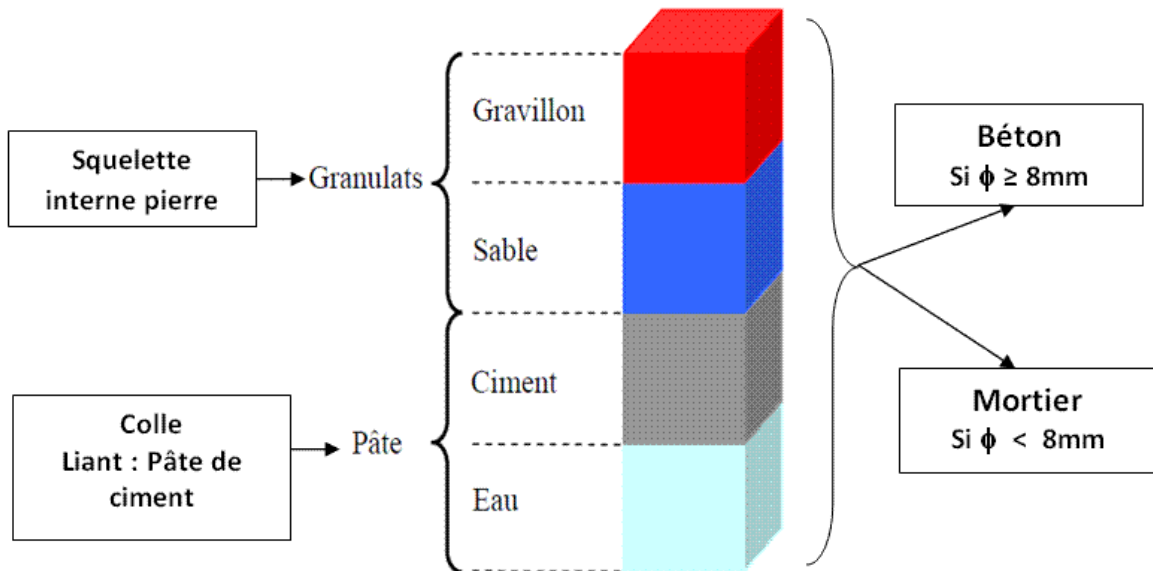


Figure I.1. Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [8]

Dans un béton, l'ordre des grandeurs en % des constituants sont en générale selon le tableau I.1 :

Tableau I.1. Pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [9]

	Eau (%)	Air (%)	Ciment (%)	Granulats (%)
Volume	14 - 22	1 - 6	7 - 14	60 - 78
Poids	5 - 9	-	9 - 18	63- 85

I.3 Constituants du béton

Le béton comprend les constituants essentiels [7]:

- 1) Le liant ;
- 2) Les granulats ;
- 3) L'eau ;

- 4) Adjuvants: éventuellement des adjuvants qui permettent d'améliorer certaines caractéristiques soit du béton frais, soit béton durci.

I.3.1 Ciments

Le ciment se présente sous la forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche. La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui mesure la surface totale des grains contenus dans un gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm²/g [11]. La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50μ. Le clinker, issu de ce procédé, est employé pour la préparation d'une majorité des ciments. Les clinkers peuvent avoir des compositions variables mais les oxydes principaux sont toujours les mêmes [12] : la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la ferrite (Fe₂O₃). Le clinker est un matériau de base auquel on peut trouver nombre d'ajouts pour la préparation des ciments, qui sont disponibles sur le marché. On peut ainsi ajouter, des cendres volantes, des laitiers de hauts fourneaux, ou encore des fumées de silice. On modifie ainsi la composition du ciment et par voie de conséquence ses propriétés (figure I.2). Les compositions sont normalisées en fonction des compositions et des mélanges (tableau I.2)

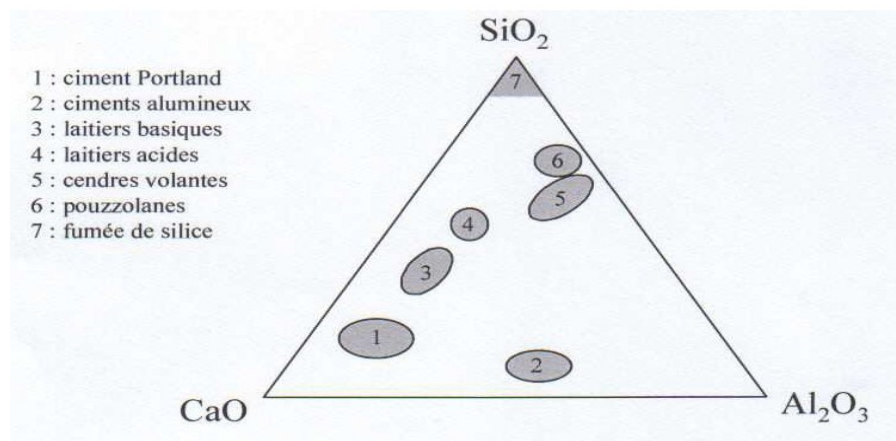


Figure I.2. Nature chimique des différents types de ciment [10]

Un ciment est constitué de phases anhydres qui vont s'hydrater en présence d'eau. C'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation du ciment [24, 27]. Le clinker, constitutif de l'essentiel de ce que l'on nomme un ciment Portland, peut être pris en exemple pour décrire le processus d'hydratation. Dans le cas de ciments dits « mélangés », les réactions sont identiques, seules vont changer les proportions ou certaines stoechiométries des hydrates formés [13, 27].

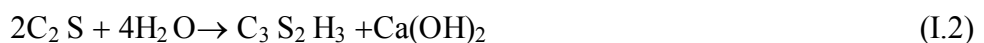
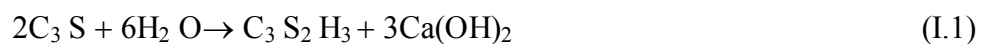
Au contact avec l'eau, les phases anhydres du clinker, notamment les silicates tricalciques (C₃S) et bicalciques (C₂S), se dispersent en solution aqueuse pour donner différents ions tels que Ca⁺², OH⁻, SiO₄ H₂⁺², SiO₄ H₃⁻, SiO₇ H₄⁺². Une fois que leur seuil de

solubilité est atteint, ces anhydres se combinent en molécules hydratées par précipitation puis nucléation. Ce sont des réactions exothermiques car elles mettent en jeu beaucoup d'énergie.

Tableau I.2. Classification des ciments selon la norme EN 206 [10]

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B
Clinker (K)	95%	80% ≤ 94%	65% ≤ 79%	35% ≤ 64%	20% ≤ 34%	5% ≤ 19%	65% ≤ 90%	45% ≤ 64%	40% ≤ 64%	20% ≤ 39%
Laitier (S)	*	6% ≤ total ≤ 20% (fumée de silice ≤ 10%)	21% ≤ total ≤ 35% (fumée de silice ≤ 10%)	36% ≤ 65%	66% ≤ 80%	81 V 9%	*	*	18% ≤ 30%	31% ≤ 50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*	10% ≤ total ≤ 35% (fumée de silice ≤ 10%)	36% ≤ total ≤ 55% (fumée de silice ≤ 10%)	18% ≤ total ≤ 30%	31% ≤ total ≤ 50%
Cendres siliceuses (V)	*			*	*	*				
Fumée de silice (D)	*			*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

La pâte fraîche obtenue se présente comme un système dispersé de grains de silicates [13, 14]. Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau selon [17, 23, 25] :



Les deux hydrates principalement formés sont les silicates de calcium hydratés de la forme $C_3S_2H_3$, notés « CSH » et la portlandite $Ca(OH)_2$ symbolisée CH . D'autres composés mineurs sont également formés durant l'hydratation, tels que des hydroxydes d'aluminium, des aluminates de calcium hydratés ou de l'ettringite [15].

La quantité d'eau apportée durant la fabrication du matériau est généralement supérieure à la quantité utile à l'hydratation complète du ciment, pour favoriser la maniabilité à l'état frais. Cependant, avec l'avancée de l'hydratation, le cheminement de l'eau jusqu'aux phases anhydres est gêné par les hydrates déjà formés [21, 20]. Ainsi, même si elle ralentit considérablement, l'hydratation se poursuit dans la microstructure du matériau par diffusion de l'eau. La quantité d'eau est généralement rapportée à la quantité de ciment et cela est noté rapport eau sur ciment (E/C). Plus le matériau présente un E/C faible, plus sa matrice cimentaire est dense. De ce fait, le rapport E/C est un paramètre qui influence la microstructure se formant durant l'hydratation [22, 16].

1.3.2 Les granulats

Les granulats (gravillon et sable) forment les quelettes du béton . Les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. Pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, le choix de l'agrégat s'avère alors très important. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des bétons à l'état frais et durci [18, 16].

Les granulats constituent la phase dominante du béton, (70% du volume) et se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques [31]. Ils vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton. Le granulat est généralement composé de fillers, de sable, de gravier, de pierres concassées, de galets ou de cailloux (selon sa dimension) [32]. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de gravier d'origine alluvionnaire, terrestre ou maritime, en concassant des roches massives, ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition [19, 16].

1.3.3 Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet

industriel, eau de mer, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques [28].

1.3.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés en faibles quantités au béton frais afin d'en améliorer certaines propriétés. Ils représentent entre 1 et 5 % du poids du ciment. Leur rôle et leur efficacité dépendent de la nature du produit chimique et de l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton frais [30, 59].

a) Mode d'action

Leur action est différente d'un adjuvant à un autre en contact des grains de ciment. D'une manière générale, les adjuvants enrobent le grain de ciment pendant l'hydratation pour augmenter une charge négative sur la surface de la particule de ciment. Nous détaillerons plus bas, certaines réactions des différents adjuvants avec le ciment.

b) Classification des adjuvants

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960 [33]. Leur qualité et leur constance s'améliorent sans cesse. Selon des recherches statistiques [33], la majorité des bétons utilisés en Amérique du nord contiennent au moins un adjuvant. Au Japon comme en Australie, 80 % des bétons confectionnés contiennent des adjuvants, tandis qu'en Allemagne cette valeur est de 60 %.

Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques selon leur composition chimique, mais leur caractère chimique, distinct de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du béton, est essentiel. Ainsi, dans la nomenclature Américaine on les appelle adjuvants chimiques, mais ici cette qualification est superflue, car les produits minéraux incorporés dans le béton, dont la teneur est souvent supérieure à 5% de la masse du ciment, sont appelés liants ou ajouts.

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

➤ **Plastifiants** : Les plastifiants (ou fluidifiants) sont les adjuvants les plus utilisés dans la production du béton. Ils ont la propriété de rendre plus facile la maniabilité du béton, et donc, à maniabilité égale, de réduire fortement la quantité d'eau de gâchage et d'augmenter donc la résistance du béton (en diminuant le rapport E/C). Un plastifiant réduit le rapport eau/ciment de l'ordre du 5% ; lorsqu'il est nécessaire d'obtenir des réductions du rapport E/C de l'ordre de 20 - 40% on parle d'adjuvant super-plastifiant [34].

➤ **Superplastifiant**: sont des adjuvants à haut pouvoir de réduction d'eau. Ils ont pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils

permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35% tout en gardant une même maniabilité [33].

L'action d'un superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. En se fixant sur les grains de ciment, elle modifie la nature des charges électriques. Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entoure d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un grain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton. Dans certains cas, l'ajout du superplastifiant est directement additionné dans la toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet (figure I.3).

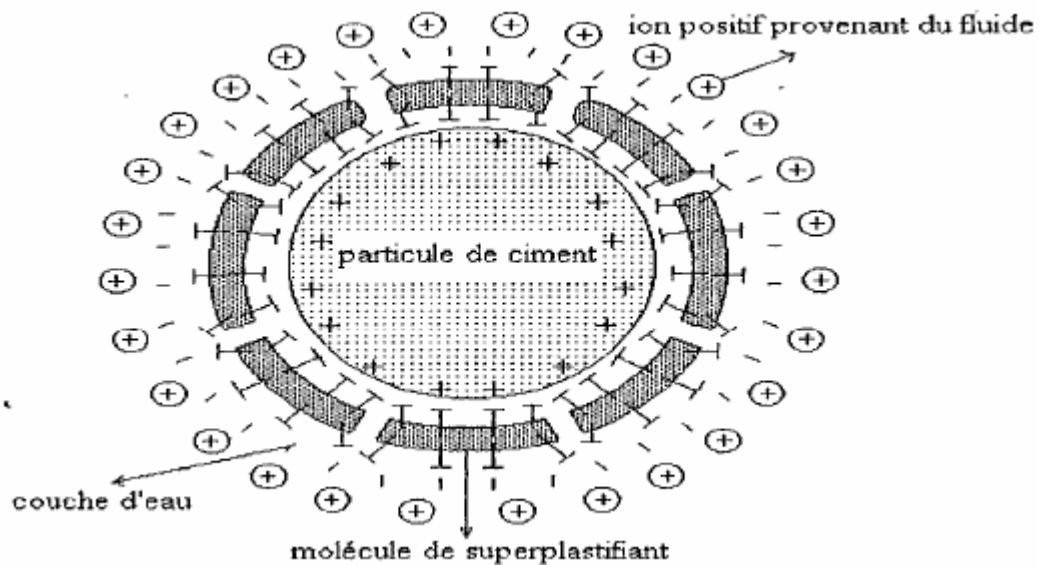


Figure I.3. Mode d'action d'une molécule de superplastifiant [60].

Le superplastifiant est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximum. Il suffit de reconnaître que les adjuvants en général et les superplastifiants en particulier, s'ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels pour des bétons durables. Il est possible enfin de confectionner des bétons imperméables et résistants aux agents chimiques grâce aux adjuvants et un rapport E/C très bas (≤ 0.35). Bien sûr, il ne faut pas aussi négliger le temps de mûrissement d'un béton. Cette étape est aussi importante que la confection du béton lui-même. Nous verrons plus loin les moyens et les méthodes utilisés pour la protection des bétons frais.

➤ **Retardateurs de prise :** Les retardateurs de prise sont des molécules organiques qui empêchent la nucléation du CSH [60]. Les adjuvants retardateurs sont souvent des mélanges de :

- 1) Lignosulfonates : Ce sont des sous produits de la cellulose obtenus par un procédé au bisulfite dans le traitement du bois. Leur taux élevé en sucre (xylose) est la raison de l'effet retardateur.
- 2) Gluconate de sodium : retardateur très actif $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COO Na}$
- 3) Gluconate de Calcium
- 4) Acide citrique
- 5) Le borax
- 6) Les sucres (glucose, saccharose...etc).

Mode d'action

Les retardateurs peuvent agir en diminuant la vitesse d'hydratation de certains constituants anhydrides des ciments. En se précipitant autour des grains de ciment ou en formant avec la chaux des précipités enrobant certaines parties des grains anhydrides (CaSO_4). Il y a donc une formation d'une enveloppe plus ou moins imperméable et d'épaisseur variable.

Le retardateur va dépendre alors :

- ✓ de l'épaisseur de l'enveloppe
- ✓ de son imperméabilité
- ✓ de sa composition (de l'enveloppe créée par l'adjuvant)
- ✓ du pH du milieu

L'action va dépendre surtout de la teneur en C_3A et C_3S , des alcalins et des sulfates dans le ciment.

➤ **Accélérateurs de prise:** C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment. Mais en contrepartie, l'accélération recherchée peut entraîner une résistance mécanique moins élevée que le témoin.

Les adjuvants chimiques sont des produits solubles dans l'eau et le plus souvent d'origine minérale : acide ou base forte et leurs sels.

Ils agissent en modifiant sélectivement la solubilité et la vitesse d'hydratation des liants constituant anhydrides. Certains accélérateurs sont plus efficaces avec un ciment portland qu'avec un ciment en forte teneur en constituants secondaires (CPJ).

➤ **Entraîneurs d'air:** L'air entraîné dans le béton a été remarqué accidentellement pour la première fois au USA vers les années 1938. Ces adjuvants, qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de micro-bulles d'air réparties de façon homogène [36].

Les bulles d'air doivent être nombreuses, suffisamment petites (60 et 100 μ) et réparties uniformément dans la masse, pour pouvoir, plus tard, servir de «barrage» dans le

réseau des canalicules. Elles pourront éventuellement recueillir l'eau et la glace remontant par capillarité. L'air occlus permet aussi :

- a) D'améliorer la maniabilité du béton;
- b) De diminuer le ressuage.

Mais il est important de souligner que l'addition d'un entraîneur d'air dans le béton, diminue :

- Les résistances mécaniques de béton .
- Le pourcentage d'air occlus dans le béton ne doit pas dépasser 6%.
- L'adjuvant est introduit directement dans la bétonnière pendant le malaxage du béton .

L'influence des adjuvants peut varier sensiblement en fonction de la nature et de la composition du ciment ; des problèmes de compatibilité peuvent apparaître entre adjuvants et ciments [37].

1.3.5 Les additions

Selon la norme NF EN 206-1 ; une addition est un « matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ». Les additions minérales sont aussi connues par leur influence sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci, et améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'addition, elles améliorent aussi la granulométrie», qui est un remplissage par les éléments les plus fins (de taille inférieure à 80 μm) des vides laissés par les éléments les plus gros (sables) et éventuellement, une contribution directe à la résistance par la formation d'hydrates, en général à long terme [40] .

1.4 Eau dans la microstructure du béton

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.

1.4.1 Eau libre dans les capillaires

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 (2005), démontre que pour une vitesse de montée en température fixée à 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, seulement 3 % l'eau s'évapore à 100 $^{\circ}\text{C}$, alors qu'elle augmente à 9 % lorsque cette vitesse est réduite à 0,2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ [121]. 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.

1.4.2 Eau adsorbée

L'eau est dite absorbée 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.

➤ 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 [66]. 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 [103]. 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.

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 [68], dite de disjonction. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction qui s'exerce entre particules solides des C-S-H 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.

➤ Eau adsorbée chimiquement

L'eau est adsorbée chimiquement lorsqu'elle est combinée à d'autres composants dans les hydrates [103]. 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.

1.4.3 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 C-S-H, R. Sierra (1980) identifie trois grandes classes d'eau dans les C-S-H, et les présente suivant l'ordre décroissant des énergies de liaisons [80]. Ainsi nous retrouvons l'eau hydroxylique, l'eau inter - feuillet et l'eau inter – lamellaire.

- 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 ;
- 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 ;
- 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 Diamond [13] seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible.

I.5 Propriétés des bétons

1.5.1 Propriétés physiques

a) Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et de ferrailage [47]. C'est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au être d'Abrams (norme NF P 18-451) et l'essai d'étalement à la table à secousses ; mais les essais Vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [48,49].

b) Retrait

C'est une diminution dimensionnelle du béton en absence de chargement, due à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment. Le retrait est le raccourcissement d'un élément en béton dû à une perte en eau. On distingue quatre types de retrait :

- ✓ Le retrait plastique dû à la dessiccation de la pâte de ciment en début de prise.
- ✓ Le retrait par auto-dessiccation au cours de l'hydratation.
- ✓ Le retrait thermique causé par les différences de température au cours de l'hydratation.

- ✓ Le retrait à long terme causé par l'évaporation de l'eau contenue dans le béton. Il est en général de 2% à 5% de la longueur totale.

c) Fluage

Le fluage est une déformation due aux contraintes auxquelles est soumis l'objet. Une partie de la déformation temporaire devient lentement permanente. Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau viscoélastique. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Le fluage représente environ 4% à 6% de la longueur totale [50].

d) Porosité

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telle sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. La porosité ouverte est considérée comme un indicateur de durabilité pertinent pour une large gamme de dégradations. En effet, elle conditionne les échanges entre le matériau et son milieu environnant. Ces pores sont surtout les capillaires continus qui contribuent au transport des espèces chimiques au sein de la structure poreuse. La porosité ouverte interconnectée est donc particulièrement liée aux propriétés de transfert dans le béton, notamment la perméabilité à l'eau [43]. Il y a trois types de pores : les pores fermés, les pores accessibles à l'eau non interconnectés et les pores accessibles à l'eau interconnectés (figure I.4).

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les propriétés physiques et mécaniques du béton.

La porosité est essentiellement fonction du rapport E/C du béton. Il a été démontré que pour un béton donné, la seule réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22, réduit d'un facteur 3 le

volume total des pores capillaires.

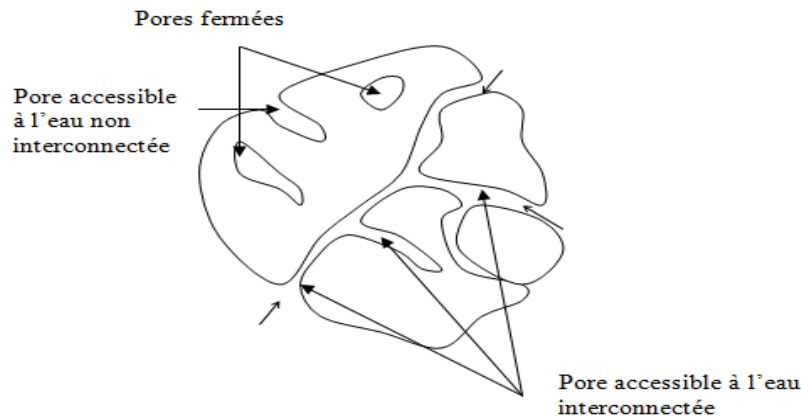


Figure I.4. Illustration des différents les types de porosité dans un système cimentaire [51].

1.5.2 Propriétés mécanique du béton

Le béton se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, généralement considérée comme sa propriété importante, et par la résistance à la traction. Cette partie permet de présenter un aperçu du comportement mécanique du béton à température ambiante sous sollicitation de compression et de traction.

1.5.2.1 Résistance à la compression

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés. Le comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la (figure I.5). On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement [52] :

- Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation ;
- La phase de développement de la microfissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte.

La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.

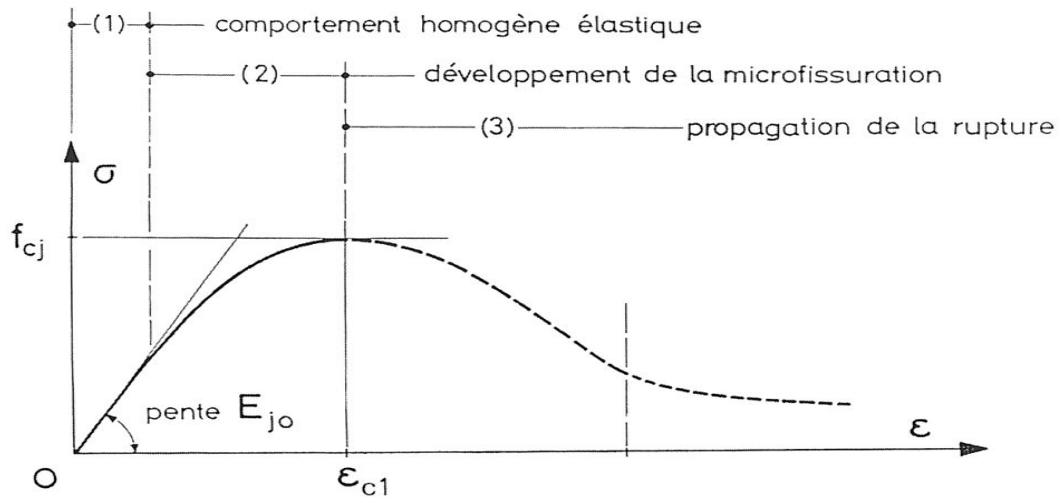


Figure I.5. Courbe contrainte-déformation en compression simple [52].

I.5.2.2 Résistance à la traction

C'est le second paramètre de base, avec la résistance en compression, qui caractérise les propriétés mécaniques du béton. La (figure I.6) présente la courbe contrainte-déformation pour le béton en traction simple [52,3].

Dans la première phase, le comportement est quasi linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale, cette charge maximale correspond à la formation d'une fissure. Juste avant l'apparition de la fissure visible, il y a un endommagement diffus dans une bande de faible largeur autour de la future fissure, qui explique une petite non-linéarité précédant la charge maximale. Après l'apparition de la fissure, la force décroît rapidement lorsque l'allongement croît jusqu'à s'annuler [54,1].

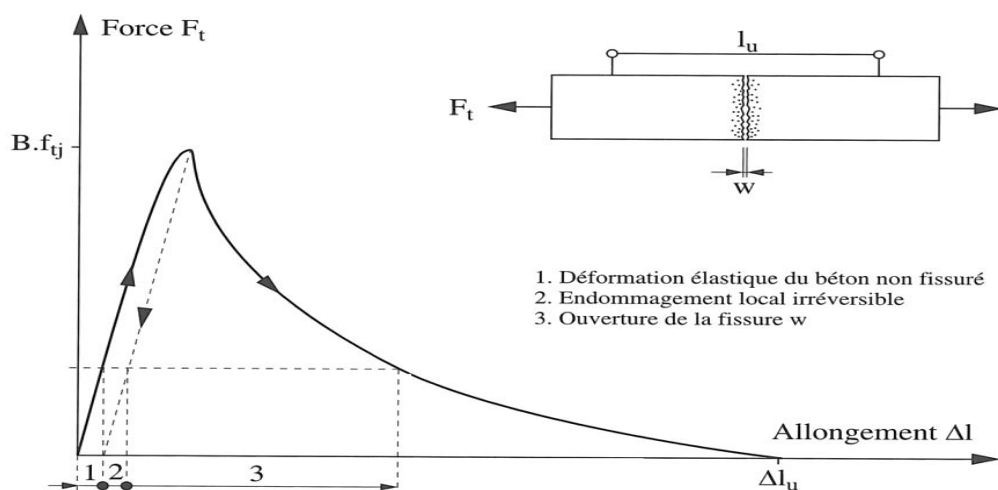


Figure I.6. Comportement du béton en traction simple [53].

I.6 Méthodes de formulation des bétons

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés désirées et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Généralement, la formulation sera orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées.

I.6.1 Les trois principes de formulation des bétons ordinaires

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre trois objectifs principaux :

- Obtenir une résistance mécanique : Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression;
- Obtenir une rhéologie : Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier;
- Limiter les effets secondaires : Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important, le coût du béton doit rester le plus bas possible et toutes les propriétés seront améliorées lorsque le squelette granulaire est de compacité maximale.

Une formule donne un béton qui présente au mieux des propriétés désirées et satisfasse aux essais de convenance pour tel ouvrage sur tel chantier, avec ses matériaux et son matériel et dans les conditions pratiques de l'exécution [55].

I.6.2 Quelques méthodes de composition des bétons

Les méthodes de composition aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux », le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac. Ces méthodes dont on retiendra 2 archétypes :

- Celle qui consiste à obtenir une granularité « continue »;
- Celle qui consiste à obtenir une granularité « discontinue ».

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes, dont notamment :

I.6.2.1 Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) ; dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100-A) \sqrt{d} / D \quad (I.3)$$

Avec :

P: est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D: est le diamètre du plus gros grain

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue [56].

I.6.2.2 Méthode de Faury

Faury proposa une nouvelle loi de granulation de type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $5\sqrt{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$), des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $5\sqrt{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est une valeur tabulée en fonction de types des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Y, se calcule par la formule suivante [55] :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75} \quad (I.4)$$

A : valeur tabulée

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

D : est exprimé en dimension de passoire.

R : est le rayon moyen du moule .

I.6.2.3 Méthode de Valette

R.Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». La méthode Valette

proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Dans les cas les plus courants on parlera en général d'un béton binaire : un sable et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité (par exemple : sable 0/5 et gravier 16/25).

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en oeuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment [58,3].

1.6.2.4 Méthode Dreux-Gorisse

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E , ciment C , sable S , gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E , C et E , le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats [2,3].

1.6.2.5 Méthode de Joisel

Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus généralisant. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $m\sqrt{D}$, où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant $m\sqrt{D}$ comme graduation des abscisses, Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire [60].

I.7 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie

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

pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable [62].

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid (figure I.7), la tour est resté debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu a démarré au 21^{ème} étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé [63].



Figure I.7. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie.

À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [63].

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003. Une température de 750 °C a été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles [63].

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000 °C. On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100 °C. Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [64]. Cette

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

Conclusions

La qualité d'un béton dépend de son constituant qui a une influence sur son comportement à l'état frais et ses caractéristiques mécaniques à l'état durci.

Le béton c'est un matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles.

Cependant, et vue son indispensabilité dans le domaine de la construction, le matériau béton a été et reste toujours sujet à de multiples travaux d'étude et de recherche. Même si l'avancée est jugée considérable, les études d'adaptation et de formulation s'avèrent nécessaires à travers quelques études présentes dans la littérature, on peut dire que :

- ✓ D'après la littérature, il n'est pas aisé de dégager des règles générales d'emplois de combinaison de ciments, additions et d'adjuvants dans les mortiers ou bétons ; cela vient de la disparité des objectifs des scientifiques, de ce que leur travail vise à caractériser, ou rechercher des propriétés particulières, de l'abondance des paramètres de composition, de matériaux locaux.
- ✓ Elle permet de dégager une problématique importante concernant la compatibilité entre les différents constituants du béton. La formulation des matériaux durables, reste actuellement une des difficultés majeures à son développement et son utilisation.
- ✓ Les différentes méthodes de composition du béton sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats. Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important.

Chapitre II - Les additions minérales

II.1 Introduction

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajouté directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives.

De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton [83]. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

Il a été prouvé que l'introduction des minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux [85].

Les fillers utilisés sont très souvent d'origine minérale. Leur principal intérêt est de diminuer le coût global du matériau. Le taux de substitution au ciment peut atteindre 30% [84]. Dans certains cas, ils peuvent modifier la rhéologie du béton frais, tout en exerçant un rôle de comblement de la porosité. Ils interviennent alors en tant qu'ajout par rapport au liant dans la composition du béton. Cette utilisation nécessite la présence d'un adjuvant organique dont la fonction principale est d'éviter le surdosage en eau tout en conservant la maniabilité du béton.

II.2 Rôle de l'ajout cimentaire

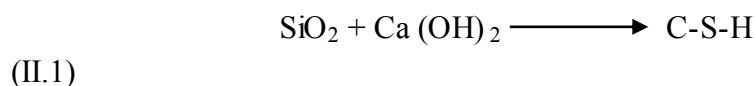
II.2.1 Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. Le rôle propre du super plastifiant est essentiellement la défloculation (grâce à sa propriété dispersante), ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [88].

II.2.2 Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C_3S et C_2S (30 % de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu où la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage [96].

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-H-S, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [85,88]. Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



II.3 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme NF EN 197 1, les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau (II.1) ci-dessous.

Tableau II.1. Classification des ajouts selon leur réactivité [87].

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, , terres à diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II.3.1 Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à $60\mu\text{m}$ ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la

pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière [12].

II.3.1.1 Fillers calcaire

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes cc). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent;
- Leur finesse, la forme des grains et leur état de surface;
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutent à un CPA. Ils peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau);
- Rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle;
- Rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates: germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates;
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [100].

II.3.1.2 Fillers de Marbre

Le marbre est une roche calcaire de texture assez dense, à tissu compact ou cristallin. Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Ces couleurs proviennent essentiellement d'oxydes métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il est provient uniquement composée de calcite.

Certains types des marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2.7. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils

existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

Les produits marbrières algérienne sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- ✚ Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières;
- ✚ Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur (figure II.1), souvent veiné de couleurs variées. Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée.

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches préexistantes par une chaleur intense ou/et de très fortes pressions [97].

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect: il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite (figure II.2).



Figure II.1. Gisement de marbre



Figure II.2. Poudre de marbre

II.3.1.2.1 Composition minéralogique

Le marbre contient surtout de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la bauxite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont facilement rayés par le canif, ce qui sert à les distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques.

Le marbre blanc est une roche de calcaire très pur « CaCO_3 », aussi c'est une calcite, qu'elle est l'un des minéraux les plus communs avec la dolomite représente 22% des roches sédimentaires soit 273 millions de kilomètres cubes de roches carbonatées. Pendant très longtemps la calcite n'était connue que sous son nom de spath calcaire ou de chaux carbonatée. Peut-être est-ce Haidinger qui lui a donné le nom de calcite sous lequel elle est maintenant universellement connue [26].

II.3.1.2.2 Utilisation

Du fait de sa résistance, de sa durabilité, de son aptitude au façonnage, de son adaptabilité architecturale et de son aspect esthétique, le marbre constitue depuis les temps historiques un important matériau de construction. L'industrie du marbre comprend deux branches principales: le marbre taillé et le marbre concassé et broyé. Le terme marbre taillé s'applique aux marbres exploités pour obtenir des blocs ou des plaques répondant à des spécifications de dimensions et de forme. Les fragments de marbre concassés et broyés vont des gros blocs aux granulés fins; on les utilise, par exemple, comme agrégats, ballasts, éclats pour toiture, charges, pigments, matériau pour le chaulage, ...etc [33].

II.3.1.2.3 La poudre de marbre dans les bétons

La poudre de marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, ajout cimentaire alternatif de couleur blanche, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, extraite par abattage à l'exploitation, des moellons de dimension variant de (80-100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir une poudre finement broyée. L'utilisation de la PM comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [Dr. B. Krishna Rao, (2016); R. Chaid et al., (2011); Li Yijin, (2010); N. Schwarz et al., (2008); A. Taha et al, (2008)]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

♦ *L'état frais*

L'utilisation du déchet de marbre est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton dans le monde entier notamment en Turquie.

Peu des travaux traitant l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre (PM) sur les bétons ont été publiés. R. Chaid et al, ont étudié l'effet des PM sur les propriétés des béton. Ces auteurs ont trouvé qu'une teneur en PM de 200 (kg/m^3) est appropriée pour améliorer les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci [72].

Li. Yijin et al. ont montré que l'introduction de PM dans les mortiers par substitution partielle au ciment conduit vers l'augmentation du temps d'écoulement et le temps du début et

de fin de prise [144]. La composition optimale est celle du béton est de 30% d'ajout de poudre de marbre et 1,5% de super plastifiant. Sur la base de cette donnée une autre compagne expérimentale a proposée pour valoriser la poudre de marbre en la comparant au calcaire (ajout connu et beaucoup exploité). Il s'avère qu'une la masse volumique à l'état frais des bétons (PM) est supérieure à celle des bétons (FC), mais dans les deux cas, elle augmente en augmentant la SSB.

A. Talah et al, le comportement des deux bétons pendant l'écoulement ; l'ajout de la poudre de marbre influe positivement sur l'écoulement du béton tout en maintenant constant la quantité d'adjuvant et le même rapport E/C pour les deux échantillons [146]. Ce résultat est dû à l'effet de correcteur rhéologique que joue la poudre du marbre [144].

♦ *L'état durci*

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers marbre sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers marbre contribuent à la formation de monocarboaluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation. Les auteurs rapportent qu'avec le filler marbre, il y a une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge due à l'effet accélérateur et à l'effet filler du marbre. On note que pour une finesse de 300 à 350 m^2/kg , il y a seulement l'effet filler.

A. Shayan et A. Xu (2004), ont étudié la performance de la poudre de marbre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. Les résistances en compression de béton avec ajout de poudre de marbre de granulométrie très serrée élaboré dans le cadre de nos travaux et quel que soit l'échéance, sont toutes supérieures au béton de contrôle. Nous avons donc affaire à des bétons de hautes performances. Cette qualité n'est en rien affectée par le milieu environnant.

II.3.2 Les ajouts minéraux actifs

II.3.2.1 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [68]. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

1. Pouzzolane naturelle

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

2. Pouzzolane artificielle

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite. On classe les pouzzolanes en trois catégories [68]:

- ✓ Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées;
- ✓ Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites;
- ✓ Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.

II .3.2.2 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, l'dioxyde de silicium (SiO_2) se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 [100,12].

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice.

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en Silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 .

La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe - Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85%. Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.03\mu\text{m}$ et $0.3\mu\text{m}$ (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de $0.1\mu\text{m}$), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron.

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse.

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés

mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique.

La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumé de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible.

Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3.1. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise [101]. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- ✓ Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en Général pour des raisons d'économie;
- ✓ Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durcis [101].

Tableau II. 2. Compositions chimiques de la fumée de silice [100].

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2

II.3.2.3 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion

d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique tableau (II.3), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément.

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ✓ Broyage poussé;
- ✓ Chaleur (étuvage, autoclavage);
- ✓ Produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

Tableau II.3. Composition typique de laitier de haut fourneau [78].

Oxydes	Laitier français	Laitier USA	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7
S	1.5	-	0.15

II.3.2.4 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (II.4) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup [103].

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires. Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- ❖ Les cendres silico- alumineuses (cendre de houille).
- ❖ Les cendres sulfocalciques (cendre de lignite).
- ❖ Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1 μm et 100 μm , leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m^2/kg . La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium. D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces [101].

Tableau II.4. Composition chimique de certains types de la cendre volante [101].

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo- calcique	Sulfo- calcique
SiO ₂	59.4	47.4	36.2	24	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	6.2	6.4	17	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1	1.8
Na ₂ O	2.2	0.4	2.2	0.8	-
SO ₃	2.4	1.5	2.8	8	15.1
PAF	2.0	1.5	0.6	-	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	-	-	-	-	28

II.3.2.5 La poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm²/g. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

II.3.2.6 Le verre

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent [102],[103].

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité

l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études [104], [105].

II.3.2.6.1 Définition du verre

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux présentent une meilleure illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés tel que : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin.

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial.

On obtient un verre, la silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées. Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (figure II.3).

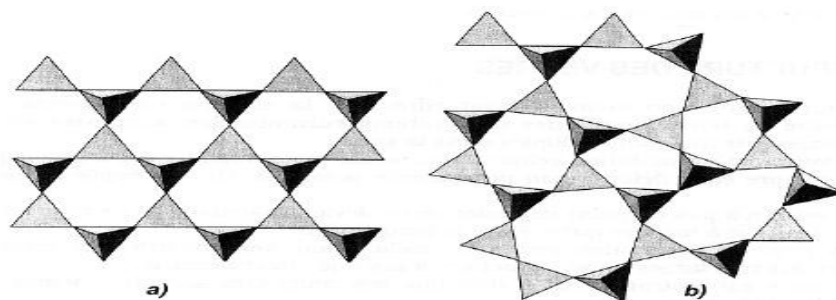


Figure II.3. a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par Zachariasen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions [106].

En 1921, Lebedev avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés.

La théorie de Zachariasen décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages SiO_4 de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite. Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. Zachariasen a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes :

- La coordinance du cation doit être petite ;
- Un ion oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations ;
- Les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces ;
- Trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (figure II.4), proche de celui d'un liquide qui tend à se cristalliser. La cinétique de cristallisation est en général suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.

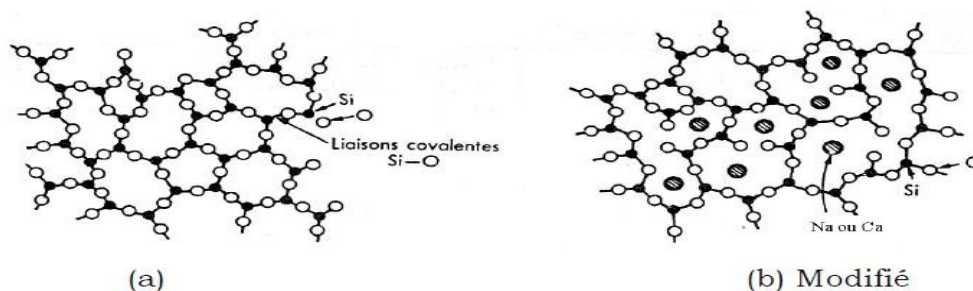


Figure II.4. (a) L'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na_2O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique [107].

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent : un tel atome est appelé oxygène portant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule M_2O , comme Na_2O et K_2O ou des alcalino-terreux de formule MO , comme CaO et BaO . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de $1730\text{ }^\circ\text{C}$ à $1400\text{ }^\circ\text{C}$ (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées [85]. Avec Na_2O nous avons (figure II.5).

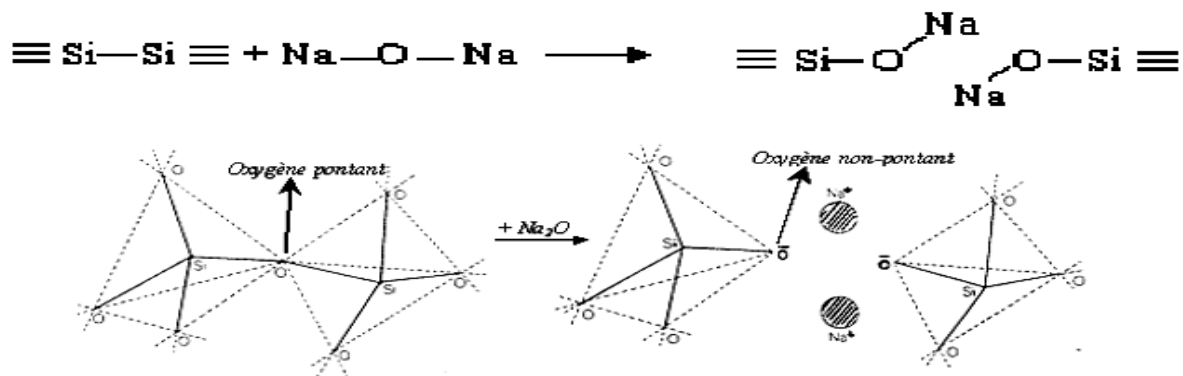
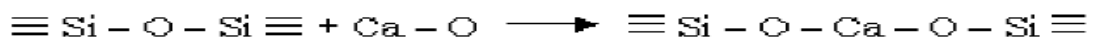


Figure II.5. Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na_2O [108].

La présence de Na_2O provoque l'interruption des liaisons du réseau continu non cristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entraîne un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts Si - O - Si.



L'introduction de CaO entraîne l'existence d'ions O^{2-} liés au silicium d'un seul côté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison $\text{Ca} - \text{O}$ est considérablement plus forte que la liaison $\text{Na} - \text{O}$ à cause de la bivalence de l'ion Ca^{2+} de sorte que les deux oxygènes non portants se trouvent en quelque sorte liés à travers l'ion Ca^{2+} [107].

II.3.2.6.2 Composition du verre

Le verre est le résultat de la fusion d'un mélange de plusieurs composants chimiques. On classe les éléments constitutifs du verre en fonction de leur rôle dans son élaboration [109].

a) Vitrifiant

Constituent la base du verre. Le vitrifiant le plus utilisé en grande quantité dans la nature, est le sable. Le verre de silice pure existe, mais sa réalisation est très complexe, car sa fusion ait lieu aux environs de 2000°C . Elle nécessite l'emploi de réfractaires spécial, de beaucoup de combustible, et de techniques de mise en forme particulière. Autant de contraintes qui en font un produit très onéreux et réservé à un usage bien spécial, notamment en laboratoire [121].

b) Fondants

Leurs principal rôle est d'abaisser la température de fusion du sable en se combinant à lui. Les principaux sont l'oxyde de sodium (Na_2O), l'oxyde de Potassium (K_2O) qui permet d'abaisser le point de fusion et contribuent à augmenter la plasticité à chaud. En trop grande proportion, ils entraînent une moindre résistance chimique du verre [110].

c) Stabilisants

Sans eux, le verre pourrait se dissoudre dans l'eau, et serait altéré par les agents atmosphériques. On utilise le plus souvent la chaux (CaO), introduite sous forme de craie dans le mélange vitrifiable. Cette chaux joue le rôle d'un stabilisant et évite la cristallisation au refroidissement. En théorie, ces trois constituants mélangés en proportions adéquates, suffisent à l'obtention d'un verre. Mais dans la pratique, on lui adjoint d'autres éléments en fonction des caractéristiques que l'on veut obtenir [110].

d) Affinant

L'élimination des bulles gazeuses générées par les réactions chimiques lors de la fusion s'effectue plus rapidement et de manière plus complète grâce à ces substances, elles se décomposent à haute température en dégageant un grand volume de gaz. Les grosses bulles entraînent les petites, brassent le verre en l'homogénéisant. Les plus utilisés, sont les nitrates (de potasse, de soude, de soufre) et l'arsenic [112].

e) Colorants

Leur dénomination définit bien leur rôle qui est la coloration du verre. Par exemple, on sait que la principale impureté contenue dans le sable est l'oxyde de fer, suivant les proportions relatives d'oxyde ferreux et ferrique, le verre sera coloré soit en vert, en jaune, ou en bleu. Par contre pour éliminer cette coloration, il faut ajouter un décolorant en l'occurrence de l'oxyde de manganèse. L'oxyde de cuivre et le cobalt couvrent la gamme des bleus. Le cristal est obtenu par le remplacement de l'oxyde de sodium par de l'oxyde de plomb (24 à 32%) [113].

En résumé, la composition chimique dépend de la nature du verre, de sa couleur et de sa dureté, mais dans la majorité des cas, les éléments essentiels qui rentrent dans la composition du verre sont donnés dans le tableau (II.5) :

Tableau II.5. Composition chimique du verre [113].

Sable (SiO_2)	68 à 74 %
Soude (Na_2O)	12 à 16 %
Chaux (CaO)	7 à 14 %
Potasse (K_2O)	(K_2O) 1 %
Alumine (Al_2O_3)	0,3 à 3 %
Oxyde d'antimoine (SbO)	0,3 à 3 %

II.3.2.6.3 Utilisation du verre dans le béton

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciable de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement partiel du ciment Portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré.

En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables décideurs et ceux-ci ont encouragé de nouvelles études [113], [114].

Le pourcentage d'utilisation du verre broyé par substitution dans la matrice cimentaire peut varier selon la disponibilité du verre et les performances voulues du béton. La résistance en compression pour certains ouvrages peut être une référence du pourcentage utilisé, sans omettre la durabilité qui est devenue une autre obligation pour la qualité des bétons d'aujourd'hui. Au fur et à mesure que l'utilisation des autres ajouts cimentaires traditionnels occupait une place importante dans l'industrie du béton, des travaux en parallèle sur les ajouts cimentaires alternatifs apparaissent, soit en les combinant avec les ajouts cimentaires tels que, la fumée de silice, les cendres volantes dans des systèmes ternaires ou avec le ciment portland tout seul dans des systèmes binaires [113].

Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

II.3.2.6.4 Effet du taux de verre

TY. Shi et al. ont étudié l'ouvrabilité du béton au laitier des hauts fourneaux en modifiant sa teneur en verre par un procédé de traitement et observent que l'ouvrabilité augmente avec le taux de substitution et d'autant plus avec celui ayant une plus grande phase vitreuse comme le montre la (figure II.6). Bien que les particules fines d'une addition minérale soient moins réactives que les grains de ciment, elles génèrent une multitude de sites de nucléation pour la précipitation des hydrates. La pâte devient plus homogène et plus dense avec des pores plus fins [119].

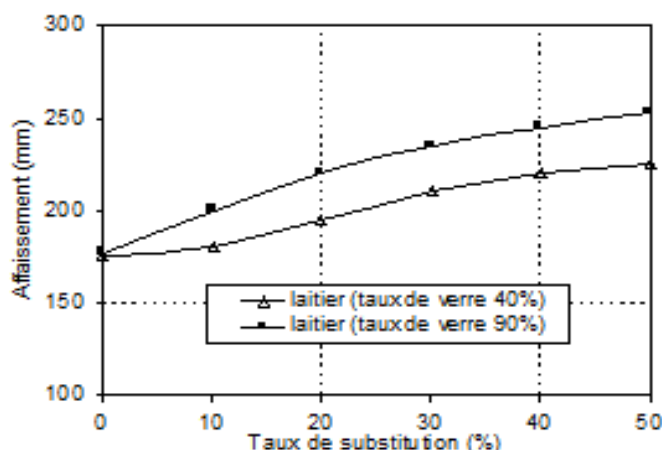


Figure II. 6. Effet du taux de substitution sur l'ouvrabilité du béton au laitier pour deux taux de verre [119].

II.3.2.6.5 Comportement du verre dans un milieu cimentaire

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique [99].

❖ Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG et DRX. La (figure II.7) rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin.

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique;
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente;
3. L'activité é pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leur couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.

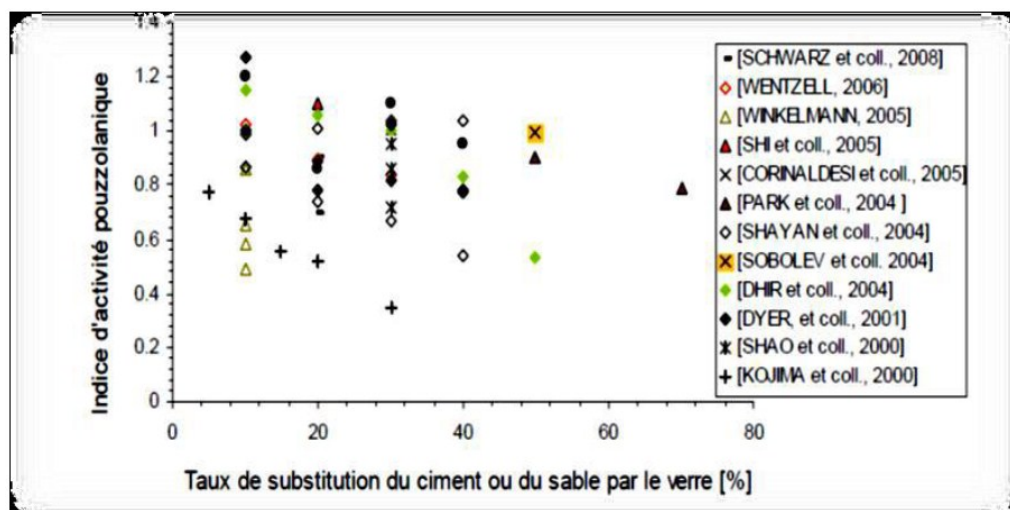


Figure II.7. Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [99].

❖ Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante : en effet, dans le cas du verre, celui apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affiche une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante [105]. Les travaux de TY. Shi et al., (2005), viennent confirmer également cette tendance.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante [109]. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

❖ L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [110], [111].

❖ Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel du granulats naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions.

Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres, la bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

❖ L'activité des fines et des granulats de verre

Le verre peut présenter deux types de comportements dans une matrice cimentaire: la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. La réaction alcali-silice qui est délétère, généralement associée aux grosses particules, est liée à la formation de gels composés principalement de silice et d'alcalins (Na et K) avec de faibles quantités de calcium (qui ont tendance à augmenter avec le temps). Les résultats des variations dimensionnelles de la première partie ont montré qu'un diamètre critique (ou seuil) autour de 0.9-1mm (classe C2) a été observé au-dessous duquel aucune expansion n'a eu lieu. Seules les grosses particules (classes C1 > 1.25 mm) conduisent à une expansion significative des éprouvettes. Les particules de taille inférieure à ce seuil n'ont aucun effet sur les variations dimensionnelles. Néanmoins dans ce cas, l'absence de gonflement n'est pas synonyme d'absence d'alcali-réaction. En effet, des signes de RAS sous la forme d'exsudations ont été aperçus sur la surface des éprouvettes contenant des particules de verre supérieures à 315µm. Des observations au microscope électronique balayage (figure II.8) ont confirmé la présence de gels de RAS sur ce type de mélanges. La classe C4 (160-315µm) est la finesse de transition : aucun gel de RAS n'a été détecté, cependant il est à noter que ce type de gel est difficile à détecter lorsque les particules sont de petites tailles en raison du gel qui se diffuse dans la pâte. Ainsi, la RAS ne peut pas être écartée pour les particules fines, mais la réaction pouzzolanique (avec de plus fortes teneurs en calcium que les gels de RAS) est probablement majoritaire. La coexistence des deux réactions ne peut être exclue, mais l'effet de la réaction pouzzolanique prend le dessus sur la RAS dans le cas des fines particules [108].

La réaction pouzzolanique est généralement associée à de fines particules amorphes qui, en réagissant avec le ciment, forment des Silicates de Calcium Hydratés (C-S-H*) avec de faibles rapports Ca/Si (<1.4). Ces C-S-H sont capables de fixer une quantité importante d'alcalins comparés à des C-S-H classiques (Ca/Si ~1.7) issus de l'hydratation du ciment. En présence de fortes concentrations en alcalins, ces C-S-H avec de faibles rapports C/S ont tendance à avoir une composition proche de C-(N, K)-S-H, avec des rapports (N+K)/S supérieur à 0.2. D'une part il semblait évident, considérant l'augmentation significative des

résistances en compression dans le temps, que les classes les plus fines (C6, C8) présentent une activité chimique.

D'autre part, de légères augmentations de résistance en compression ont été également obtenues pour les grosses particules de verre (figure II.9). Dans ce cas, l'augmentation des résistances ne peut être attribuée à un effet physique, comme la germination associée à de fines particules, étant donné la taille des grains. Ainsi on peut supposer qu'une activité chimique (i.e réaction pouzzolanique) des grosses particules ne peut être négligée [108].

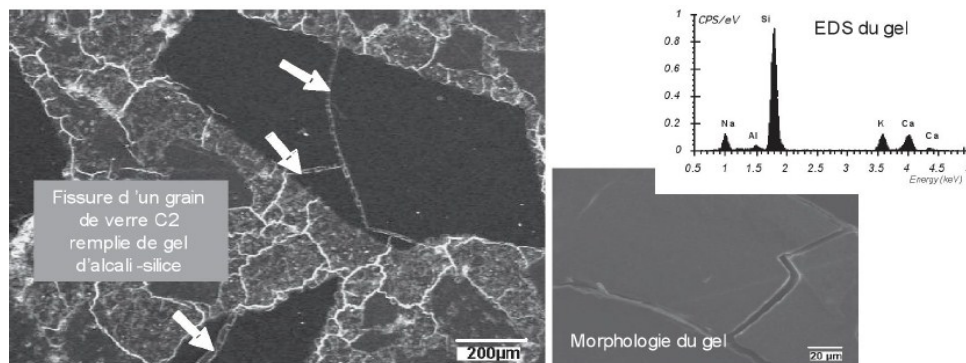


Figure II.8. Particule de verre fissurée (classe C2) remplie de gel de RAS (cure 60°C- 100% HR) [108]

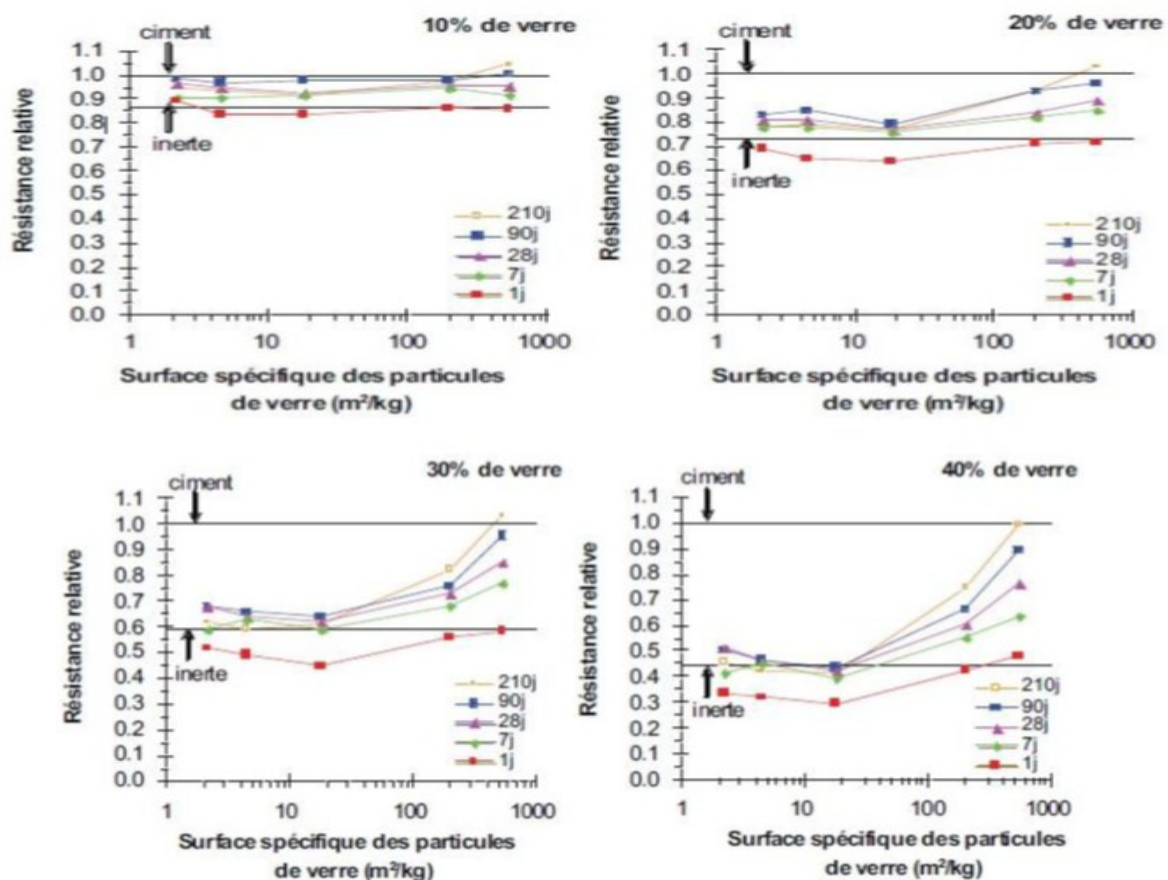


Figure II.9. Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre [108].

❖ Étude de la pouzzolanité

La (figure II.10) présente les résistances en compression des mortiers contenant les différentes classes de verre. Comme on peut le constater, les résistances dépendent de la finesse et de la teneur en verre. Des résistances importantes sont obtenues pour les particules les plus fines (C8), avec des valeurs dépassant parfois celles de la référence sans verre quel que soit le taux de remplacement utilisé (jusqu'à 40 %). Néanmoins, la tendance générale est que le remplacement du ciment par le verre conduit à une baisse de résistance en compression, principalement en raison de l'effet de dilution.

Le calcul des courbes de dilution a été effectué par la loi de Bolomey (Equation 1), en considérant uniquement la quantité de ciment utilisée dans les mortiers (par exemple 10 % de verre signifie que seulement 90 % de ciment peut contribuer au développement de la résistance).

$$\sigma = K_b \left(\frac{C}{W+V} - 0.5 \right) \quad (\text{II.3})$$

Où σ est la résistance à la compression du mortier, C, W et V sont respectivement les masses du ciment (sans tenir compte du verre), d'eau et des vides (pris égale à 10 % de la teneur en eau), et K_b est un coefficient qui prend compte la nature du ciment et des granulats. Ce coefficient a été calculé pour chaque échéance en utilisant la résistance en compression du mortier témoin sans verre [108].

La (figure II.10) présente les résistances relatives (rapport des résistances des mortiers avec et sans verre) jusqu'à 210 jours pour tous les mortiers avec verre en fonction de la surface spécifique du verre. Les courbes inertes ont été calculées avec la loi de Bolomey (Equation 1). On peut remarquer que jusqu'à 30 % du verre, les résistances relatives sont plus élevées que les courbes inertes (sauf pour 1 jour), ce qui signifie qu'il y a une activité non négligeable pour toutes les tailles de particules de verre, y compris les plus grossières. A 1 jour et pour une teneur de 10 % de verre, l'effet de la finesse est limité, toutes les classes de verre ont des résistances relatives comparables à la courbe de dilution. Seule la classe la plus fine se détache des autres courbes à long terme (90 et 210 jours). Cela signifie que le ciment peut-être remplacé par n'importe quelle taille de verre sans pour autant nuire à l'activité, la résistance relative restant toujours supérieure à 0.9 dans tous les cas. Avec 20, 30 et 40% de verre, un changement progressif de comportement, lié à l'effet de taille du verre est observé. Cet effet devient plus important avec l'augmentation de la teneur en verre.

- 1- La résistance relative des mortiers avec les grosses particules (C1, C2 et C4) tend vers la courbe inerte mesure que la teneur en verre augmente : 20% de verre reste toujours meilleur que la courbe inerte mais 40 % de verre se comporte, au mieux, comme un matériau inerte. Cela signifie que pour une teneur en verre de 40 %, les résistances des classes C1, C2 et C4 sont uniquement dues au ciment, sans aucun effet perceptible de l'activité du verre.

- 2- Une activité pouzzolanique importante, qui semble évoluer dans le temps pour les deux classes plus fines (C6 et C8), est mise en évidence par l'augmentation de la résistance relative en fonction du temps. A 210 jours, la résistance relative reste autour de un pour les mortiers-C8 contenant jusqu'à 40 % de verre [110].

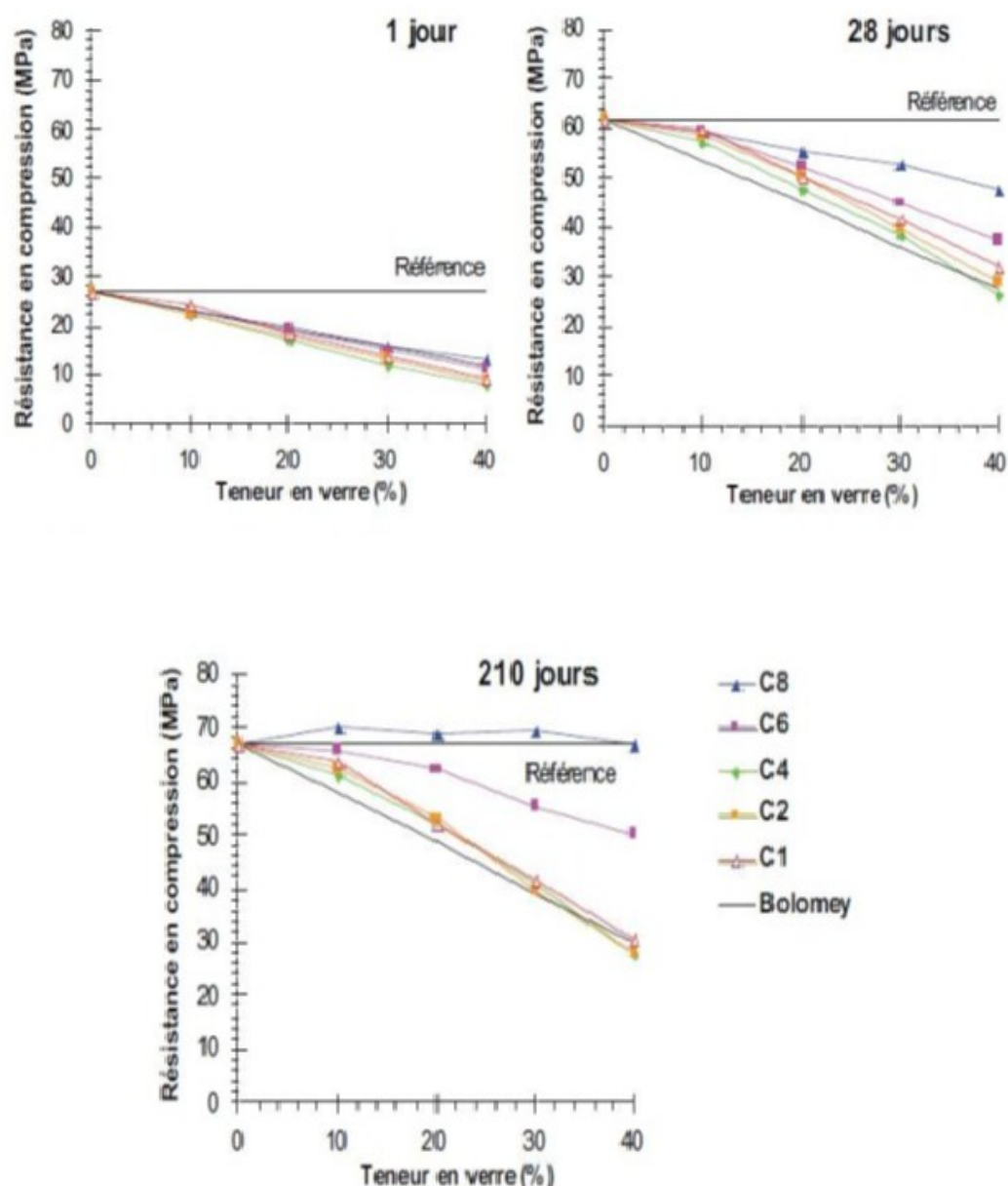


Figure III.10. Résistances en compression des mortiers conservés à 20°C contenant jusqu'à 40% de verre de différentes finesses [104].

II.3.2.6.6 L'influence de poudre de verre sur les propriétés des bétons

♦ A l'état frais

L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [N. Schwarz (2008); R. Idir et al., 2011; Y. Shao et al., (2000); A. Shayan (2004) et Y. Xu (2001); T. Shi et al, (2005); A. Taha, (2008); A. Zidol, (2009)]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

L'effet de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. A. Zidol (2009) a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un béton ordinaire ayant un rapport E/C = 0,5, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la porosité de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre [182]. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de SP requis pour un étalement donné.

♦ A l'état durci

Il est démontré que la poudre de verre à une pouzzolanicité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes [16]. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps. Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de PV en remplacement partiel du ciment [103]; [16]; [17]; [182].

A. Shayan et Y. Xu (2001), ont étudié la performance de la poudre de verre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. La finesse de la PV que les auteurs australiens ont utilisé est le double de celle du ciment GU, soit 800 m²/kg. Les bétons étudiés sont formulés afin d'atteindre une résistance à la compression de 40 MPa à 28 jours. Le remplacement partiel du ciment est de 20 – 30 % de PV et 10 % de FS. Le béton témoin est dosé à 380 kg/m³ de GU. Il s'avère qu'avec 20 % de PV, la résistance visée à 28 jours est atteinte. Cependant avec 30 % de PV ce n'est qu'à partir de 90 jours que la résistance atteint 55 MPa.

II.3.2.6.7 Avantages d'utilisation de la poudre de verre dans le béton

- ✓ Béton plus performant, moins perméable et plus durable ;
- ✓ Substitution de matière polluante par du verre recyclé ;
- ✓ Coûts de transformation et de transport réduits ;
- ✓ Empreinte écologique réduite ;

- ✓ Nouvelle filière pour le recyclage du verre [58].

II.4 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons

II.4.1 L'ouvrabilité

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance. Plusieurs recherches confirment que l'ouvrabilité des bétons avec laitier granulée est plus grande que celle des bétons ordinaires. Cette amélioration est due à la surface caractéristique des particules de laitier qui sont en fait dense, lisse et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation.

Certaines additions minérales augmentent la quantité de superplastifiant nécessaire pour maintenir une ouvrabilité constante comme rapporté par M. Nehdi et al [109]. L'amélioration de la fluidité du mortier apportée par la présence du calcaire conforte celle obtenue par plusieurs auteurs [116,117] telle que pour un dosage constant en ciment ou un rapport E/C constant, l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Yahia et al. [108], où l'ajout du filler calcaire provoque une augmentation de la viscosité plastique lorsque le dosage est supérieur à une certaine valeur critique. Ceci est attribué aux particules fines du filler calcaire, qui améliorent la distribution granulaire des grains, remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier et augmentent la compacité du mélange. Par conséquent, la quantité d'eau qu'occupaient ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité.

Récemment, l'utilisation de la poudre de calcaire comme matériau de remplacement a été étudiée. M. Touguay et al, ont constaté que la maniabilité des ciments et des mortiers contenant des fines calcaires est affectée d'une manière très sensible, elle passe de 55 % pour le béton de contrôle (0 % d'ajout calcaire) à 45 % pour une teneur de 10 %, et atteint 36 % pour 20 % de fines (figure II.11) [106].

Kwan AKH, ont étudié l'influence de pourcentage de l'ajout pour la fabrication des bétons, la (figure II.12) présente que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant [112].

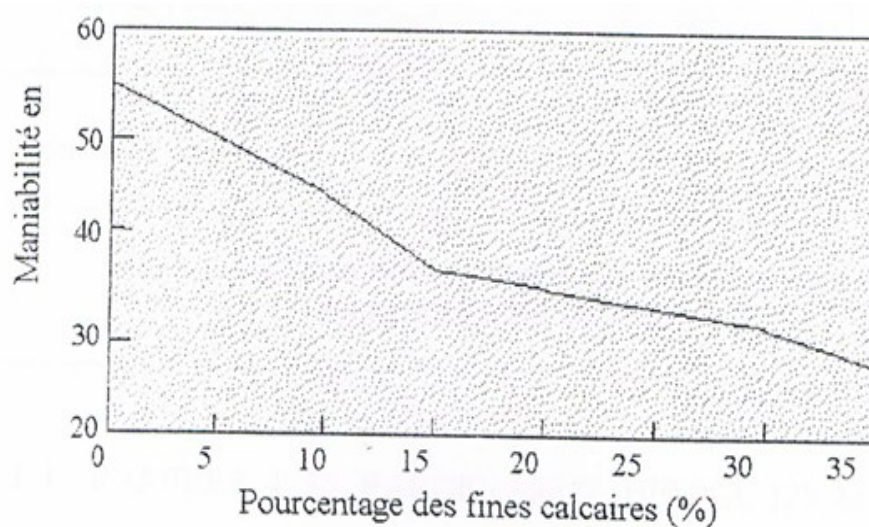


Figure II.11 .Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires [112].

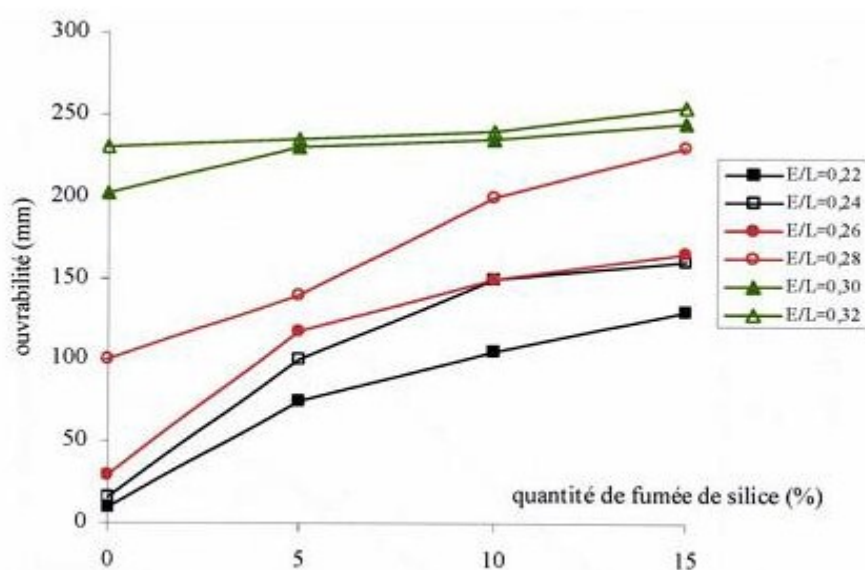


Figure II.12. Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant [112]

II.4.2 Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

II.4.3 Résistance mécanique

Le rôle des additions minérales dans un système cimentaire dans un premier temps est d'améliorer la résistance à la compression grâce à leur finesse et leur réaction pouzzolanique. De nos jours, l'addition minérale la plus efficace du point de vue de la résistance mécanique est la fumée de silice. Issue de l'industrie du silicium et ferrosilicium, la fumée de silice possède une excellente finesse avec une taille des particules inférieure à $1\ \mu\text{m}$ et une surface spécifique de $13000 - 30000\ \text{m}^2/\text{kg}$. Plusieurs recherches ont montré une augmentation de la résistance mécanique des mortiers en présence de la fumée de silice. [120], [121].

Plusieurs auteurs ont conclu que l'ajout des fines aux mortiers et aux bétons, engendre une chute des résistances qui n'est pas très importante lorsque la teneur en fine n'excède pas 20 %, Les (figure II.13) et (figure II.14) suivantes illustrent les résistances obtenues en fonction de la quantité pour les deux additions minérales, à toutes les échéances. L'examen de ces figures, nous montre que le béton à base de 20 % de l'addition a développé les plus faibles résistances par rapport à 10 %. La résistance du béton avec additions augmente jusqu'à un certain contenu (10 %) de l'ajout au-delà duquel la résistance a été diminuée. Il montre à 10 %, de plus hautes résistances ont été réalisées à partir de 7 jours. Toutefois, la variation n'est pas assez élevée si on tient compte de l'écart des résistances à la compression [122].

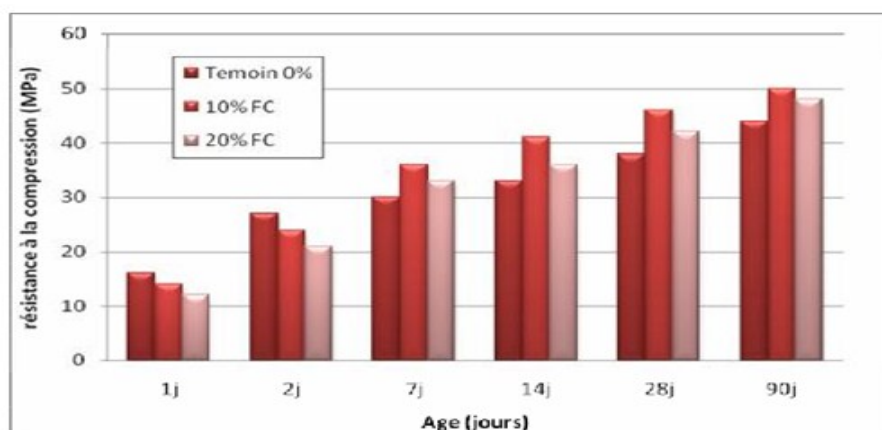


Figure II.13. Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les deux taux de substitution de filler calcaire [122]

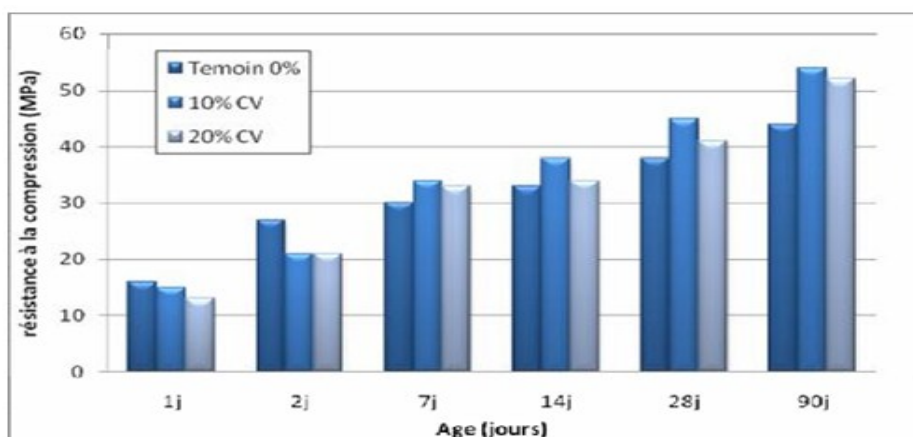


Figure II.14. Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge Pour les deux taux de substitution de cendre volante [122]

II.4.3 Retrait

Plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer évolution du retrait du mortier et béton durci en fonction du taux d'ajout .C. Jin et I. Jawed, ont étudié l'influence de pourcentage de l'ajout cimentaires substitués à une partie de ciment pour la fabrication des bétons, le retrait doit être minimisé, ce comportement paradoxal peut s'expliquer comme suite [117], [118]:

- ♦ Les résistances mécaniques des pâtes des ciments hydratées diminuent et le retrait de séchage/gonflement augmentent proportionnellement avec la quantité d'alcalins rentrants dans la composition chimique et cela même avec une teneur optimale en SO_3 [124].
- ♦ La diminution du pH par la consommation des ions OH^- et la neutralisation des charges négatives de la silice dissoute favorisent la polymérisation.

Le produit de réaction est alors un silicate alcalin gélatineux. La pénétration des alcalins dans la structure entraîne une augmentation de volume, réduit la force mécanique, augmente probablement le retrait de séchage et le gonflement du produit de réaction [123].

II.4.4 Module d'élasticité

Plusieurs travaux de recherches, ont montré que les bétons avec le dosage poudre de marbre ont une module d'élasticité moins élevée que celle d'un béton ordinaire. La (figure II.15), montre que l'augmentation du pourcentage de poudre de marbre a augmenté la module d'élasticité du béton d'environ (2,8 % et 11,5 %) pour un taux de poudre de marbre de (2,5 % et 5 %) comparé au béton témoin à des essais de l'âge à 28 jours. À 56 jours tests, l'augmentation du module d'élasticité était (6,2 %, 12 % et 4,6 %) pour la teneur en poudre de marbre (2,5 %, 5 % et 7,5 %) respectivement à 56 jours d'essais [113]. L'augmentation des taux de poudre de marbre dans le béton de (7,5 ,10, 12,5, 15, 17,5 et 20 %) a diminué le module d'élasticité d'environ (2, 10,7, 11,1, 11,5, 12,7 et 14,2 %) respectivement à 28 jours. A

56 jours d'essais, l'utilisation du rapport poudre de marbre dans le béton (10, 12,5, 15, 17,5 et 20 %) a diminué le module d'élasticité d'environ (7,7, 8,5, 14,3, 9,7 et 11 %) respectivement. Le module d'élasticité s'est amélioré avec le temps en augmentant le taux de poudre de marbre dans cette recherche, comme le montrent le (figure II.15).

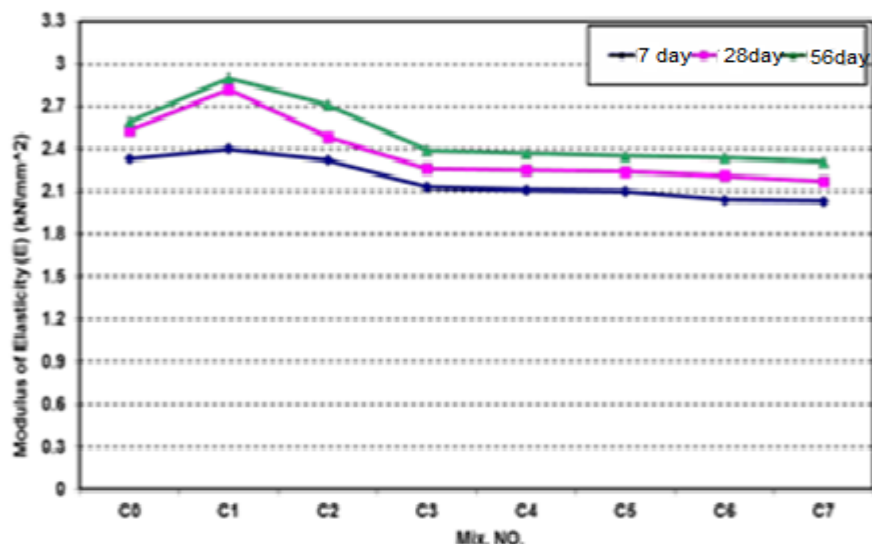


Figure II.15. Module d'élasticité (E) pour tous les mélanges à différents âges [113].

CONCLUSION

Les additions minérales peuvent être utilisées dans le béton pour améliorer certaines de ces propriétés ou pour lui conférer des propriétés nouvelles. En effet, l'action des additions minérales peut être distinguée suivant trois effets principaux : un effet granulaire, un effet physico-chimique et microstructural, un effet chimique.

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment et comment cette contribution liante est prise en compte dans les méthodes de formulation des bétons avec additions.

Chapitre III - Effets de la haute température sur le béton

III.1 Introduction

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de forte modification physico-chimique qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques et modifie sa microstructure. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats (la matrice cimentaire et les granulats) engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température. Les résultats issus de différentes investigations sur le comportement du béton exposé à des hautes températures, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres. Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes [103].

III.2 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées

III.2.1 Déformation thermohydrrique libre du béton

La pâte de ciment se dilate jusqu'à la température de 150 °C. Cette dilatation est supérieure à celle des granulats, donc les fissures se développent à l'interface pâte/granulats par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150 °C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Cette dilatation différentielle engendre des fissures radiales au sein de la matrice cimentaire [84]. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. La figure (III.1) présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température.

Les travaux de Gaweska, 2004 [132] sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700 °C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton. Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700 °C à 1000 °C.

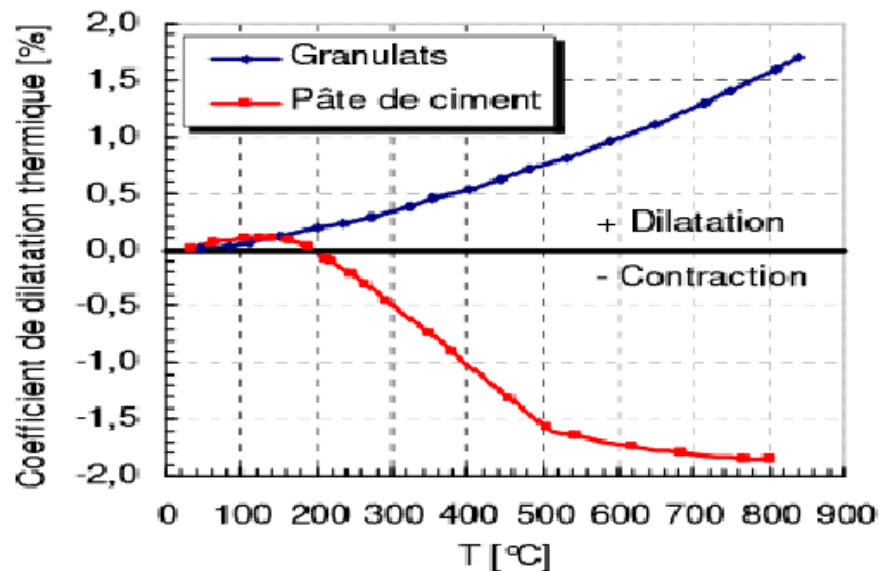


Figure III.1. Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température [138].

III.2.2 Evolution de la matrice cimentaire

Au sein du matériau béton se déroulent de nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques plus ou moins rapides. Ainsi tout au long de la vie du béton, celui-ci est sensible aux conditions d'humidité et de température de son environnement qui modifient ses caractéristiques macroscopiques (durabilité, résistance...) [123].

L'élévation de la température entraîne les processus suivants :

- ✓ Entre 30 °C et 120 °C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent [122],et aussi une Décomposition de l'étrangerité et son élimination complète avant 100 °C [123].
- ✓ Entre 130° C et 170 °C : le gypse se décompose [122].
- ✓ En dessous de 100 °C jusque 400 °C le gel C-S-H se déshydrate essentiellement en β -C₂S,
 β - CS et en eau. entre 450 °C et 550 °C : décomposition de la Portlandite selon l'équation [122] :



- ✓ Autour de 570 °C : transformation des granulats quartziques de la phase α a la phase β . Ceci S'accompagne d'un gonflement.
- ✓ Entre 600 °C et 700 °C : deuxième phase de déshydratation du gel C-S-H.
- ✓ A partir de 650 °C : décomposition endothermique du calcaire selon l'équation :



- ✓ A partir de 1300 °C : début de fusion de la pâte et des granulats, éliminations des sulfates et évaporations des alcalins[119].

III.2.3 Evolution des granulats

Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Sous l'effet de la température, les granulats se décomposent et subissent également des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro-structurelles du matériau.

Généralement, la majorité des granulats utilisés pour la confection des bétons est stable jusqu'à 500 °C [120]. La figure (III.2) présente les résultats d'une analyse thermique différentielle (ATD) qui permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats.

Les granulats siliceux contiennent approximativement 20 % d'eau liée. Entre 120 °C et 600 °C, cette eau est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. En effet, le quartz présent dans les granulats siliceux est un édifice de tétraèdres (un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène) qui subit une légère rotation des liaisons pour former une structure cristalline de symétrie hexagonale à partir d'une température de 575 °C. Cette variation de structure chimique de quartz (transformation du quartz- α en quartz- β) est accompagnée d'une dilatation de l'ordre de 1% à 5,7% [123], [124]. Ces deux phénomènes peuvent provoquer l'endommagement de la structure du béton.

Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 650 °C [124]. Au-delà de cette température, le CaCO_3 se décompose (décarbonatation) en donnant du dioxyde de carbone (CO_2) et du monoxyde de calcium (CaO). Pendant le refroidissement, la chaux libre (CaO) peut réagir avec l'humidité pour donner la Portlandite Ca(OH)_2 avec une augmentation de volume de 40 %. Cette réaction entraîne un accroissement de fissure et l'endommagement de la structure du béton, qui peut expliquer la diminution des résistances mécaniques résiduelles pour les bétons de granulats calcaires chauffés au-delà de 700 °C [123].

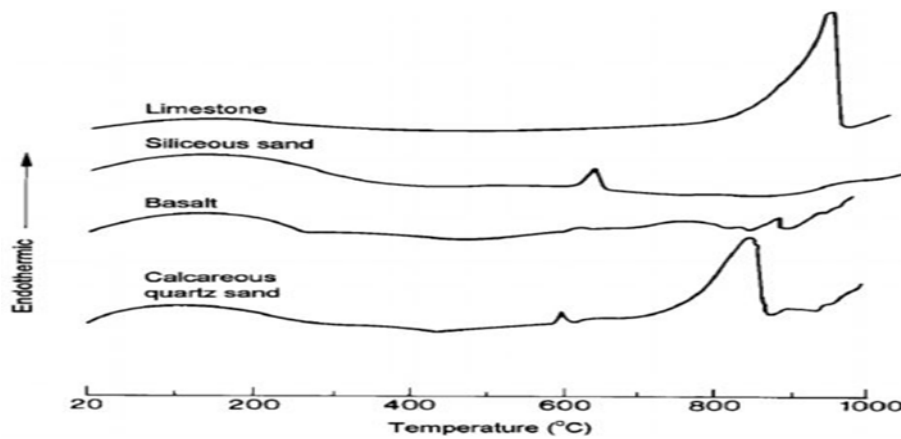


Figure III.2. Courbes ATD de quatre types de granulats (10 °C/min) [123].

III.3 Evolution des propriétés physiques

Les phénomènes entraînés par la variation de température ont des conséquences sur les propriétés de transfert du béton. La perméabilité et la porosité évoluent sous l'effet de la température. Multiples travaux ont démontré l'augmentation de ces deux paramètres après l'exposition du béton à hautes températures [122], [140], [138], [124].

Les interactions entre les propriétés physiques et mécaniques sont évidentes, par exemple, la croissance de la porosité et de la perméabilité induit, dans la majorité des cas, une diminution de résistance mécanique du matériau.

III.3.1 Evolution de la porosité

La porosité d'une pâte de ciment est fortement modifiée avec la température. D'après L. Alarcon-Ruiz [120], elle passe de 22% pour un échantillon non chauffé à 40% pour un échantillon chauffé à 600°C. La synthèse des résultats obtenus par différentes hauteurs, L. Alarcon-Ruiz [120], S. Y. N. Chan [121], A. Noumowé [122], C. Alonso [123] et G.I. Hager [124], indique que la porosité totale du béton augmente avec la température. La (figure III.3) montre la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par A. Noumowé [122] sur un béton ordinaire ($R_c = 38,10$ MPa) et un béton de haute performance ($R_c = 61,10$ MPa).

Nous pouvons observer que la porosité totale augmente très peu entre la température ambiante et des températures de l'ordre de 120°C. Ceci confirme le fait qu'à ces températures l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. A partir de 120 °C, l'augmentation de la porosité est plus nette du fait de l'apparition de microfissures.

Ces microfissures peuvent avoir pour origine la déshydratation de la pâte de ciment et l'incompatibilité de déformation des granulats et la pâte de ciment [123].

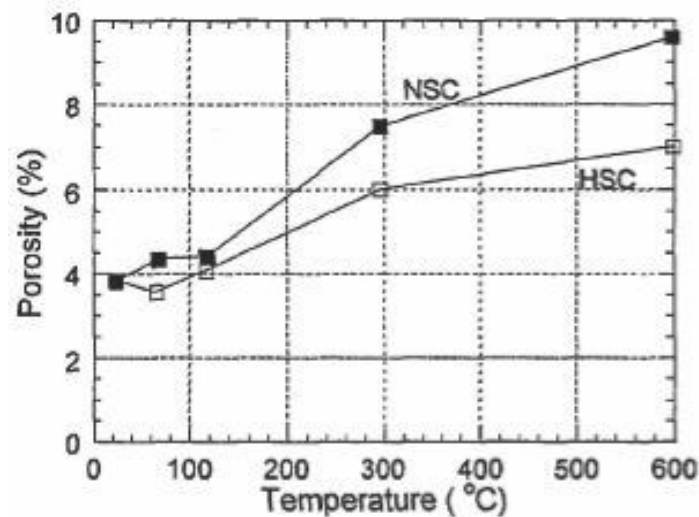


Figure III.3. Evolution de la porosité du béton avec la température [122].

III.3.2 Evolution de la perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laissé traverser par un fluide sous un gradient de pression [125]. Bien que cette perméabilité dépend fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructivité du réseau poreux liée à la taille des pores, la perméabilité du béton dépend également de ses constituants [127]. Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement lié à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition. Les résultats expérimentaux, M. Kanema [125], A. Noumewé [122], ont montré que la perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100 °C. La (figure III.4) présente la variation de la perméabilité intrinsèque résiduelle du béton en fonction de la température obtenue par M. Kanema et al. [125]. Ils constatent que la perméabilité des bétons diminue à 150 °C pour augmenter de manière exponentielle pour des températures supérieures. Ils attribuent la baisse de la perméabilité intrinsèque résiduelle à 150 °C à la présence d'eau sous forme liquide dans les pores. L'augmentation de la perméabilité constatée entre 150 et 300 °C est attribuée à un élargissement des pores capillaires tandis que celle observée entre 300 et 450 °C est due à une détérioration de la matrice cimentaire.

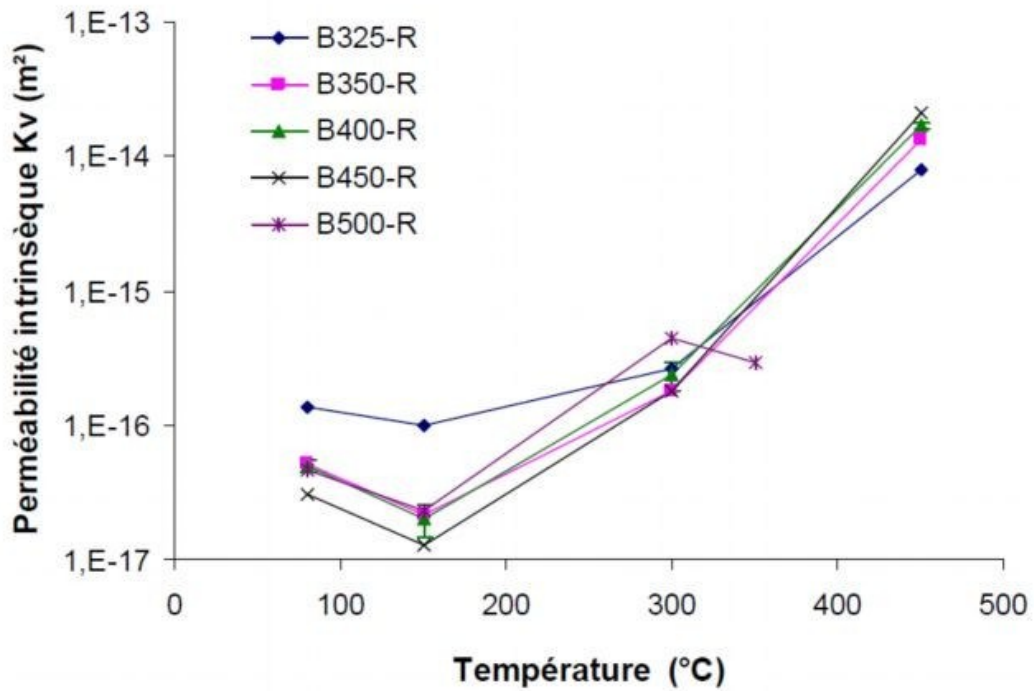


Figure III.4. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température [125].

III.3.3 Perte de masse

La masse du béton subit une perte de poids au cours du chauffage. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Les travaux menés par A. Noumowé [122], G.I. Hager [124] et M. Kanema [125] sur l'évolution de la perte de masse du béton avec la température montrent que la perte de masse commence à partir des températures supérieures à 100 °C.

La (figure III.5) présente les courbes de la perte de masse mesurées par G.I. Hager [124]. Les courbes obtenues montrent que la cinétique de la perte de masse augmente brusquement entre 150 et 300 °C. Celle-ci correspond au départ de l'eau libre et de l'eau liée chimiquement [125], [124]. La température de 300 °C peut être considérée comme la fin de la migration d'eau évaporable, A partir de cette température, la vitesse de perte de masse ralentit. Cependant, la diminution de la masse continue à cause de la déshydratation de la Portlandite et du gel de CSH [123].

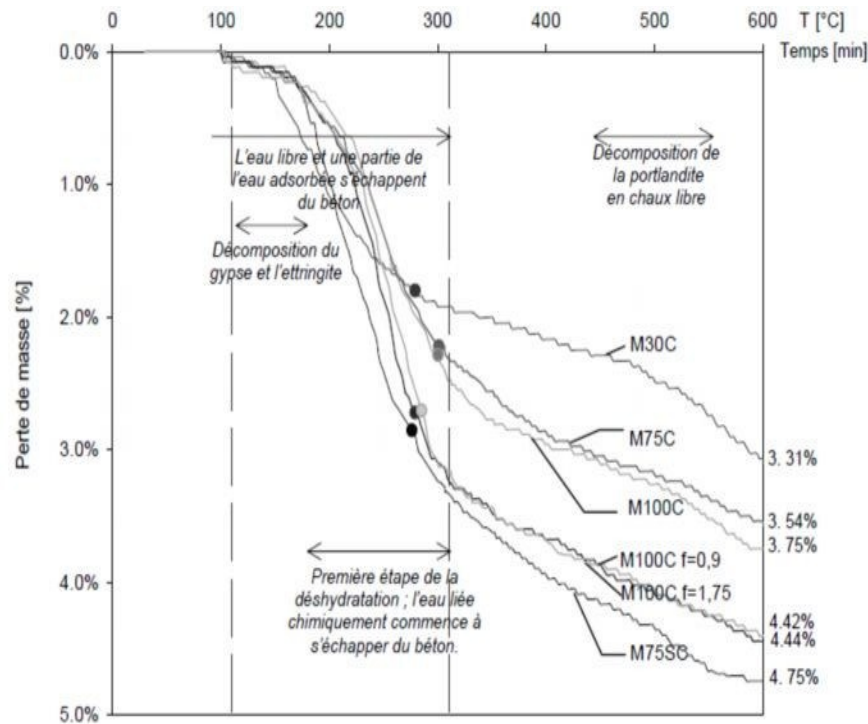


Figure III.5. Perte de masse des bétons déterminées durant l'échauffement [124].

III.3.4 Evolution de la masse volumique

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La (figure III.6) montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. C. Alonso a observé une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800 $^{\circ}\text{C}$, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800 $^{\circ}\text{C}$. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite [123].

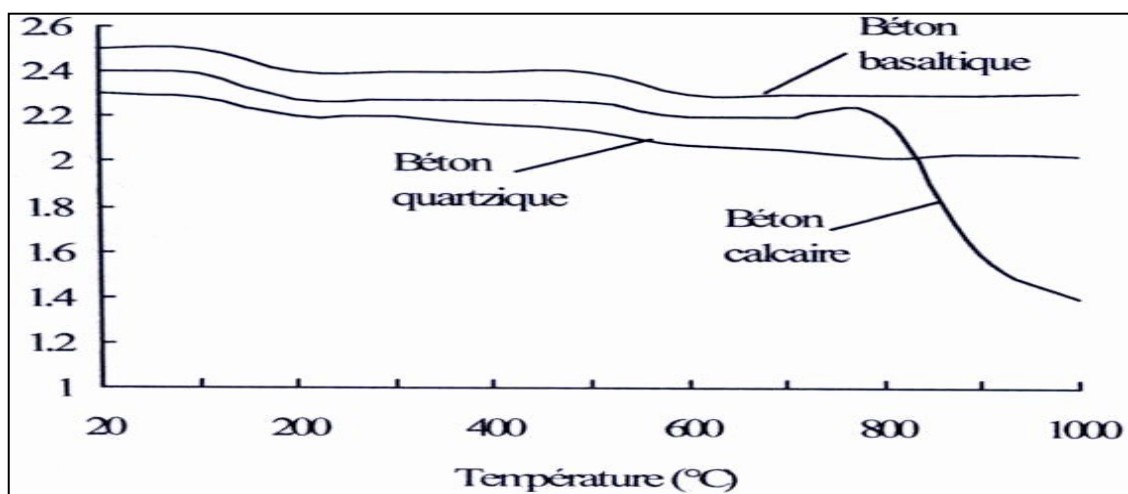


Figure III.6. Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température [123]

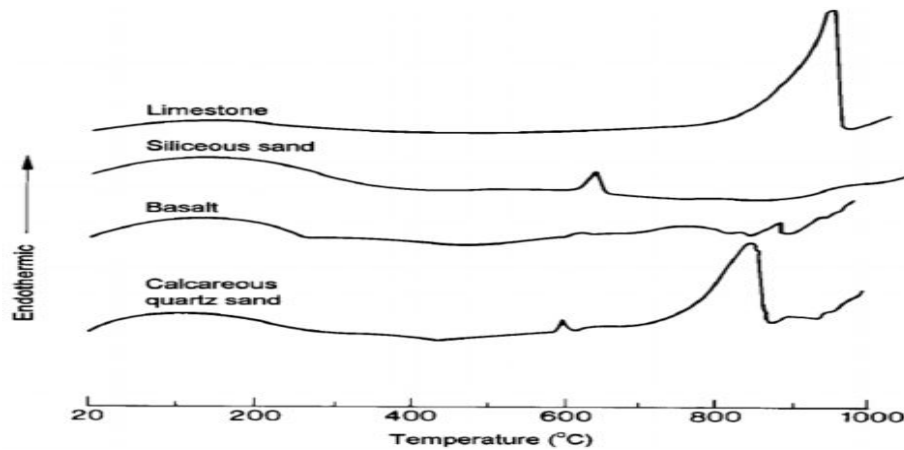


Figure III.7. Courbes ATD de quatre types de granulats (10 °C/min) [123].

III.4 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton [132].

III.4.1 La conductivité thermique

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

Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont : la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton [123], [125].

La (figure III.8) présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour différents types de béton. On constate sur cette figure que la conductivité thermique des bétons décroît avec l'élévation de la température. Ceci peut être attribué à la création des vides (fissuration) et au départ progressif de l'eau.

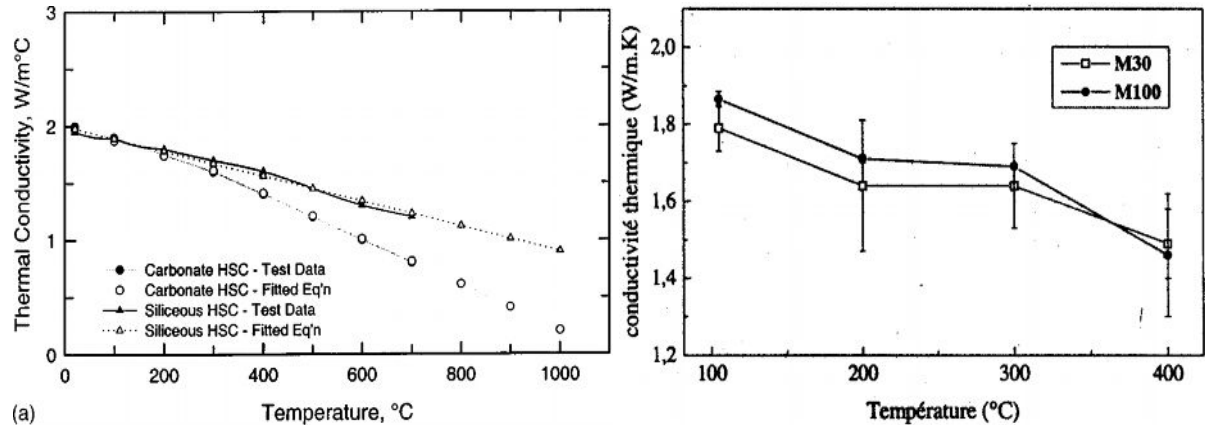


Figure III.8. Evolution de la conductivité thermique de différents bétons avec la température. A gauche, l'effet de type des agrégats [125]. À droite, l'effet de type du béton [123].

III.4.2 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique décrit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'une masse de béton. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la masse volumique et la chaleur spécifique. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau, du degré d'hydratation du ciment et de la nature de granulats [125].

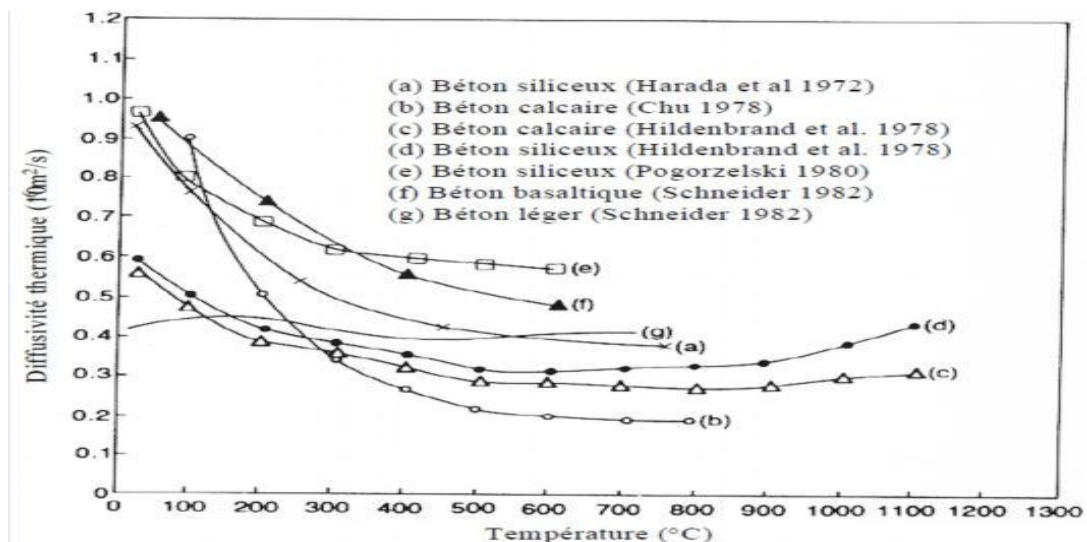


Figure III.9. Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température [125].

La (figure III.9) présente les variations de cette propriété avec la température obtenue par différents auteurs sur des bétons formulés avec différents types de granulats. Il apparaît que la diffusivité thermique du béton diminue avec l'élévation de la température.

III.4.3 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. Autrement dit, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats.

La (figure III.10) montre que la chaleur spécifique augmente avec la température. Cette augmentation est peut être liée aux réactions chimiques et physiques qui ont lieu dans le béton aux hautes températures [123].

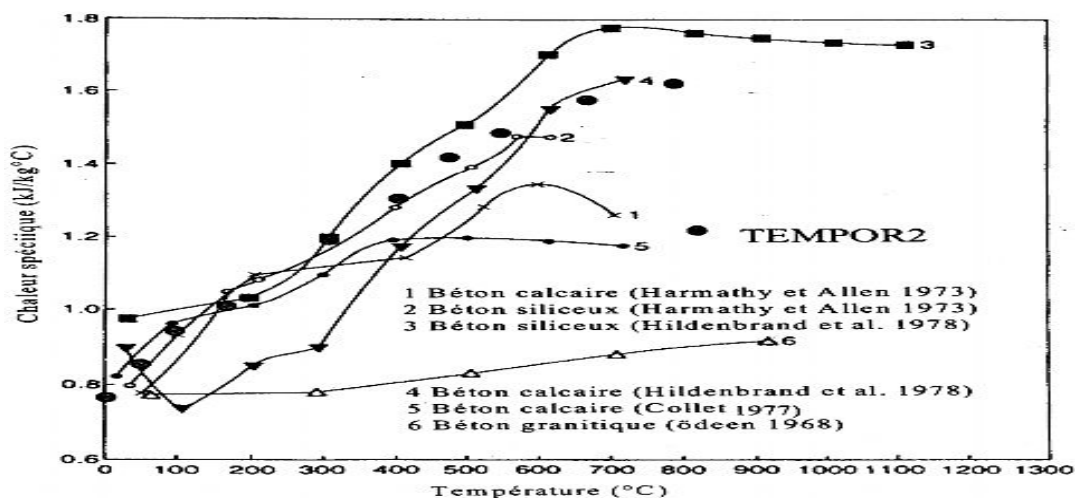


Figure III.10. Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température [123].

III.4.4 Déformation thermique du béton et ses constituants

Comme la plupart des matériaux, le béton subit une déformation thermique, lorsqu'il est soumis à un changement de température. La déformation thermique du béton est la superposition des déformations de la matrice et des granulats au cours de l'échauffement. Dans les composites tels que le béton elle dépend fortement des propriétés de ces constituants notamment de leur nature et de leur quantité. L'objectif de ce paragraphe est de donner une réponse aux questions: comment les éléments du composite influencent la déformation du béton et comment l'incompatibilité des déformations thermiques influence les propriétés mécaniques à haute température. Nous allons nous pencher d'abord sur la déformation des constituants du béton, la pâte de ciment et les granulats.

III.4.4.1 Déformation thermique de la pâte cimentaire

La pâte de ciment durcie se dilate seulement dans la plage de températures allant jusqu'à 150 °C [124], [154]. A partir de 150 °C, elle subit un retrait important. Ce mouvement provient de la diminution de la tension capillaire de l'eau absorbée dans la pâte, au cours de l'échauffement.

La température à laquelle on observe le changement de signe du coefficient de dilatation thermique, dépend selon Cruz et Gillen, 1980 de la vitesse d'échauffement. Lorsque la vitesse de montée en température est inférieure à 10 °C/min, cette température se situe autour de 150 - 200 °C. En augmentant la vitesse d'échauffement, la température de changement augmente également. Pour une pâte de ciment chauffée à 35 °C/min, elle se situe à environ de 300 °C. Les déformations thermiques des pâtes de ciment chauffées avec une vitesse de montée en température 2 °C/min, ont été déterminées aussi par Diederichs et al. [156],[157] et Khoury et al. [155]. Dans les travaux de Van Thai Nguyen [97], il a été montré que l'ajout de fumée de silice en quantité de 10% dans la pâte

de ciment, augmente au cours de l'échauffement, le retrait de celle-ci. Dans ces travaux les auteurs ont également observé deux phases dans la déformation thermique des pâtes.

Dans la première, les pâtes se dilatent jusqu'à environ 250 °C–300 °C pour atteindre une déformation de 3 ‰. Ensuite les déformations changent de direction, le matériau commence à se rétracter. Le retrait peut atteindre à 700 °C l'environ 35 ‰ pour la pâte avec 10 % de la fumée de silice et 27 ‰ pour la pâte sans de la fumée de silice.

III.4.4.2 Déformation thermique des granulats

Les granulats occupent environ 70% du volume du béton. La dilatation thermique des bétons est, principalement liée à leur dilatation. On peut limiter la déformation du béton aux hautes températures en jouant sur la nature des granulats. Dans le Tableau 1, nous donnons les valeurs du coefficient de dilatation thermique (α_T) des roches fréquemment utilisées comme granulats dans le béton. La (figure III.11) regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. Nous soulignons que le coefficient de dilatation thermique est plus faible pour les granulats calcaires que pour ceux de nature siliceuse.

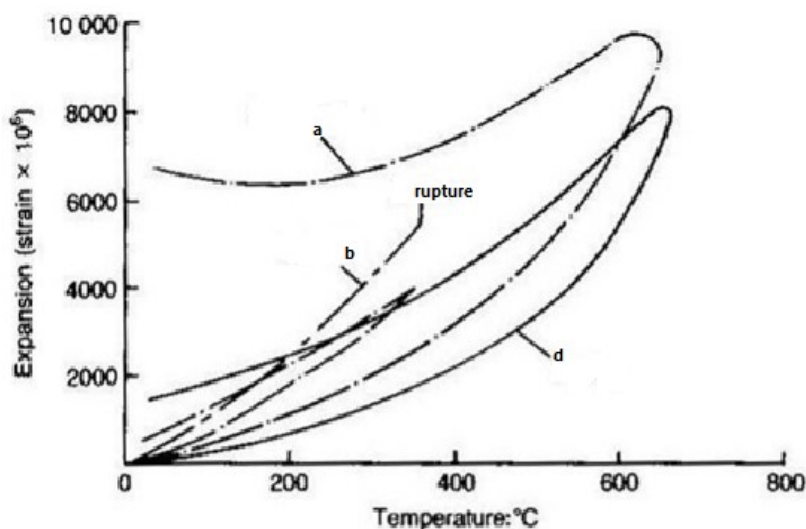


Figure III.11. Evolution avec la température de la dilatation longitudinale de différents types de roches a) calcaire ; b) quartz ; d) basalte [155].

Tableau III.1. Effet de la température sur le coefficient de dilatation thermique pour les grés, calcaire et granit [105].

Température	Coefficient de dilatation thermique αT [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]		
	Grés	Calcaire	Granit
20 - 100 $^{\circ}\text{C}$	10.0	3.0	4.0
100 - 300 $^{\circ}\text{C}$	15.0	9.0	13.5
300 - 500 $^{\circ}\text{C}$	21.5	17.0	26.0
500 - 700 $^{\circ}\text{C}$	25	33.0	47.5

III.4.4.3 Déformation thermique du béton

La déformation totale d'une éprouvette en béton non chargée soumise à une élévation de température très lente est due aux effets composés suivants :

- ✓ Expansion thermique des granulats;
- ✓ Retrait de matrice cimentaire;
- ✓ Microfissuration et contraintes engendrées par l'incompatibilité entre ces deux premiers effets;
- ✓ Transformations et décompositions des constituants du béton s'accompagnant de variations dimensionnelles.

L'analyse des résultats présentés sur la (figure II.12) montre que la déformation thermique des bétons est très fortement influencée par la nature des granulats. G.I. Hager [124] a montré que la déformation thermique du béton est une fonction non linéaire de la température. Ainsi que le béton contenant des granulats silico-calcaires présente des déformations supérieures à partir de 300 $^{\circ}\text{C}$. La déformation thermique plus élevée des bétons de granulats silico-calcaires est environ 2,5 fois supérieure à celles des bétons de granulats calcaires à 600 $^{\circ}\text{C}$. Ceci peut s'expliquer par la nature des granulats silico-calcaire qui possèdent un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui du calcaire. De plus, les transformations du quartz- α en quartz- β à 573 $^{\circ}\text{C}$ qui s'accompagnent d'une augmentation de volume de l'ordre de 1%, ce qui a contribué à la fissuration significative du matériau [124].

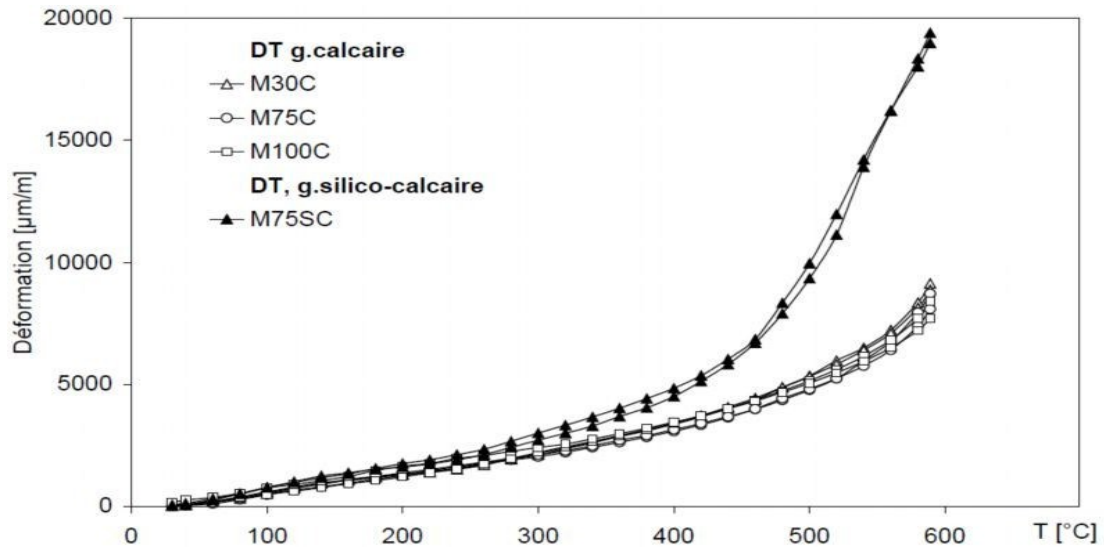


Figure III.12. Déformation thermique de quatre différents bétons confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires [123].

III.5 Evolution des propriétés mécaniques avec la température

Le béton est le matériau le plus fréquemment utilisé dans le domaine de la construction. Il se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young. En situation d'incendie, le béton est exposé à des températures élevées qui entraînent un certain nombre de transformations physico-chimiques et microstructurales qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température [119].

Pendant ces dernières années, plusieurs équipes de différents pays se sont investis dans la réalisation des essais sur les différents types de béton soumis à hautes températures. Les résultats de ses essais interprètent différemment les évolutions des propriétés mécaniques du béton. Ces différences ne sont pas dues seulement au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme le régime d'échauffement et refroidissement, la géométrie des éprouvettes, la présence de la charge mécanique et histoire de son application, le moment de la réalisation d'essai : à chaud ou après refroidissement, etc. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec une élévation de température [131].

III.5.1 Résistance en compression à haute température

L'essai de résistance à la compression 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 de compression à chaud. Ce dernier se pratique à la fin du palier de stabilisation de température au cours du cycle thermique. Il est considéré

comme étant plus représentatif du comportement du matériau à haute température.

L.T. Phan [8] dans ses travaux, rassemble les résistances en compression résiduelles obtenues au cours de ses essais et une partie des résultats obtenus par d'autres chercheurs. L'allure générale des courbes débute par une chute de résistance au voisinage de 100 °C à 150 °C, suivi d'un accroissement de résistance entre 300 °C et 350 °C, puis d'une chute de résistance continue avec la température au-delà de 350 °C.

G.A. Khoury [129] attribue la baisse de résistance enregistrée entre 100 °C - 150 °C à un gain de fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles.

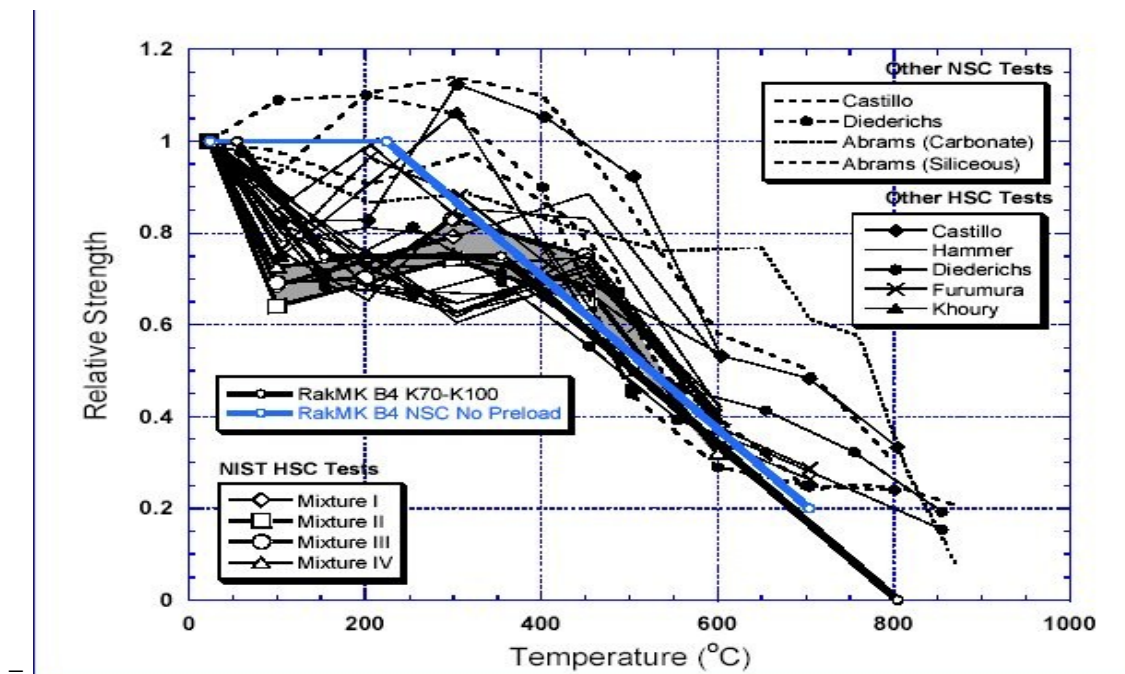


Figure III.13. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [8].

D'après W.P.S. Dias [130], le gain de résistance vers 300 °C – 350 °C est dû à une augmentation des forces de liaisons entre hydrates et à un accroissement des énergies de surface. Les bétons à hautes performances (BHP) présentent un gain plus marqué et décalé vers les hautes températures par rapport aux bétons ordinaires (BO) [131].

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

également une chute des résistances mécaniques du béton [105].

Les travaux menés par I. Gaweska [132], W.P.S. Dias et al. [130], T. Harada et al. [133] sur l'évolution des résistances à chaud et résiduelles sur un même béton montrent une baisse plus significative de la résistance résiduelle à la compression.

Pour les essais de caractérisation du béton, le comité technique de la RILEM (T-129) [134] limite la vitesse de montée en température, suivant la taille des éprouvettes, afin de limiter la formation des forts gradients de température dans les échantillons. Ces forts gradients thermiques

engendrent des fortes contraintes sources d'apparition des phénomènes d'instabilités dans le béton. G.A. Khoury compare la résistance en compression résiduelle des bétons chauffés à une vitesse de 1 °C/min à celle des bétons chauffés à 0,2 °C/min [129]. Il constate que les bétons chauffés à la vitesse de 0,2 °C/min ont une résistance inférieure aux bétons chauffés à 1 °C/min. Ainsi la durée d'exposition du béton aux hautes températures est un facteur prépondérant dans la détermination du comportement du béton aux hautes températures. L'application d'une vitesse lente permet une transformation chimique plus complète dans le béton et donc une réduction plus significative des résistances.

III.5.2 Influence du type de béton et de la nature des constituants

III.5.2.1 Type de béton : haute performance et ordinaire (E/C)

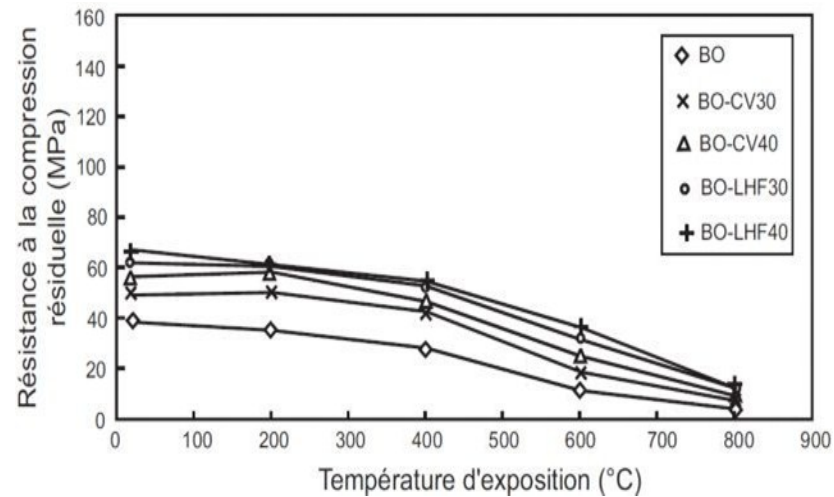
Contrairement aux bétons ordinaires, l'étude du comportement mécanique à hautes températures des BHP a fait l'objet de peu de travaux [158].

Afin de déterminer l'influence du type de béton sur le comportement à haute température, nous nous sommes, en particulier, intéressés aux résultats obtenus par U. Diederichs et al [156], M. Ludovic [119], S.Y.N. Chanet et al, [121]. De plus, nous avons analysé les valeurs proposées par le DTU et l'Eurocode. Toutefois, en comparant, tous ces résultats expérimentaux nous ne pouvons pas de façon claire déterminer l'influence du paramètre E/C sur le comportement « à chaud ». Additions minérales

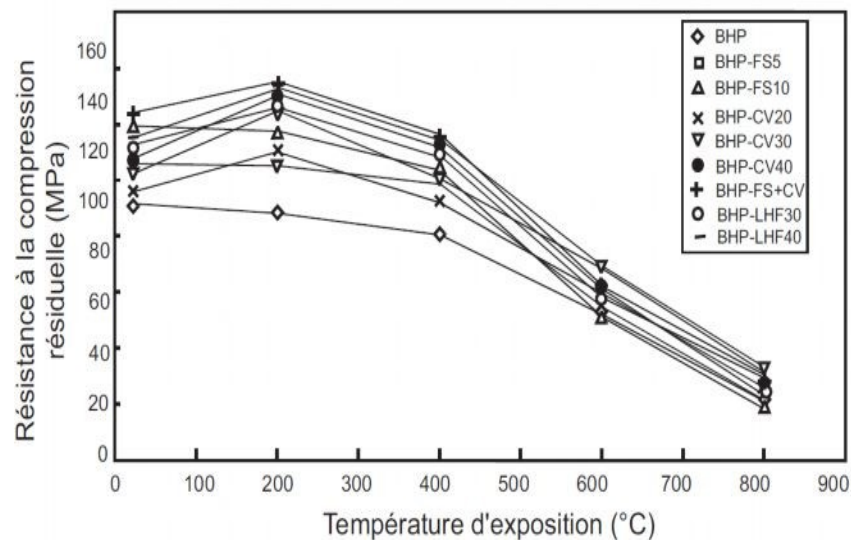
III.5.2.2 Influence des additions minérales

L'influence des additions minérales sur l'évolution des résistances mécaniques du béton à hautes températures a été étudiée par C.S. Poon [143], L.T. Phan [8], Y. Collet [104].

L'étude réalisée par C.S. Poon [143] a été menée sur un béton ordinaire ($f_c = 40$ PMa) et un BHP ($f_c = 90$ PMa) sans additions (formulation de référence). Des bétons de même résistance ont été confectionnés avec trois types d'additions minérales : Laitier de haut- fourneau, fumée de silice et les cendres volantes (figure III.14). L'évolution de la résistance en compression du béton soumis à hautes températures est influencée aussi par les conditions de réalisation des essais. Ces essais peuvent être réalisés à chaud en charge, à chaud non chargé ou après refroidissement (essais résiduels).



BO : béton ordinaire de référence, CV : cendres volantes, LHF : laitier de haut-fourneau.



BHP : béton à haute performance de référence, FS : fumée de silice, CV : cendres volantes, LHF : laitier de haut-fourneau

Figure III.14. Influence des additions sur la résistance en compression résiduelle en fonction de la température pour des bétons courants et des bétons à hautes performances [143].

III.5.3 Résistance en traction à haute température

Dans la littérature, il existe peu de résultats concernant l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. Pourtant cette donnée est primordiale, la résistance en traction conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements) [135].

P. Bamonte a observé une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température (figure III.16). Jusqu'à 300 °C, les valeurs sont assez dispersées avec des résistances relatives allant de 35% à 100%. Par contre, les valeurs fournies par l'Eu-recorde représentent plutôt des valeurs moyennes [136]. Au-delà de 300 °C, les résultats sont tous

supérieurs aux valeurs dentées par l'Euro code. P. Bamonte et al. [137] ont mène une étude sur le comportement en traction des bétons a haute température. Pour cela, ils ont mis aux points différents types d'éprouvettes pour

réaliser les principaux essais caractérisant le comportement à la traction d'un béton (BHP, BO et BHP avec granulats légers, BTHP, BAP provenant tous d'etudes de jàa publiees).

Selon P. Bamonte et al. [137], la meilleure manière de mesurer la résistance en traction est d'utiliser, La traction directe avec encastrement des bords, car avec une rotation libre de l'éprouvette, la résistance est sous-estimée. Concernant l'essai par fendage (ou essai brésilien), il est considere comme une bonne alternative aux essais de traction. Par contre, la résistance a la traction par flexion est trop affectée par l'augmentation de la ductilité d'éprouvettes prismatiques d'épaisseur fine (appelé poutre fine) (figure III.15).

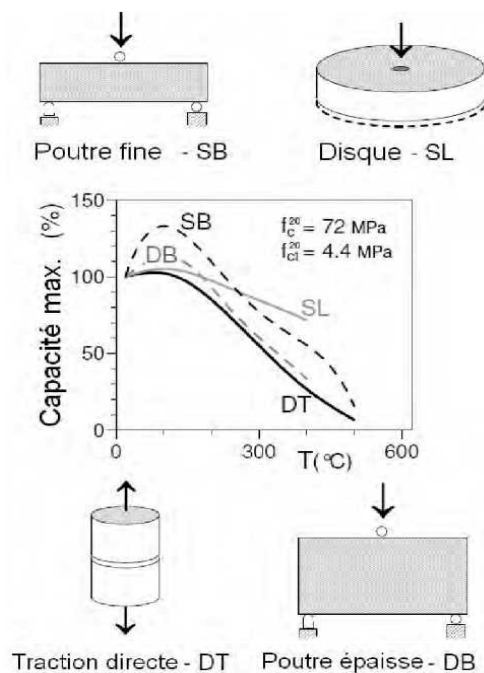


Figure III.15. Différents types d'essais pour déterminer la résistance à la traction [137]

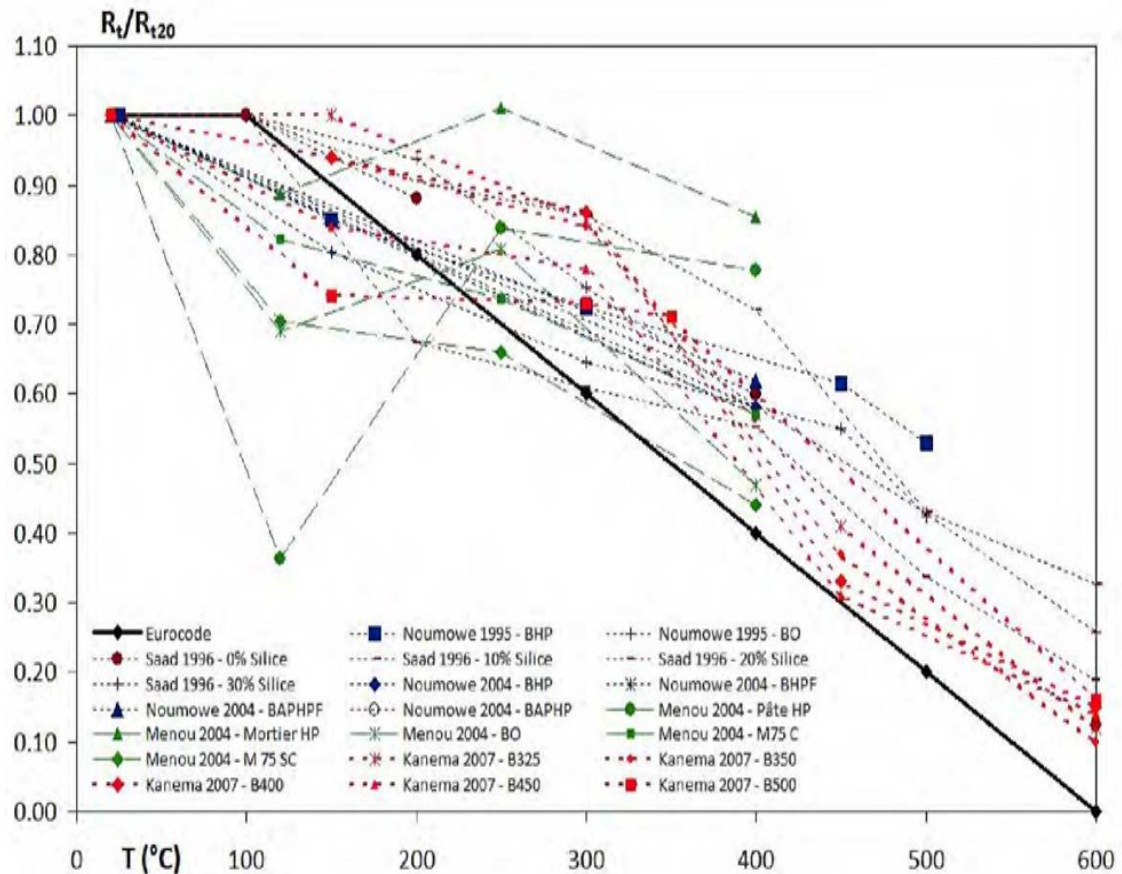


Figure III.16. Différents résultats de résistance à la traction obtenue comme ci-dessous [135].

III.5.4 Module d'élasticité

Le comportement des structures dépend souvent du module d'élasticité du béton qui exprime la rigidité du matériau. Il lie la contrainte normale à la déformation instantanée longitudinale lorsque le béton est soumis à des sollicitations uniaxiales. Les différents résultats expérimentaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et des paramètres expérimentaux d'autre part [19].

La (figure III.17) montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement. Dans la série I, les éprouvettes sont chauffées sans chargement à 1 °C/min à la température désirée puis maintenue à cette température avant d'être chargées. Dans la série II, les éprouvettes sont chauffées jusqu'à la température désirée, puis elles sont refroidies avec une vitesse de 0,5 °C/min avant d'être chargées. Ces essais montrent que la rigidité du matériau baisse généralement en fonction de la température jusqu'à 120 °C. Entre 200 °C et 300 °C, les résultats de la (figure II.17) montrent que le module est à peu près constant [18].

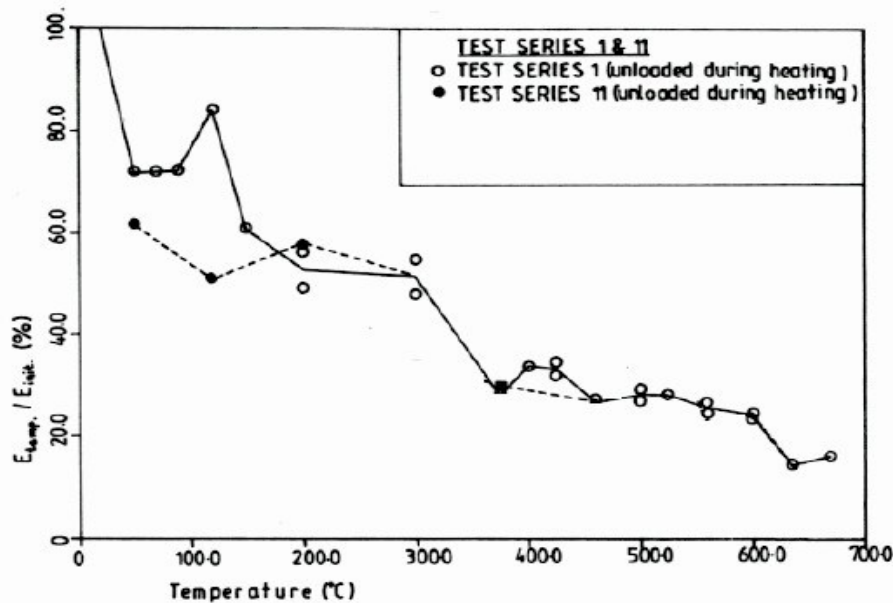


Figure II.17. Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température [18].

III.6 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

D'après P. Kalifa et al [140], G.R. Consolazio et al. [141], Le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

- ✓ Le processus thermomécanique : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent, tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire.
- ✓ Le processus thermo-hydrique : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La (figure III.18) montre le mécanisme d'éclatement lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du

phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement [139].

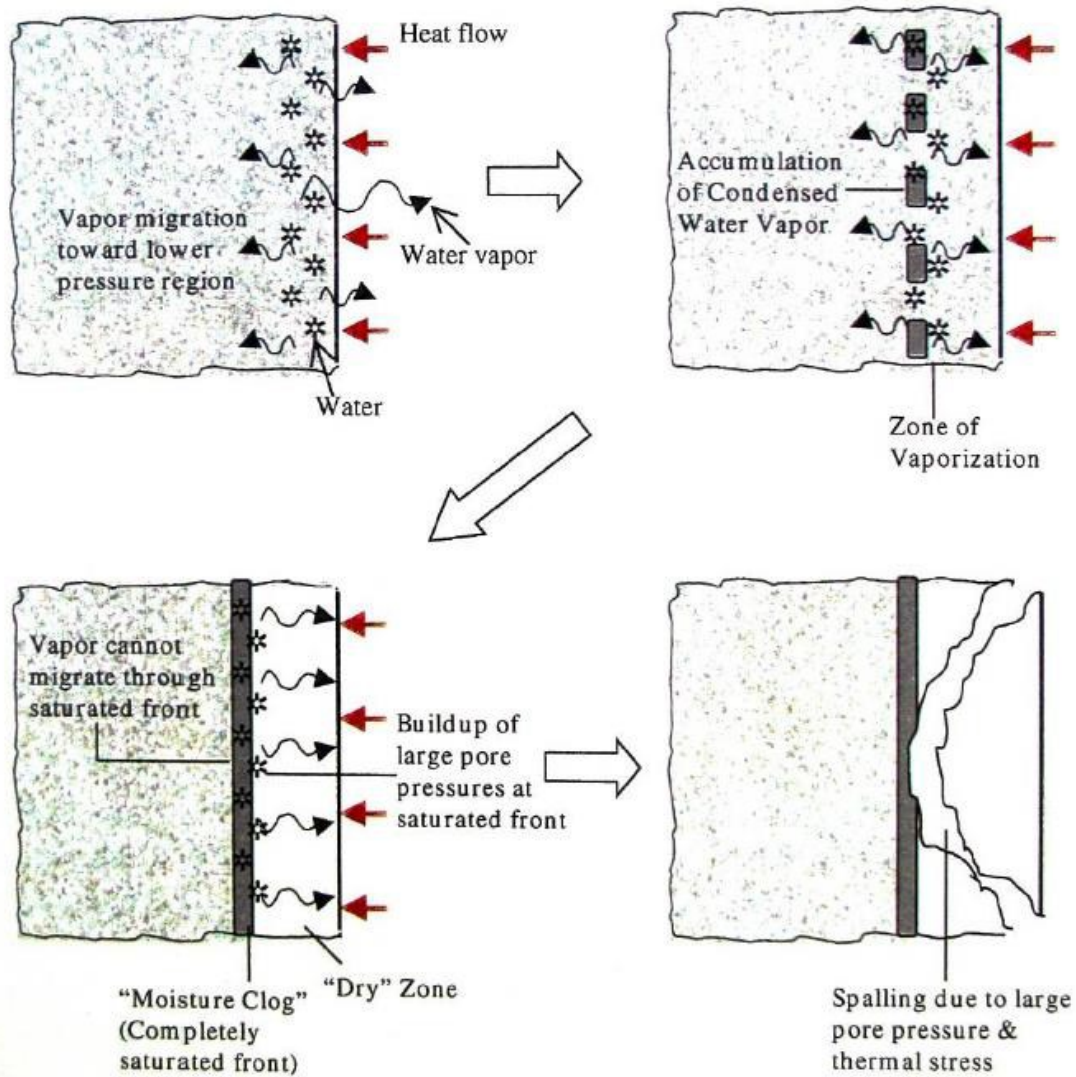


Figure II.18. Illustration du mécanisme d'éclatement[141].

III.7 Paramètres favorisant l'instabilité thermique

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

– Teneur en eau : elle joue un rôle principal dans la formation de pression de Vapeur. Une teneur en eau massique inférieure à 3 - 4% limiterait le risque d'éclatement. Dans le cadre de travaux de l'influence de teneur en eau sur l'endommagement de BHP, une faible fissuration sur des échantillons de teneur en eau inférieure à 2.6%.

– Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité, résistances) : un BHP caractérisé par un faible rapport Eau/Liant est plus sensible à l'éclatement. La faible perméabilité du BHP rend difficile le transfert de fluide engendrant de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température.

- Vitesse de chauffage : plus elle est élevée, plus le risque d'instabilité thermique du béton est important. L'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton. À la vitesse de chauffage de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont éclaté à une température du surface voisine de $300 - 350^{\circ}\text{C}$. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement.
- Taille des éprouvettes : un effet d'échelle est remarqué sur le comportement de diverses sections d'éprouvettes de béton. Des tests de chauffage sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm et 11x22 cm, ont montré plus d'éclatement avec les éprouvettes 16x32cm. La mesure de la perte de masse des éprouvettes au cours du chauffage a conduit à un séchage plus rapide des échantillons 11x22cm. Cette perte de masse peut atténuer la pression de vapeur et limiter l'éclatement.
- Nature des granulats : le comportement des granulats est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui les granulats calcaires [102].

CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse des connaissances et des résultats expérimentaux sur le comportement du béton à température ambiante et à hautes températures. La synthèse des observations et des expérimentations réalisées a révélé que le béton subit de nombreuses transformations physico-chimiques durant le chauffage. Les diverses transformations physico-chimiques que subit le béton chauffé sont : la déshydratation des CSH, la déshydroxylation de la portlandite et la décarbonatation des calcaires. Les résultats des différents auteurs montrent une diminution de la résistance en compression, de la résistance en traction et du module d'élasticité. La perte des propriétés mécaniques est liée fortement au départ de l'eau qui représente la principale cause de perte de masse, d'augmentation de la porosité et de la perméabilité et la destruction de la matrice cimentaire.

Chapitre IV - Matériaux et procédures expérimentales

IV.1 Introduction

L'incorporation des ajouts minéraux est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative sur la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche. La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituants sont bien caractérisés, nous présentons les essais mécaniques et chimiques réalisés dans cette étude.

Le programme expérimental a été réalisé en deux phases successives. Dans une première phase, six ciments composés ont été fabriqués en substituant une partie du ciment par un ou deux ajouts cimentaires disponibles localement (poudre de verre et poudre de marbre). Les compositions minéralogiques et chimiques des éléments de départ sont étudiées par diffraction X. Des essais sur ciments anhydres (densité absolue, surface spécifique Blaine et granulométrie laser), sur pâte de ciment (consistance et temps de prise).

La caractérisation des propriétés physico-chimiques de matériaux cimentaires est d'une importance cruciale puisque ces propriétés impactent directement le comportement des bétons, des mortiers autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Les propriétés physiques des matériaux à prendre en compte sont la morphologie, la granulométrie, la finesse ainsi que la surface spécifique. Ces caractéristiques sont souvent analysées par comparaison avec le ciment et en prenant en compte leur effet sur le comportement à l'état frais des bétons.

La caractérisation des compositions chimiques et minéralogiques est importante afin de s'assurer de la compatibilité des fines avec le milieu cimentaire. Les éléments ou les phases pouvant être délétères, autant sur les propriétés des matrices cimentaires

Dans une deuxième phase, une étude préliminaire a été réalisée en confectionnant un béton à base de filler en optant pour un rapport E/C = 0.5, avec adjuvant et une finesse de mouture des ciments constante. Des pourcentages d'ajouts cimentaires (poudre de marbre, poudre de verre) sont substitués au ciment. Pour chaque mélange, des éprouvettes 10x10x10 cm³ coulées et conservées dans l'eau de robinet ont été soumis à des essais de compression. Le sable de dune a été caractérisé par diffraction X.

Afin de bien évaluer La composition du béton est obtenue en utilisant la méthode de formulation de Dreux- Gorisse [2], elle sert de base de déclinaison des autres compositions par ajout de ciment. Nous avons également testé de béton en prenant les mêmes proportions des constituants que les formulations. L'apparition de la décomposition, la résistance à la compression, la perte de masse, la porosité, la phase cristalline et l'analyse thermique avant et après l'exposition à diverses températures (20, 200, 400 et 600 ° C) ont été étudiées.

Les bétons ont été caractérisés mécaniquement à 7, 14, 28 jours et 9 mois. La microstructure interne est observée par diffraction X. Les analyses thermiques gravimétriques et différentielles (ATG et ATD) permettent de quantifier la portlandite.

IV.2 Caractéristiques des matériaux

Les matériaux utilisé dans notre étude sont des matériaux locaux,nous avons effectué des études expérimentale qui concerne leurs caractéristiques au saine du laboratoire de génie civil à l'université Mohamed Boudiaf - M'sila.

IV.2.1 Ciment

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ CEM II/A - 42,5) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) conforme à la norme algérienne NA 442 Européenne (EN CE 197-1) et provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalâa (Wilaya de M'sila).

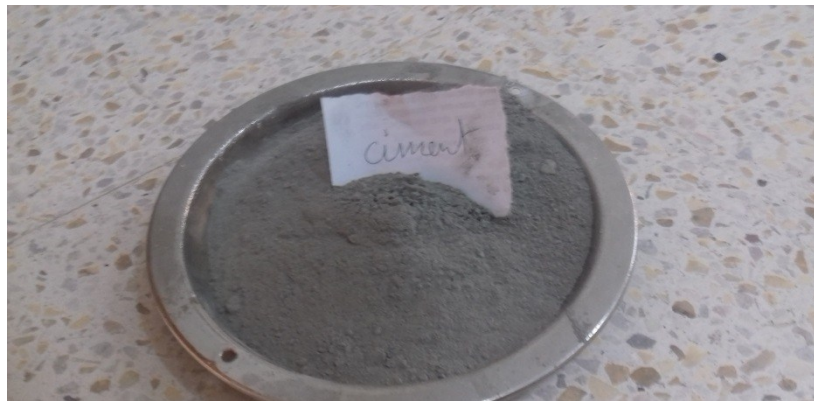


Photo IV.1. Ciment utilisé.

L'analyse chimique et minéralogique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Hammam Dalâa. La composition chimique et minéralogique du ciment sont représentées au tableau (IV.1).

Tableau IV.1. Composition chimique et minéralogique du ciment

Composition chimique (%)										
Constituents	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Totale
Clinker	18.51	4.88	2.96	58.3	1.85	2.39	0.1	0	8.74	97.746
Composition minéralogique										
Constituents	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A			C ₄ AF		
Teneur	95		14		6			10		

La composition chimique globale du ciment (tableau IV.1) est typique d'un ciment portland. Les éléments majoritaires sont le calcium, le silicium (58.3% CaO et 18.51% SiO₂) ainsi que l'aluminium et le fer (4.88% Al₂O₃ et 2,96% Fe₂O₃). La teneur en sulfates est de 2.39%, ce qui correspond à une valeur typique.

Le tableau (IV.2) présente les résistances, le temps de prise et la fin de prise obtenus sur le ciment CEM II 42,5.

Tableau IV.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM II 42,5.

Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques		
Poids spécifique (g/cm ³)	3,01	Résistance en compression MPa (NA 234)	2 jours	18.42
Retrait (µm/m)	834		7 jours	32.51
Gonflement (µm/m)	0,00		28 jours	46.23
S.S. Blaine (cm ² /g)	3410,	Résistance à la flexion (MPa)	2 jours	2,51
Consistance (%H ₂ O)	028,3		7 jours	6,23
Début de prise (h:min)	2h :		28 jours	7,42
Fin de prise (h:min) Exp.	06'			
à chaud (mm)	2h :			
Refus sur tamis 45 µm (%)	56'			
	0,90			
	14,24			

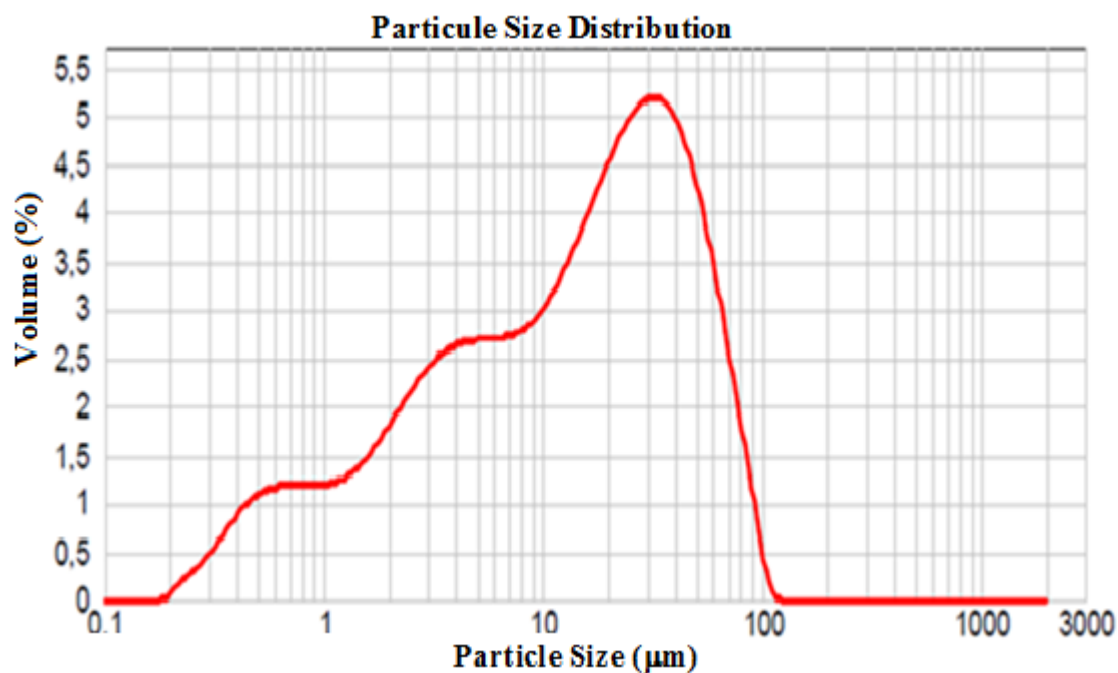


Figure IV.1 . Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42.5.

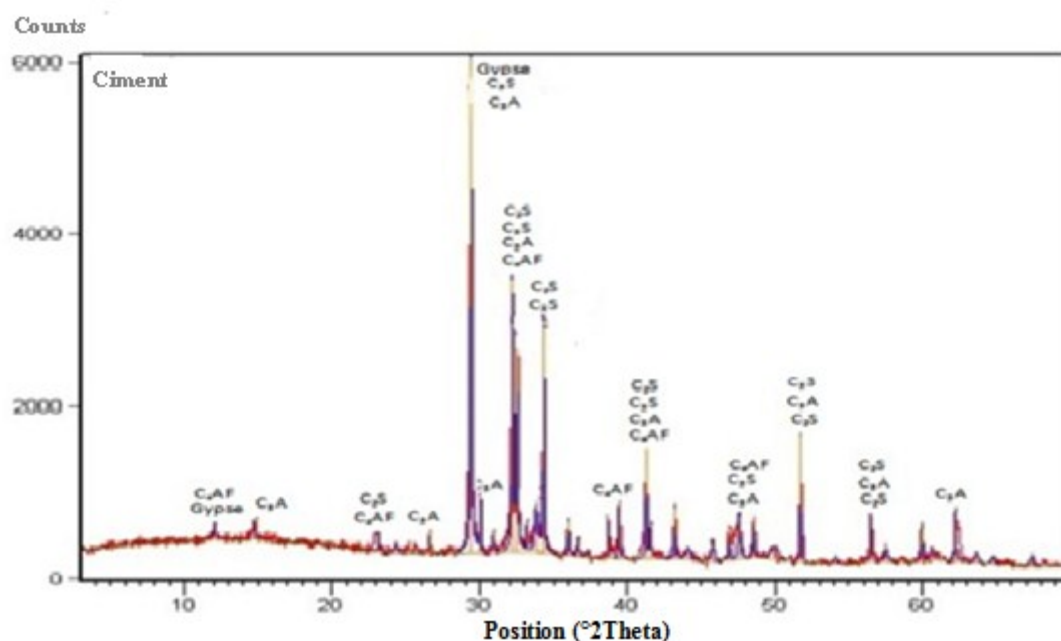


Figure IV.2. Diffractogramme du ciment anhydre CEM II 42,5.

Le diffractogramme réalisé sur le ciment anhydre montre bien la présence des différentes phases cristallines : les quatre minéraux essentiels (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) responsables de la prise et du durcissement, le gypse ($CaSO_4.2H_2O$) régulateur de prise et l'ajout calcaire figure (IV.2).

IV.2.2 Ciments composés

Les résultats de la composition chimique et les caractéristiques physiques des ciments préparés sont présentés dans les tableaux (IV.3, IV.4).

L'incorporation de poudre de verre verre dans le ciment à différents pourcentages 0%, 5%, 10% ; augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , SO_3) et diminue le taux d'oxyde de chaux (CaO , Fe_2O_3), augmente le pourcentage de oxyde PAF dans tous les ciments composés.

Le pourcentage d'ajout dans les ciments préparés ne doit pas dépasser le pourcentage (80% à 95%) conformément à la norme NA 442 qui stipule que les ciments composés

Tableau IV.3. Analyse chimique de ciments composés, en (%)

Eléments	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	PAF
C	18.51	4.88	2.96	58.3	1.85	2.39	0	0.1	0.016	8.74
C+5%M	19.2	5.07	2.87	56.42	1.86	2.57	0	0.10	0.015	9.71
C+10%M	20.5	5.34	2.84	55.5	1.83	2.49	0	0.10	0.015	9.94
C+5%V	17.55	4.67	2.81	58.38	1.88	2.54	0	0.1	0.016	10.65
C+10%V	16.9	4.44	2.77	59	1.87	2.32	0	0.11	0.014	12.5
C+5V+10M	18.05	4.66	2.71	56.91	1.83	2.17	0	0.1	0.014	12.94
C+10V+5M	19.73	5.07	2.73	56.04	1.82	2.24	0	0.1	0.015	13.04

Tableau IV.4. Propriétés physiques des ciments préparés.

Ciments préparés	Densité (g/cm^3)	SSB (g/cm^2)	Retrait ($\mu\text{m/m}$)	gonflement ($\mu\text{m/m}$)	DP (min)	FP (min)	R_{C28} (MPa)
C+5%M	3.08	4090	942.2	302.2	200	260	40.3
C+10%M	3.06	4020	912.2	317.5	190	250	37.7
C+5%V	3.08	4120	885.5	287.5	230	285	44.2
C+10%V	3.08	4060	876.2	292.2	240	280	40.0
C+5V+10M	3.05	3950	865.2	311.5	210	265	35
C+10V+5M	3.02	3890	820.2	323.5	230	270	35.2

Les compositions minéralogiques des ciments préparés utilisé sont présentées dans le tableau (IV.5). L'analyse minéralogique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (Hammam Dalâa).

Tableau IV.5. Composition minéralogique des ciments préparés, en %.

Ciment préparés	C	5% V	10% V	5% M	10% M	5V10M	10V5M
Alite	47.01	46.79	46.39	43.62	41.22	40.65	43.69
Belite	10.80	12.10	11.78	11.84	11.07	10.19	11.38
Alum	2.81	2.66	2.38	2.90	2.69	2.48	2.86
Ferrite	8.85	10.22	10.30	9.17	8.07	8.50	8.98
Lime	1.21	0.41	0.41	0.55	0.40	0.28	0.38
Portlandite	0.43	1.05	1.16	1.04	1.27	0.91	1.05
fCaO XRD	1.53	1.20	1.29	1.33	1.36	0.97	1.17
Periclase	0.42	0.37	0.44	0.53	0.46	0.26	0.09
Quartz	0.69	0.89	0.89	0.83	0.72	0.85	0.93
Arcanite	0.72	0.46	0.40	0.67	0.57	0.53	0.66
Langbeinite	0.17	0.27	0.27	0.01	0.11	0.22	0.14
Aphthitalite	0.27	0.04	0.16	0.14	0.18	0.24	0.17
Gypsum	2.52	2.84	2.86	2.55	2.60	2.60	2.65
Hemi hydrate	1.39	0.98	1.15	0.97	1.05	0.80	0.99
Anhydrite	0.02	0.03	0.03	0.01	0.10	0.09	0.02
Calcite	20.12	18.87	19.45	22.85	27.04	27.40	23.49
Dolomite	1.16	0.74	0.63	0.99	1.18	1.19	1.24
SO3 XRD	2.51	2.26	2.39	2.11	2.25	2.18	2.25
BFS amorphous	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	2.81	1.28
Gypsum XRD	5.09	4.59	4.67	4.52	4.91	4.68	4.90

IV.2.2 Poudre de marbre

La poudre de marbre (PM) est une roche métamorphique compacte commercialisée par fabrication de revêtement de type carrelage issue d'une industrie à Boussaada (Algérie). Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans le tableau (IV.6) .



Photo IV.2. Poudre de marbre.

Tableau IV.6. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Couleur	Structure	Masse volumique	Masse spécifique	S.S.B
Blanche	Microcristalline	650,0 kg/m ³	2,68 g/cm ³	7500 cm ² /g

La composition chimique est indiquée dans le tableau (IV.7). Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge hammam Dalâa . L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé, afin de déterminer sa composition chimique.

Tableau IV.7 . Composition chimique de la poudre de marbre

Oxide	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	PAF
%	1.47	55.3	0.01	0.14	0.35	0.12	0.04	0.01	42.56

La composition minéralogique est indiquée dans le tableau (IV.8) Elle a été déterminée par l'essai de DRX au laboratoire de la cimenterie de Lafarge Hammam Dalâa .

Tableau IV.8. Composition minéralogique de la poudre de marbre, en%

Minéraux presents	Teneur
Quartz SiO_2	1.5
Calcite CaCO_3	95.5
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	03
Albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-
(Feldspaths K (Orthoclase) $(\text{K}_2\text{O} \ 6\text{SiO}_2 \ \text{Al}_2\text{O}_3)$	-
Illite $2\text{K}_2\text{O} \ \text{Al}_2\text{O}_3 \ 24\text{SiO}_2 \ 2\text{H}_2\text{O}$	-
Total	100

Les analyses granulométriques laser sont données sur la figure (IV.4) .L'analyse par diffractométrie de rayons X des fillers montre que les minéraux la calcite (CaCO_3) 95.5% et la dolomite en très faible quantité figure (IV.3).

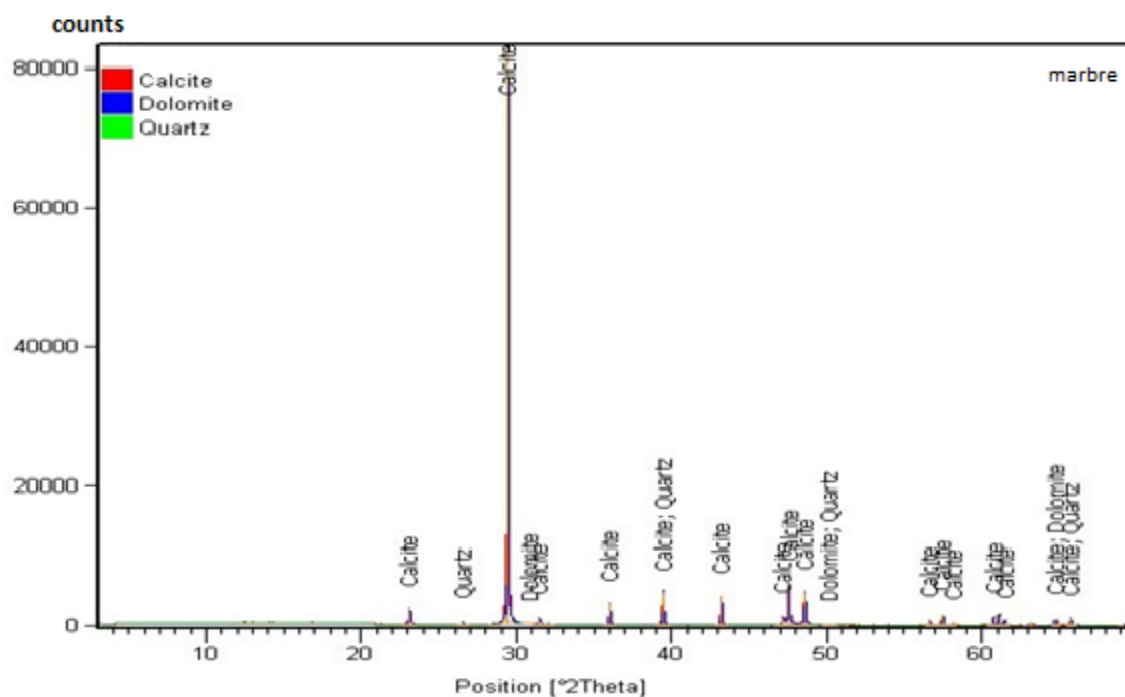


Figure IV.3. Diffractogramme de la poudre de marbre.

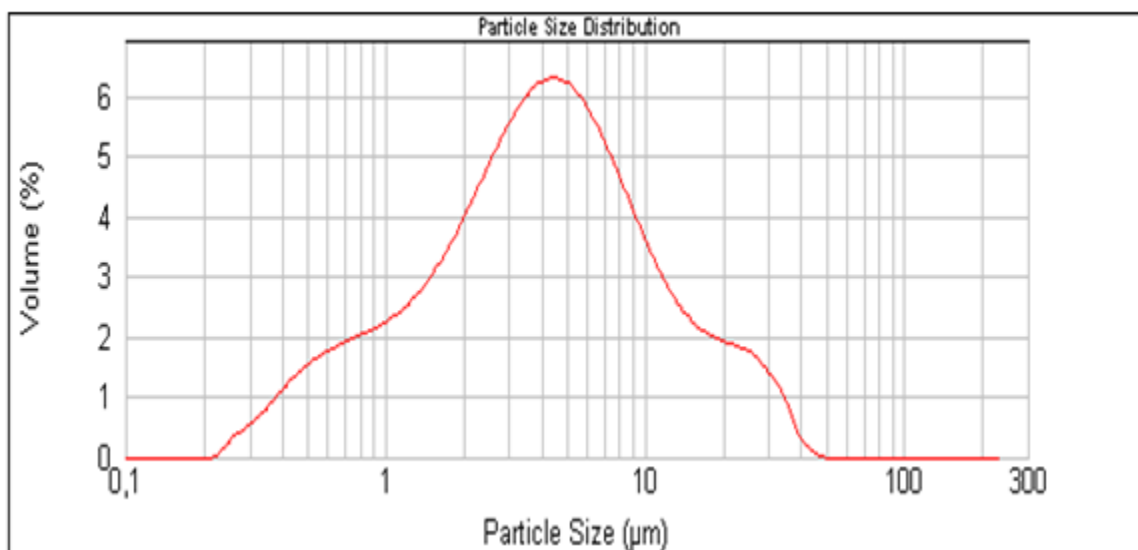


Figure. IV.4. Distribution granulométrique de la poudre de marbre

IV.2.3 Poudre de verre

La poudre de verre est obtenue après broyage d'une durée de 2 heures de débris de verre transparent pour aboutir la finesse voulue. Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans les tableaux (IV.9, IV.10) .



Photo IV.3. Poudre de verre.

Les analyses granulométriques sont réalisées par tamisage à sec sur les fractions supérieures à 80μm (NFP 94-040) et par sédimentométrie sur les fractions inférieures à 80μm (NF P 94-057). L'analyse granulométrique est illustrée par la figure (IV.5) .

Tableau IV.9 . Composition chimique de la poudre de verre

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
%	72,84	0,98	0,55	9,66	1,76	0,25	0,43	12,69	0,01	0,04	0,79

Tableau IV. 10 . Caractéristique physique de la poudre de verre

Caractéristiques	Poudre de verre
Densité absolu (Kg/l)	2.7
Surface spécifique (cm ² /g)	8530
Couleur	blanc
Activité pozzoulanique	28,5 g (Ca(OH) ₂ /g (PV)

La composition chimique globale de la poudre de verre tableau (IV.9) montre que le matériau contient principalement du silicium (72.84 % exprimé en SiO₂), des alcalins (12.69 % Na₂O) et du calcium (9.66 % exprimé en CaO). Le dosage en chlorure montre une faible teneur (0,11 %).

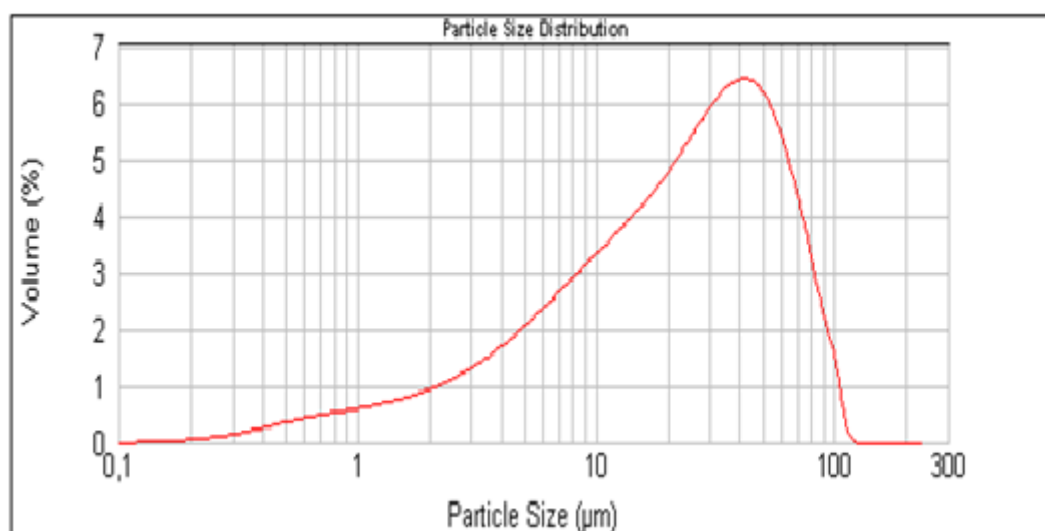


Figure IV.5. Distribution granulométrique de la poudre de verre.

IV.2.4 Superplastifiant

Le MEDAPLAST 40 est un super-plastifiant haut à base de polymères combinés, fourni par l'entreprise GRANITEX (Alger-Algérie). Il est recommandé dans la réalisation des bétons et mortiers de très haut qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton.



Photo IV.4. superplastifiants MEDAPLAST 40

L'adjuvant MEDAPLAST 40 permet d'augmenter les résistances mécaniques à jeune long terme. Il est applicable à tout type de ciment conforme à la norme EN934-2 NA 774. La page de dosage recommandée est : 0,6 à 2,5% du poids de ciment, soit 0.5 L à 2 L par 100 Kg de ciment. Ses caractéristiques physiques et chimiques sont représentées dans le tableau (IV.11).

Tableau IV.11. Caractéristiques de MEDAPLAST SP 40

Superplastifiant	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Medaplast SP 40	Liquide	Brun clair	8.2	1.2±0.01	< 1g /l	40%

IV.2.5 Eau de gâchage.

L'eau de gâchage utilisé est une eau courante du laboratoire de département de génie génie civil. La composition chimique d'eau du laboratoire de département de chimie, université de M'sila. La composition chimique d'eau est illustrée par le tableau (IV.12).

Tableau IV.12. Caractéristiques Chimique de l'eau de gâchage

Les caractéristiques	La valeur
PH	7.71
conductibilité	1745
Chlore Cl^-	236.30 mg/l
Sulfate SO_4^-	349.60 mg/l
Magnésium Mg^{2+}	115.3 mg/l
Sodium Na^{2+}	néant
Calcium Ca^{2+}	269.50 mg/l

IV.2.6 Nature du sable utilisé

Le sable de base de notre recherche provient des abords de l'Oued M'aitre. Cet oued est situé entre les collines de Bousaada, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins. Les caractéristique physique et analyse granulométrique du sable de Bousaada sont illustrées dans les tableaux (IV.13, IV.14).

Tableau IV.13. Caractéristiques du sable de Bousaada

Sable 0/5		M_{app} (g/cm ³)	M_{abs} (g/cm ³)	M_f	ES		A (%)	P (%)	C (%)	e (%)
					ESV (%)	ESP (%)				
SD	Compact	1.69	2.56	1.76	90.56	85	2.44	28.30	71.7	39.48
	Lache	1.52						34	66	51.52

Notre sable est très propre l'absence totale de fines argileuses , risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau, d'après les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX.

Le module de finesse (M_f) est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable. Le sable alluvionnaire de Boussaâda est un sable fin.

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18- 554 et NF P18- 555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est –à- dire $Ab < 5\%$. Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée.

La norme NF P 18 541 fixe comme valeur maximale 5%, pour les bétons classiques, ce qui est peut-être insuffisamment sévère, valeur d'ailleurs ramenée à 2,5% pour les bétons de résistance caractéristique supérieure à 36 MPa.

Tableau IV.14. Analyse granulométrique du sable de Bousaada

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	1	1	0.1	99.9
2.5	86	87	8.7	91.3
1.25	57	144	14.4	85.6
0.63	54	198	19.8	80.2
0.315	242	440	44	56
0.16	447	887	88.7	11.7
0.08	105	992	99,2	0.8
Fond	6	998	99,8	0.2

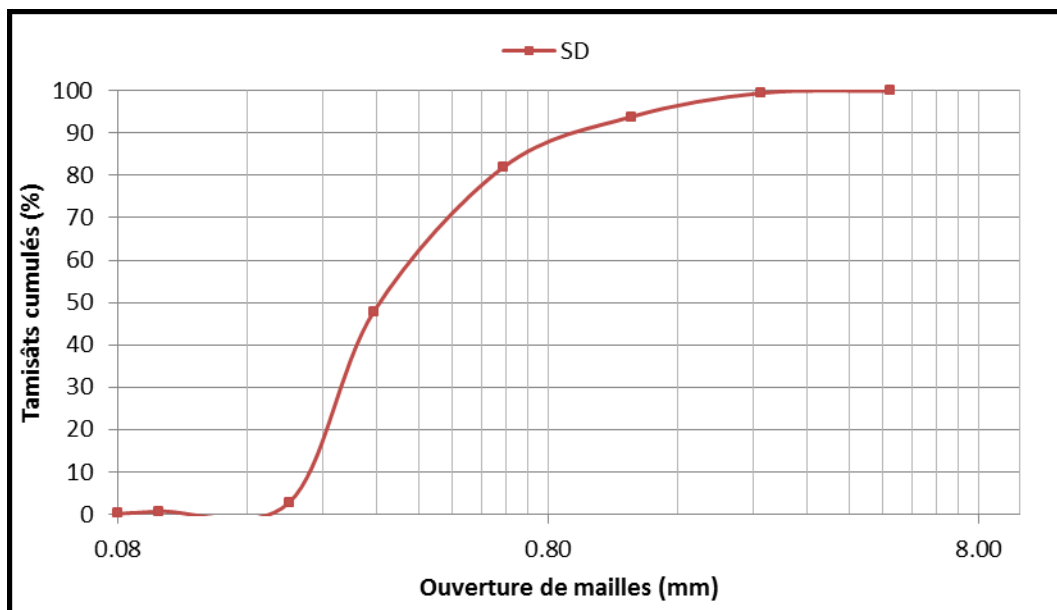


Figure IV. 6. La courbe granulométrique du sable (0/5).

L'échantillon du sable alluvionnaire de Bousaada a été examiné aux laboratoires de la cimenterie Lafarge a Hammam Dhalaa (Wilaya de M'sila), Le sable de Bousaada est un sable à haute teneur en silice, Elle est donnée au tableau (IV.15).

Tableau IV.15. Analyse chimique du sable de Bousaada

CONSTITUANTS		
Elément	Symbole	Teneur en (%)
Silice	SiO ₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0.90
Alumine	Al ₂ O ₃	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	So ₃	0.44
Pente au fer	P.A.F	2.81

Les caractéristiques chimiques montre que ce sable contient une haute teneur en silice.

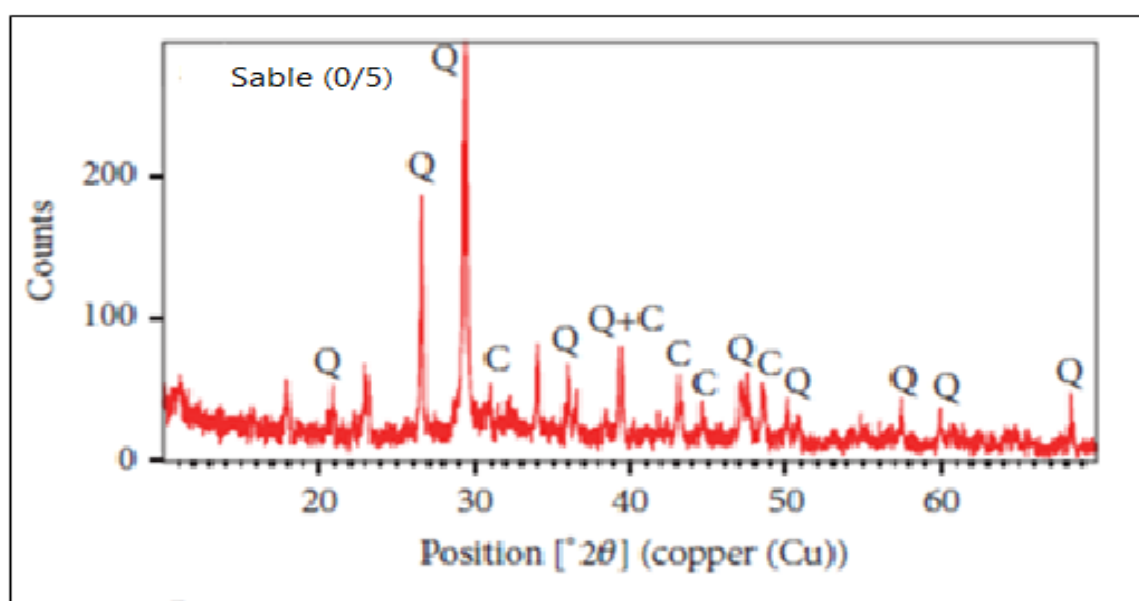


Figure IV. 7. Diffractogramme X du du sable de Bousaada.

IV.2.7 Graviers

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière Cosider). La composition chimique du gravier de carrière est établie en mars 2018, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au tableau (IV.16).

Les fractions du gravier sont :

- Fraction 3/8
- Fraction 8/16



Photo IV.5. Les granulats utilisés dans l'étude

Tableau IV.16. Analyse chimique de la pierre concassée, en (%)

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

Gravier 3/8

Tableau IV.17. Caractéristiques physiques du gravier 3/8

gravier		M _{app} (g/cm ³)	M _{abs} (g/cm ³)	L _A (%)	Micro Deval (%)	Coeff D'aplatis sement(%)	A (%)	P (%)	C (%)	e (%)
3/8	Compact	1.63	2.71	16.14	16.6	15	1.138	39.62	60.38	65.62
	Lâche	1.44						46.66	53.34	87.47

Tableau IV.18. Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	98	98	4,9	95.1
6,3	726	824	41.2	58.8
5	376	1200	60	40
4	519	1719	85.95	14.05
3,15	229	1948	97.4	2.6
2,5	46	1994	99.7	0.3
Fond	2	1996	99,8	0.2

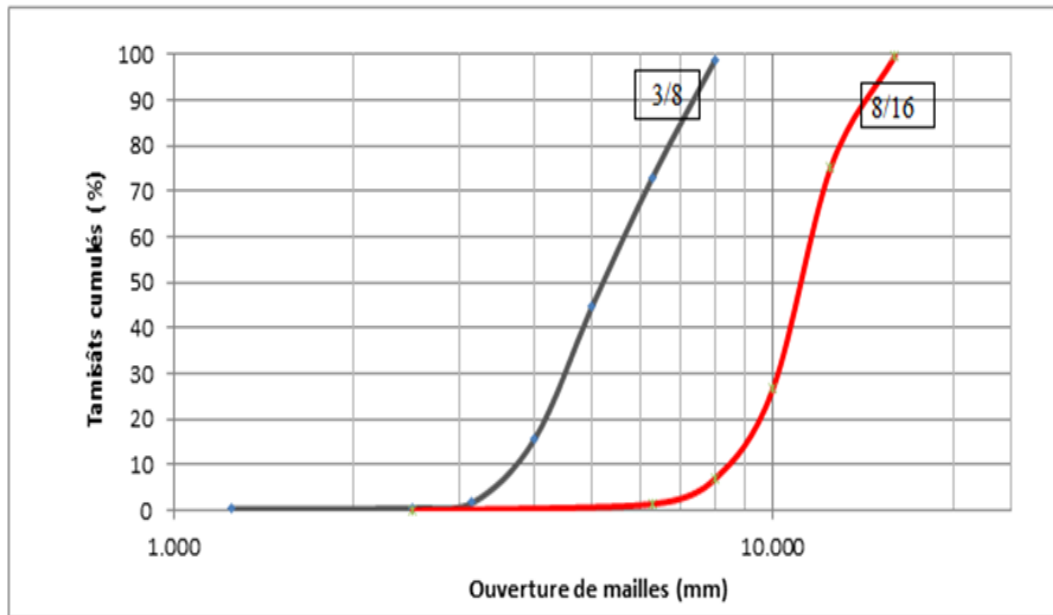


Figure IV. 8. La courbe granulométrique des graviers (3/8, 8/15).

Gravier 8/15

Tableau IV.19. Caractéristiques physiques du gravier 8/15

gravier		M_{app} (g/cm ³)	M_{abs} (g/cm ³)	L_A (%)	Micro Deval (%)	Coeff D'aplatis- sement(%)	A (%)	P (%)	C (%)	e (%)
8/15	Compact	1.66	2.68	20.88	17.6	16.5	1.465	38.22	61.8	61.82
	Lâche	1.49						44.56	65.35	80.37

Commentaire:

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier très dure ($L_A=16.14\%$) / < 20 et gradué.
- Le gravier (8/15) :c'est un gravier dur ($L_A=20,88\%$) ($20 < L_A < 25$), se trouve dans l'intervalle des graviers admissibles.

Tableau IV.20. Analyse granulométrique du gravier 8/15

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	2	2	0.1	99.9
12.5	434	436	21.8	78.2
10	1035	1471	73.55	26.45
8	396	1867	93.35	6.65
6,3	125	1992	99.6	0.4
5	1	1993	99.65	0.35
Fond	2	1995	99.75	0.25

IV.3 Préparation et conditionnement des échantillons de béton

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable/gravillons sur une courbe de référence.

IV.3.1 La formulation de la composition des bétons ordinaire

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible.

Sur le graphe d'analyse granulométrique on trace la courbe granulaire de référence OAB.

- Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D des plus gros granulats.

$$\text{Point B : } \begin{cases} X=16 \text{ mm} \\ Y=100 \% \end{cases}$$

- Point de brisure A à pour coordonnées :
- En l'abscisse :

$$D \leq 25, X=D/2;$$

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Les valeurs de K et K_s et K_p sont données par des tableaux.

- Dosage de ciment $C = 350 \text{ kg/m}^3 \rightarrow K = 2$, pour les granulats concassé.

- Pour le dosage en ciment de 350kg/m³, et avec un granulat concassé et une vibration normale et le module de finesse

Mf = 1.78 est :

$$\begin{cases} K_s = 0 \\ K = 2 \\ K_p = 0 \end{cases}$$

Point A: $\begin{cases} X = D/2 = 16/2 = 8\text{mm} \\ Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \\ Y = 50 - \sqrt{16} + 2 = 48 \end{cases}$

❖ dosage des granulats:

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (Graphe - 2-) que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats S, G3/8, G8/15

Les résultats obtenus sont :

Sable (S)	→	22 %
Gravier (G3/8)	→	33 %
Gravier (G8/15)	→	45 %

❖ coefficient de compacité γ :

$$\begin{cases} D=16 \\ \text{Béton plastique } \gamma=0,820 \\ \text{Vibration puissante} \end{cases}$$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0.01 ; Donc

$$\begin{aligned} \gamma &= 0.830 - 0.01 \\ \gamma &= 0.820 \end{aligned}$$

❖ détermination de volume des granulats:

$$VC = C/3.10 = 350/3.10 = 113\text{l/m}^3$$

$$V_g = V_T - VC$$

$$V_g = 1000\gamma - VC$$

$$V_g = 1000(0.820) - 113 = 707 \text{ l/m}^3$$

$$V_g = 707 \text{ l/m}^3$$

❖ détermination du volume absolu de chaque granulat:

- Volume absolu du sable = $707 \times 0.22 = 155.54 \text{ l}$
- Volume absolu de gravier (3/8) = $707 \times 0.33 = 233.31 \text{ l}$
- Volume absolu de gravier (8/15) = $707 \times 0.45 = 318.15 \text{ l}$

Les masses spécifiques sont :

- - Sable = 2.54 g/cm^3
- - Gravier (3/8) = 2.56 g/cm^3
- - Gravier (8/15) = 2.62 g/cm^3

Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/m^3 :

- Ciment = 350 kg/m^3 .
- Sable = $2.54 \times 155.54 = 395.072 \text{ kg/m}^3$
- Gravier (3/8) = $2.56 \times 233.31 = 597.273 \text{ kg/m}^3$
- Gravier (8/15) = $2.62 \times 318.15 = 833.553 \text{ kg/m}^3$
- Eau total = 197 l/m^3

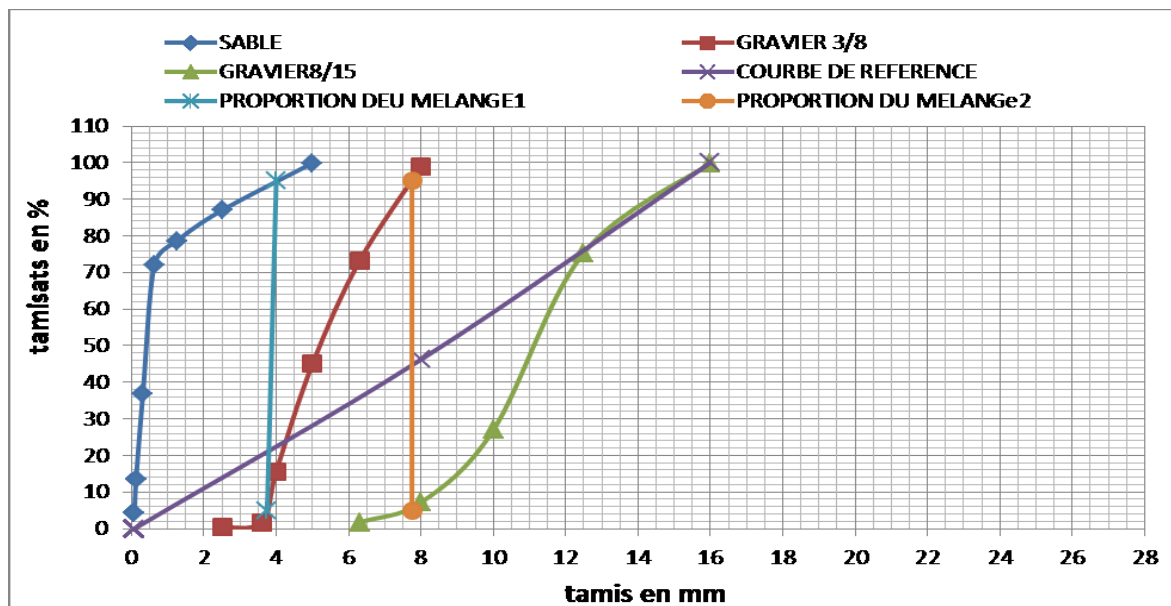


Figure IV.9. La courbe granulométrique.

Notre béton a été formulé d'après la méthode de Droux-Gorisse. Les constituants et leurs quantités sont présentés au tableau suivant (tableau V.21).

Tableau V.21. La composition d'un m³ de béton ordinaire

Constituants	Quantité Kg/m ³
Ciment	350
Gravier (3/8)	597.273
Gravier (8/16)	833.553
Sable (0/5)	395.072
Poudre de marbre(5%)	17.5
Poudre de marbre(10%)	35
Poudre de verre (5%)	17.5
Poudre de verre (10%)	35

IV.3.2 Composition des différents bétons ordinaires

Nous avons réalisé des essais sur des bétons confectionnés avec de superplastifiant et des bétons à base de ciment Portland substitué en poids par différents pourcentages de :

- 5 % et 10 % de la poudre de marbre d'industrie de Boussaâda ;
- 5 % et 10% de la poudre de verre ;
- Combinaisons entre 5% de la poudre de verre et 10 % de la poudre de marbre ;
- Combinaisons entre 10% de la poudre de verre et 5 % de poudre de marbre .

Ces bétons ont été conservés pendant 90 jours dans une eau de robinet, de béton ont subits différents essais physiques, mécaniques et chimiques. Les tableaux (IV. 23) et (IV. 24) donnent la composition des différents bétons étudiés. Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux imbibés et les dosages en adjuvants sont présentés.

Tableau IV.22. Liste des différents bétons étudiés.

Notation	Désignations
BT	Béton sans poudre de verre, poudre de marbre et sans super plastifiant
BM5	Béton + 5 % poudre de marbre,
BM10	Béton + 10 % poudre de marbre,
BV5	Béton + 5 % poudre de verre,
BV10	Béton + 10 % poudre de verre,
1BM5	Béton + 5 % poudre de marbre +1% super plastifiant,
1BM10	Béton + 10% poudre de marbre +1% super plastifiant,
1BV5	Béton + 5 % poudre de verre +1% super plastifiant,.
1BV10	Béton + 10% poudre de verre +1% super plastifiant,
BV5M10	Béton+ 5% poudre de verre + 10% poudre de marbre,
BV10VM5	Béton+ 5% poudre de verre + 10% poudre de marbre,
1BV5M10	Béton+ 5% poudre de verre + 10% poudre de marbre +1% super plastifiant,
1BV10VM5	Béton+ 5% poudre de verre + 10% poudre de marbre +1% super plastifiant.

Tableau IV.23. Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires.

COMPOSITION Kg/m ³	Designation des betons ordinaires (V=0,047 m ³)								
	B-T	0BM5	0BM10	1BM5	1BM10	0BV5	0BV10	1BV5	1BV10
E/C	0.56	0.59	0.62	0.49	0.54	0.59	0.62	0.489	0.488
Eau	9.25	9.25	9.25	7.69	8.124	9.25	9.25	7.65	7.23
Ciment	16.45	15.63	14.81	15.63	14.81	15.63	14.81	15.63	14.81
G (3/8)	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07
G (8/16)	39.17	39.17	39.17	39.17	39.17	39.17	39.17	39.17	39.17
S (0/5)	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56
marbre	--	0.822	1.645	0.822	1.645	--	--	--	--
Poudre de verre	--	--	--	--	--	0.822	1.645	0.822	1.645
Super plastifiant	--	--	-	0.1645	0.1645	--	-	0.1645	0.1645
Reduction d'eau (%)	0.00	0.00	0.00	16.86	12.17	0.00	0.00	17.29	21.83

Tableau IV.24. Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires (données pour 1 m³).

Composition (kg)	Designation des betons ordinaires				
	1BT	BV5M10	BV10M5	1BV5M10	1BV10M5
E/C	0.56	0.59	0.62	0.49	0.54
Eau	215.36	215.36	215.36	215.36	215.36
Ciment	350	297.5	297.5	297.5	297.5
G (3/8)	142.63	142.63	142.63	142.63	142.63
G (8/16)	968.94	968.94	968.94	968.94	968.94
S (0/5)	651.83	651.83	651.83	651.83	651.83
Poudre de marbre	-	29.75	14.88	29.75	14.88
Poudre de verre	-	14.88	29.75	14.88	29.75
Super plastifiant	3.5	-	-	2.1536	2.1536

IV.3.3 Fabrication et conditionnement des éprouvettes

Le béton a été coulé dans les moules cubiques et prismatiques en deux couches. Chaque couche a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes par couche. Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions 10 cm x 10 cm x 10 cm et des moules prismatiques de dimensions 7 cm x 7 cm x 28 cm, les éprouvettes cubiques sont destinées aux essais de masse volumique aux essais de perte de masse et aux essais de compression avant et après exposition aux cycles thermiques. Les éprouvettes prismatiques sont réservées à la mesure de la résistance à la flexion et la porosité.

IV.3.4 Cure appliquée

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et le même conditionnement conformément à la norme NF P 18-404. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans leur moule à température ambiante (20 ± 2) °C. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20 °C pendant 90 jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet également de maintenir les bétons saturés et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains



Figure IV.10. Conservation les éprouvettes dans l'eau.

IV.4 Programme experimental

IV.4.1 Essais macrostructuraux

Nous avons choisi de réaliser une campagne expérimentale de caractérisation des principales propriétés de nos matériaux à haute températures, parmi lesquelles :

- La résistance à la compression sur éprouvettes cubiques (10 cm x10 cm x10 cm).
- La résistance à la flexion sur éprouvettes prismatiques (7 cm x 7cm x 28cm).
- La perte de masse sur éprouvettes cubiques (10 cm x10 cm x10 cm).
- La porosité à l'eau et la densité sur éprouvettes cubiques (7 cm x7 cm x7 cm).
- Le changement du volume pour les éprouvettes (10cm x10 cm x10 cm).

IV.4.2 Essais microstructuraux

La microstructure interne est observée par diffraction X. Les analyses thermiques gravimétriques et différentielles (ATG et ATD) permettent de quantifier la portlandite. Ces techniques sont utilisées pour caractériser les dégradations de béton.

IV.5 Essai de chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermique. Toutes les éprouvettes retenues pour cette étude sont testées après leur refroidissement. Nous appliquons trois cycles de chauffage-refroidissement de 20 °C à différentes températures de palier : 200 °C, 400 °C, 600 °C. Chaque cycle de chauffage- refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante. Finalement des éprouvettes ont été exposées à une température élevée variant de 200 °C et 400 °C et 600 °C avec une vitesse de la montée en température de 1°C/ min et un maintien de température dans le four à moufle pendant 1 heure .

Le procédé expérimentale appliqué repose sur Chargement thermique puis mécanique (écrasement directe)



Figure IV.11. Disposition des éprouvettes dans les fours

IV.6 Procédure de fabrication des bétons

De nombreux coulages étant prévus pendant cette étude, il a été très important de s'assurer de la reproductibilité des achas pour mete en place des échanions à différentes périodes de la journée ou de l'année. Les valeurs d'affaissement au cone d'Abrams ont permis de s'assurer de la similarité de béton. Le protocole des étapes de fabrication de béton est le suivant :

- 1- Les granulats et liant (ciment + ajout cimentaire) sont mélangés à sec pendant une minute.
- 2- L'eau de gâchage est ajoutée à un tiers du volume de super plastifiant et de malaxage se poursuit pendant 2.5 mn.
- 3- Le super plastifiant restant est ajouté avec un malaxage final d'une minute.

Les chantillons de béton sont conservés dans leur moule dans un endroit humide (20 °C , 95 % HR) pendant 24 heures. Ensuite immergés dans les milieux préparés à 20 °C jusqu'à jour de l'essai.

Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans additions sont comparées.

IV.7 Essais à l'état frais

Le béton est matériau de construction formé par un mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est moulable, il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon sa formulation, sa mise en œuvre et ses traitements de surface, ses performances et son aspect peuvent considérablement varier.

Le protocole expérimental de début de prise et fin de prise est compatible avec les recommandations de la norme européenne NF EN-(196-3) et NF EN- (197-1) [NF EN-(196-3) NF 196-3, 2002], [NF EN-(196-1) NF 196-1, 2002]. Pour tout le béton fait, maniabilité a été mesurée par le test cône d'affaissement Abrams selon NF EN 12350-2 [NF EN 12350-2, EN 12350-2, 2009].



Figure IV. 12. Mesure l'affaissement du béton

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. La détermination de la mesure la teneur en air occlus du béton frais c.-à-d. connaître la contenance en air d'un béton quelconque, selon [NA EN 12350-7]. La mesure de l'air occlus d'un béton frais est basée sur le fait que seul l'air occlus est compressible. L'aéromètre travaille selon le principe de la loi de BOYLE – MARIOTTE.



Figure IV. 13. L'airomètre

La densité des mélanges a été calculée en fonction de l'échantillon introduit dans l'appareil de mesure de l'air occlus. On se sert de la chambre inférieure de L'aéromètre rempli par le mélange, avant la mesure de l'air occlus. Si les poids de la chambre pleine et vide sont respectivement $M1$ et $M0$, la densité du mélange frais est égal à :

$$d = (M1 - M0) / V$$

Le volume de la chambre inférieure de l'aéromètre $V = 8 \text{ L}$.



Figure IV. 14. Mesure de la densité du béton à l'état frais

IV.8 Essais macrostructuraux

A la suite des essais thermiques, les éprouvettes sont sorties du four et préparées pour subir les mesures de perte de masse, absorption d'eau et pour subir ensuite les essais mécaniques de compression et de flexion. Ces essais permettent d'observer l'évolution des propriétés physiques et mécaniques résiduelles des matériaux avec l'élévation de la température.

IV.8.1 Essai de compression

La résistance en compression axiale testé après 7jours, 14jours, 28jours et 90 jours de stockage a été réalisée sur trois cubes des essais (10cm x 10cm x 10cm) selon la norme européenne NF EN 12390-4 [NF EN 12350-4 EN 12390-5, 2009].



Figure IV. 15. La presse hydraulique

IV.8.2 Essai de flexion

Essai de traction par fendage [NA EN 12390-6], l'essai consiste à écraser un cylindre de béton normalisée (16*32 cm ; norme NF P 18-406, NA 427), suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse . Cet essai est souvent appelé « Essai Brésilien ». Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, Cet essai nécessite que les éprouvettes présentent des génératrices bien rectilignes. La mise, en charge s'effectue à la vitesse de 0,25 MPa/s avec une tolérance de $\pm 0,1$ MPa par seconds. La résistance en traction par fendage sera :

$$f_{tf} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

P : charge de rupture en newtons.
cylindre.

D et L : diamètre et longueur du



Figure.IV.16. Dispositif d'essai de traction par flexion

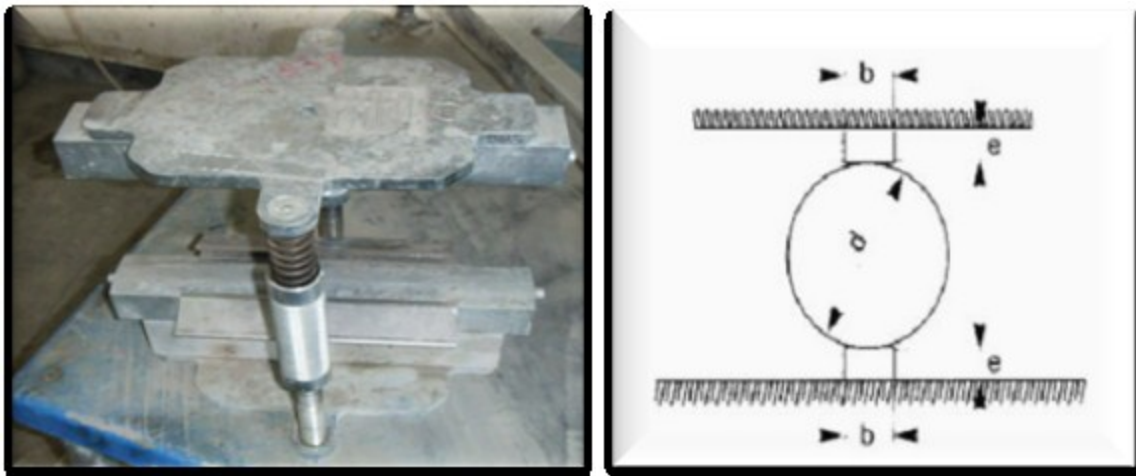


Figure IV.17. Disposition de mise en charge de l'éprouvette cylindrique

IV.5.3 Absorption d'eau

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure AFREM [AFPC, 97]. l'essai a été réalisé sur des chantillons moulés des formes cylindriques de diamètre 11cm et de hauteur 22cm (trois échantillons par formulation). Les échéances de mesure sont les suivantes: 7j, 14j, 28j et 90 jours de conservation dans la salle humide.

A l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à 80 ± 2 °C. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à un intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit

inférieure à 0,1%. Les éprouvettes sont alors placées dans des dessiccateurs pendant 24 heures pour permettre le retour en température. Par la suite, la surface latérale de chaque éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai.



Figure IV. 18. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales (Figure IV. 19). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 et 24 heures. L'essai est terminé après 24 h.

Le coefficient de sorptivité est défini par la relation suivante :

$$S = (Q / A) / t$$

Avec :

S : le coefficient de sorptivité en $(\text{mm} / \text{h}^{0.5})$;

Q : le volume de l'eau absorbée en mm^3 ;

A : la surface en contact avec l'eau en mm^2 ;

t : le temps écoulé en heure ;

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux.

IV.5.4 Porosité.

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été réalisé selon le mode opératoire recommandé par le groupe de travail ASTM C642, son avantage réside dans sa simplicité et le peu de moyens nécessaires à son utilisation. L'essai de la porosité est réalisée sur des éprouvettes de dimensions 7 cm x 7 cm x 7 cm, en appliquant les étapes suivantes :

- Séchage à l'étuve à 105 °C de l'échantillon, pendant au moins 24 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante, afin de faire évaporé toute la quantité d'eau évaporable. cette masse est noté « A » ;
- Immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures ;
- Chauffage jusqu'à ébullition pendant 5 heures figure (IV.20), puis pesage de l'échantillon à l'air (soit « C » ce poids) puis pesage à l'eau (pesée hydrostatique, voir la figure (IV.21) soit « D » ce poids

La porosité est calculée par la formule (loi d'ASTEM C642)

$$V_p = [(C-A)/(C-D)].100 \%$$

V_p: volume de vides (%)

A : poids de l'échantillon après étuvage (g).

C : poids à l'air après immersions et ébullition (g)

D : poids à l'eau après immersion et ébullition (g)



Figure IV. 20. Pesé hydrostatique des éprouvettes pour calculé la porosité



Figure IV. 19. Appareil de mise en ébullition des éprouvettes (essais de porosité)

IV.5.6 Estimation de la perte de masse

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

De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent des variations de masse dues au ressuage, à la dessiccation ou absorption d'eau. Pour rendre compte de ces variations, les éprouvettes sont pesées à différents temps : après leur démoulage, les éprouvettes de béton sont pesées et placées dans les bacs remplis d'eau pour limiter une longue durée d'exposition à l'aire libre qui entrainerait une dessiccation. A la fin de la période de cure, les éprouvettes sont essuyées avec un chiffon sec et pesées. Elles sont ensuite placées dans le four pour subir un cycle de chauffage-refroidissement.

Après le traitement thermique, chacune des éprouvettes est pesée une dernière fois pour quantifier la quantité de l'eau évaporée au cours du chauffage. Ces mesures sont effectuées sur l'ensemble des éprouvettes placées dans le four et pour tous les cycles de chauffage et pour chacune des compositions.



Figure IV. 21. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité

Les éprouvettes conservées dans l'eau ont été pesées d'abord, ensuite elles sont exposées aux fortes températures 20 °C ,200 °C, 400 °C, 600 °C. Les taux de diminution de la masse des éprouvettes est déterminé à partir :

$$T(\%) = (\Delta m.100) / m_1$$

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

T: taux de perte de masse.

m₁ : poids avant expositions à la température.

m₂ : poids après expositions à la température.

IV.5.7 Volume des éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes (longueur, largeur et hauteur) ont été calculées par la moyenne de trois mesures pour chaque dimension et pour chaque éprouvette. Pour la mesure des dimensions des éprouvettes, on a utilisé le pied à coulisse de précision de 0,01 mm. La mesure de la longueur, largeur et hauteur des éprouvettes a permis de calculer le volume

apparent de chaque éprouvette des différents bétons avant et après chaque cycle de chauffage et d'évaluer la surface sur laquelle elle été appliquée la charge de compression.



Figure II.22. Pied à coulisse digital.

IV.5.8 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression). La mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieure d'un élément de béton. L'essai est donc utilisé pour évaluer l'homogénéité du matériau et détecter la fissuration, les vides et les détériorations dues au feu. Donc, l'objectif principal de cette méthode est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.

Dans le cas d'un béton soumis au feu, l'élévation de température provoque une modification physico-chimique du matériau. L'auscultation sonique, basée sur des mesures de temps de parcours, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation [181], [1].

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, dont le nom de la méthode, à parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un circuit de mesure du temps et un affichage digital dutemps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs. La norme P 18-418 [NF P 18-418] décrit la méthode d'essais [181].

La vitesse des ondes, V , est calculée par la formule :

$$V = \frac{l}{t}$$

Où : l est la distance entre les transducteurs (m).

t est le temps de propagation (s).



Figure II.23. Appareil à ultrasons hautes performances et ses équipements.

IV.6 Essais microstructuraux

Après l'essai de compression, des analyses de diffractométrie aux rayons X (DRX) et ATG & ATD ont été conduites sur des échantillons exposés à température ambiante et haute température. Ces analyses sont nécessaires pour mieux comprendre le mécanisme de dégradation du béton.

IV.6.1 L'analyse DRX

La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. Les atomes s'organisent donc en plans réticulaires plus ou moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées (h , k , l) dans un système de repérage de l'espace [150].

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé (par exemple pour la silice, elle distingue le quartz de la cristobalite).

Les domaines d'application de la diffraction par Rayon X sont très variés et peuvent concerner aussi la recherche (valider un nouveau matériau, une réaction chimique ou physique, étudier des roches, ou des structures protéiques...), l'industrie (contrôle qualité d'un produit) ou l'art (analyse de peinture).

Nos analyses DRX ont été faites au laboratoire de physique à l'université de M'sila. L'appareil utilisé est un diffractomètre X'PERT couplé à un système informatique permettant l'exploitation et le tracé des résultats acquis (figure IV.16). La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des bétons broyés ($\phi \leq 80\mu\text{m}$).

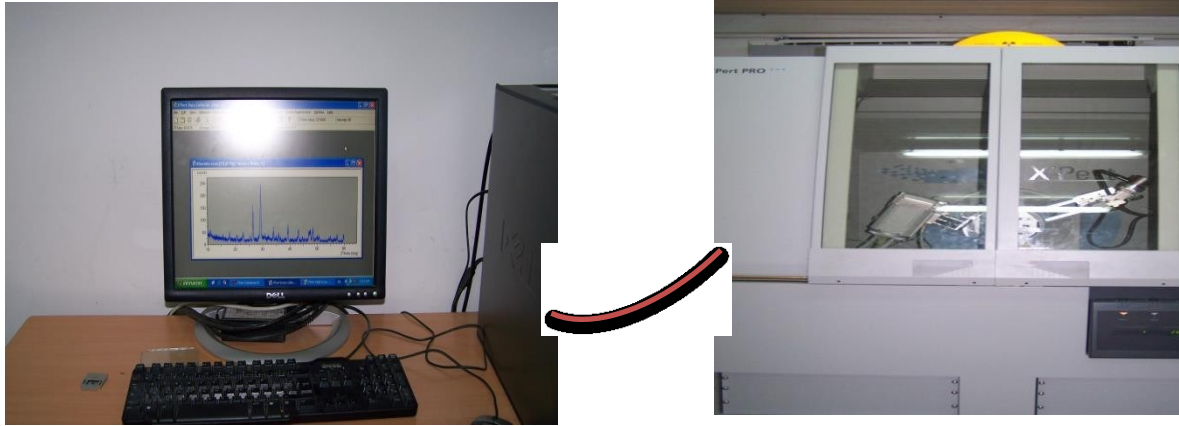


Figure IV. 24. Diffractométrie X'PERT

IV.6.2 L'analyse ATG et ATD

L'analyse thermogravimétrique (ATG) consiste à mesurer la variation de masse d'un matériau en fonction du temps et de la température. Cette technique est utilisée pour la détermination des caractéristiques des matériaux tels que la stabilité thermique, la cinétique des réactions chimiques, les températures de dégradation ou encore la volatilité [149].

L'analyse thermodifférentielle (ATD) va permettre une mesure de la différence de température entre l'échantillon et un corps témoin inerte. Cette technique vient généralement compléter l'analyse ATG. Les analyses par ATG et ATD ont été faites au laboratoire de physique à l'université de M'sila (figure (IV.23)). Ce procédé sert à mesurer les variations massiques d'un matériau en fonction de la température et du temps. L'analyse thermogravimétrique (ATG) enregistre la perte de poids d'un échantillon de matière plastique soumis à une hausse de température dans des conditions d'atmosphère prédéfinies.



Figure IV. 25. Thermogravimétrie (ATG) et (ATD)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, ainsi que le détail des différentes formulations utilisées pour la réalisation de notre campagne expérimentale: études des propriétés physiques et mécaniques.

La granulométrie de la poudre de verre et la poudre de marbre est du même ordre de grandeur que le ciment. La finesse de la poudre de verre et poudre de marbre plus grande à celle du ciment.

La composition élémentaire des additions est majoritairement basée sur le système SiO_2 , Al_2O_3 , CaO . Certaines additions contiennent des éléments qui peuvent être nocifs. La poudre de verre contient une forte proportion d'alcalins ce qui n'est pas problématique dans le cas d'une utilisation sous forme de fines (Idir 2009).

Nous avons déterminé des formulations avec la méthode DREUX-GORISSE. Cette formulation nous a permis de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

Pour qualifier les performances des différents bétons, de nombreux essais ont été réalisé :

certaines sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression et à la traction et d'autres concernent les propriétés de transfert avec les essais de porosité (porosité accessible à l'eau) et d'absorption capillaire.

Chapitre V- Résultats et interprétation

V.1 L'introduction

Dans notre travail, nous avons essayé de valoriser la poudre de verre et la poudre de marbre en différents pourcentage par substitution avec le ciment.

Pour la réalisation de ce projet nous avons proposé le programme de travail suivant:

Deux types des additions ont été utilisés les fillers marbre (PM) et le verre (PV). En ce qui concerne les additions minérales, nous avons souhaité, en premier lieu, comparer les différentes additions de manière à disposer la compatibilité entre les différents constituants des ciments. Ce choix a permis de mettre en évidence son effet sur les performances des bétons. Ainsi, deux additions (poudre de marbre (PM) et poudre de verre (PV)) ont été étudiées comparativement à un béton normal.

Les compositions des bétons avec et sans marbre ou verre retenues pour le programme expérimental sont reportées dans les Tableaux (IV.23), (IV.24) ; à noter que les teneurs en ajouts de marbre plus le verre et de super plastifiant : de 0%, 5%, 10% et 1% du poids de ciment.

Les éprouvettes de béton subissent une cure appropriée selon le type d'essai. Le milieu de conservation est l'eau robinet. Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans ajout cimentaire sont comparées.

Nous avons adopté la légende suivante pour les formulations de béton:

- BT : béton sans poudre de verre, sans poudre de marbre et sans super plastifiant ;
- BM5: béton avec 5 % de poudre de marbre ;
- BM10: béton avec 10 % de poudre de marbre ;
- BV5: béton avec 5 % de poudre de verre ;
- BV10: béton avec 10 % de poudre de verre ;
- 1BM5: béton avec 5 % de poudre de marbre et 1% de super plastifiant ;
- 1BM10: béton avec 10% de poudre de marbre et 1% de super plastifiant ;
- 1BV5: béton avec 5 % de poudre de verre et 1% de super plastifiant ;
- 1BV10: béton avec 10% de poudre de verre et 1% de super plastifiant.

Les mélanges de béton frais ont été préparés au laboratoire de génie civil (Université de M'sila). Les échantillons de béton ont été conservés dans leur moules dans un endroit humide à une température de 20 ° C et 95% humidité relative pendant 24 heures. Après démoulage, ils ont été immergés dans l'eau du robinet à 20°C jusqu'à l'âge de l'essai. Les caractéristiques physiques et caractéristiques mécaniques des bétons sans ajout sont comparées. Le marbre est ajouté à des doses de 5%, 10% du poids du ciment et le verre à 5% et 10%, respectivement.

V.2 Effet combiné de poudre de verre et de poudre de marbre sur les caractéristiques du béton soumis à température ambiante

V.2.1. L'effet de la poudre de verre et de poudre de marbre sur consistance normale

La consistance de la pâte du ciment est caractérisée par sa fluidité. Cet essai est nécessaire pour déterminer les temps de début et fin de prise, ainsi que l'expansion. Les mesures de la consistance normale sur la pâte du ciment sont déterminées, selon la norme EN 196-3 [151].

Dans cette partie, avec une série d'expériences, nous allons examiner l'influence de poudre de verre et de marbre sur la consistance de la pâte du ciment. Le pourcentage de poudre varie de 5% à 10% sous l'hypothèse que ces particules très fines pourraient réduire la porosité interstitielle des granulats (les interstices entre les grains de sable) figure (V.1).

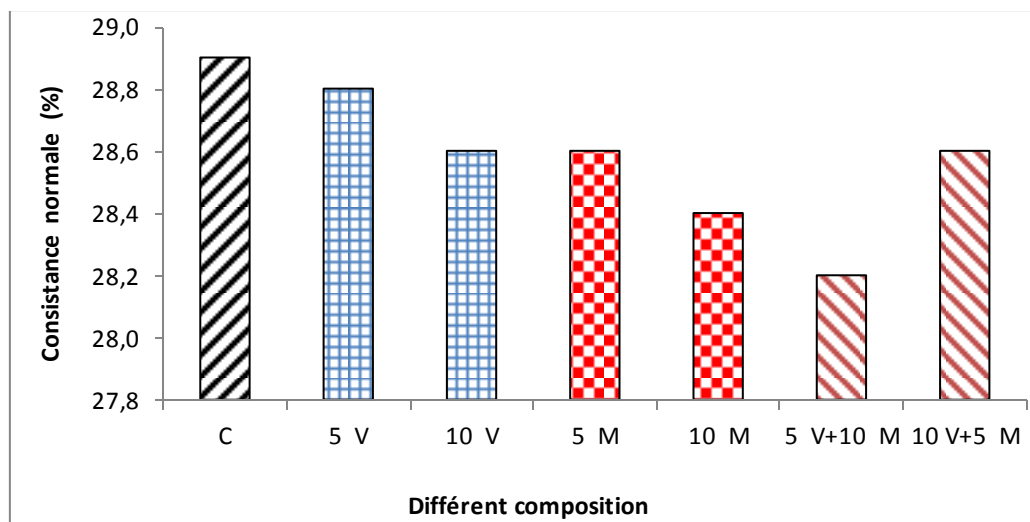


Figure V.1. Evolution de la consistance normale en fonction les différents compositions.

On constate d'après la figure (V.1) que l'addition de 5 % et 10 % du filler diminue la quantité d'eau de 28,9 % à 28,2 % respectivement. Les mêmes constatations ont été faites par S. Tsivilis et al [152], où une diminution de 24 % à 22,5 % pour une substitution de 5 % à 35 % de marbre comparant au ciment contrôlé.

Dans ces recherches, nous considérons la poudre de verre comme une substitution du ciment, pour économiser la fraction non hydratée du ciment dans les interstices. Chaque liant hydraulique demande une certaine quantité d'eau différente, appelée ici quantité d'eau optimale, pour que la pâte soit de bonne consistance ou que la prise se fasse dans de bonnes conditions.

En remplaçant une partie du ciment par des poudre de verre, et en supposant que le poudre de verre n'absorbent pas d'eau, ni ne produisent de réaction chimique avec l'eau, la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation diminue. De plus, la forme sphérique des billes diminue le frottement entre les particules de liant. Cela rend le mélange plus plastique et donc moins d'eau est nécessaire pour obtenir la consistance voulue [174].

Des constatations identiques que celles de notre étude, ont été observées par des chercheurs, ces constatations indiquent que la consistance normale diminue, avec l'augmentation du verre figure (V.1), [147]. En outre, on constate que l'addition de 5 % du verre au ciment contenant 10 % de marbre diminue le pourcentage d'eau. En comparant avec des d'autres mélange, on remarque que, l'addition de 10 % de verre contenant 5% de marbre une augmentation du pourcentage d'eau de 28.2 % à 28.6 % respectivement [147].

V. 2. 2. L'effet de la poudre de verre et de poudre de marbre sur le temps de prise

Le temps de prise dépend de plusieurs paramètres : composition chimique, la finesse des composants ...etc. Les récentes recherches montrent que les adjuvants modifient de manières différentes la prise des suspensions cimentaires.

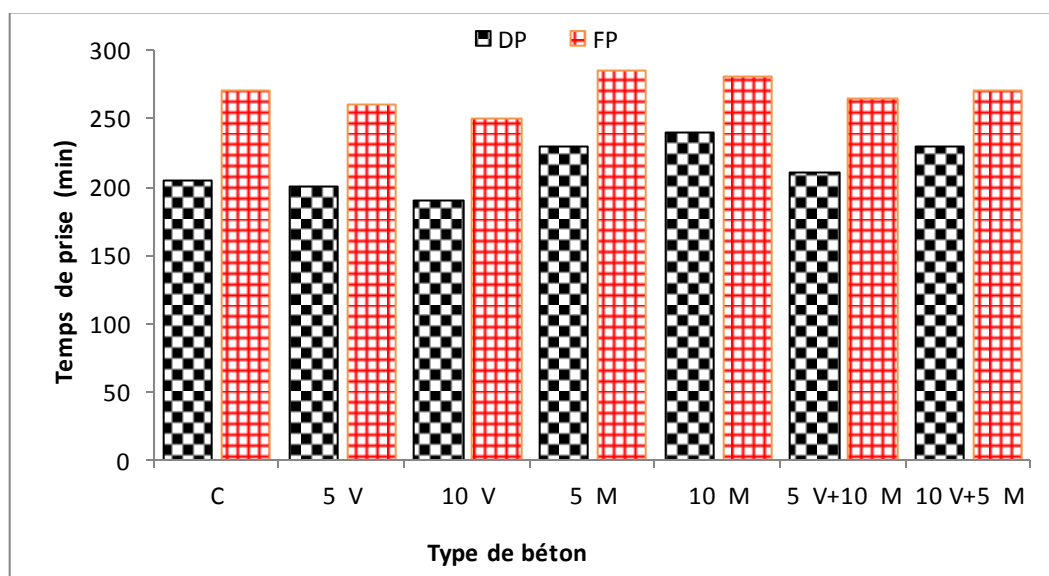


Figure V.2. Variation des temps de prises en fonction les différents compositions.

On constate d'après la figure (V.2), que le temps de début de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage de verre. En ajoutant la poudre de marbre dans la pâte de ciment, a trouvé que le temps de début de prise augmente quand la quantité de marbre augmente figure (V.2).

Cependant, le début de prise est dans la norme qui exige un minimum de 60 minutes pour le début de prise. Notons que l'effet d'accélérateur que joue le verre est d'environ 5 minutes pour 5 % d'ajout, et de 15 minutes pour 10 % d'ajout par rapport au ciment. La réduction du temps de début de prise avec l'augmentation de la quantité de verre est due à l'effet combiné l'augmentation du taux d'hydratation et l'augmentation de la fraction granulaire.

On remarque aussi que, une augmentation du temps de prise avec le taux de substitution du marbre. Cette augmentation est justifiée par la nature des réactions d'hydratation des ciments au marbre qui se déroulent plus lentement, à cause de la diminution du pourcentage des aluminates tricalciques et l'augmentation des silicates bi calciques, accompagné d'une diminution des silicates tricalciques dans la composition minéralogiques des ciments figure (V.2).

Ultérieurement, une légère différence notable au niveau du temps de fin de prise apparaît pour le mélange de (5V, 10M) et (10V, 5M). Alors on peut conclure que la combinaison de la poudre de verre et du marbre permet d'augmenter légèrement le temps de prise, à titre d'exemple les combinaisons (5V, 10M) et (10V, 5M) le processus d'hydrations est plus lent pour la pâte de ciment au jeune âge.

V.2.3. Caractéristiques du béton à l'état frais

V.2.3.1. Effet du pourcentage de la poudre de marbre et verre sur l'ouvrabilité du béton

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, fournit des mesures fiables de la consistance. L'affaissement est mesuré pour les neuf précédents mélanges du béton afin de connaître :

- ❖ L'effet du dosage en filler (verre, marbre) sur l'affaissement.
- ❖ L'effet du super plastifiant sur l'affaissement.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures (V.3) et (V.4):

En fonction d'affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (5cm à 7cm), les bétons adjuvantés présente un affaissement supérieur à celui des bétons non adjuvantés, parce que le super plastifiant augmente la fluidité du mélange en agissant sur les grains de ciment (phénomène de défloculation).

Les résultats de l'ouvrabilité du béton dans lequel la poudre de verre est ajoutée à des doses de 5% et 10% du poids du ciment, il semble que la maniabilité du béton diminue à mesure que la teneur en verre augmente.

La maniabilité des bétons avec poudre de verre et de fillers de marbre connaissent une légère amélioration de la fluidité des bétons par l'addition du verre .Les verres empêchent les particules de ciment de se former dans des blocs [142], [143], [6].

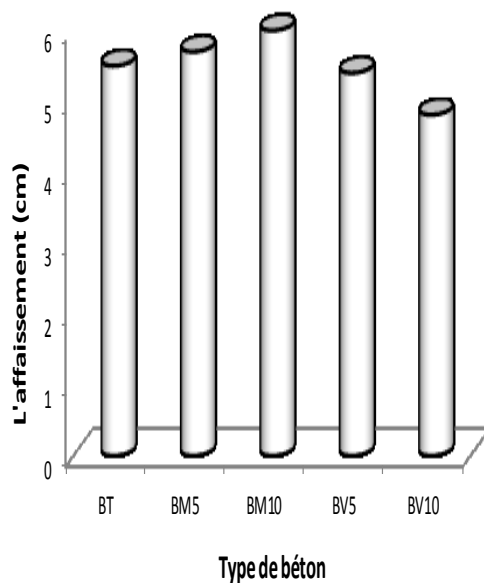


Figure V.3. L'affaissement des bétons non adjuvés

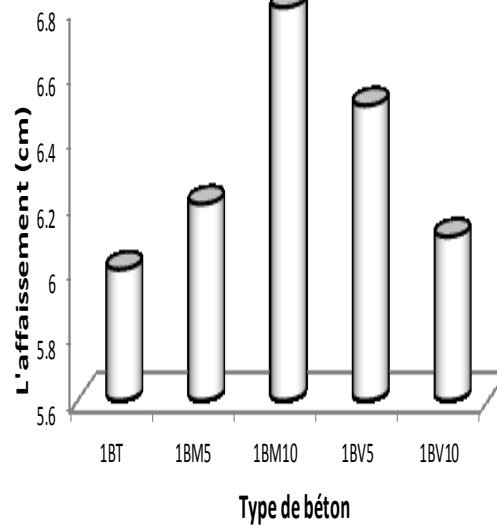


Figure V.4. L'affaissement des bétons adjuvés

Nous avons aussi remarqué qu'une combinaison de 1% du super plastifiant combinés et 10% des fillers aboutit à un béton ou à une l'affaissement supérieure à 6 cm. Au-delà d'un taux de 10% de fillers marbre, l'effet du super plastifiant devient significatif.

La poudre de marbre est un matériau inerte. Son ajout avec de petites fixations au mélange de béton en remplacement partiel du ciment augmente la maniabilité à l'état frais (voir les figures). Il facilite la dispersion du passé de ciment et le compactage qui provoque l'augmentation de la résistance.

Les valeurs d'affaissement augmentent d'environ 20%, et 13% en utilisant un taux de remplacement de ciment en poudre de marbre (5% et 10%) respectivement. Ceci indique qu'avec l'augmentation du pourcentage de poudre de marbre dans le béton, la valeur d'affaissement augmente. Ceci est en accord avec les résultats de B. Krishna Rao [147].

La figure (V.4) nous renseigne sur le comportement des bétons pendant l'écoulement, l'ajout de la poudre de verre influe positivement sur l'écoulement du béton tout en maintenant constant la quantité d'adjuvant et le même rapport E/C pour les tous échantillons. Ce résultat est dû à l'effet de correcteur rhéologique que joue la poudre du verre [147].

La diminution de l'ouvrabilité pourrait être interprétée en raison de la tension superficielle élevée de la poudre de verre, justifiée par la surface spécifique très fine représentée sur la figure 1; tandis que la quantité de ciment joue un rôle inverse, en raison de la quantité de pâte dans les lots, ce qui augmente la consistance du béton par sa propriété gélatineuse.

Sur la base des résultats expérimentaux présentés à la figure (V.4), l'incorporation d'ajouts minéraux affecte négativement sur l'ouvrabilité du béton. En effet, la teneur en verre augmente suite par une diminution à l'ouvrabilité. Comme il y a une réduction du module de finesse du matériau cimentaire, la quantité de pâte de ciment disponible est moindre pour fournir un effet lubrifiant par unité de surface d'agrégat. Par conséquent, il y a un frein à la mobilité [178].

V.2.3.2. La masse volumique

Les figures (V.5) et (V.6) illustrent l'évolution de la masse volumique des bétons non adjuvants à l'état frais.

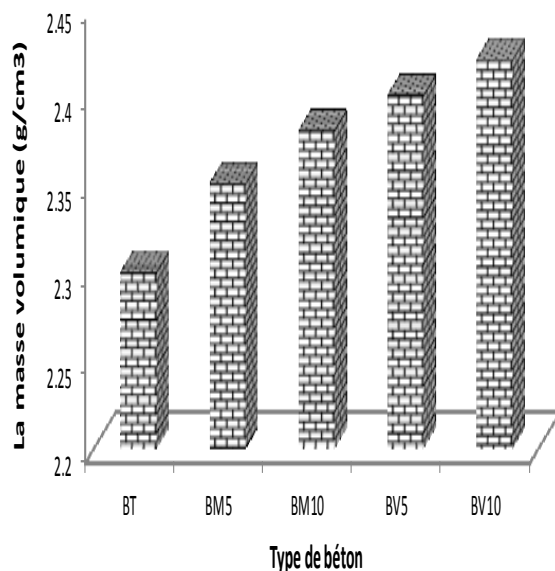


Figure V.5. Evolution de la masse volumique des bétons non adjuvants à l'état frais

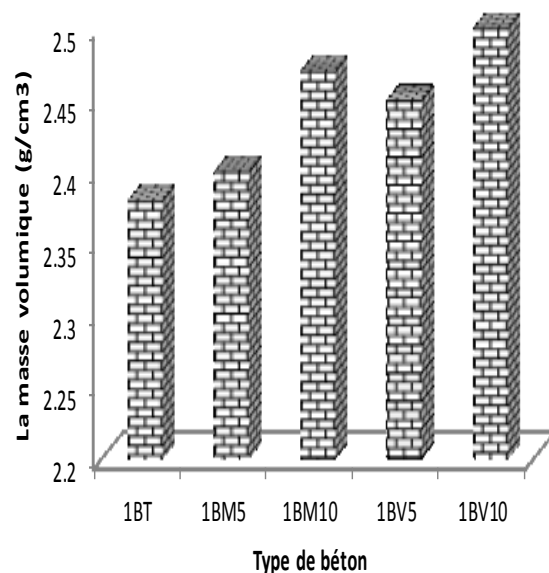


Figure V.6. Evolution de la masse volumique des bétons adjuvants à l'état frais

D'après ces figures, on remarque que la poudre de verre qui est un filler, intervient par sa finesse et s'insère dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité ; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique. Cette dernière augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, sa finesse ainsi que le taux de super plastifiant. On peut dire qu'il y a une proportionnalité entre la masse volumique et ces trois paramètres. Cette proportionnalité peut être expliquée par l'effet de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la fermeté du béton, donc on peut prouver que l'effet granulaire, conditionné par une finesse de mouture très élevée explique ce phénomène et bien sûr par l'intermédiaire du super plastifiant qui assure une meilleure mobilité.

Tandis que la masse volumique du béton de référence est 2300 kg/m^3 , on observe une augmentation de celle du béton avec poudre de verre à 2500 kg/m^3 et béton avec poudre de marbre à 2450 kg/m^3 . Cela est dû d'une part à l'effet de remplissage de la poudre du verre et poudre de marbre et d'autre part à la surface spécifique élevée ($800 \text{ m}^2/\text{kg}$, $700 \text{ m}^2/\text{kg}$) qui induit une compacité du béton d'où une densité accrue. Les résultats actuels obtenus sont conformes à des travaux de recherche entrepris par B. Krishna Rao, (2016) [145].

- Les bétons adjuvantés présentent une masse volumique supérieur à celle des bétons non adjuvantés, ce qui est lié au rôle du super plastifiant.
- Les bétons avec les fillers de poudre de verre présente une masse volumique supérieur à celle des bétons avec les fillers de poudre de marbre ce qui lié à la différence de la masse volumique de chaque filler (la masse volumique du poudre de verre est plus grande) [147].

On peut expliquer l'augmentation des masses volumiques par la capacité d'adsorption d'eau de particules fines qui ont remplacé une partie de ciment : en effet, une finesse plus élevée adsorbe plus d'eau. Par conséquent, on peut attribuer une partie des résultats obtenus à ce phénomène. Ainsi la granulométrie des particules des additions de dimensions moyennes plus faible, que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique qui conduit à un empilement plus compact des grains solides, et à modifier la microstructure en réduisant les pores de la matrices cimentaires.

V.2.3.3. L'air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier ou un béton le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange [85]. Il est possible d'évaluer la quantité d'air enfermée lors de remplissage par la méthode décrite par la norme NF 413-2 et EN 459-2. La teneur en air occlus d'un béton avec le filler est généralement comprise entre 1% et 1,5%, ce résultat est vérifié dans tous les bétons testés. Les résultats obtenus sont reportés sur les figures (V.7) et (V.8) pour les deux taux de substitution.

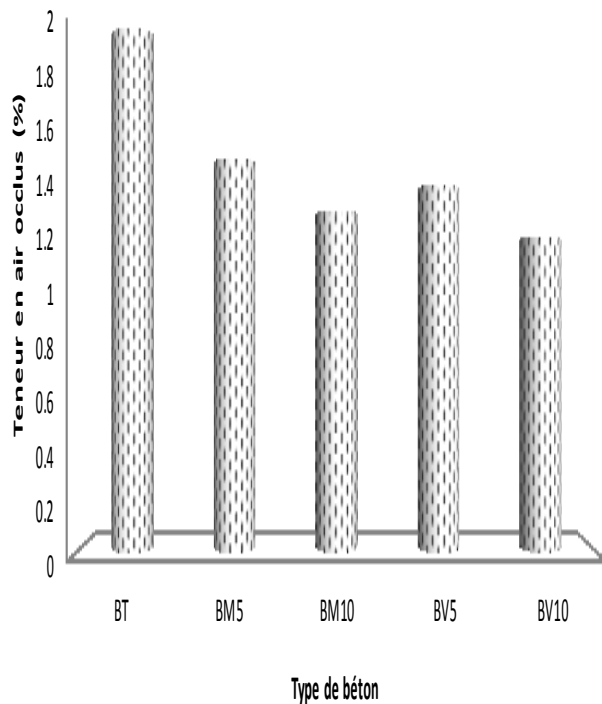


Figure V.7. Evolution de la teneur en air occlus des bétons non adjuvantés

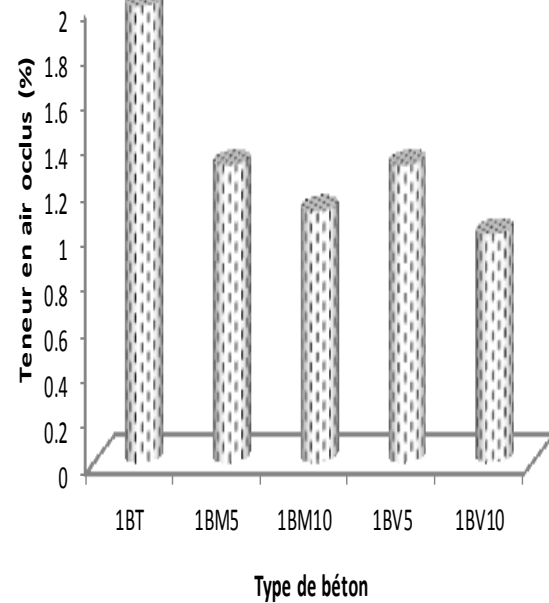


Figure V.8. Evolution de la teneur en air occlus des bétons adjuvantés

La figure (V.8) indique que le contenu d'air diminue pour les bétons contenant 10% verre. Car les poudre de verre est plus bon d'une part que les particules de ciment et d'autre part les particules plus fines de verre remplissent les vides entre les particules de ciment ayant pour résultat la microstructure imperméable de la pâte de ciment. L'effet remplissant de verre est l'un des facteurs important pour le développement des bétons denses avec une résistance élevée.

Les bétons adjuvantés présentent une teneur en air faible par rapport à ceux non adjuvantés. Le volume d'air occlus dans tous les bétons est limité dans un domaine assez réduit et acceptable, entre 1 et 2%.

V.2.4. Caractéristiques du béton à l'état durcis

V. 2.4.1. La densité

Les figures (V.9) et (V.10), présentent la variation de la densité des différents types de béton à l'âge (7, 14,28 et 90 jours).

On peut noter l'évolution de la densité des différents bétons conservés dans l'eau. Un mélange plus dense du béton avec les ajouts de verre et de marbre ont été enregistrées

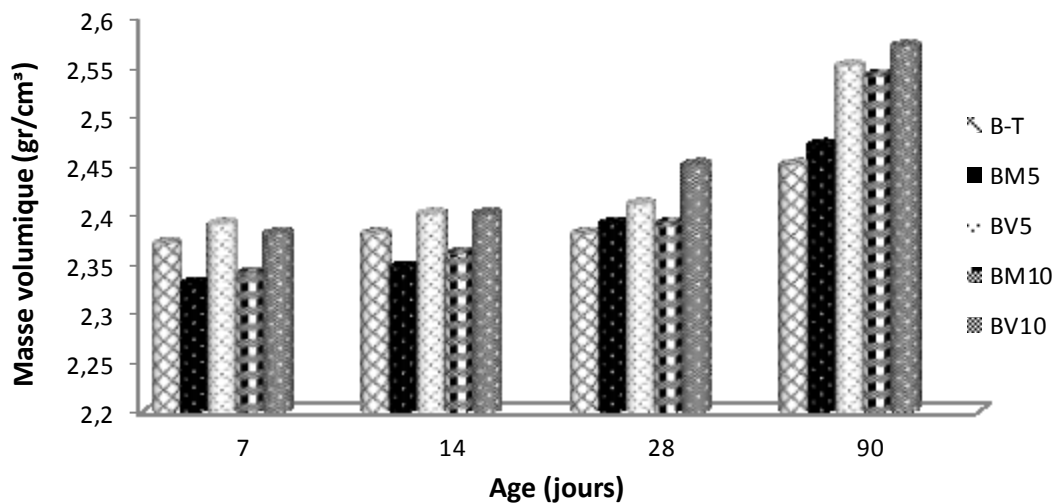


Figure V.9. La masse volumique des bétons non adjuvés en fonction de l'âge

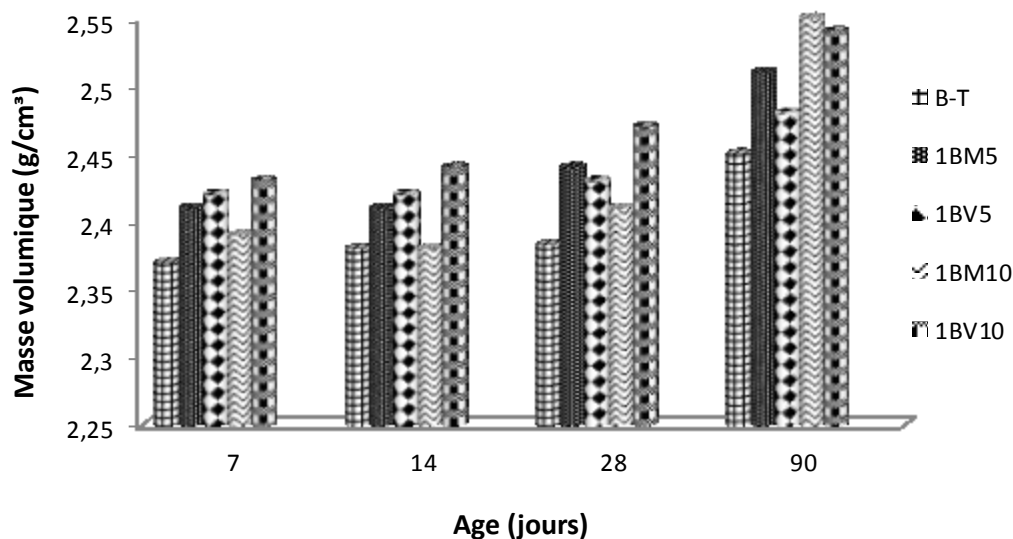


Figure V.10. La masse volumique des bétons adjuvés en fonction de l'âge

D'après les figures (V.9) et (V.10), on remarque que la densité des bétons augmente proportionnellement avec l'âge. Cette densité est augmentée avec des taux (10%,20 %) par rapport au béton témoin aux âges de 7 et 14 jours successivement. Par contre cette densité reste légèrement supérieure avec des taux (20 %,25 %) par rapport au béton témoin aux âges de 28 et 90 jours successivement.

D'autre part, on constate que la masse volumique à l'état durci pour les bétons 1BV5% augmenté ; on illustre un écart d'ordre 10,75 entre 1BV5% et BT, ainsi un écart de 14,21 entre

BM10% et 1BM10%. Ce qui permet de justifier l'activité de ce produit à favoriser l'hydratation du ciment et à améliorer la microstructure et Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Ceci confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [129] [179].

Par ailleurs, On constate que la substitution de 10 % (verre) du ciment importent une amélioration à la densité des bétons de fillers, le béton BM5 détienne la valeur la plus faible comparé aux autre types de béton; à 7 jours on a enregistré une augmentation de 15% par rapport au BV5, 7% à celle de BT; et à 14jours et 28 jours ce béton commence à se rattrapé, on observe une évolution rapide d'un autre côté, on enregistre un développement croissant de la densité des bétons (1BV5,1BV10, 1BM10) à différent âges (14, 28 et 90 jours), en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par les filler.

On remarque d'après les figures précédentes, que la masse volumique augmente aux cours du temps et en fonction de pourcentage de filler d'une façonne légère.

- ✓ Les bétons avec poudre de marbre (non adjivantés) présentent une masse volumique inférieur que celle du béton témoin surtout pour les premiers 7 jours.
- ✓ La masse volumique des bétons avec les fillers de verre est supérieur à celle des bétons avec le filler de marbre.
- ✓ Le béton adjuvantés présentent une masse volumique supérieure que celle des bétons non adjuvantés.

On constate que, la masse volumique des bétons avec ajouts est relativement plus élevée par rapport à celle du béton de référence. Cela est dû, d'une part à l'effet physique des ajouts qui réagissent par leur grande finesse qui remplissant les vides et les pores afin de densifier la matrice de béton, et d'autre part, les ajouts actifs réagissent avec le Ca(OH)_2 donnent une quantité importante d'hydrosilicates de calcium (CSH) remplissant les pores.

Deux échantillons de béton (BV10) et (1BV10), donnent les meilleurs résultats dans l'âge à 90 jours. Ces résultats confirment les travaux de recherche obtenue par A. Talah et al (2015) [146] et N.Tebbal (2012) [179].

V.2.4.2. Évolution de la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression obtenus sont représentés sur les figures (V.11) et (V.12).

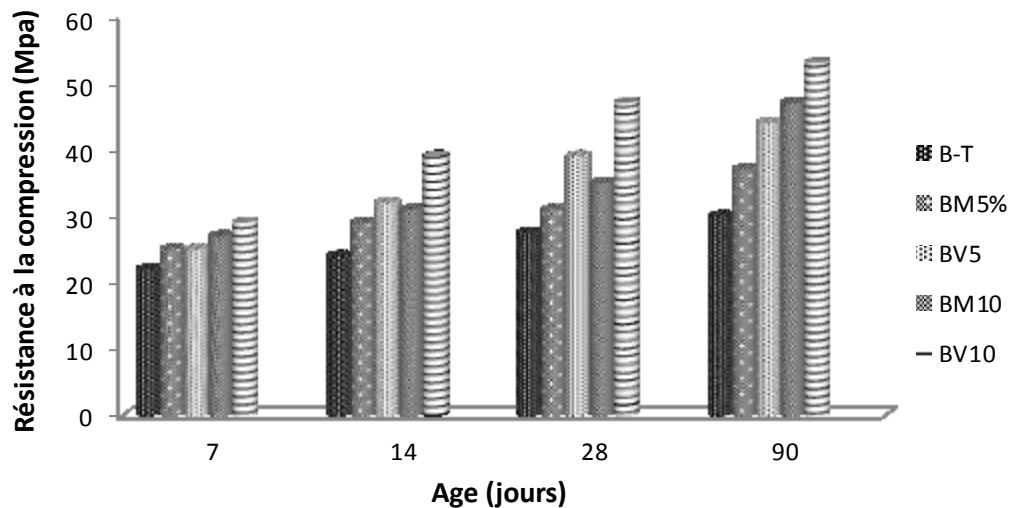


Figure V.11. La résistance à la compression des bétons non adjuvés en fonction de l'âge

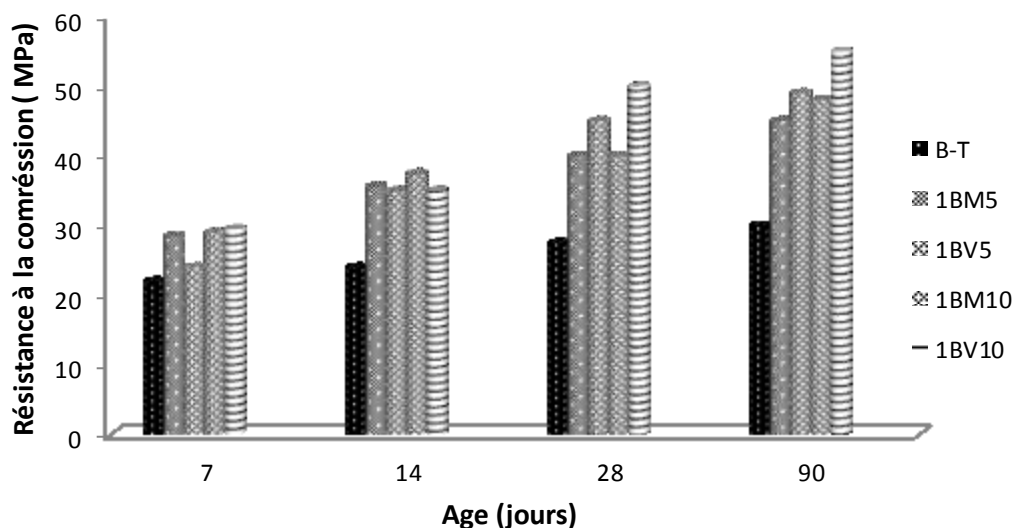


Figure V.12. La résistance à la compression des bétons adjuvés en fonction de l'âge

D'après les figures précédentes, on remarque que la résistance en compression pour tous les bétons augmente en fonction de l'âge (7j, 14j, 28j et 90 j) et aussi en fonction du pourcentage de filler utilisé. Dans les 7 premiers jours, la résistance à la compression atteint presque 70 % de la résistance à 28 jours. Il a été prouvé que le remplacement de 10% de ciment par le modificateur sous forme de verre et marbre contribue à une augmentation à la résistance moyenne du béton par rapport au béton témoin.

Les observations suivantes ont été faites: augmentation de la résistance moyenne à la compression de 25 % après 7 jours, 15 % après 14 jours, 18 % après 28 jours et 30 % après 90 jours de durcissement. L'augmentation la plus significative a été observée après la période de

durcissement prolongée, qui est causée par les propriétés du modificateur lui-même et son influence sur les changements dans la microstructure interne du composite de béton formé.

La résistance à la compression du béton a montré une résistance accrue par rapport au béton sans poudre de verre et poudre de marbre. La résistance du béton avec 10 % de poudre de verre augmente proportionnellement par rapport aux différents âges. B.Krishna ont établi que l'indice d'activité à 28 jours doit être supérieur ou égal à 75% pour assurer l'activité pouzzolanique de l'addition [145]. Le mélange avec 5% de remplacement de ciment a dépassé l'activité pouzzolanique du béton témoin à 28 jours et a atteint un indice d'activité de 114%, tandis que le mélange avec 10% de remplacement ciment a atteint 72% de l'activité pouzzolanique requise.

L'augmentation de la résistance en fonction du temps pour l'ensemble des compositions s'expliquent par l'hydratation du C_3S en présence du $CaCO_3$ de la poudre de marbre ce qui produit des hydrates de calcium qui affecte de bonnes performances mécaniques. Selon J Baron et J.P. Ollivier [12], il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Concernant l'effet de la finesse et le pourcentage d'ajout on constate qu'ils ont un effet positif sur la résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance est due à la compacité élevée des SSB des compositions élevées (la composition optimale est 10% d'ajout avec une SSB de 7000 et 1 % de superplastifiant). Ces résultats confirment les travaux de recherche obtenue par R. Idir(2009), P. Lawrence (2000) [146], [86].

Au jeune âge (7 jours), la poudre de verre donne des améliorations non significatives de résistance avec les bétons à bases des fillers mais à 28jours on a un gain de résistance 10MPa de la résistance comparé à un béton témoin.

Nous remarquons aussi que la résistance à la compression à 90 jours du BM (poudre de marbre avec la plus grande finesse) est meilleure par rapport au béton témoin. Ce résultat est peut-être dû aussi à la nature de cette addition. La réaction chimique entre la silice apportée par la poudre de marbre et la portlandite produite par l'hydratation du ciment conduit à l'accroissement de la résistance à travers la formation de nouveaux hydrates (CSH). Nous remarquons aussi que la résistance à la compression augmente (pour les types d'ajouts) quand la finesse augmente (SSB augmente). Ce résultat favorise l'utilisation des ajouts avec une finesse élevée à cause de leur effet positif sur la compacité et par voie de conséquence sur la résistance à la compression.

L'ajout de la poudre de verre et de la poudre de marbre engendre des modifications significatives sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. L'ajout de la poudre de marbre et le verre avec l'adjuvant SP40 (1BV10) a donné une amélioration de la résistance à la

compression d'environ 74%. Le mortier avec de la poudre de marbre et adjuvant (1BM10) affiche une résistance de 62% par rapport au béton de référence.

Selon R. Chaid [85] en ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité.

- Les bétons avec les filler présentent une résistance en compression plus élevée par rapport au béton témoin, d'autre part la résistance des bétons avec le filler de verre plus grande les bétons avec filler de marbre, ceci rend à les différences entre les compositions chimiques de chacun.
- Les bétons adjuvantés ont une résistance plus élevée par rapport aux bétons non adjuvantés.

Le béton BV10% présente résistance très élevée presque égale à 55 MPa en 90 jours. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures où il est remarqué que les résistances des bétons ordinaires incorporant la poudre de verre se développent dans le temps[16] [17].

V.2.4.3. La résistance à la traction

Les figures (V.13), (V.14) présentent les résistances en traction pour l'ensemble des bétons testés.

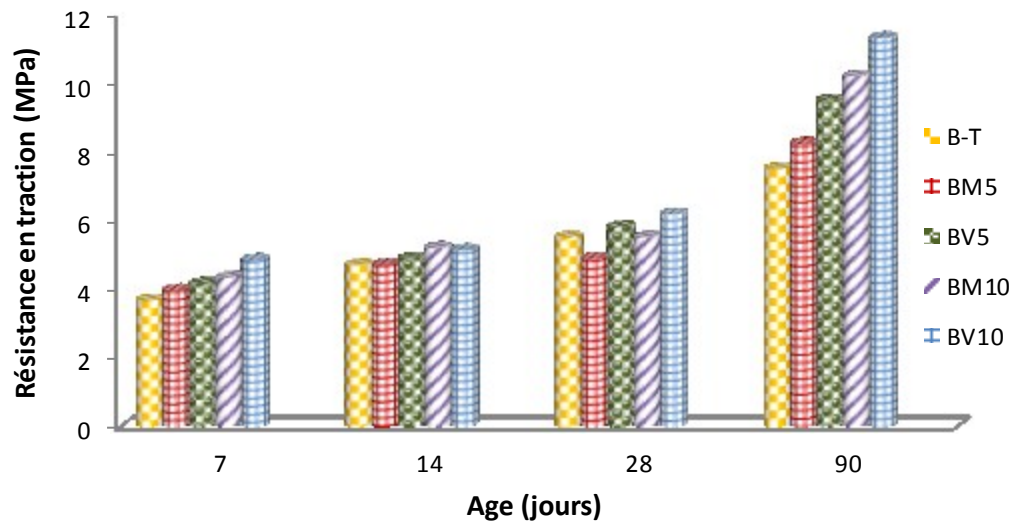


Figure V.13. La résistance en traction des bétons non adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge

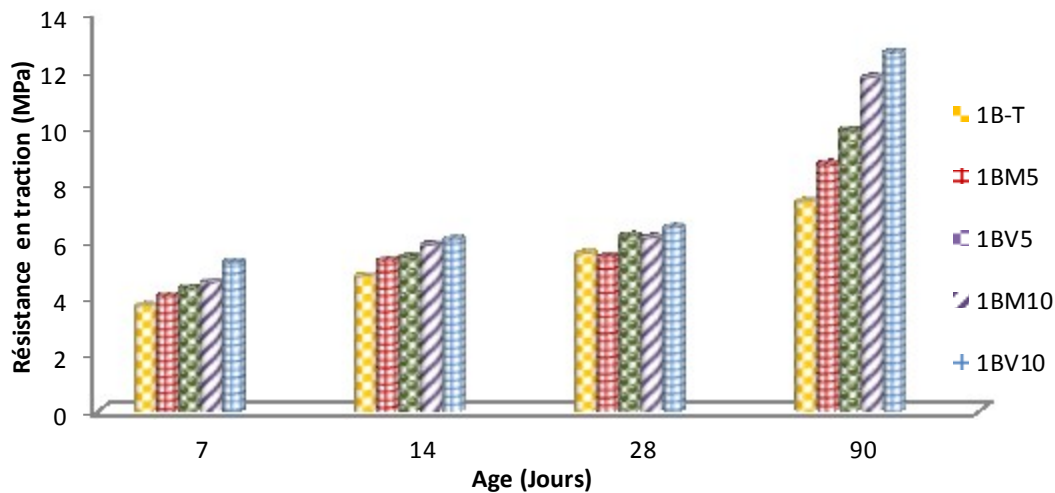


Figure V.14. La résistance en traction des bétons adjuvantés à l'état durci en fonction de l'âge

D'après les figures (V.13) et (V.14) les résistances en traction des bétons sont subit une certaine augmentation en fonction de temps et en fonction de pourcentage du filler utilisé.

- ✓ Le béton avec le filler présente une résistance en traction plus élevée par rapport à la résistance de béton témoin, d'autre part la résistance des bétons avec différent pourcentage de poudre de verre plus grande que les bétons avec marbre de même pourcentage de filler.
- ✓ Les bétons adjuvantés présentent une résistance plus élevée par rapport aux bétons non adjuvantés.
- ✓ Le béton 1BV10 a une valeur supérieure dans tous les âges.
- ✓ L'évolution de la résistance en traction en incorporant la poudre de marbre et les fillers de verre présente la même allure, quel que soit l'âge des éprouvettes, à 7, 14, 28 et 90 jours des différents types des bétons testés.

Ces résultats affirment que plus le béton est compacte plus il est résistant. En effet, avec une finesse de $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$, la poudre de verre densifie la matrice cimentaire générant ainsi une grande résistance mécanique. En outre, le pouvoir pouzzolanique de la poudre du verre lui permet de consommer la portlandite issue de la réaction d'hydratation du ciment. Ce qui donne naissance à des nouveaux C-S-H qui occupent les pores libres, cela rend la structure plus compacte et plus résistante.

Par contre, à partir de 28 jours le BV développe une meilleure augmentation en résistances par rapport au B-T ; cet exploit s'explique par le déclenchement des réactions pouzzolaniques de la poudre de verre, l'effet de remplissage et de densification de la matrice cimentaire a aussi apporté un gain de résistance pour le BV.

V.2.4.4. Masse volumique

Les résultats de la masse volumique des bétons obtenus sont représentés sur les figures (V.15) et (V.16).

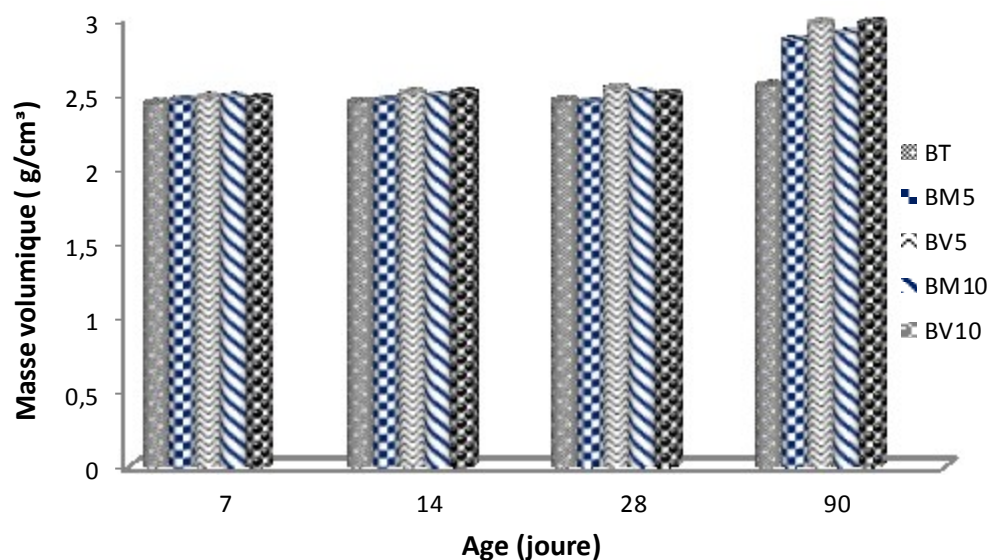


Figure V.15. La masse volumique des bétons non adjuvés à l'état durci en fonction de l'âge

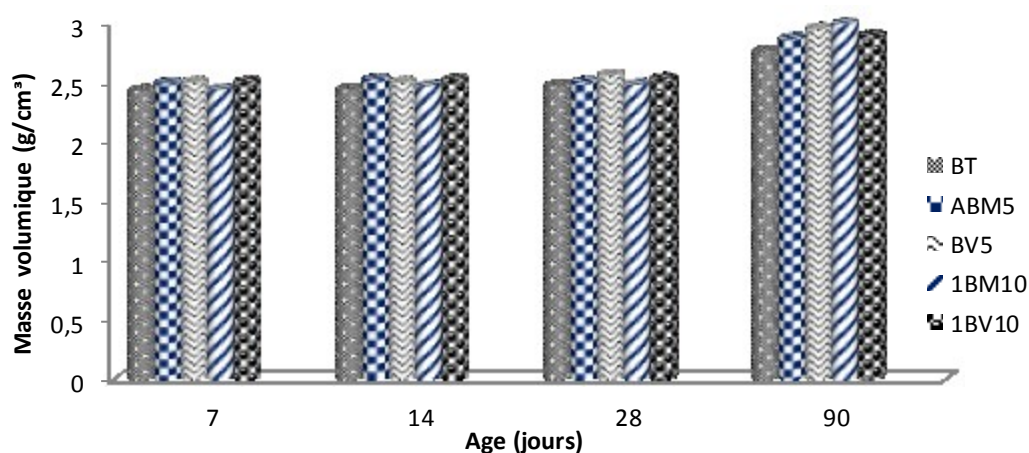


Figure V.16. La masse volumique des bétons adjuvés à l'état durci en fonction de l'âge

D'après les figures (V.15) et (V.16), on remarque une légère augmentation de la masse volumique aux cours du temps et en fonction de pourcentage de filler. Ainsi que la masse volumique des bétons avec le filler de verre est supérieur que celle avec le filler de marbre.

Les bétons adjuvés présentent une masse volumique supérieure que celle des bétons non adjuvés.

V.2.4.5. Effet de la poudre de verre sur l'absorption d'eau par capillarité

Le test d'absorption capillaire d'eau a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques 10 cm x 12 cm. La figure (V.17) montre la variation de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps.

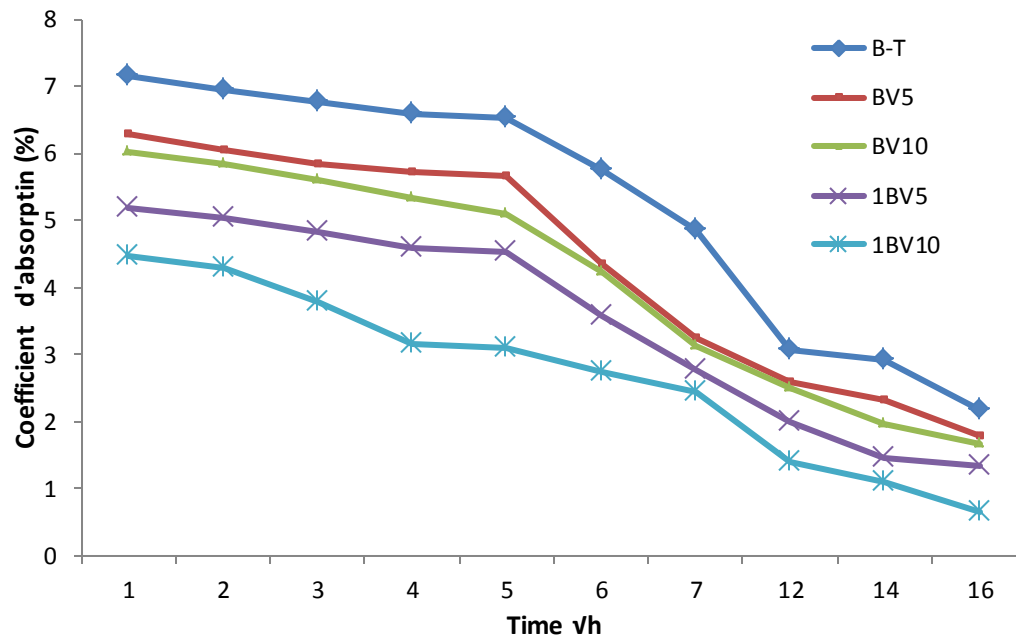


Figure V.17. La variation de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage de verre.

On note que la capacité d'absorption d'eau des bétons avec de poudre de verre et d'adjuvant est généralement faible par rapport aux bétons témoins. Le béton BV5 présente une absorption d'eau de 6% comparable à celle de béton témoin BT, ces résultats confirmés par d'autres chercheurs [38].

En revanche, une diminution de la capacité d'absorption d'eau du béton 1BV5 et 1BV10 est observée respectivement, ceci s'accompagne d'une augmentation du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre plus l'effet d'un 1% de superplastifiant lors de la formulation des bétons. En conséquence, l'effet positif des fillers de verre avec le super plastifiant diminue l'absorption d'eau des bétons et la plus faible valeur a été enregistrée pour le 1BV10 avec une réduction de 35% par rapport au BT. Les fillers de verre et a remplissent les vides dans la matrice cimentaire en réduisant sa porosité.

L'absorption d'eau du béton est un facteur important dans la classification de sa durabilité. Généralement, le béton à faible absorption d'eau offrira une meilleure protection au renforcement à l'intérieur. A. Taha et al. [146] ont remarqué que le verre par nature est un matériau imperméable, on peut donc supposer que la présence de particules de verre dans le béton peut réduire la perméabilité du mélange de béton. Cependant, les valeurs obtenues de cette

étude suggèrent une absorption d'eau similaire pour le béton témoin et celle contenant 10% de verre de remplacement, alors que les mélanges avec des teneurs en verre plus élevées étaient nettement plus absorbants. Comme expliqué précédemment, les résultats de la taille des particules montrés à la figure (V. 17) fournissent une explication importante de l'influence de la taille des particules sur les tendances observées pour cette étude. La performance semble dépendre de la forme et de la finesse de la poudre de verre usagé utilisée. Les particules de verre sont évidemment plus grossières que le béton, de sorte que l'activité pouzzolanique est réduite de manière correspondante à un niveau inférieur à ce qui serait normalement attendu.

L'absorption capillaire diminue en raison de l'addition de verre car ils agissent comme des charges et les réactions pouzzolaniques forment un gel supplémentaire qui rend la matrice de ciment plus dense figure (V.17). La réaction implique la consommation de $\text{Ca}(\text{OH})_3$ et donc il n'y a pas de production de $\text{Ca}(\text{OH})_3$. La réduction de $\text{Ca}(\text{OH})_3$.

V.2.4.6. Effet de la poudre de marbre sur l'absorption d'eau par capillarité

Les résultats de la figure (V.18), confirment la faible capacité d'absorption d'eau pour béton avec ajout de poudre de marbre par rapport au béton témoin. Cela peut être attribué à la finesse de la poudre de marbre qui réduit la distribution de la taille des pores par rapport au béton de contrôle.

D'autre part, En remarque que l'absorption d'eau du béton, diminue avec la substitution de poudre de marbre et adjuvant, cela est dû à la différence de la densité et la porosité entre les grains fins utilisés (la surface spécifique très fin de la poudre de marbre).

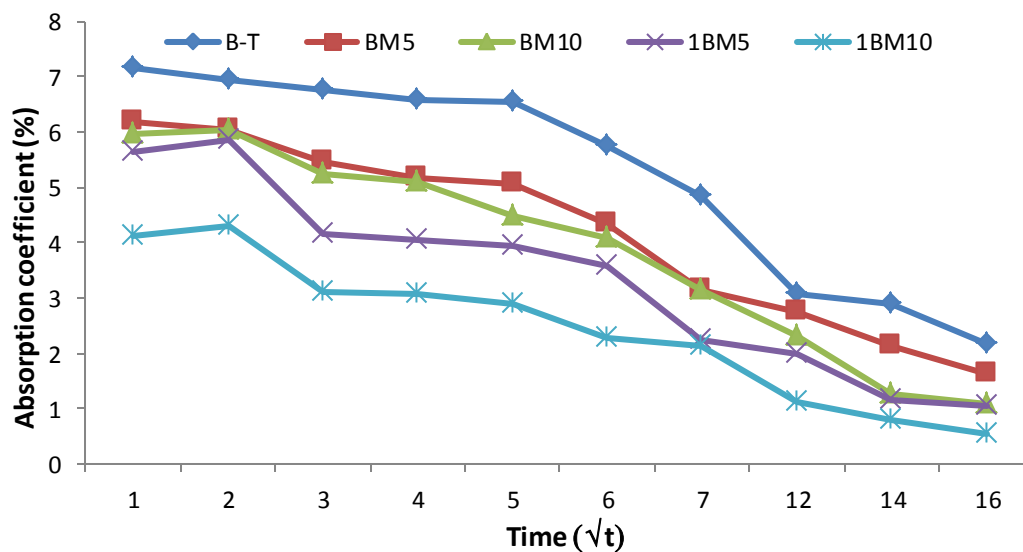


Figure V.18. La variation de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage de marbre.

V.2.4.7. Porosité en fonction du rapport E/C

La figure (V.19) présente la variation de la porosité en fonction E/C des bétons avec poudre de verre et marbre, béton des additions minérales adjuvantes.

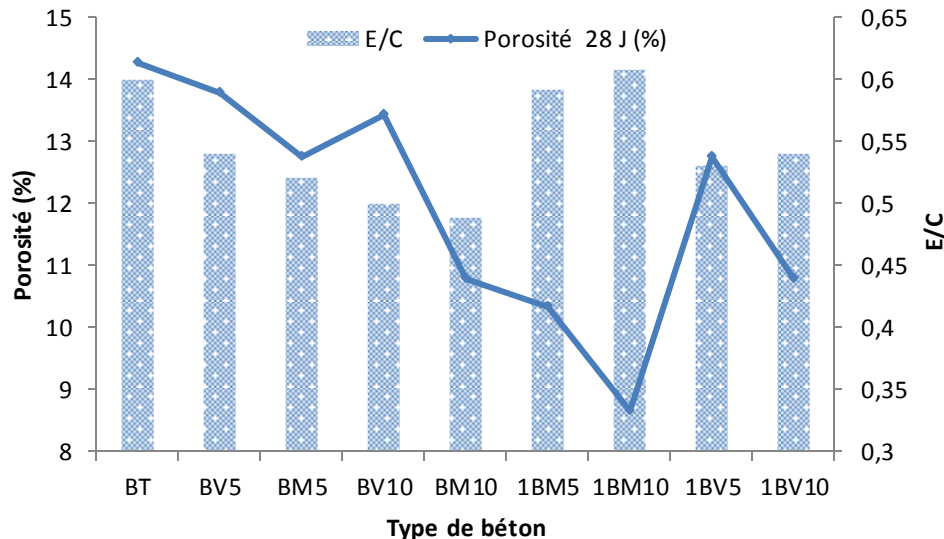


Figure V.19. La variation de la porosité en fonction du rapport E/C.

On constate que la porosité varie en fonction de pourcentage de marbre et verre. Elle diminue en fonction de pourcentage de l'adjuvant qui réduit la quantité d'eau utilisée.

L'effet en super plastifiant fixé à 1% du poids de liant, permet de diminuer le rapport E/C et la porosité et par conséquent, augmente les résistances à la compression.

V.2.4.8. Résistance mécanique en fonction de la porosité

Les figures (V.20), (V.21), (V.22) présentent la variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons.

Les résultats montrent que la diminution de la porosité des bétons a une influence significative sur les résistances mécaniques du béton testé. En général, une diminution de la porosité des béton (témoin, addition) à une augmentation de la résistance à la compression.

On constate que les bétons, dont la résistance est la plus élevée (29 Mpa) à l'âge 7 jours, présentent également la porosité la plus faible, donc la porosité diminue avec l'augmentation de la résistance à la compression.

On peut constater que l'ajout de 10% de poudre de marbre et verre est plus efficace avec la composition de ciment (verre, marbre). Les performances obtenues confirment le rôle de la

finesse de mouture des ajouts minéraux. L'augmentation de la surface spécifique Blaine a pour conséquence l'amélioration de la compacité du béton et par la augmentation sa résistance, diminuer la porosité. L'effet filler consiste à remplir les vides entre les grains de ciment [120] confirmait par N. Tebbal.N [179].

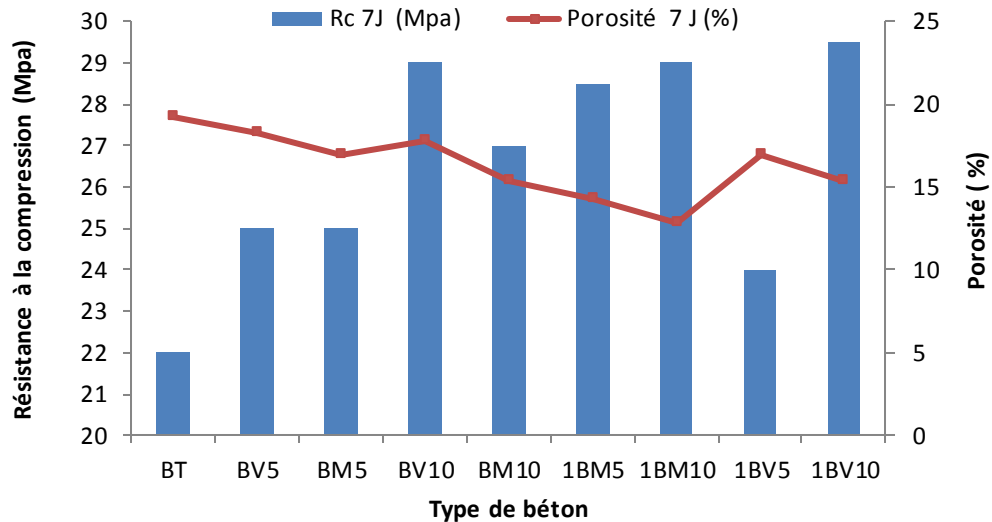


Figure V.20. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 7 jours.

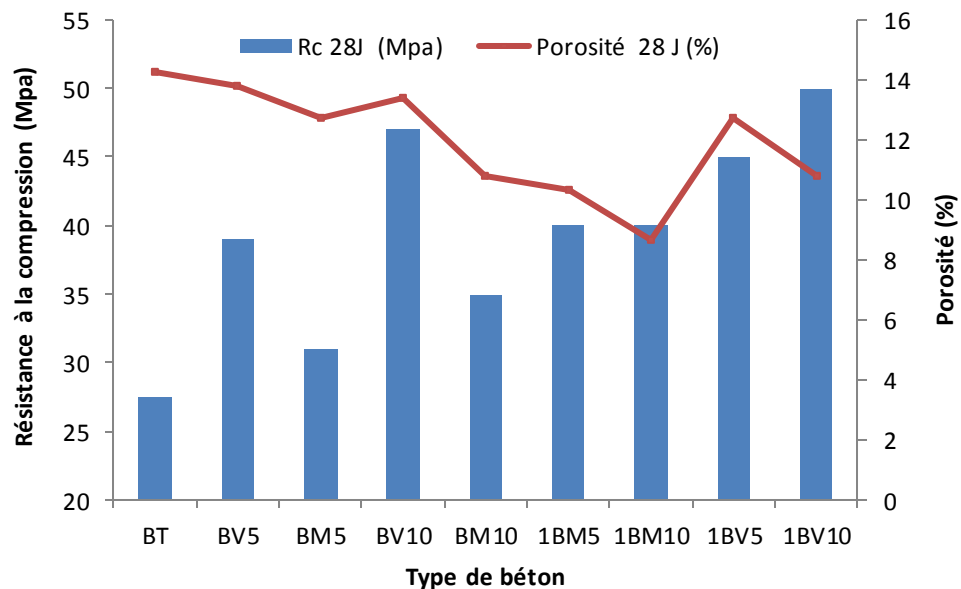


Figure V.21. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 28 jours.

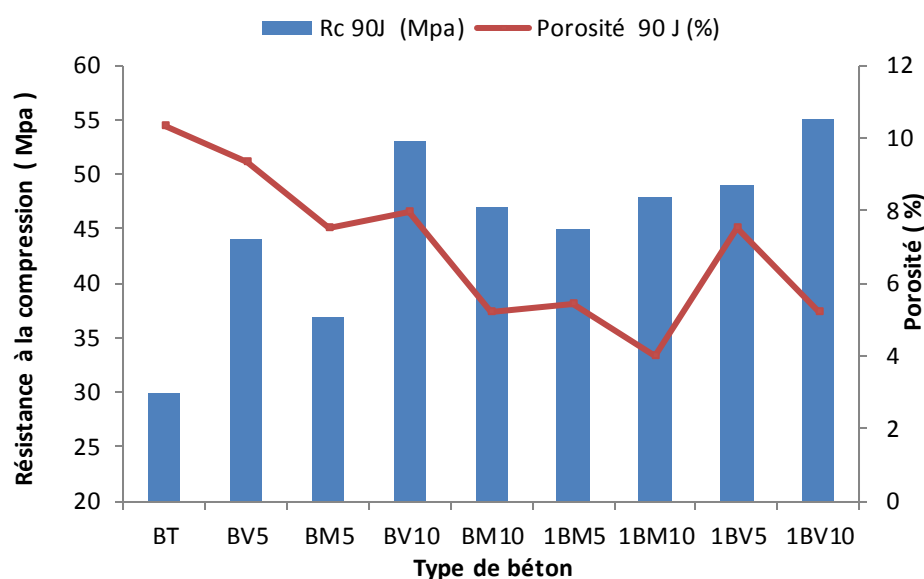


Figure V.22. La variation de la porosité en fonction de la résistance à la compression des bétons composés à l'âge 90 jours.

V.2.5. Structure interne (analyse par rayons X)

➤ **Effet de la Poudre de Marbre et verre**

Les résultats d'analyse par diffraction de rayons X des bétons avec et sans addition minérale hydraté pendant 180 jours dans l'eau de robinet sont présentés dans les figures (V.23), (V.24) et (V.25).

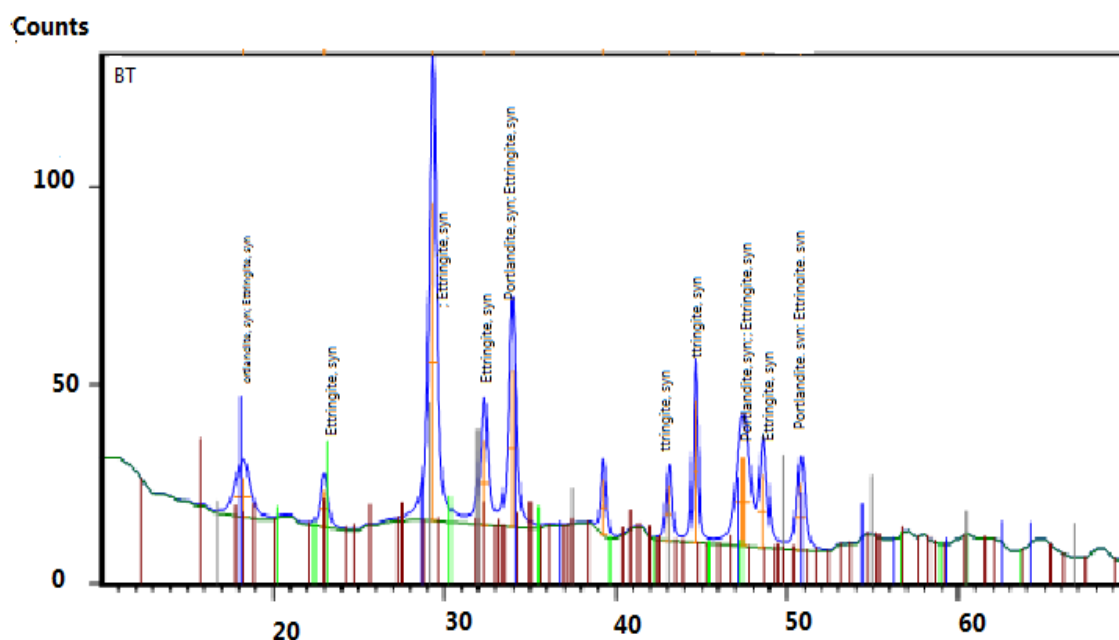
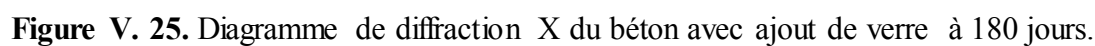
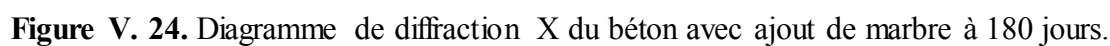


Figure V.23. Diagramme de diffraction X du béton sans ajouts à 180 jours.



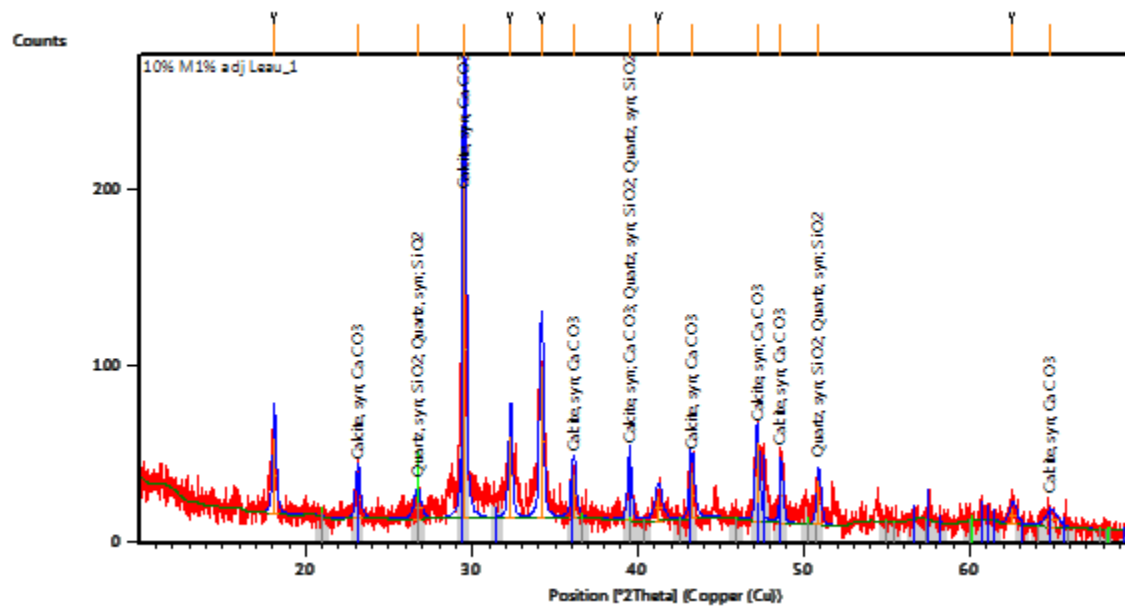


Figure V.26. Diagramme de diffraction X du béton adjuvanté avec ajout de marbre à 180 jours.

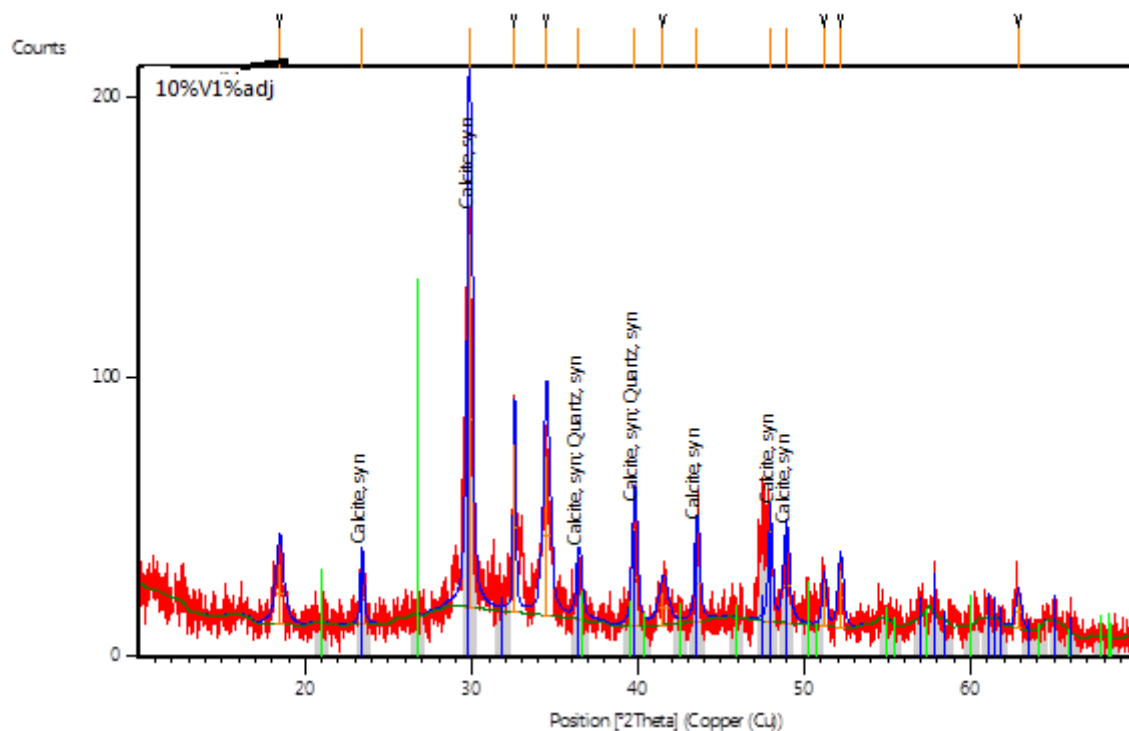


Figure V.27. Diagramme de diffraction X du béton adjuvanté avec ajout de verre à 180 jours.

Les phases principales sont l'alite et la bélite (C_3S et C_2S) qui sont les phases liantes majeures des ciments portlands. La ferro-aluminate tétracalcique (C_4AF) est également présente dans ce ciment. L'aluminate de calcium (C_3A) est difficilement distinguable par DRX car son pic principal ($38,83^\circ/2,693 \text{ \AA}$) se superpose à un pic secondaire du gypse ($38,95^\circ/2,685 \text{ \AA}$). Le pic à $38,78^\circ$ ($2,696 \text{ \AA}$) est ainsi difficilement attribuable au C_3A . Toutefois, étant donné la teneur en

aluminium de la composition chimique, il est certain que cette phase a été formée puisque cette phase constitue avec le C_4AF les phases interstitielles des clinkers, formées à partir de l'aluminium et du fer servant de fondant. Des traces d'anhydrite sont également détectées par DRX, ainsi que de la calcite, du quartz, et de la portlandite.

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH , de calcite CC et d'un gel silico-hydraté $C-S-H$ pour toutes les compositions étudiées. Les trois pics principaux de diffraction du silicate hydraté ne sont pas clairement identifiés, ce qui traduit le faible degré de cristallisation de ce composé. Le diffractomètre de l'échantillon de pâte ciment indique que l'ettringite $C_3A.3CaSO_4.31H_2O$ est présente dans la pâte durcie au bout d'une période de trois mois. Ce composé n'apparaît plus de façon significative dans les bétons contenant de la poudre de marbre et de la poudre de verre.

L'analyse par diffraction des rayons X a montré que les phases cristallines de ce type de liant sont typiques d'un ciment. La poudre de verre est amorphe et les produits d'hydratation devraient ainsi être des $C-S-H$ puisque la silice est le principal réactif de cette addition.

Les phases cristallines (intérieur des éprouvettes) des différentes pâtes de ciment avec ajout de poudre de verre paraissent identiques indépendamment de milieu de conservation. L'hydratation de leurs composés anhydres se trouve freinée, contrairement à celles de la pâte de référence. Ceci est la conséquence de la densification de la matrice.

On note aussi, une teneur de portlandite similaire pour les pâtes de ciment que ce soit avec ou sans poudre de marbre. La présence de l'ettringite est moindre pour la pâte de ciment contenant de la poudre de marbre, cela est certainement dû à la forte compacité de cette dernière comparée à celle de ciment seul.

La microstructure des liants durcis contenant de la poudre de marbre présente une structure homogène. Les silicates hydratés sont empilés et collés les uns aux autres et présentent des orientations multidirectionnelles. Leur faible microporosité est un frein à la formation de l'ettringite sous forme d'aiguilles [85].

Enfin, on peut noter la présence importante et croissante de calcite résultant de la carbonatation des phases hydratées, principalement la portlandite, dans les échantillons; aussi de calcaire minéral et de poudre de marbre.

V.2.6. Peau des bétons

La Figure (V.28) montre les observations faites sur les surfaces des éprouvettes de béton (BT, BM10 et BV10) conservées dans l'eau de robinet.

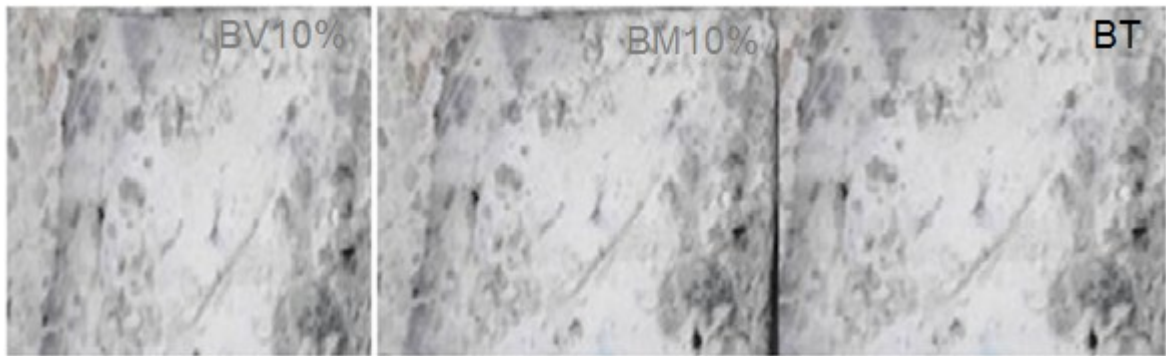


Figure V.28. Observation visuelle de la surface des échantillons.

Les observations visuelle des surfaces des échantillons montre, en évidence soit les dégradations de la surface par passage de certains éléments vers la solution soit des nouvelles phases cristallins [85]. Dans tous les cas, tous les bétons sont couverts tâches salines blanches sous la forme de cristaux aciculaires sous forme d'aiguilles de gypse et d'ettringite à la surface (le carbonate de calcium apparaît sous la forme d'une précipitation blanche appelée salinité) : ceci correspond à la sulfatation sur les cristaux de portlandite.

V.2.7. Analyse thermiques gravimétriques et différentielle

Les figures (V.29), (V.30) et (V.31) montrent les résultats de l'analyse thermogravimétrique (TGA, DTA) des pâtes confectionnés avec et sans fillers. Des analyses thermodifférentielles et thermogravimétrique (ATD et ATG) ont été effectuées pour compléter l'étude l'analyse au rayon X dans l'objectif d'étayer les concernant la nature des formations observées.

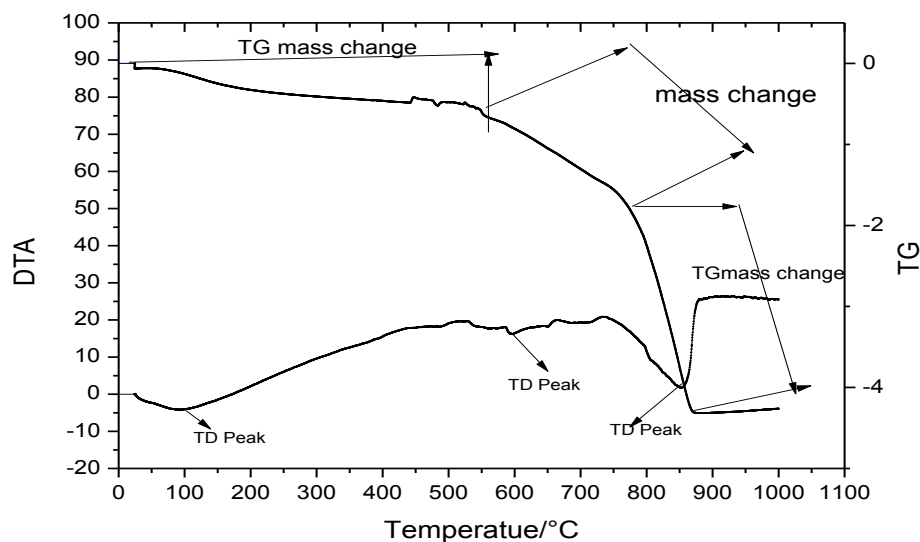


Figure V.29. Thermogramme des pâtes durcies CEM II 42.5

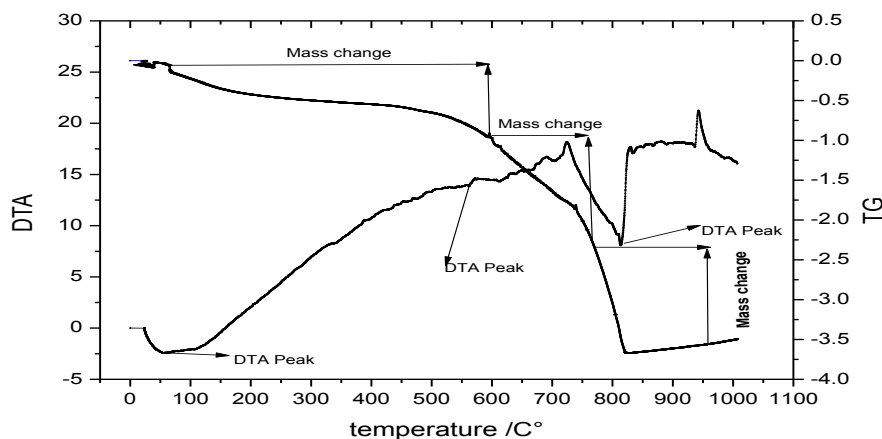


Figure V.30. Thermogramme des pâtes durcies de CEM II 42.5 avec la poudre de verre

Une prise d'essai de 200 mg de pâte a été analysée suivant un chauffage linéaire de puis la température ambiante jusqu'à 1000°C avec vitesse de 10 °C/mm. Les thermogrammes (figures (V.29) et (V.30)) montrent essentiellement quatre pics et / trois pertes de masses qui caractérisent respectivement la perte des molécules d'eau de CSH et de $C_6AS_3H_{32}$ sans différenciation, la déshydratation de la portlandite et la décarbonatation de $CaCO_3$ (initiale et $CaCO_3$, néoformé). Par contre, par cette méthode, nous ne décelons pas la présence de monocarboaluminate C_4ACH_{11} ni celle d'alumine hydratée [176].

Un grain de masse entre 50°C et 550°C figures (V.29), (V.30) correspond à la décomposition de la portlandite $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$ [176].

Une deuxième perte de masse très importante, aux correspond à la seconde phase de 600°C à 850°C à la déshydratation des C-S-H et de l'ettringite, ainsi que la formation de βC_2S .

Au-delà de 800°C les figures (V29), (V30) correspond à la décarbonatation de la calcite ($CaCO_3$) qui donne naissance à la chaux vive CaO suivant la réaction : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$.

Dans notre l'intervalle 700°C (figure V.32) on constate une perte de masse correspondant à la décarbonatation de la calcite [24].

Enfin vers 100°C un pic endothermique présenté pour les pâtes pures et faiblement marqué pour les pâtes avec ajout poudre de verre. on peut constante l'effet endothermique à la température de 450 à 550 °C, exprime la présence des cristaux hydratés de chaux restant libres pour les pâtes avec poudre de marbre.

V.3 Effet de la combinaison poudre de marbre /verre sur le comportement de béton

V.3.1 L'ouvrabilité du béton

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, nous a permis d'étudier les principaux effets des additions sur l'écoulement des bétons.

La figure (V.31) présente la consistance des bétons des couples compositions (déchés de verre et de marbre).

Une légère amélioration de la fluidité des bétons par l'addition du verre et du marbre à la fois a été observée par D. Shindo [142] et C.S. Poon [143].

Le béton BV10M5 a montré une meilleure fluidité que le BV5M10. On le pense que le marbre a eu une distribution particulière en comparaison avec le verre.

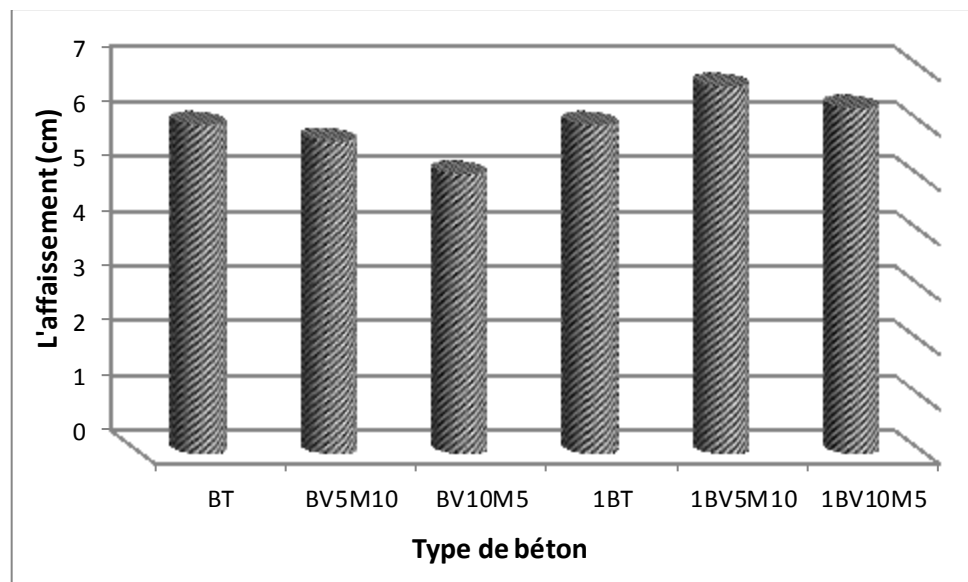


Figure V.31. Variation de l'affaissement en fonction du type de béton

Dans le même contexte Lang et al, [71] ont conclu, pour une fluidité donnée, l'introduction spécifique de verre réduisait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange (la forme sphérique des particules facilite l'empilement granulaire et réduit les frictions inter granulaire). Le remplacement du ciment par des ajouts marbre diminue aussi l'activité chimique du liant et réduit la contraction volumique du béton frais, ce qui contribue à la réduction du temps d'écoulement. Le phénomène de réduction est expliqué aussi par l'adsorption d'une certaine quantité d'eau sur les surfaces des fillers marbre au début du malaxage du béton, ce qui

diminue la quantité d'eau libre. La finesse des particules des fillers marbre contribue à chasser l'eau d'interstices cimentaires plus petits.

On peut constater que, lorsque les additions minérales sont utilisées dans le béton, elles peuvent réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité désirée, comme indiqué par [171]. Aussi, R. Derabla [183] ont conclu que l'utilisation de ciments composés (au verre et aux marbre) a légèrement diminué la nécessité de superplastifiant dans les mélanges.

V.3.2 La masse volumique à l'état frais

D'après la figure (V.32) on constate que les masses volumiques des bétons adjuvantés présentent une masse volumique supérieure à celle des bétons sans adjuvant.

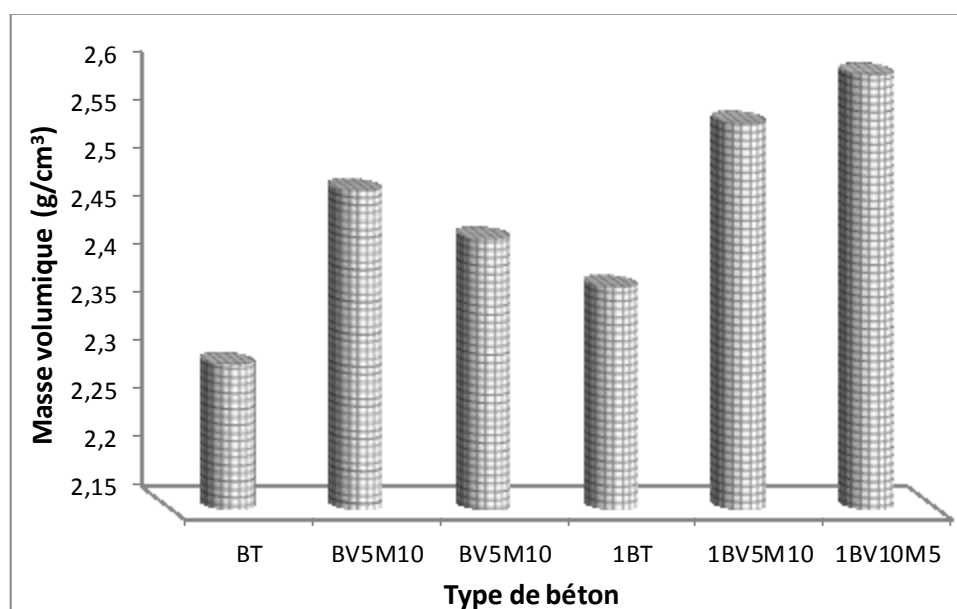


Figure V.32. Evolution de la masse volumique des bétons à l'état frais

Pour le B5V10M une augmentation de la masse volumique observée par rapport les autres types des bétons, par contre le 1BV10M5 une augmentation de densité. Notons que le béton avec ciment composé à une densité plus élevée que celle de béton référence.

V.3.3. Masse volumique à l'état durci

La figure (V.33) montre la variation de la masse volumique des bétons en fonction de l'âge (7,14, 28 et 90 jours).

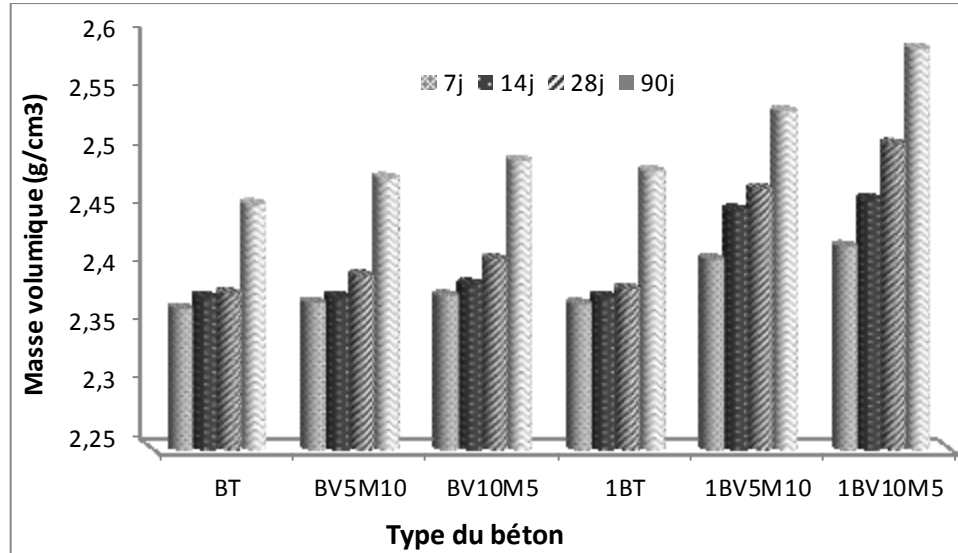


Figure V.33. Evolution de la masse volumique à l'état durci des bétons

On remarque que la densité des compositions des bétons est généralement élevée par rapport au béton témoin. On note que; le béton (BV10M5) présente une densité égale à 2.476 g/cm^3 avec une augmentation de 10% par rapport au BT (2.459 g/cm^3) à 90 jours. Par ailleurs, on constate que la substitution de 5%V et 10%M à améliorer la densité des différents bétons. Le béton (1BV10M5) possède la valeur la plus grande comparé aux autres types des bétons.

On peut expliquer l'augmentation des masses volumiques par la capacité d'adsorption d'eau de particules fines qui ont remplacé une partie de ciment : en effet, une finesse plus élevée adsorbe plus d'eau. Par conséquent, on peut attribuer une partie des résultats obtenus à ce phénomène. Ainsi la granulométrie des particules des additions de dimensions fin plus faible, que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique qui conduit à un empilement plus compact des grains solides, et à modifier la microstructure en réduisant les pores de la matrices cimentaires, le résultat est confirmé par O. Sunny et al [147].

V.3.4. Évolutions de la résistance à la compression

La figure (V.34), montre l'influence de la combinaison de poudre de marbre /verre sur la résistance mécanique.

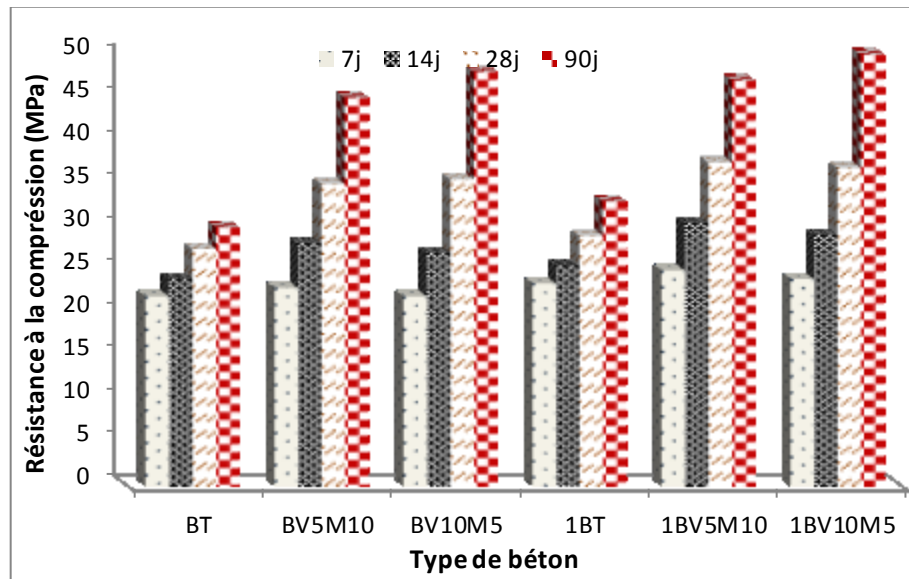


Figure V.34. Evolution de la résistance en compression des différentes compositions en fonction de l'âge

La résistance à la compression augmente en fonction du temps pour tous les mélanges (figure V.34). Nous pouvons conclure que l'utilisation des ajouts a donné des bons résultats par rapport au béton de témoin (sans ajout : BT) à tous les âges.

Le béton (BV5M10) présente un développement de la résistance similaire à celui du BT à (7, 14, 28 et 90 jours), une différence de 23% entre la résistance du 1BV10M5 (50 MPa) et BT (22 MPa) a été enregistrée.

Le béton BV5M10 possède des résistances à long terme plus faibles que celles du BV10M5. Elles représentent 70 à 90 %, en exception de mélange 1BV10M5 à 90 jours, de la valeur de béton témoin (BT). Ce gain de résistance peut être attribué à un effet pouzzolanique de verre qui produit, grâce à leur finesse et un effet filler entre les grains du ciment. Ainsi que les fillers de marbre servent de germes sur lesquels vont se fixer les calciums libérés lors de l'hydratation des anhydres du ciment.

La valeur maximale de la résistance en compression à 90 jours est de 50 MPa obtenue dans le béton 1BV10M5.

La valeur minimale de la résistance en compression à 28 jours est de 30 MPa obtenue dans le béton ajout.

Par contre, la résistance du béton BV5M10 à long terme n'est que de 50% par rapport à celle du béton témoin. La quantité de marbre peut être en excès par rapport à la quantité nécessaire pour remplir les pores interstitiels des granulats. Cet excédant-là disperse les grains de ciment et rend la matrice cimentaire moins résistante.

Les meilleures performances sont obtenues pour une valeur optimale à 10% de verre permet d'obtenir des résistances les plus élevées à 90 jours. Il est intéressant de remarquer que ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par des autres auteurs concernant l'optimum pour obtenir les meilleures performances [146].

V.3.5. La résistance à la traction

Les résultats de la résistance en flexion obtenus sont présentés sur la figure (V.35).

Pour des deux différentes combinaisons marbre / verre. On remarque que les résistances de tous les mélanges augmentent régulièrement avec l'âge.

Parallèlement à l'essai de compression, des essais d'évaluation de la résistance à la traction ont été réalisés. On remarque par ailleurs qu'il y a pratiquement une corrélation entre les résistances à la compression et celles à la traction comme illustré dans les figures (V.34) et (V.35).

Les valeurs de la résistance à la traction par flexion des bétons combinés avec le verre et la poudre de marbre croissent quel que soit la nature et le taux d'addition. En effet, S. Husson a montré par une étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment fillers dans les bétons que les additions minérales pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges [84].

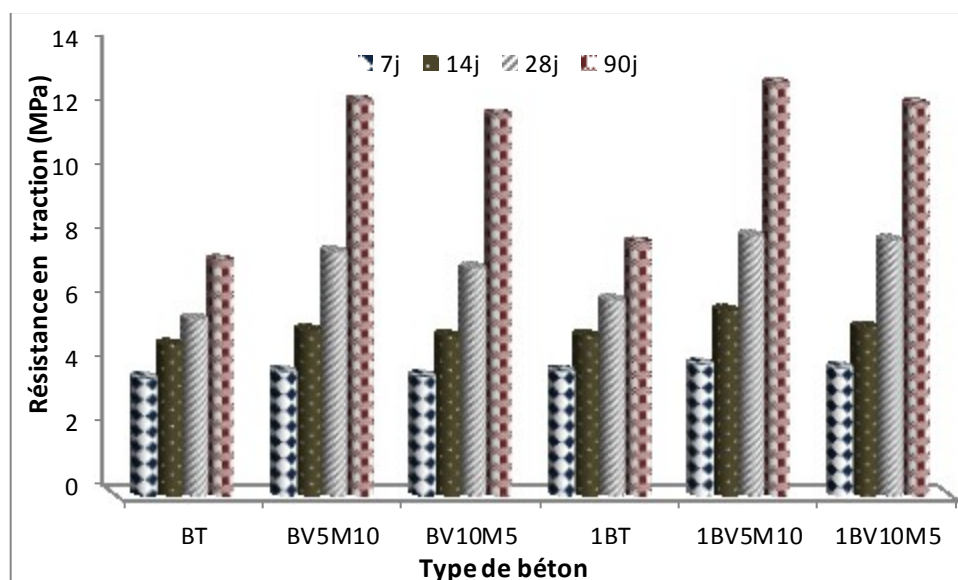


Figure V.35. Evolution de la résistance en traction des différentes compositions de béton en fonction de l'âge

V.3.6. l'absorption d'eau par capillarité

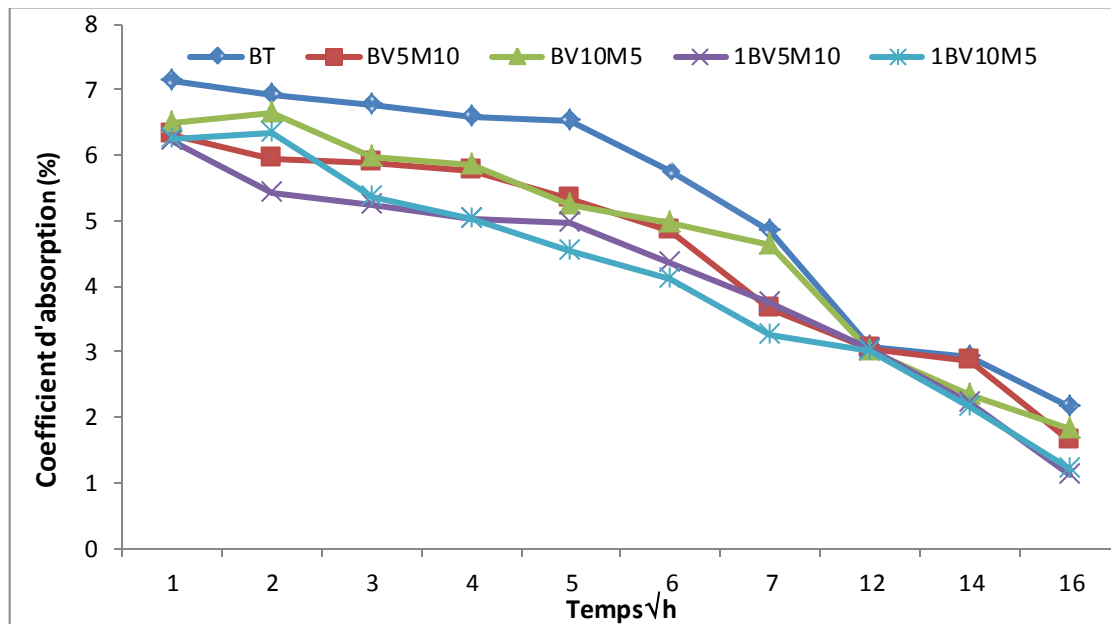


Figure V.36. La variation de la d'absorption d'eau en fonction des différentes compositions

L'analyse des résultats d'essai d'absorption d'eau par capillarité, mentionnée à la figure (V.36) ci-dessus, permet de constater que les différents bétons présentent des taux d'absorption inférieure au béton témoin (BT).

Les résultats montrent que l'absorption d'eau du béton, diminue avec la substitution de poudre de verre à la poudre de marbre, Ceci est dû à la différence de masse volumique et la porosité entre les différents grains fins.

Le béton BV5M10, indique une diminution d'environ 15% par rapport au béton BT à 7 jours, ceci en corrélation avec les travaux antérieurs [164].

Un effet légèrement bénéfique du super plastifiant sur les essais d'absorption en présence de verre et marbre est observé à longs termes. L'utilisation d'adjuvant permet de réduire le nombre de vides et les pores existant dans le béton, qui devient par conséquent plus compact, plus résistant.

Conclusion

Toutes les observations effectuées dans ce présent chapitre, permettent de tirer les conclusions suivantes :

Les bétons avec ajout cimentaires ont retrouvé un grain d'intérêt dans le cadre du développement durable de nouveaux produits cimentaires plus respectueux de l'environnement. la variation des déchets de verre et marbre à raison de 5% à 10% de la masse de ciment leur de formulation des bétons, conduit entre autre à l'amélioration de la microstructure.

On constate une augmentation non significative de la masse volumique du béton avec la poudre de verre par rapport au témoin à l'état frais et à l'état durci, cela est dû à l'effet de remplissage par les ajouts dans le béton qui ont une finesse plus grande que celle du ciment.

Une très bonne amélioration des résistances mécaniques avec l'utilisation de l'adjuvant par rapport au béton de référence, cette amélioration est due à l'effet de l'adjuvant.

La résistance des bétons testés augmente en fonction de l'âge de durcissement. Cela est dû à la variation de la cinétique d'hydratation minéral C_3S et C_2S . Ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à long terme.

Une étude comparative en variant le taux d'ajout de la poudre de verre et de la poudre de marbre et celle de l'adjuvant avec un béton témoin sans ajout a été réalisée. Les résultats de cette étude nous ont permis de constater que la présence de la poudre de verre avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression du béton. Nous avons constaté aussi que de la poudre de marbre avec adjuvant a fait grimper la résistance à la compression. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la combinaison des deux ajouts : la poudre de verre et la poudre de marbre.

V.4 L'influence des hautes températures sur les propriétés du béton

Ce chapitre présente une étude expérimentale sur la performance du béton avec et sans ajout cimentaire (poudre de verre (PV) et (poudre de marbre (PM)) soumise à des températures élevées. Les propriétés mécaniques et physicochimiques des bétons ont été étudiées à la fois à température ambiante et à température élevée.

L'une des principales préoccupations environnementales est l'élimination ou le recyclage des déchets. Cependant, un volume élevé de la production industrielle a généré une quantité considérable de déchets qui ont un certain nombre d'impacts négatifs sur l'environnement. En outre, l'utilisation de verre ou de sous-produits dans la production de béton présente des avantages pour améliorer certaines ou toutes les propriétés du béton.

Les incitations économiques et les avantages environnementaux en termes de réduction de l'empreinte carbone sont également la raison de l'utilisation des déchets dans le béton. L'apparition de l'écaillage, résistance à la compression, la perte de masse, la composition chimique, de la phase cristalline, et l'analyse thermique des bétons avant et après exposition à différentes températures (20, 200, 400 et 600 ° C) ont été étudiés en détail.

Trois types du béton sont étudiés :

- Un béton ordinaire (témoin) ;
- Un béton à base de la poudre de verre comme addition de : 0%, 5% et 10%,
- Un béton à base de la poudre de marbre comme addition de : 0%, 5% et 10%,

V.4.1 Mesures des propriétés physiques des bétons

V.4.1.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des bétons étudiés a été déterminée sur le béton durci après 90 jours. Les résultats présentés dans les figures (V.37), (V.38). La masse volumique a été mesurée après le refroidissement.

La masse volumique apparente est exprimée en pourcentage est normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température de 20 °C.

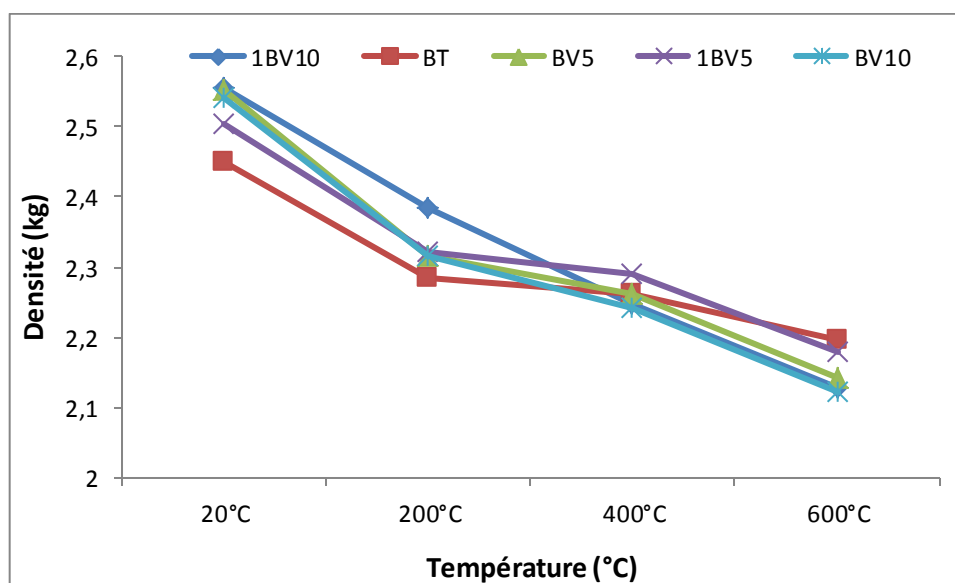


Figure V.37. Évolution de densité des bétons de la poudre de verre en fonction de la température.

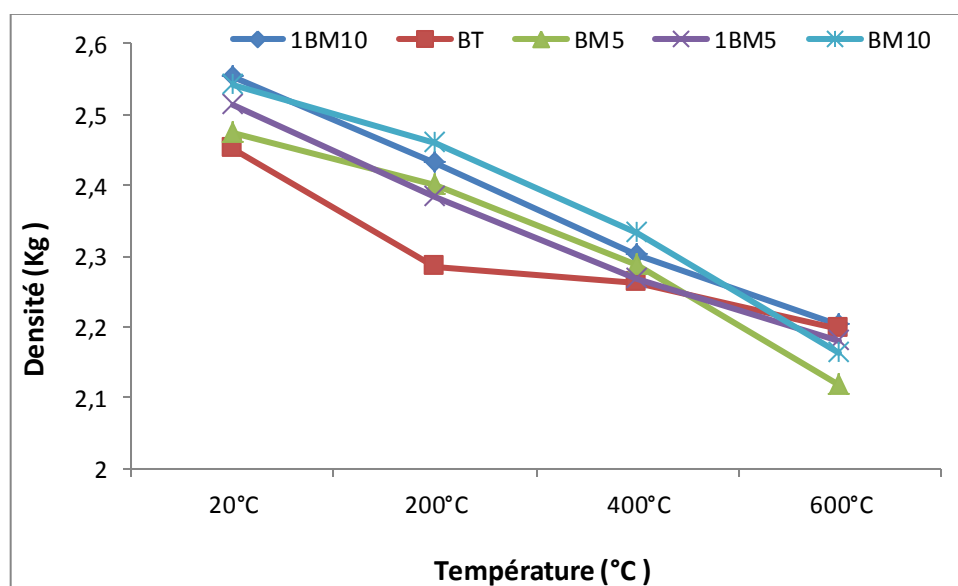


Figure V.38. Évolution de la densité des bétons de la poudre de marbre en fonction de la température.

On remarque que la masse volumique apparente de différentes compositions de bétons diminue en fonction de la température de chauffage.

La variation de la densité est faible, n'excédant pas 2.5 %, dans la gamme de température de 20 °C à 200 °C. Cette diminution est attribuée au départ de l'eau libre et capillaire, l'augmentation du volume du béton suite à la déshydratation des CSH et la Portlandite [172].

Pour les bétons avec les additions (marbre ou verre) reste toujours supérieure à celle du béton référence quel que soit le cycle de chauffage. En considérant tous les bétons (témoin, filler), pour toute l'étendue de température entre 20 °C et 600 °C, on note une faible diminution de la densité apparente entre 5 % pour le BV5 et 10 % pour les autres bétons. Néanmoins, au-delà de 400 °C, la mesure de la densité comme pour la porosité est sujette à la désagrégation du matériau lors de son chauffage. Donc, les échantillons manipulés sont très friables. Ce qui peut expliquer leur apparition est dû au départ de l'eau adsorbée des pores capillaires et au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment. Dias et al [122]. Observent également des macros pores qui sont liés aux microfissures observées à la surface des éprouvettes chauffées à 200 °C minimum. Nous observons à partir de 400 °C, de nombreuses fissures sur les éprouvettes dues au chauffage.

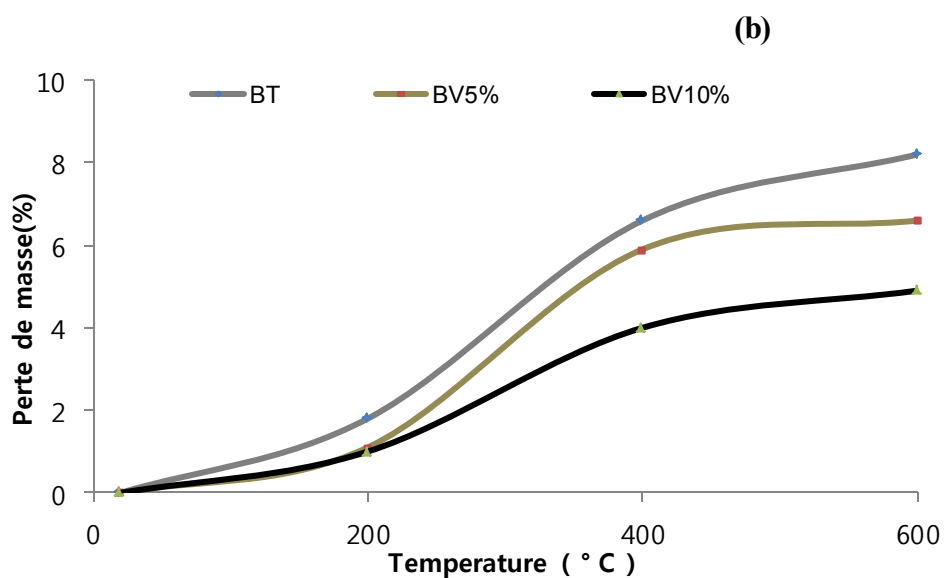
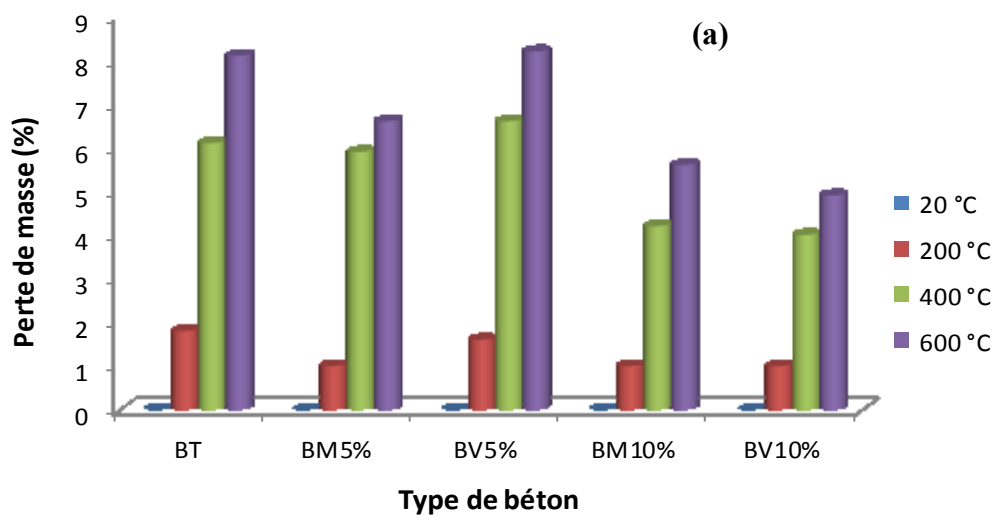
A 200 °C, la densité des bétons varie de 2.28 à 2.55. Le béton le plus léger est le BV10 composé de 315 kg.m³ de ciment et de 35 kg.m³ poudre de verre. La forte porosité de ce béton est responsable de cette diminution du poids volumique. La faible diminution de la densité apparente lors du traitement thermique entre 200 °C et 400 °C sur des bétons a été montrée par P. Kalifa et al. [140] et I. Gaweska [132].

La diminution de la densité apparente est due au départ de l'eau durant le chauffage (déshydratation des hydrates comme les C-S-H et la portlandite) et à l'augmentation de porosité. Selon T. Harada et al. [133], la diminution est associée à l'expansion thermique du béton, et plus particulièrement des granulats. L'évolution de la densité est corrélée à celle de la porosité car les deux phénomènes sont liés.

V.4.1.2 Perte de masse

Au cours d'une élévation de température, les différentes catégories d'eau du béton (liée, adsorbée à la surface des éléments solides et libre dans les pores) sont successivement éliminées en fonction de leur énergie de liaison. Le suivi de la perte de masse des éprouvettes permet de quantifier l'eau libre et l'eau liée présentes dans le béton.

La valeur de la perte de masse est une moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes pour chaque type de béton. Les courbes de la perte de masse en fonction de la température sont présentées sur les figures (V.39), (V.40).



(a) : perte de masse pour tous les bétons

(b) : perte de masse pour les bétons avec poudre de verre

Figure V. 39. Evolution de la perte de masse des bétons non adjuvés liée à la température

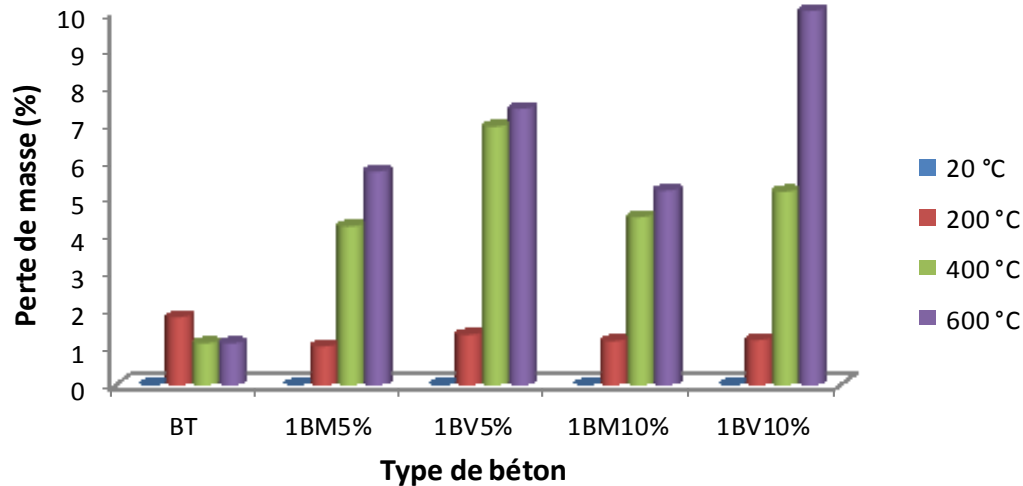


Figure V. 40. Evolution de la perte de masse des bétons adjuvés liée à la température

La masse des bétons diminue due à la perte d'humidité. Le maintien en masse de béton à des températures élevées est fortement influencé par le type d'agrégat [102]. Voici quelques explications pour cela :

- Avant 200 °C, le changement de masse est très faible. La perte de masse dans cette plage de températures correspond généralement à l'évacuation de l'eau des pores du béton.
- Entre 200 et 600 °C, une perte de masse importante pour tous les échantillons de béton testés. Tout le béton a perdu entre 4% à 9% de sa masse d'origine. La majorité d'eau dans chaque échantillon de béton évaporé pendant le chauffage entre 200 °C et 400 °C.
- L'augmentation est presque linéaire jusqu'à une température de 600 °C. Ceci est dû à l'évaporation de l'eau et à la déshydratation progressive du gel CSH. [124]. D'autres chercheurs confirment qu'au-delà de 600 °C il n'y a plus d'eau dans le spécimen de béton [124], [162].
- La perte de masse est minimale pour les bétons (BV10) jusqu'à environ 600 °C. Cependant, le type d'agrégat a une influence significative sur la perte de masse dans les bétons au-delà de 600 °C. Dans le cas du béton en poudre de verre, la perte de masse est peu significative au-dessus de 600 °C par rapport au béton témoin. Ce pourcentage plus élevé de perte de masse dans le béton est attribué à la dissociation de la dolomite dans l'agrégat carbonaté à environ 600 °C [102].
- On observe que les pertes de masse en fonction de la température sont très proches pour les bétons étudiés. Entre la température ambiante et 200 °C, la variation de masse est assez faible. Entre 200 °C et 400 °C, on observe pour tous les bétons une forte perte de masse correspondant environ à 6.5 % de la masse initiale. Sachant que la quantité d'eau totale dans les bétons, est de 8.7 à 9.6 % de la masse de béton, on peut constater que

l'essentiel de l'eau contenue dans chaque béton s'échappe au cours du chauffage entre 200 et 400 °C.

- Les pertes de masse augmentent lorsque la température augmente. Elles passent de 1% à 12% après une exposition à 200 °C et à 600 °C respectivement. Cette augmentation est linéaire dans les températures étudiées. Ceci est dû à l'évaporation de l'eau. Plusieurs auteurs, confirment qu'au-delà de 600°C il ne reste plus d'eau dans l'éprouvette du béton. Aux températures 400 °C et 600 °C, les pertes de masse des différents bétons sont voisines. Entre 400 °C et 600 °C ; la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se décompose en chaux libre et il est noté par la formation d'un réseau des microfissures connectées.
- La transformation du quartz α , présent dans les granulats, en quartz β est à 570 °C [177] se déroule sans perte de masse et se situe autour de la dernière température.
- A partir des figures précédentes, on remarque que l'augmentation de température influe significativement sur la masse. La perte de masse à 200°C est de 1% de la masse initiale, à 400°C elle est estimée à 6.5%, à 600 °C le maximum de perte de masse est enregistrée par le béton BV10.
- Les mélanges de béton contenant du superplastifiant sont affectés par des températures élevées, en particulier à 600 °C et plus, comparativement à ceux non adjuvants.

V.4.1.3 Porosité à l'eau

La mesure de la porosité à l'eau est un des paramètres qui permet de caractériser la microstructure poreuse des bétons testés. Les valeurs de la porosité obtenues par pesée hydrostatique pour tous les bétons sont reportées sur les figures (V. 41), (V. 42) et (V. 43).

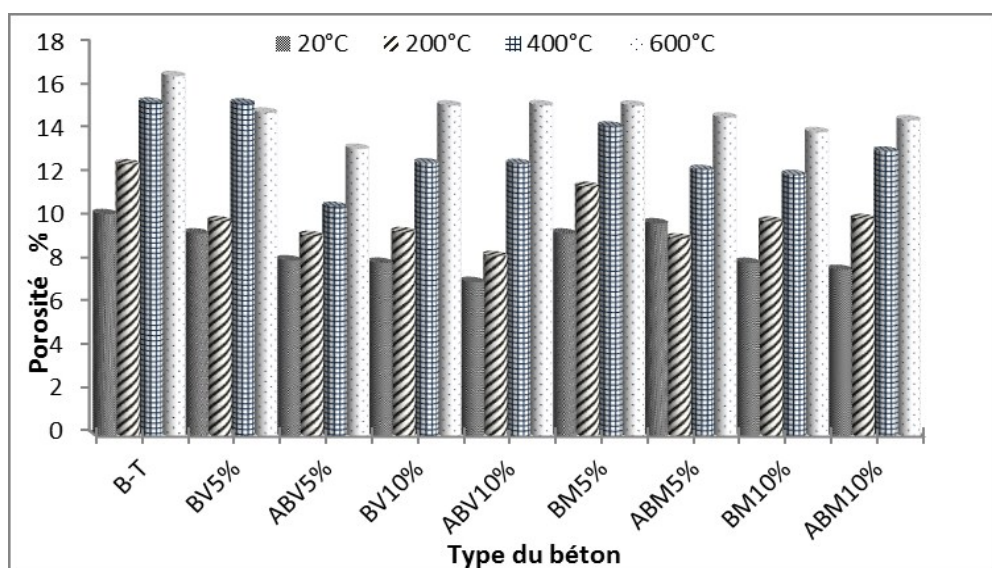


Figure V. 41. Variation de la porosité des bétons en fonction de la température

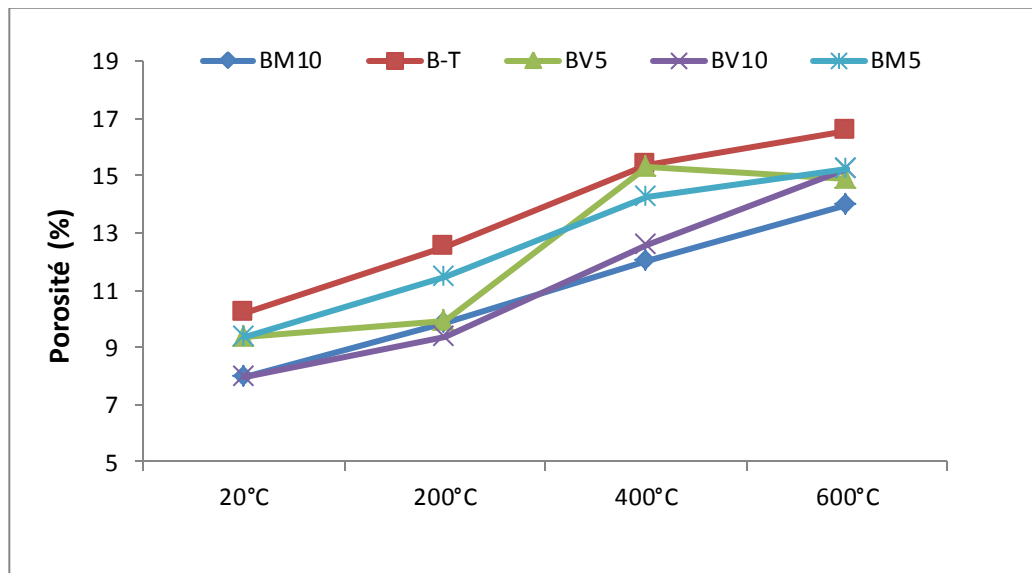


Figure V. 42. Variation de la porosité des bétons non adjuvés en fonction de la température

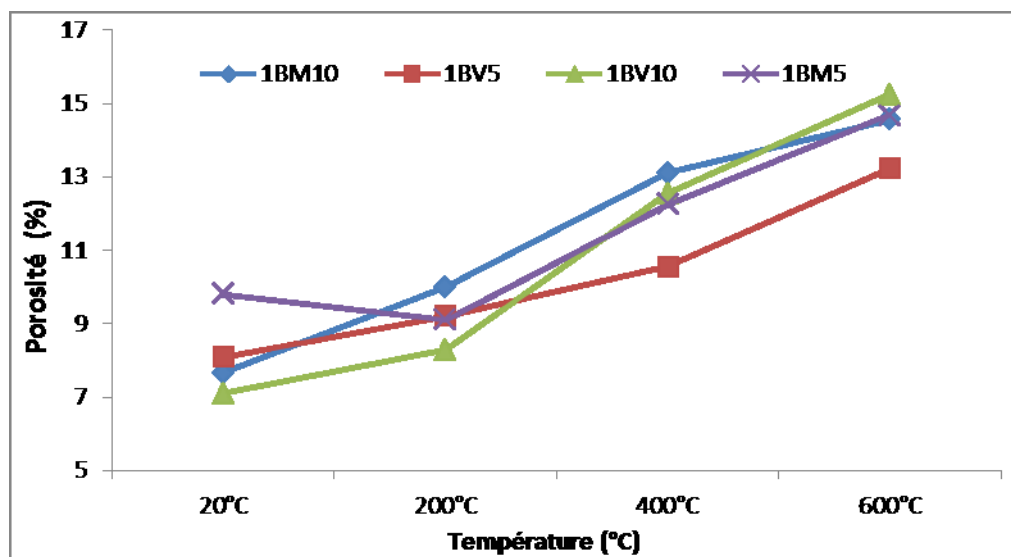


Figure V. 43. Variation de la porosité en fonction de la température des béton adjuvés

Les figures (V. 41) (V. 42) montrent les valeurs moyennes de la porosité relative obtenues à partir des éprouvettes des bétons avant et après exposition à des températures élevées. On constate que la porosité des bétons augmente avec l'augmentation de la température pour tous les bétons, elle est de l'ordre de 10% à 200 °C et de 16% à 600 °C.

Entre 20 °C et 200 °C, la porosité du béton varie très peu, ce qui indique que la structure poreuse de chaque béton n'est pas significativement modifiée. Cette observation est également notée par A. Noumowé [122].

Une augmentation de la température de chauffage allant de 400 °C à 600 °C, conduit à une faible augmentation (13%, 8%) de la porosité du béton de verre. L'augmentation de la porosité en fonction de la température et l'augmentation du volume total du béton, sont liées au départ de l'eau et l'existence de microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. Leur apparition est due au départ de l'eau adsorbée des pores capillaires et au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment. W.P.S. Dias et al [130]. attribuent l'évolution de la porosité à la génération de pores capillaires plus larges. Leur apparition est due au départ de l'eau adsorbée des pores capillaires et au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment.

G. Ye et al. [169] attribuent l'augmentation de la porosité à la décomposition des CSH et de la portlandite. Leur transformation entraîne la destruction des hydrates et crée une porosité additionnelle par le biais de l'altération du réseau poreux.

D'après la figure (V. 43) , on note que l'augmentation de la quantité de poudre de verre et marbre dans le béton entraîne une diminution de la porosité (entre 4% et 7% pour un béton exposé à une température de 20 °C et 21% et 13% pour un béton exposé à une température de 600 °C). Le changement du pourcentage des fillers de verre et l'utilisation de 1% d'adjuvant super plastifiant réduit sensiblement la porosité quelle que soit le degré de température. Le volume de vide est réduit pour un dosage de 1% de l'adjuvant, cela permet de le considérer comme le meilleur adjuvant réducteur de la porosité.

V.4.1.4 Volume des éprouvettes

Les variations dimensionnelles affectent directement le volume du matériau. La variation du volume des éprouvettes est mesurée jusqu'à 600 °C. Les figures (V. 44), (V. 45) présentent la variation du volume des éprouvettes de béton en fonction de la température

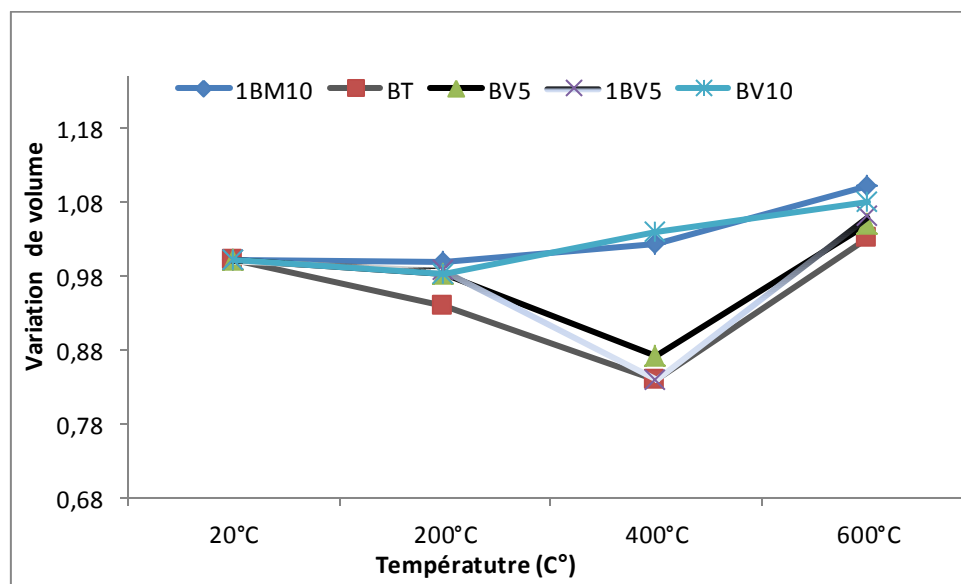


Figure V. 44. Variation du volume des bétons de poudre de verre en fonction de la température.

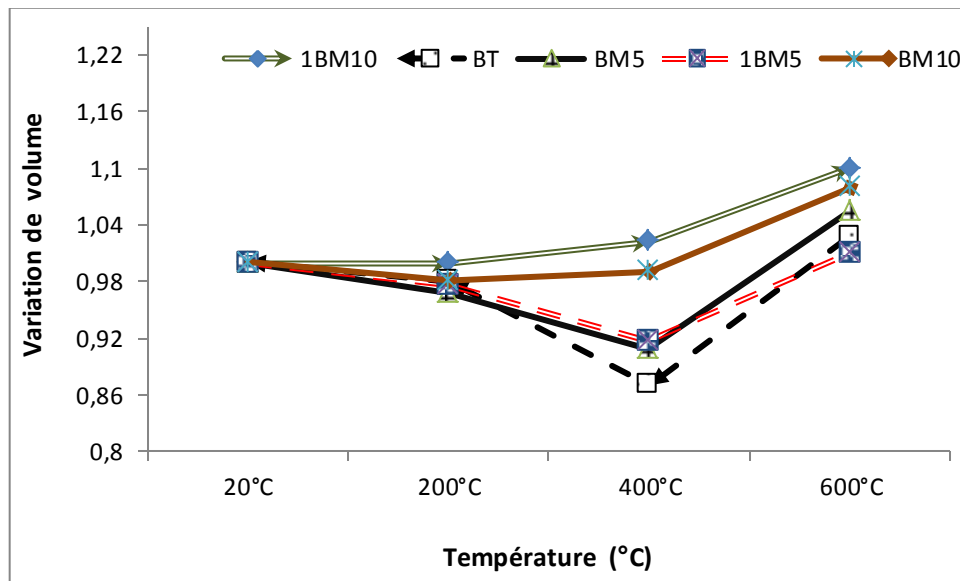


Figure V. 45. Variation du volume des bétons de poudre de marbre en fonction de la température.

On observe une variation du volume des éprouvettes pour tous les types de bétons avec l'augmentation de la température. Cette observation est également notée par S. Hachemi [159], [161] et I. Miličević [160].

La variation du volume des éprouvettes est inférieure à 1.5% dans la gamme de température de 20 °C jusqu'à 400 °C pour tous les bétons. Au-delà de 400 °C, tous les bétons subissent une augmentation du volume. À 600 °C, le pourcentage de l'augmentation du volume varie entre 3.2% à 5.8%. Cette augmentation du volume est généralement attribuée à la génération des macro-fissures provoquant un gonflement de l'éprouvette.

Le béton contenant de la poudre de verre avec superplastifiant présentent des variations du volume apparent supérieures à celles des bétons contenant de la poudre de marbre dans la gamme de température de 400 °C à 600 °C. Cette variation est liée à la nature du poudre de verre qui subit une augmentation de volume de l'ordre de 1% lors du changement de quartz à 575 °C ce qui contribue à la fissuration significative du matériau [124].

V.4.1.5 La vitesse d'ultrason (V)

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrason est une des diverses méthodes d'essai non destructif utilisées pour obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.

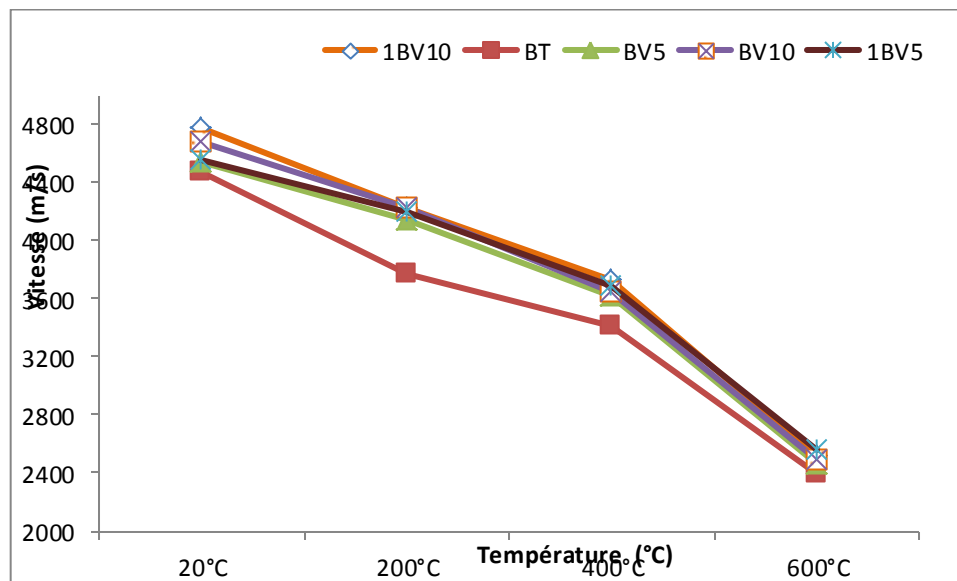
La qualité du béton peut être estimée en mesurant la vitesse des ondes ultrason selon la classification de [NFP 18- 418]. Les valeurs de la vitesse des ondes ultrason et la qualité du béton sont présentées dans le tableau (V.2).

Tableau V.1. Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes [NFP 18- 418].

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3200 – 4000	Bonne
2500 – 3200	Douleur
1700 – 2500	Mauvaise
Inférieure à 1700	Très mauvaise

Tableau V.2. Valeurs de la vitesse de propagation des ondes ultrason et qualité des bétons.

T (°C)	20 °C		200 °C		400 °C		600 °C	
	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité
BT	4478	Bonne	4535	Bonne	3316.26	Bonne	2292.73	Mauvaise
BV5	4535	Excellente	4136.16	Bonne	3765.67	Bonne	2456.31	Mauvaise
1BV5	4556	Excellente	4198.21	Bonne	3780.79	Bonne	2562.23	Douleur
BV10	4683	Excellente	4220.16	Bonne	3879.81	Bonne	2488.11	Mauvaise
1BV10	4770	Excellente	4227.66	Bonne	3880.61	Bonne	2511.26	Douleur
BM5	4520	Excellente	3989	Bonne	3546.20	Bonne	2416.17	Mauvaise
1BM5	4533	Excellente	3996.78	Bonne	3526.76	Bonne	2519.87	Douleur
BM10	4633	Excellente	4189.02	Bonne	3766.86	Bonne	2446.20	Mauvaise
1BM10	4689	Excellente	4199.89	Bonne	3796.20	Bonne	2582.20	Douleur

**Figure V.46.** Effet de la température sur la vitesse des ondes des bétons avec le verre.

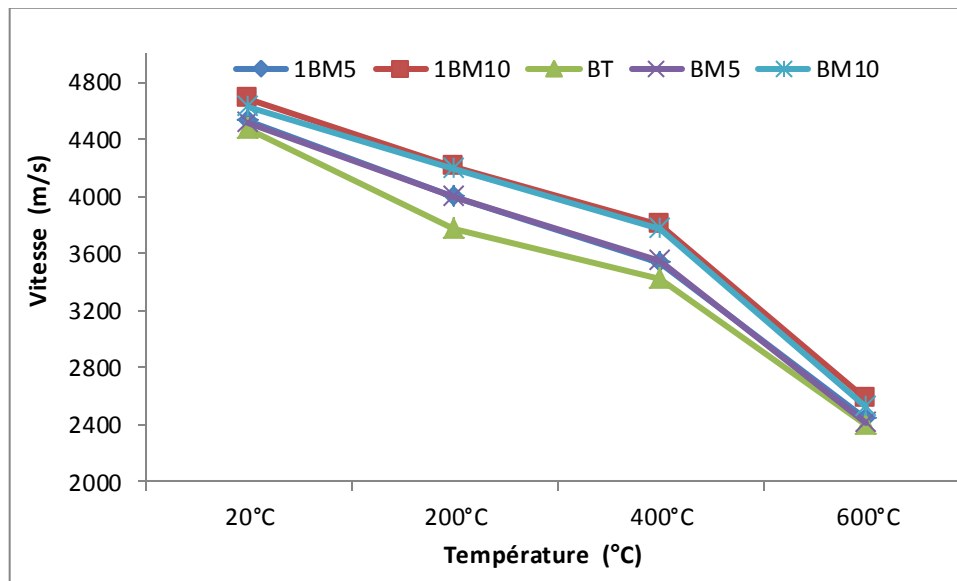


Figure V.47. Effet de la température sur la vitesse des ondes des bétons avec le marbre.

A partir de les figures (V. 46) et (V. 47) nous pouvons observer une diminution de la vitesse des ondes ultrason avec l'augmentation de la température. Cette baisse de la vitesse résulte de l'endommagement produit par le chauffage du béton, ce qui est en accord avec les résultats de la littérature [163], [166].

On distingue deux domaines de température :

✓ **De 20 °C jusqu'à 400 °C**

Nous observons une diminution progressive de la vitesse des ondes avec l'augmentation de la température pour les trois types du béton (béton de verre, marbre, béton de filler adjuvanté) béton de

Une diminution de 4% et 8% dans la température 200 °C. A 400 °C la vitesse des ondes ultrason atteint la valeur de 9 % pour le BT.

Une diminution de 3% et de 4% dans la température 200 °C. À 400 °C la valeur de la vitesse des ondes ultrason est de 10% pour le BM.

La diminution est de 5%. Et nous observons une diminution de 7.46% à 200 °C. À 400 °C la perte devient 10% pour le BV.

Cette baisse de la vitesse des ondes résulte de l'endommagement produit par le chauffage. Peut être s'expliquer par la microfissuration engendrée dans les éprouvettes testées et bien entendu par la déshydratation qui entraîne une augmentation de la porosité contribuant à l'endommagement du béton et l'évaporation de l'eau liée.

✓ **A partir de 400 °C jusqu'à 600 °C**

Dans cet intervalle il y a une chute de la vitesse des ondes ultrason. Au-delà de 400 °C, la vitesse des ondes décroît d'une manière quasi linéaire. Les pourcentages de diminution sont

d'environ 70% pour béton de marbre adjuvanté, 65% pour béton de verre adjuvanté. La baisse des valeurs de la vitesse des ondes est expliquée par l'augmentation des volumes poreux et l'endommagement de la microstructure par propagation des fissures.

Cette diminution peut être interprétée par la seconde étape de la déshydratation du gel CSH [165], la dégradation de l'interface pâte-granulats et la décomposition du carbonate de calcium.

V.4.1.6 Evolution de la surface fissurée des éprouvettes en pâte de ciment et de béton après un cycle chauffage refroidissement

Dans cette partie, on étudie l'évolution de la surface fissurée des éprouvettes en pâte de ciment et en béton en fonction de la température

Les observations des faciès de rupture obtenus après le cycle de chauffage-refroidissement montrent une grande rugosité de ces surfaces à haute température. Une microfissuration assez importante a été constatée sur les éprouvettes de pâte à leur sortie du four et notamment à 200 °C.

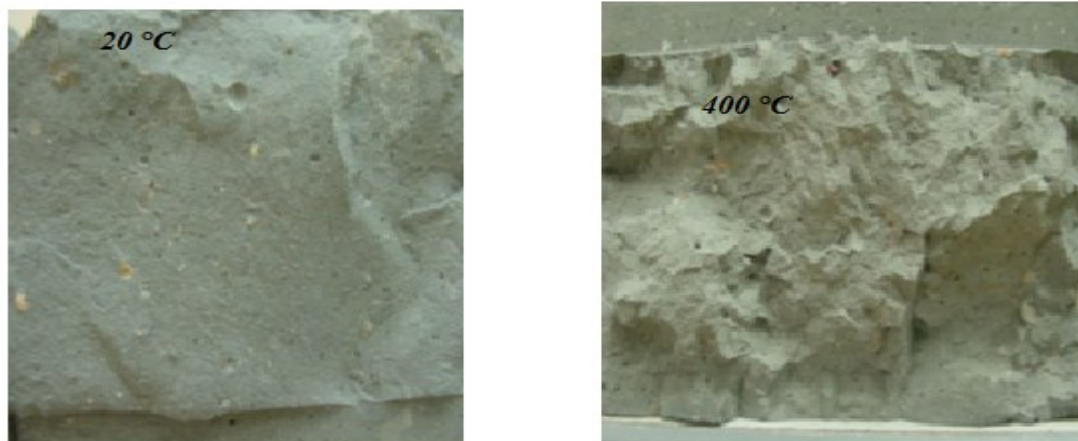
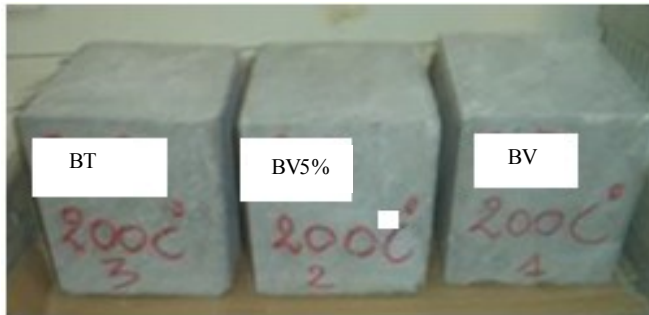


Figure V. 48. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des pâtes de ciment après et avant les cycles de chauffage.

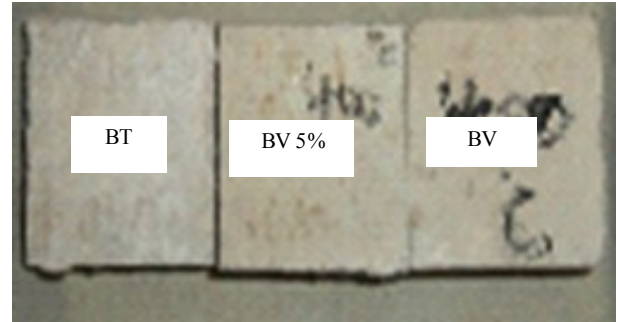
La figure (V. 48) présente les faciès de rupture de ce même matériau dans le cas non chauffé et le cas chauffé à 400 °C. La diminution de fragilité due au chauffage constatée sur la photo de la pâte à 400 °C figure (V.48), peut être expliquée d'une part par l'augmentation des irrégularités des surfaces de faciès de rupture, et la pré-microfissuration due au chauffage d'autre

part. En effet les fissures ne suivent plus le chemin pré-initié par l'entaille et la propagation de la fissure devient moins "rectiligne" et donc une surface de rupture plus importante. Les photos prises avant et après chauffage montrent un grand réseau de microfissures dans la pâte de ciment et un état d'endommagement thermique important de ce matériau. Sa surface de rupture est

devenue très importante à 200 °C et à 400 °C. Ceci peut expliquer en partie l'augmentation de la ductilité de ce matériau en fonction de la température.

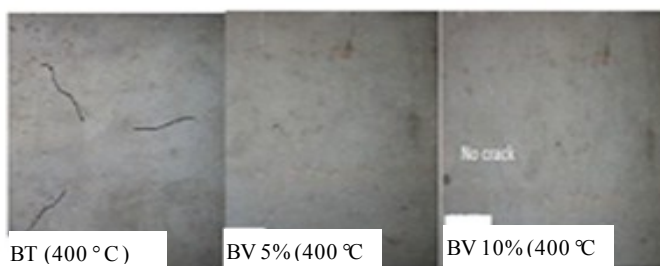


(a) à 200 °C

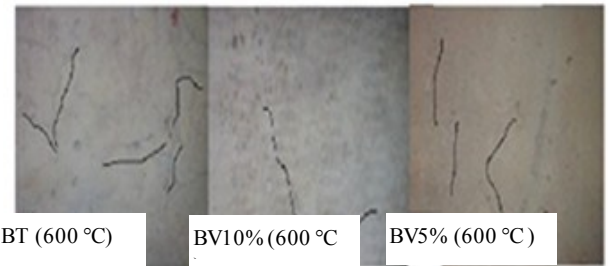


(b) à 600 °C

Figure V. 49. Échantillons de béton exposés à haute température (200 °C et 600 °C)



(c) les fissures de BT, BV 5 et BV 10 exposé à 400 °C



(d) les fissures de BT, BV 5 et BV 10 exposé à 600 °C

Figure V. 50. Fissuration des échantillons de béton exposés à haute température (400 °C et 600 °C)

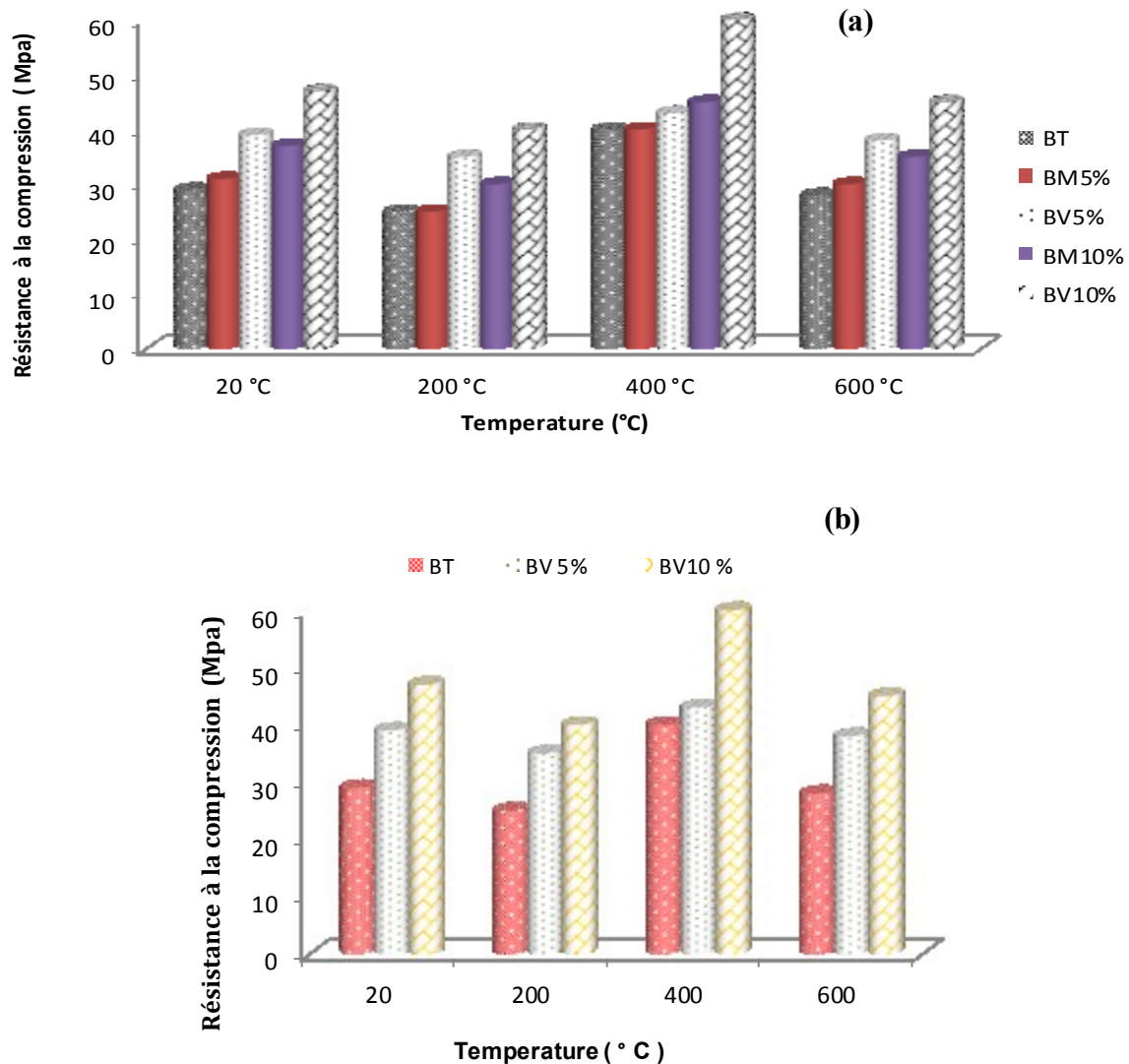
D'après la figure (V.49), on observe des changements de couleur sont survenus à la surface des échantillons de béton en raison des effets de haute température. À la suite de ces changements de couleur, il est possible d'évaluer absolument la gamme de valeurs de température. On peut voir aussi que les fissures, la rupture et les changements de couleur sont produits beaucoup plus dans les échantillons de béton exposés à 600 °C que dans ceux à 200 °C et 400 °C. La surface des spécimens a été observée après exposition à différents niveaux de température et leur refroidissement à température ambiante. BV 5% et BV 10 % ne détectent aucune fissuration visible à la température d'exposition supérieure à 400 °C et développé une ou deux petites fissures à 600 °C.

D'autre part, les échantillons BT ont commencé à développer des fissures à 400 °C et lorsque la température a été augmentée à 600 °C, un nombre des fissures plus larges et réparties

s'est développé. La figure (V.50) illustre le comportement de fissuration des éprouvettes de béton BV 5, BV 10 et BT après leur exposition à différents niveaux de température de 400 °C et 600 °C.

V.4.2. Evolution de la résistance en compression

Après le passage dans le four, les échantillons de béton ont été refroidis pendant 24 heures en laboratoire à une température de 20 ± 5 °C avant de subir un test de résistance à la compression. La résistance à la compression de tous les mélanges de bétons à température ambiante et après chauffage à 200 °C, 400 °C et 600 °C sont illustrée sur les figures (V.51) et (V.52).



(a) : perte de masse pour tous les bétons
 (b) : perte de masse pour les bétons avec poudre de verre

Figure V.51. Résistance à la compression des bétons non adjuvés en fonction de l'âge

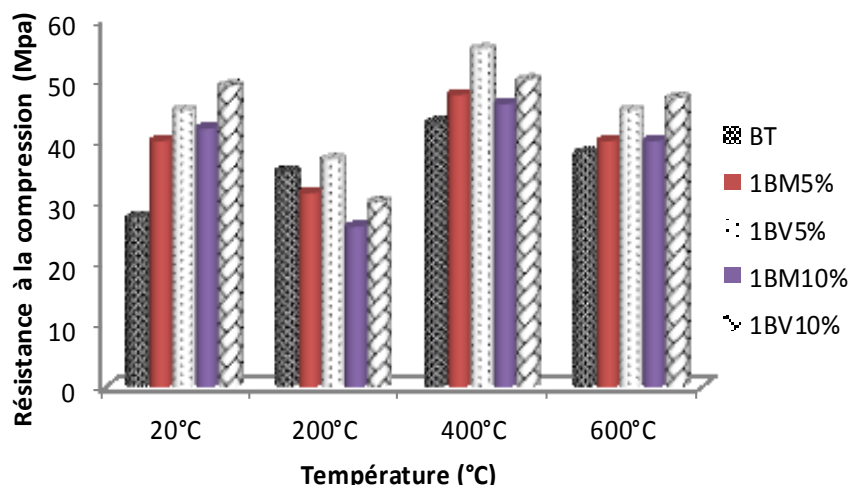


Figure V.52. Résistance à la compression des bétons adjuvantés en fonction de l'âge

D'après les résultats des figures (V.51) et (V.52), on remarque que le remplacement du ciment par 5% à 10% de poudre de verre a augmenté la résistance à la compression d'environ 33% à 28 jours. Cela est dû à la réaction de la poudre de verre avec de l'hydroxyde de calcium s'est formée pendant l'hydratation du ciment qui a provoqué la formation d'hydrate de silicate de calcium (CSH) ainsi que le rôle de charge de très fines particules de verre. En général, on peut conclure que les bétons contenant des BV avaient une résistance significativement plus élevée que ceux des bétons BT à température ambiante. Après une exposition à 200 ° C, la résistance à la compression des bétons sans BV a été réduite. Les résultats ont montré une récupération de force de 20% pour les bétons BV 10 après chauffage à 400 ° C par rapport à 200 ° C. Ces gains à 400 ° C sont attribués à l'augmentation des forces entre les particules de gel (forces de Van der Walls) due à l'élimination de la teneur en eau [131].

L'incorporation des additions minérales peut améliorer les résistances mécaniques des bétons et cette amélioration est fortement liée à la nature, la finesse et le dosage de l'addition. P. Ramanathan et al [171] et A. Yahia et al [170] révèlent que les additions minérales ont la capacité d'assurer un bon remplissage des vides entre les particules de ciment de grande taille et l'augmentation de la production d'hydrates secondaires par des réactions pouzzolaniques avec la chaux résultant de l'hydratation primaire ce qui améliore la résistance à la compression.

Selon de nombreuses recherches, la température élevée peut accélérer et promouvoir le processus d'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique de poudre de verre en même temps, qui produiront tous les deux un hydrate de silicate de calcium (C-S-H) et généreront de la force. Selon la théorie de l'équilibre chimique, il est raisonnable que le taux de réaction chimique et le degré de réaction, y compris la réaction d'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique, augmentent avec la température de réaction [186].

Dans la plage de 400 à 600 °C, des pertes sévères de résistance se sont produites dans tous les bétons BT, BV 5 et BV 10. Dans cette gamme, la pâte de ciment se contracte, tandis que les granulats se dilatent. Ainsi, la zone de transition et la liaison entre les agrégats et la pâte sont affaiblies. Après chauffage à 600 °C, les résistances à la compression de BT étaient inférieures à celles du béton BV 10. Ceci est dû à la présence et à la quantité de poudre de verre dans les bétons qui forment une zone de transition très dense entre agrégats et pâte. Selon les études de G.I. Hager, lorsque la température dépasse 400 °C, la résistance du béton diminue plus rapidement en raison de la dégradation du calcium-silice-hydrate (C-S-H). La seconde phase du C-S-H se décompose dans la gamme de température de 600 à 800 °C, formant β -C2S [124].

A 600 °C, on constate que les pertes rapides de résistance à la compression des bétons BV 10 sont attribuées à la microstructure dense de ce type de bétons qui provoque l'augmentation de la pression interne due à la transition vapeur d'eau de l'eau intercouche. Ainsi, ce processus ainsi que la décomposition chimique des produits d'hydratation provoquent de graves détériorations et des pertes de résistance dans le béton après avoir subi des températures élevées. Les plus grandes pertes de résistance résiduelle relatives du béton BV5, BV10 et sans poudre de verre ont été observées à 600 °C, qui étaient respectivement de 2%, 24% et 25%.

Il apparaît que le dosage de poudre de verre n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression à 200 °C. Cependant, entre 200 °C et 400 °C, la quantité de BV à 10% a des effets significatifs sur la résistance à la compression résiduelle.

V.4.3 Relation entre les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons

V.4.3.1 Relation entre la porosité et la résistance en compression

Nous avons essayé de vérifier s'il existe une relation entre la porosité des matériaux étudiés, changeant avec la température et la variation de la résistance en compression dans la gamme des températures de 20 °C à 600 °C.

Les résultats de la porosité à l'eau en fonction de la résistance en compression Dans les figures (IV.53) (IV.54).

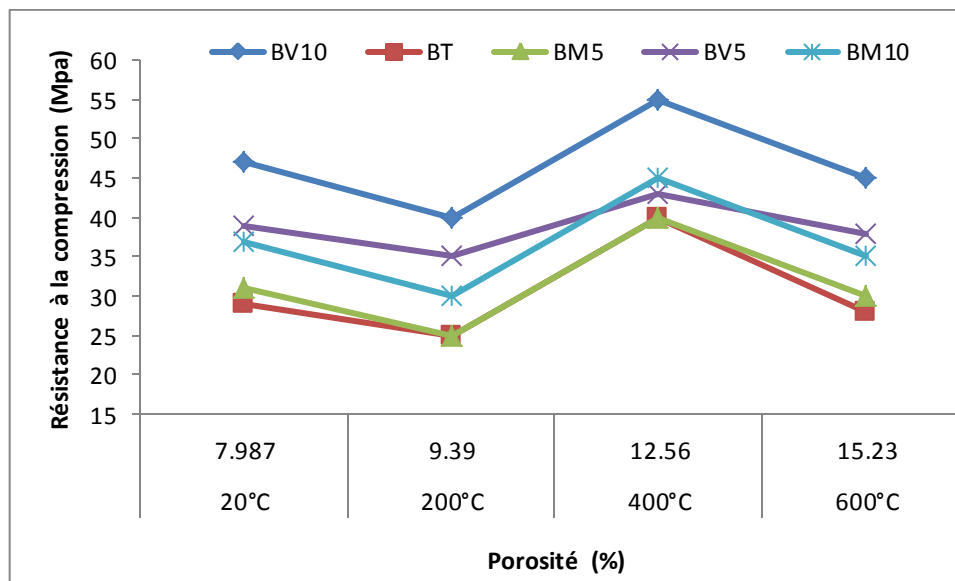


Figure IV.53. Evolution de la résistance en compression des bétons non adjuvanté en fonction de la porosité

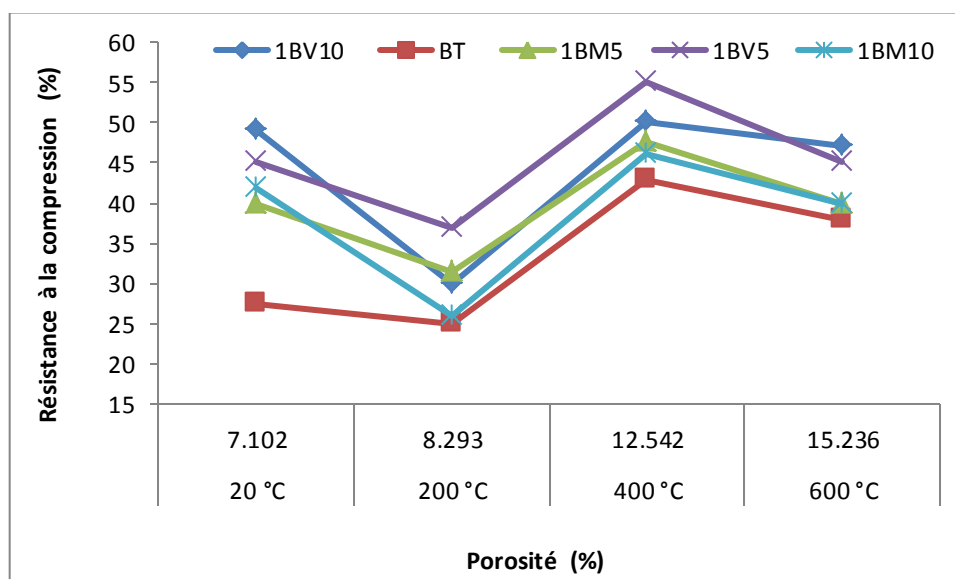


Figure IV.54. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvanté en fonction de la porosité

La figure montre qu'il existe une dépendance entre la porosité et la résistance en compression, ce qui a été confirmé par G.I Hager [124]

G. Ye et al. [169] attribuent l'augmentation de la porosité à la décomposition des CSH et de la portlandite. Leur transformation entraîne la destruction des hydrates et crée une porosité additionnelle par le biais de l'altération du réseau poreux. Si nous comparons l'évolution de la résistance à la compression avec celle de la porosité entre 200 et 400 °C, nous constatons une

augmentation dans les 2 cas : un accroissement de 30% pour la résistance, et de 10% pour la porosité des bétons entre 200 et 400 °C. L'augmentation de la résistance ne peut donc pas être attribuée à la diminution de la porosité, mais plutôt à une amélioration des propriétés liantes des hydrates de la pâte de ciment.

On peut expliquer ces résultats par le fait que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans les hydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui jouent un rôle de précontrainte et par ceci à une augmentation de la résistance à la compression aux alentours de 400 °C. Au-delà de 400 °C, le rapport de la résistance à chaud diminue quasi linéairement

V.4.3.2 Relation entre la porosité et la perte de masse

La figure (V.55), (V.56) présente la relation entre la porosité et la perte de masse du béton exposé à la température du cycle de chauffage-refroidissement. L'évolution de la porosité en fonction de la perte de masse montre une bonne corrélation entre ces deux paramètres. L'augmentation de la porosité s'accompagne d'une grande perte de masse des bétons. D'après M. Kanema [125], la perte de masse entre 200 et 400 °C correspond au départ de l'eau liée dans les hydrates. A 400 °C, cet auteur observe une perte de masse correspondant au départ de 65% à 80% de l'eau contenue dans le béton. Nos résultats concordent parfaitement avec ces données.

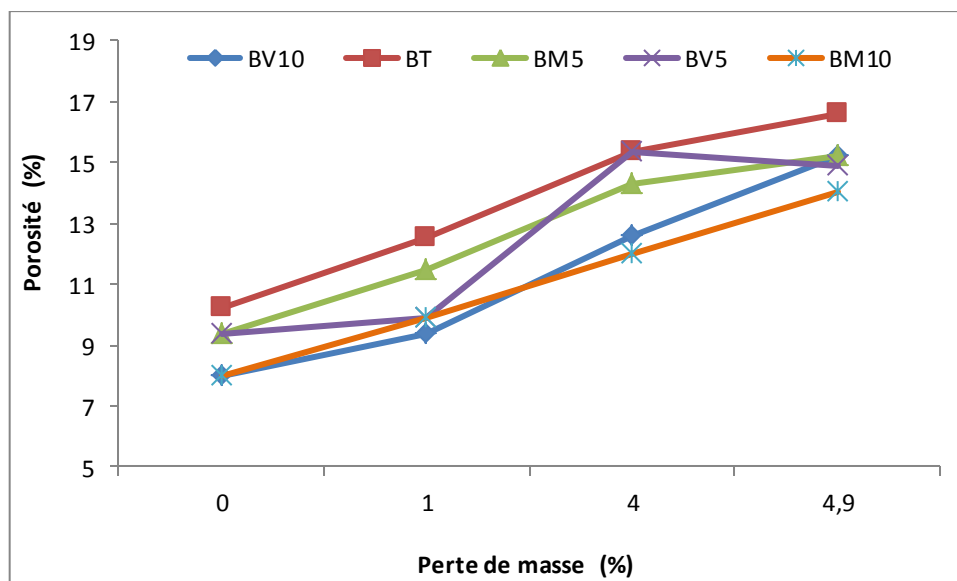


Figure V.55. Evolution de la porosité des bétons avec ajout en fonction de la perte de masse

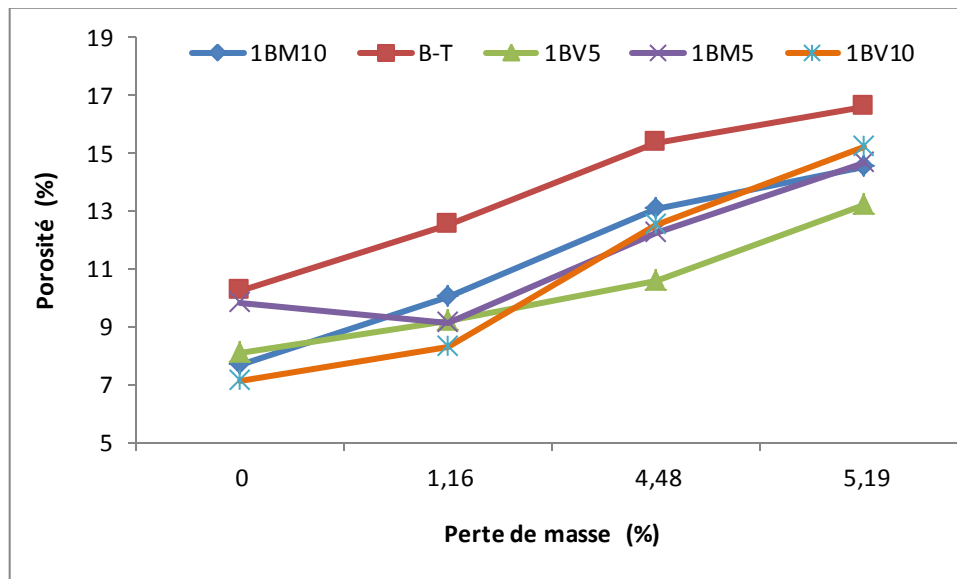


Figure V.56. Evolution de la porosité des bétons adjuvantés en fonction de la perte de masse

V.4.3.3 Relation entre la porosité et variation de volume

La relation entre la porosité et la variation de volume a été également tracée sur les figures (V.57), (V.58). Avec l'augmentation de la température, nous avons noté des variations de volume.

Les variations de volume des éprouvettes augmentent croisement avec l'augmentation de la porosité et la température. Elles passent de 4% à 15% après une exposition à 200 °C et à 600°C respectivement. Cette augmentation est quasi linéaire jusqu'à une température de 600 °C. Ceci est dû à l'évaporation de l'eau. Plusieurs auteurs; A. Noumowé 1995 [122], N. Tebbal [57], confirment qu'au-delà de 600 °C il ne reste plus d'eau dans l'éprouvette du béton.

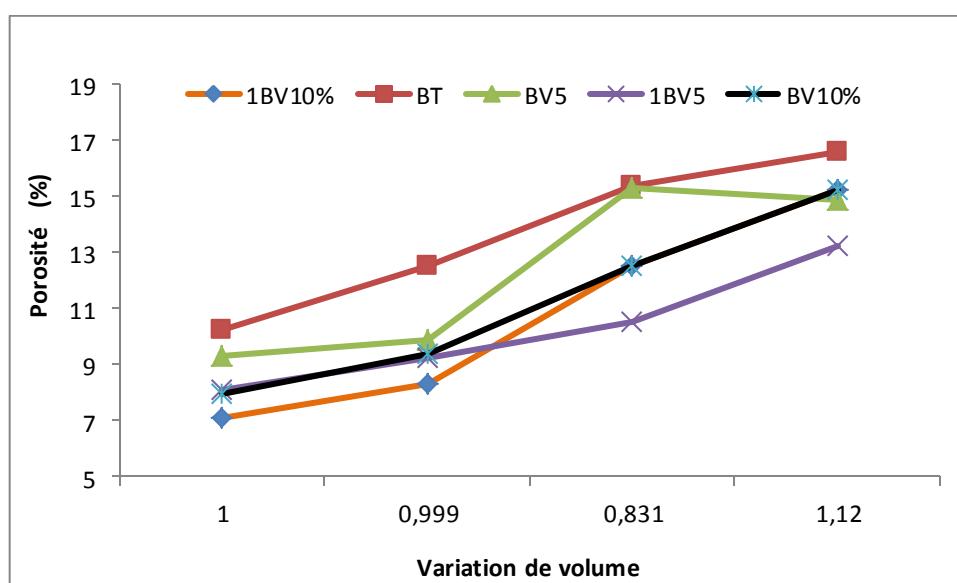


Figure V.57. Evolution de la porosité en fonction de la variation de volume (Poudre de verre)

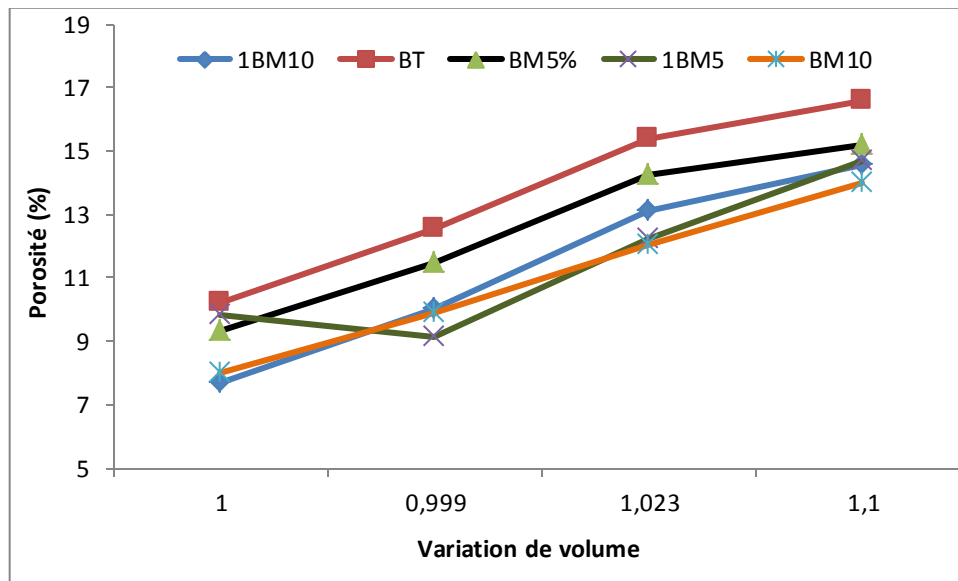


Figure V.58. Evolution de la porosité des bétons avec poudre de marbre en fonction de la variation de volume

V.4.3.4 Relation entre la résistance en compression et la perte de masse

La relation entre la résistance à la compression et la perte de masse est présentée sur les figures (V.59), (V.60). Nous constatons une légère variation de la résistance à la compression pour une perte de masse inférieure à 6.5%. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la perte de masse est accompagnée par une diminution significative de la résistance à la compression.

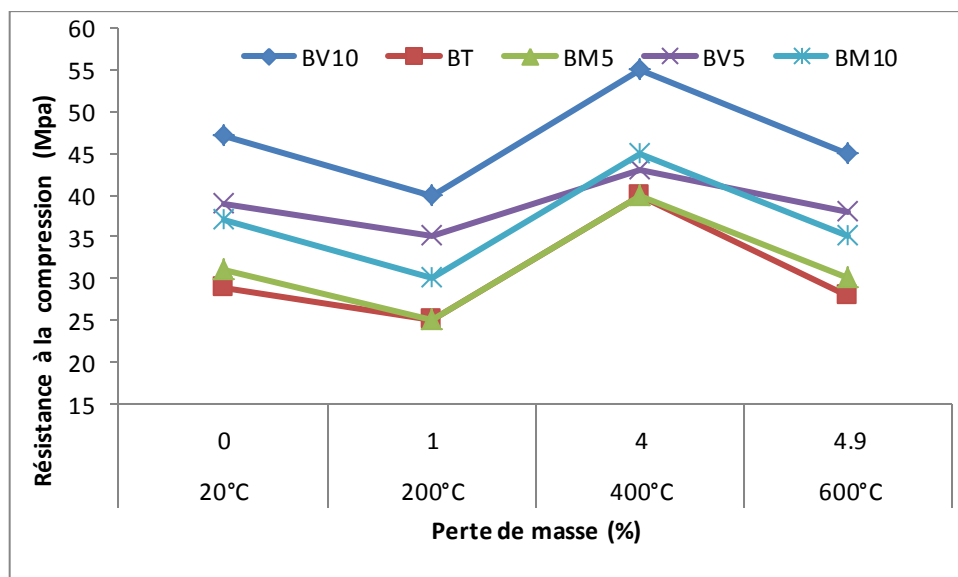


Figure V.59. Evolution de la résistance en compression des bétons sans adjuvant en fonction de la perte de masse

A 400 °C ; la chute de la résistance continue. Tous les bétons présentent une chute de résistance à 600 °C comparativement à celles à 400 °C. Cela explique que le béton soumis à des températures supérieures à 400 °C, l'eau liée chimiquement dans les CSH et Ca(OH)_2 passe à l'état libre et peut s'échapper. La dégradation de la matrice cimentaire par l'évaporation de l'eau liée chimiquement pourrait contribuer [125].

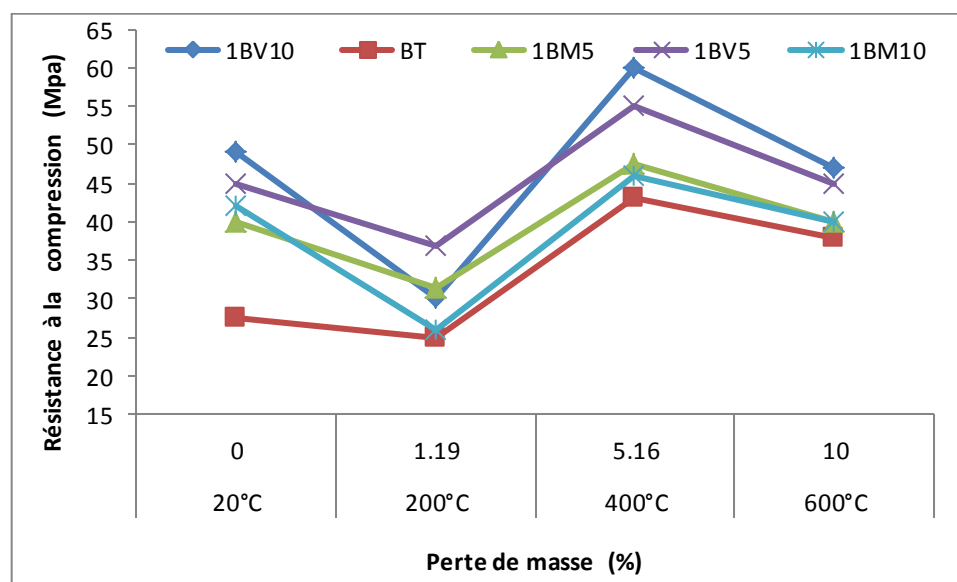


Figure V.60. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvantés en fonction de la perte de masse

V.4.3.5 Relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques

La résistance en compression et la vitesse des ondes enregistrées sur les mêmes éprouvettes sont reportées sur les figures (V.61) ,(V.62). Elle permet de mettre en évidence la relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes. Les résultats obtenus montrent que :

Entre 20 °C et 200 °C, il y a une diminution modérée de la résistance à la compression de tous les bétons à une variation de la vitesse des ondes inférieure à 20% pour des températures inférieures à 400 °C. .

Au-delà de 400 °C, la diminution progressive de la vitesse des ondes soniques entraîne une diminution rapide de la résistance en compression. Nous observons un pic de contrainte à 400 °C indiquant une valeur maximale de la résistance à la compression du béton. Ceci se justifie par l'apparition des fissures visibles sur les éprouvettes des bétons.

Sur la figure (V.62), les bétons adjuvantés présentent à une variation diminuée de la vitesse des ondes et de la résistance élevées. Le rôle du super plastifiant dans la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité du béton est mis en évidence.

On peut dire que, les bétons adjuvantés sont affectés par les hautes températures surtout au – delà de 600 °C en comparaison avec ceux moins de dosage en super plastifiant, ce qui confirment les résultats de H.Y. Li, et al [176], N. Tebbal et al [57].

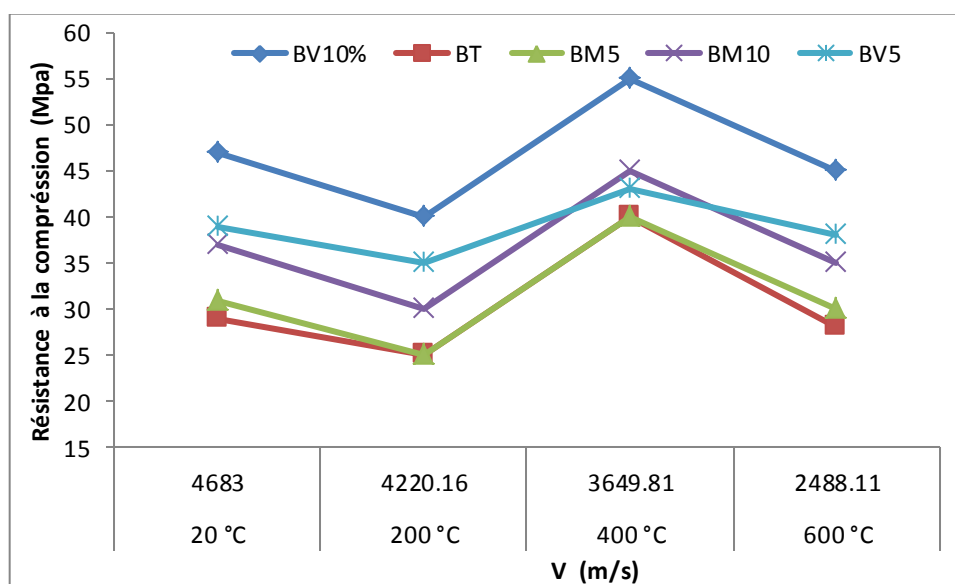


Figure V.61. Evolution de la résistance en compression des bétons sans adjuvant en fonction de la vitesse des ondes

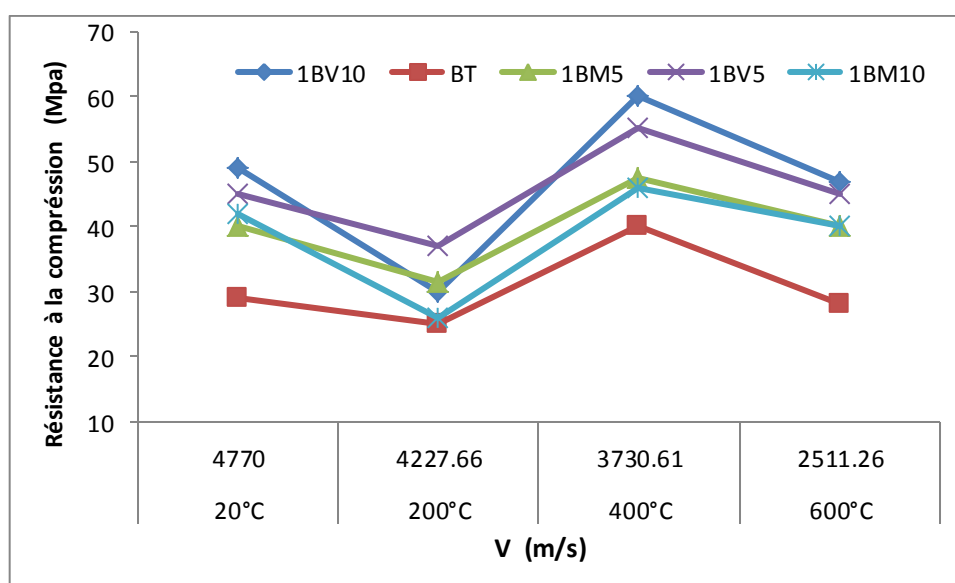


Figure V.62. Evolution de la résistance en compression des bétons adjuvantés en fonction de la vitesse des ondes

V.4.4 Diffraction des rayons X

L'analyse par diffraction des rayons X est réalisée à l'Université de de M'sila par un diffractomètre à rayons X (X' Pert) couplé à un système informatique. Le but essentiel de cette analyse est d'identifier les différentes phases cristallines présentes dans un échantillon.

Les bétons avec ajout cimentaires (fillers de marbre ou de verre) à 600 °C sont représentés dans les figures (V.63), (V.64), V.65).

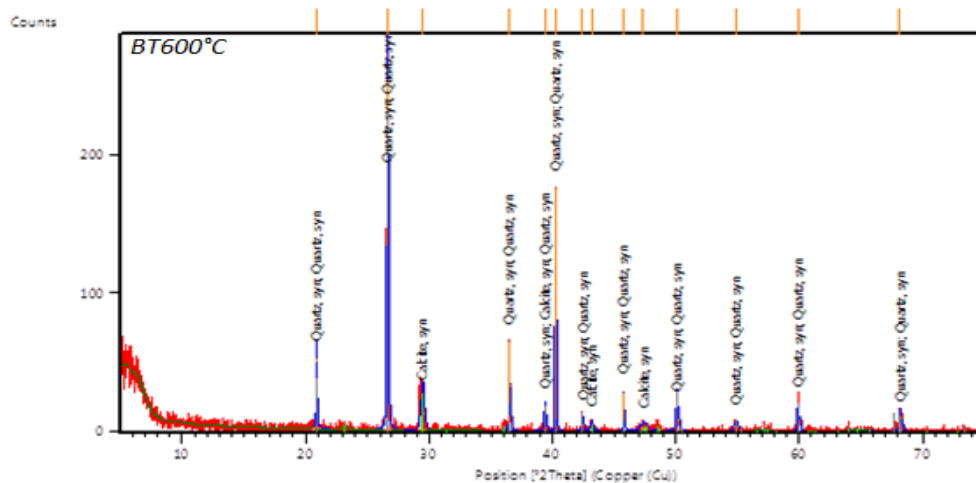


Figure V.63. Diagramme de diffraction X du béton sans ajout à 180 jours.

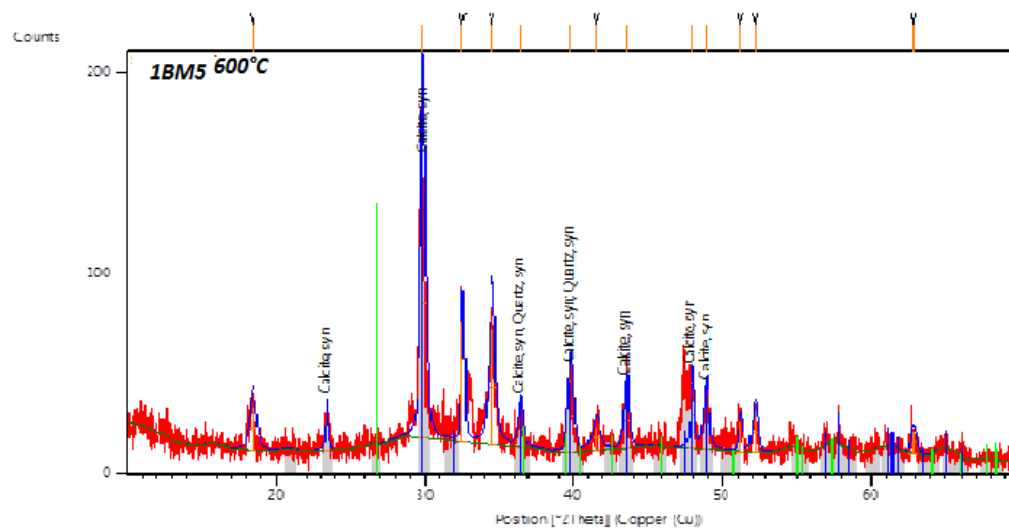


Figure V. 64. Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de marbre à 180 jours.

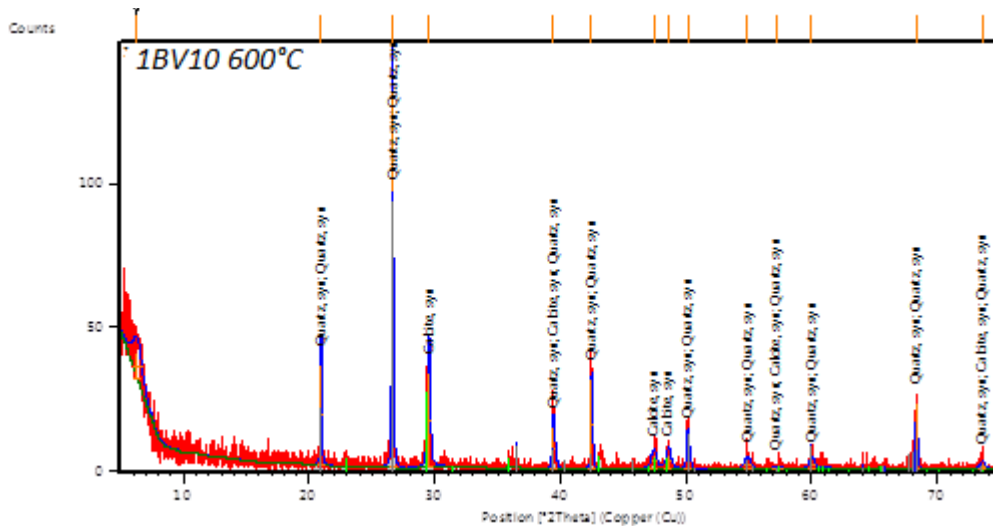


Figure V. 65. Diagramme de diffraction X du béton avec ajout de poudre de verre à 180 jours.

L'étude des diagrammes précédents, présente les observations suivantes :

- La présence de quartz SiO_2 , confirmant la présence de sable;
- La présence de calcite CaCO_3 , obtenue par carbonatation de la chaux;
- La présence de traces de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Le diffractogramme d'un béton non chauffé (20°C) révèle la présence de portlandite, de calcite ou encore de quartz- α . L'ettringite et le monosulfaluminate n'ont pas été détectés, les angles correspondants n'étant pas mesurés par l'appareil utilisé car la raie principal 2 θ de ces éléments est inférieure à 10 °C.

Un traitement thermique plus sévère (450 et 600 °C) tous les pics relatifs à la portlandite disparaissent. Cette transformation a été également observée par les diagrammes d'ATD, ATG.

V.4.5 Analyse thermo - gravimétrique et différentielle (TG - ATD)

La structure interne. L'analyse thermo-gravimétrique et thermique différentielle, l'ATG et l'ATD du béton soumis à haute température sont représentés sur les figures (V.66) (V.67) et (V.68). Un échantillon d'essai de 200 mg de béton a été analysé en fonction du chauffage linéaire de la température ambiante à 1100 ° C. vitesse de 10 °C / min.

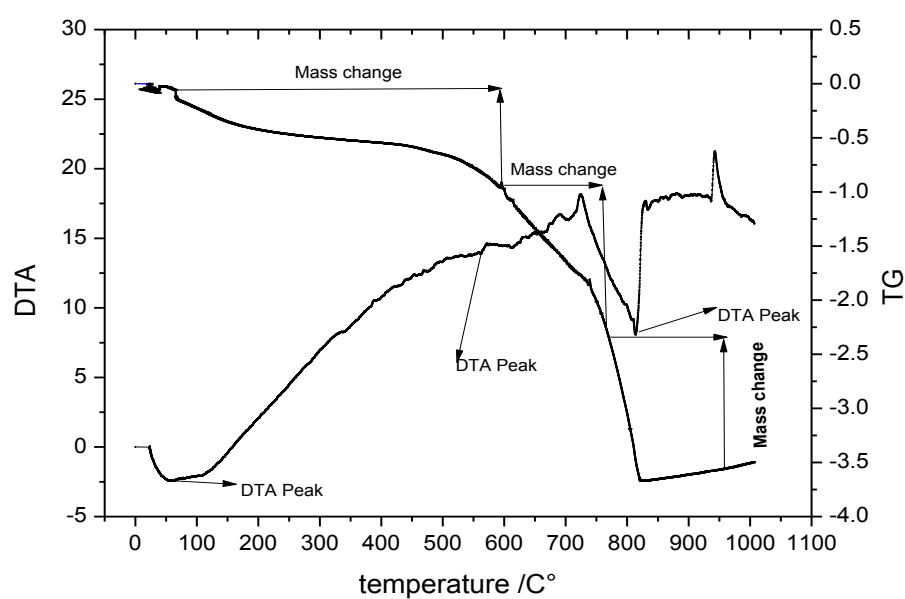


Figure V.66. ATG et ATD de poudre du BV10% à 600 °C

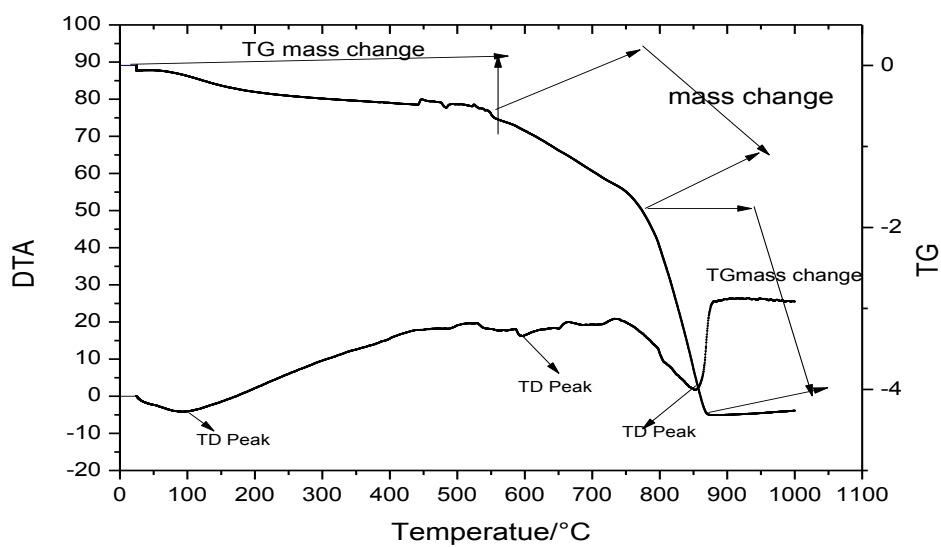


Figure V.67. ATG et ATD de poudre du BT à 600 °C

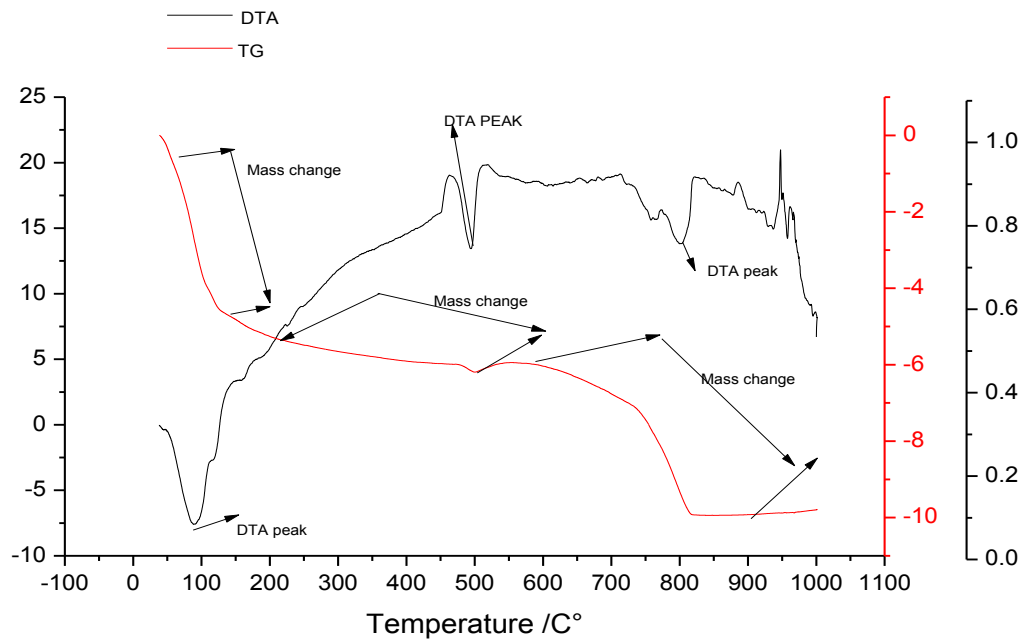


Figure V.68. ATG et ATD de poudre du BM10% à 600 °C

Six pics endothermiques ont été observés: 110 -125 °C, 180 °C, 400 °C et 450-550 °C, 573 °C et 800 °C. Ces pics de flux thermique sont essentiellement liés aux températures d'échange de phases des différents hydrates de la pâte de ciment. Quelques faits pour ceci sont donnés comme suit.

- L'eau libre commence à s'évaporer rapidement, ce qui explique la présence de double pic à 110 et 125 °C.
- Dans la plage de température de 80 à 150 °C, la déshydratation de l'ettringite a lieu, suivie de la décomposition du gypse entre 150 et 170 °C [124].
- Entre 200 °C et 300 °C, de légères variations de flux vers la déshydratation continue de C-S-H, appelée «bouchon d'eau», se développent dans les pores de béton [184].
- À 400 °C, un pic mineur a été observé sur les pâtes de ciment. W. Sha et al. (1999) attribuent ce changement d'état cristallin ou de déshydratation à une solution solide de Fe_2O_3 mais d'autres sources (J.P. Persy et F.X. Deloye 1986) attribuent ce pic à la décomposition de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) [167].
- Le pic correspondant à la décomposition du calcaire libre $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO}$ a été observé entre 450 °C et 550 °C [124].
- La transformation allotropique du quartz- α quartz- β accompagnée d'un phénomène d'expansion. Il a été attribué à 573 °C [185].

- Le C-S-H se décompose et se transforme en une nouvelle forme d'hydrates moins riches en eau et en dons sans être formés de composés anhydres. Il s'agit principalement de silicates bicalciques (B-C2S) et de β -wollastonite (β -CS) entre 600 °C et 700 °C [61].
- A 700 °C à 900 °C, le calcaire se décompose, ce pic indique donc la décomposition des carbonates de calcium (CaCO_3), également appelés "calcite" en libérant de la chaux accompagnée d'un dégagement de CO_2 selon la forte endothermie réaction qui est la suivante [129]:



Dans la dernière partie de cette étude, nous pouvons dire que les résultats sont cohérents avec les recherches effectuées par S. Liu et al. (2014), par lequel il a confirmé que les tests TG-DTA indiquent qu'une partie de CH est consommée lors de la réaction pouzzolanique de BV. Plus la quantité de BV est grande, moins le contenu en CH est important. Une température de durcissement élevée peut contribuer à la réaction pouzzolanique de BV, entraînant une consommation plus importante de CH [99].

CONCLUSION

L'étude présentée dans cette partie concerne le comportement de trois type de béton exposés à haute température, le premier type de béton référence et le second a été réalisé avec de deux additions (poudre de marbre , verre) et troisième type de bétons adjuvanté (superplastifiant SP40). Les propriétés mécaniques et physiques résiduelles de neuf bétons ont été déterminées à température ambiante et après exposition à différents cycles de chauffage/refroidissement à 20 °C, 200 °C, 400 °C et 600 °C. On a étudié l'effet de la température sur la perte de masse, la porosité à l'eau, la densité, la variation de volume, la résistance à la compression et la vitesse des ondes soniques de ces bétons. Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des résultats présentés dans cette étude:

- La valorisation de la poudre de verre et marbre présente un voie prometteuse pour fabriquer de nouveaux ciments composés.
- L'activité de la poudre de verre est remarquée à long terme.
- La température exerce une influence non seulement sur les granulats mais sur la compacité de la matrice cimentaire.
- Les bétons à base de la poudre de verre sont plus vulnérables en comparaison avec les bétons ordinaires:
 - a. Une réduction sensible dans la masse aux différentes températures (200, 400 et 600 °C)
 - b. Une réduction notable dans la résistance en compression de 400 °C à 600 °C

- La perte de masse à haute température est plus importante pour les bétons;
- La mesure de la perte de masse des bétons a permis de distinguer trois zones de départ d'eau du béton. La première zone, commençant de 20 °C à 400 °C, présente une importante perte de poids due au départ de l'eau puis l'eau liée aux hydrates. Entre 400 °C et 600 °C, la cinétique de perte de masse ralentie. Au-delà de 600 °C, la perte de masse est attribuée au départ de l'eau fortement liée;
- L'évolution de la porosité des bétons additionnés et bétons adjuvantés est similaire. Cependant, à 400 °C, nous observons une diminution de la porosité qui peut être attribuée à un retrait des éprouvettes causant une diminution du volume et notamment des pores présents dans l'échantillon;
- La vitesse des ondes soniques de tous les bétons diminue avec l'augmentation de température, et un processus d'accélération dans la diminution de la vitesse des ondes soniques est observé dans la plage de 200 à 600 °C. Dans cette plage de température, la vitesse des ondes soniques des bétons contenant du marbre présente les valeurs les plus faibles que celles des bétons contenant du poudre de verre.
- Une amélioration de la résistance en compression est notée dans le premier palier d'élévation de température 20 °C – 200 °C dans les différents bétons (ordinaire ou base de la poudre de verre et marbre) humides, durcis à l'âge.
- D'après les résultats on constate que, une diminution de la densité des différents bétons avec l'augmentation de la température. La perte de masse des bétons références est inférieure à celle du béton à base de poudre de verre mais supérieure légèrement à celle du béton contenant des poudres de marbre.
- Nous avons constaté que la résistance à la compression est fortement influencée par l'augmentation de la perte de masse et de la porosité. Elle est influencée aussi par la diminution de la densité et de la vitesse des ondes soniques. Ces constatations sont remarquées suite à une exposition des bétons à des températures supérieures à 400 °C.
- Une relation proportionnelle est constatée entre la porosité et la perte de masse. L'augmentation de la perte de masse provoque une augmentation de la porosité. Nous avons vu aussi que la densité du béton est influencée par l'augmentation de la perte de masse. Une relation inversement proportionnelle est montrée entre la vitesse des ondes soniques et la porosité. La vitesse des ondes soniques diminue significativement avec l'augmentation de la porosité.

Conclusion générale

Le devenir des déchets et des sous-produits représente un enjeu majeur, au centre des préoccupations du monde industriel en pleine mutation environnementale. L'étude articulée autour des trois principaux axes suivants :

- L'influence des fillers sur les propriétés des bétons confectonnés à l'état frais et à l'état dur;
- Caractérisation des bétons avec la poudre de verre et celle de marbre à travers des essais physico-mécaniques ;
- Étude de comportement des bétons soumis à des hautes températures vis-à-vis des plusieurs paramètres tel que la résistance mécanique , perte de masse , porosité , ..ect.

Les résultats obtenus dans cette étude nous a permis d'aboutir les conclusions suivantes :

a) L'effet de filler

En maintien un rapport E/C égale à 1,78 avec un l'affaissement constant (7 cm), la méthode de Dreux-Gorisse conjuguée à celle de coulis nous ont conduit à des compositions de béton satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs de formulation .

les résultats de cette étude nous a permet de conclure les points suivantes:

- ✓ L'augmentation du taux d'ajout (marbre, verre) dans le ciment influe sensiblement sur la finesse (surface spécifique) des ciments;
- ✓ Le dosage l'ajout soit de verre ou du marbre dans le ciment, augmente la surface spécifique du liant qui entraîne une demande d'eau supplémentaire et conduit ainsi à une eau de consistance plus importante dans toutes les pâtes de ciment;
- ✓ La consistance normale augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de Blain des ajouts cimentaires, ce qui favorise les réactions et les particules hydratés forment une bonne cohésion;
- ✓ Le début et la fin de prise diminuent avec l'augmentation de la surface de Blain, et augmente en fonction de l'augmentation du dosage de la poudre de verre;
- ✓ L'utilisation de la poudre de verre finement broyé avec un superplastifiant, abouti à un bon écoulement du béton par rapport au béton de référence ;
- ✓ L'introduction du fillers de marbre broyé augmente la masse volumique du béton à l'état frais, et donne une amélioration à la fluidités des bétons ;
- ✓ L'ajout de la poudre de verre a donné des résultants acceptables par rapport à la composition témoin, essentiellement la composition contenant 10 % de poudre de verre amélioré la maniabilité et la résistance mécanique;
- ✓ Les additions minérales contribuent au remplissage des pores en plus de ce que l'hydratation du ciment seul peut apporter, par la formation d'hydrates lors de la prise et

du durcissement. L'amélioration de la porosité du béton est d'autant plus importante que la finesse de la poudre de marbre est élevée ;

- ✓ Le taux d'air occlus des bétons frais avec poudre de verre, comparé à celui du béton de référence, est plus faible. L'effet de l'introduction de la poudre de verre, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores suite au remplissage de ces derniers par la poudre de verre;
- ✓ La masse volumique des bétons avec poudre de verre, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines ;
- ✓ La masse volumique des bétons à l'état durci augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage de filler (quel soit le type de filler) ;
- ✓ La masse volumiques des bétons adjuvantés est supérieure a celle des bétons sans adjuvant. Pour les bétons ordinaires, la densité maximale avec 10% de verre et 1% super plastifiant.

b) *L'effet de la température élevée*

- ✓ La valorisation de la poudre de verre et marbre présente un voie prometteuse pour fabriquer de nouveaux ciments composés;
- ✓ L'activité de la poudre de verre est remarquée à long terme;
- ✓ La température exerce une influence non seulement sur les granulats mais sur la compacité de la matrice cimentaire;
- ✓ Les pics de résistance sont remarqués à 400 °C, ce qui indiquent que le béton chauffé est sujet à une augmentation de la pression interne dans le béton qui peut jouer un rôle de précontrainte;
- ✓ Les résistances à compressions nous a montré que les performances mécaniques des bétons se dégradent avec l'augmentation de la température. Les résultats des essais mécaniques de compression évoluent suivant trois domaines. Dans le premier domaine, entre 20 °C et 200 °C, les bétons perdent 3% à 23% de leur résistance initiale. Dans le deuxième domaine, entre 200 °C et 400 °C, la résistance en compression ré-augmente partiellement. Le troisième domaine est caractérisé par une forte baisse de la résistance en compression. Nous avons constaté que la diminution de cette résistance dans le troisième domaine est plus importante pour les bétons de filler;
- ✓ Les pertes de masses mesurées à 20 °C jusqu'à 600 °C sont plus grandes que la masse de l'eau de gâchage initiale contenue dans le béton qui est de l'ordre de 12% de la masse totale du béton;
- ✓ Des changements de couleur ont été observés sur le béton sous l'effet de la température élevée;
- ✓ L'addition de 10% de fillers de marbre engendre un squelette plus cohérent, une peau de béton plus imperméable et par conséquent un béton plus résistants par rapport au béton de référence;

- ✓ Les résultats de mesure de porosité confirment que la porosité du béton augmente avec la température. Cette augmentation est liée à la détérioration de la matrice cimentaire et à l'apparition de microfissuration ;
- ✓ Nous avons constaté une dégradation progressive de la résistance à la compression du béton en fonction de la température;
- ✓ Il a été démontré que le verre très finement broyé est une excellente charge et peut avoir des propriétés pouzzoloniques suffisantes pour servir de remplacement partiel du ciment;

Recommandations

Afin de compléter cette étude et de cerner de près les lois qui réagissent le comportement de béton avec poudre de verre, nous recommandons pour les futurs travaux, d'aborder les points suivants :

- ❖ Etudier la durabilité des bétons à base de poudre de verre en milieu acide;
- ❖ Etudier le comportement des bétons à base de poudre de verre au feu .

Référence Bibliographique

- [1] **G. Chanvillard**. Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas, 1999.
- [2] **Georges DREUX, Jean FESTA**. Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8^{ème} édition Eyrolles Paris 1998.
- [3] **O. Haddad, S. Aggoun, R. Cabrillac**. Influence des addition minérales sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants, Université de Cergy-Pontoise, France, 2003.
- [4] **A. Kerbouche**. Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons. memoir de magister .UST Oran .2009.
- [5] **M. Pattengil et T.C. Shutt**. Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products. Albuquerque, New Mexico, U.S.A. 1973.
- [6] **Rachida IDIR** Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, doctorat de l'université de toulouse, 2009, 304 Page
- [7] **Rachida IDIR *Martin CYR Arezki TAGNIT-HAMOU** (DECEMBRE 2010) Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Etude des propriétés des bétons de verre, rapport. Centre d'Etudes Techniques Université de Toulouse France
- [8] **L.T. Phan, N.J. Carino**. Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature. National institute of standards and technology. Materials and structures, Vol. 36, N°256, 2003, p.91-98.
- [9] **Wikipedia**, Verre, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre>, (consulté le 15 janvier 2008)
- [10] **M.Y. Celik and E. Sabah**. Marble Deposits and the Impact of Marble Waste on Environmental Pollution Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon–Turkey). *J Environ Manage* 87: pp10, 6–116, 2008.
- [11] **K.E. Alyamac and R. Ince**. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials* 23, pp 1201–1210, 2009.
- [12] **J. Baron, J.P. Olivier et J.C. Weiss**. Les ciments courants, Les bétons, Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques Baron, Jean-Pierre Olivier, Ed. Eyrolles, 1996.
- [13] **P. Lawrence** Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.
- [14] **Lucien Pliskin** « Béton »,
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/32774/C%26T_1992_26_58
- [15] **R. Dupain, R. Lanchon et J.C. Saint-Arromain**. Granulats, sols, ciments et bétons, Paris ; Ed. Educavivre, 276 p, 1995.
- [16] **N. Schwarz et N. Neithalath**. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison

- to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, volume 38, numéro 4, p. 429-436, 2008.
- [17] **A. Shayan et A. Xu.** Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 1, p. 81-89, 2004.
- [18] **Notice N° PM 08-01.** Guide d'utilisation du béton en site maritime. Centre d'Etudes techniques maritimes et fluviales, ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, France, 04- 2008.
- [19] **V. Baroghel-Bouny.** caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthode, analyse, interprétation. LCPC, 1994.
- [20] **J.-P. Balayssac, V. Kringkaï, M. Sbartai, G. Klysz, S. Laurens, G. Arliguie.** Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton », 25e rencontres de l'AUGC, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA – UPS Génie Civil, 135 avenue de Rangueil,F-31077 TOULOUSE Cedex 04, France, 05- 2007.
- [21] **J.P. Ollivier et J. Baron.** Les bétons, bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles, 1997.
- [22] **John Wiley and Sons, F. Taylor, S. Thompson,** 1912. A treatise on concrete plain and reinforced, New York.
- [23] **Rabah chaid, hamid zeroub et damien rangeard.** Concrete durability indicaj“ors with glass powder addition in marihe environment, algerie equipement N°56 décembre 2015.
<https://www.freepdfconvert.com/membershi>
- [24] **Andra,** Dossier 2005. Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue, Tome 2 : matériaux cimentaires, document interne à l'Andra n° CRPASCM040015T2_A, 2005, 2005.
- [25] **H.J.H. Brouwers.** The works of powers and Brownyard revisited : part1. Cement and concrete research, Vol. 34, 2004; p. 1697-1716
- [26] **Andra,** CEBTP. Choix des formulations de référence : ciment CPA-CEM I, caractéristiques mécaniques et de durabilité, document interne Andra n° C RP 0 CTP 01-002/A, 2001.
- [27] **S. Diamond.** The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. Cement & concrete composites, Vol. 26, 2004, p. 919-933.
- [28] **Andra,** LERM, Choix des formulations de bétons de référence, document interne Andra n° C RP 0 LER 01-004/A, 2001.
- [29] **V. Baroghel Bouny.** Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [30] **P. C. Aitcin.** Bétons Haute Performance, éditions Eyrolles, 2001.
- [31] **E. Tazawa, S. Miyazawa et T. Kasai.** Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, *Cement and Concrete Research*, 25, 2, 1995, p 288-292.

- [32] Fiches techniques. **CIM béton**: Le ciment et ses applications, 2000,.
- [33] **Guide**. D'application pratique de la nouvelle norme pour béton NF EN 206-1 sur chantier, mars 2005.
- [34] **H. Yigitier, H. Yazici et S. Aydin**. Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete, *Building and Environment*, 42, 2007, p 1770-1776.
- [35] **G. Sanjayan, L. Stocks**. Spalling of high-strength silica fume concrete in fire. *ACI materials journal*, Vol. 90, 1993, p.170-173.
- [36] **A. Plassais**. Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments. Thèse de doctorat, université de Paris 6, 2003.
- [37] **S. Diamond**. The microstructure of cement paste in concrete, in procceding of the 8th international congress on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, 1986, Vol. 1, p.122-147.
- [38] **F.P. Glasser, S.Y. Hong**. Thermal treatment of C-S-H at 1 bar H₂O pressure up to 200°C. *Cement and concrete research*, Vol. 33, 2003, p. 271-279.
- [39] **J.J. Chen, J.J. Thomas, H.F.W. Taylors et H.M. Jennings**. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and concrete research*, Vol. 34, 2004, 1499-1519.
- [40] **I. Klur**. Etude par la R.M.N de la structure des silicates de calcium hydrates. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1996.
- [41] **R.F. Fedman, P.J. Serada**. 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.
- [42] **N. Petrov**. Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'étringite, Thèse de doctorat à l'Université Sherbrooke Canada, avril 2003.
- [43] **A. Meyer**. Experiences in the use of superplsticizers in Germany, in *Superplasticizers in concrete*, ACI SP-62, P. 21-36, Detroit, Michigan, (1979).
- [44] **A. M. Neville**. Propriétés des bétons, traduit par le Crib, Edition Eyrolles, 806p, 2000.
- [45] **Norme Française XP P 18-540**. Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: p 15-540", 1997.
- [46] **Norme Française EN 12-620**. Granulats pour béton hydraulique, 2004.
- [47] **P. C. Aitcin**. Les superplastifiants : des réducteurs d'eau, Recueil de conférences présentées à l'université de Sherbrooke, 1990.
- [48] **V. S. Ramachandran et al**. Superplasticizers: Properties and applications in concrete, Minister of Public Works and Government services, p. 97-100, Canada, 1998.

- [49] **M. R. Rixom, N. P. Mailvaganam.** Chemical admixtures for concrete, E & F. N. Spon, Ed., London, 1986.
- [50] **Journée d'information.** Ciments – Bétons – Adjuvants. Organisée par : ERCE – CTC-Est - GRANITEXLES "adjuvants définitions et opportunités d'utilisation" Année 2004.
- [51] **S. Chandra, J. Björnström.** Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – part II, Cement and Concrete Research, Vol. 32, p.1613– 1619, 2002.
- [52] **N. Edwige** Compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants. thèse doctorat de l'université Henry Poincaré et de l'université de Luxembourg, 2010.
- [53] **D. Lootens.** Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement encombrement et floculation. thèse doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. Oct 2004.
- [54] **J. Baron et R. Sauterey.** Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, 1982.
- [55] **N°40.** Béton ; performance mécanique, juillet 2007
- [56] **Pierre-Claude AITCIN.** Béton haute performance , Edition Eyrolles 2001.
- [57] **N. Tebbal, Z. Rahmouni , M. Belouadah.,** Influence d'un ajout sur le comportement mécanique des bétons à haute performance soumis à des températures élevées. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [58] **Fayçal. Aladdine.** Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité à des bétons incorporant du verre finement broyé, Université de SHERBROOKE, 2009, 124 Page ; Designer sur :<http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/1558/MR70773.pdf>.
- [59] **De Larrard.** Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p, 2000.
- [60] **F. Gorisse.** Essais et contrôle des bétons . P 200 édition Eyrolles 1978.
- [61] **G. Platret.** Suivi de l'hydratation du ciment et de l'évolution des phases solides dans les bétons par analyse thermique, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons, Méthodes de Mesure et d'essai de Laboratoire, Méthode d'essai, 58, 2002.
- [62] **P. Acker, M. Adam., M. Mamillan et J. Saulnier.** Caractères du béton, Techniques de l'ingénieur, traité Construction C2 250, 1998.
- [63] <http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants>
- [64] **Prentice-Hall.** Concrete structure, properties, and materials, p. 450, 1986.
- [65] **Jean Marie Reynouard, Gilles Pijaudier .** Comportement mécanique du béton, 2005
- [66] **F. De Larrard, A. Belloc.** L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 219, Janvier Février, pp.41-52, 1999.

- [67] **Boutiba Aldjia**. Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci. Mémoire de magister.
- [68] **M. Venuat**. La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1. Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers, édition 2 – Collection Moniteur, 1989.
- [69] **M. Neville**. Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Editions Eyrolles, 2000.
- [70] **Boukli Hacene**- Thèse de Doctorat contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM, 2009.
- [71] **Hachemi Samia** -Thèse de Doctorat étude du comportement du béton soumis à haute température UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2015.
- [72] **P. Acitcin et J. Baron**. Chapitre 4, les adjuvants normalisés pour béton, 2002.
- [73] **NF EN 934-2**. Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. (Indice de classement : P 18- 342/A1).
- [74] **T. Chaussadent, V. Baroghel-Bouny, N. Rafai, A. Ammouche et H. Hornain**. 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°2-3, 2001, p.217-230.
- [75] **L. Alarcon-Ruiz, G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlacher**. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete research, 35 : 609–613, 2005.
- [76] **A.M. Matos, J. Sousa-Coutinho**. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials. 2012; 36 : 205 – 215.
- [77] **M. Kanema, A. Noumowe, J.-L. Gallias, R. Cabrillac**. Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons, XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil – Risque & Environnement, 2005.
- [78] **L. Divet, S. Arnaud, X. Derobert, P. Fasseu, R.-M. Faure, C. Larive, B. Naquin, G. Olivier**. Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai n° 62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2005
- [79] **R. Vedalakshmi, A. Raj, S. Srinivasan, K. Babu**. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. Thermochimica Acta. 2003; 407:49-60.
- [80] **R. Sierra**, 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, p.VI/210-206, 1980.
- [81] **AM. Matos, J. Sousa-Coutinho**. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials. 2012; 36: 205 – 215.
- [82] **C. Alonso, C. Andrade, G.A. Khoury**. Porosity & Microcracking, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.

- [83] **K. Manai**. 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.
- [84] **S. Husson**. Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers, Thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991.
- [85] **R. Chaid**. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006
- [86] **R. Chaid, R. Jaubertie et A. Boukhaled**. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.
- [87] **Djobo Yankwa Jean Noël**. Effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymériques à base scories volcanique.
- [88] **A. K. Ramezaniapour**. Engineering properties and morphology of pouzzolanic cement concrete, PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages - April 1987.
- [89] **P.C. Aitcin**. Les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de Fontenay et leur utilisation dans les mortiers en béton. Revue des matériaux de construction. Mai 1968.
- [90] **P.C. Aitcin, C. Jolicoeur et J. Macgregor**. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, concrete international, pp 45- 52 – Mai 1994.
- [91] **R.G. Pike, D. Hubbard et E.S. Newman**. Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin, n°275, 1960.
- [92] **T. Kojima, N. Takagi, et K. Haruta**. Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec. 2000
- [93] **Norme ACI** (American concrete institute) 116R-90 (ACI 1990b).
- [94] **W. H. Zachariasen**. The atomic arrangement in glass, Journal of the American chemical society, vol. 54. 1932.
- [95] **J. Zarzycki**. A direct electron microscope study of the structure of glass, Physics and chemistry of Glasses, vol.3, 1962.
- [96] **H. Scholze**. Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.
- [97] **Van Thai NGUYEN**- Thèse de Doctorat Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions
- [98] **T. Kojima, N. Takagi, et K. Haruta**. Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles, 11 th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec, 2000.
- [99] **S. Liu, G. Xie and S. Wang**. "Effect of curing temperature on hydration properties of waste glass powder in cement-based materials", J. Therm. Anal. Calorimet., 119(1), 47-55, 2015.

- [100] **Mamery Serifou** Concrete with waste aggregates: effect of aggregates type and role of composition, 2014, 191 Page; Designer sur:
https://tel.archivesouvertes.fr/file/index/docid/962148/filename/SERIFOU_MAMERY_2013.pdf
- [101] La valorisation de la chaîne du verre, Société des alcools du Québec 2012, 11 Page; Designersur
<http://www.ecotechquebec.com/documents/files/Sommets/sagsommet2012.pdf>
- [102] **V. K. R. Kodur, M. A. Sultan.** Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, Vol. 15, No. 2, pp. 101–107, 2003.
- [103] **Melle. Kaouane Malika-** Mémoire de Magister Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. universite mouloud mammeri, tizi ouzou, 2011.
- [104] **Y. Collet.** Etude des propriétés du béton soumis à des températures levées. Annales des travaux publics belges, 1977.
- [105] **R. Felicitti, P.G. Gambarova, M.N. Sora, G.A. Khoury.** Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling. Fifth Rilem symposium on fibre-reinforced concretes N° 5 Lyon, France, 2000, p. 749 - 758
- [106] **M. Touguay, L. Nouari .** Les fillers calcaire utilisé comme constituant secondaire dans la production du ciment composé. *Revue marocaine du génie civil* ; pp, 35-39.N° 67 ; Fevier 1997.
- [107] **M. Noha, A. Soliman.** Effect of using Marble Powder in Concrete Mixes on the Behavior and Strength of R.C. Slabs, International Journal of Current Engineering and Technology ISSN 2277 – 4106, Vol.3, No.5,December 2013.
- [108] **A. Yahia, M. Tanimura, Y. Shimoyama.** Reological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio. Cement and concrete research, vol 35, 2005, pp. 532 - 9.
- [109] **M. Nehdi, S. Mindess.** Optimization of high strength limestone filler cement mortars. Cement and concrete research, vol 26(6), 1996, pp. 883 - 93.
- [110] **O. Esping.** Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", Cement and concrete research, vol 38, 2008, pp. 938 - 44.
- [111] **A. El Hilali.** Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): Influence of limestone and fine plant fibers. MSc thesis. France: University of Cergy Pontoise; 2009, p. 183.
- [112] **A.K.H. Kwan.** Use of condensed silica fume for making high-strength self consolidating concrete. Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 2000, pp. 620-7.
- [113] **T. Y. Shi, Y. Tanigawa, H. Mori, Y. Kurokawa.** A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste. Transactions of the Japan Concrete Institute , vol 20 (2), 1998, pp. 223 – 8.
- [114] **C.Y. Huang, R.F. Feldman.** Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends. Cem.Concr.Res. 15 (4), 58 5- 592, 1985.
- [115] **X. Cong, S. Gong, D. Darwin, S.L. McCabe.** Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar and concrete. ACI Mater. J. 89(4), 375 - 387, 1992.

- [116] **Amouri Chahinez**. Contribution à l'étude de l'influence des différents ajout sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), memoir doctorat en science, 2009
- [117] **C. jin, C. Meyer, et S. Baxter**. Glasscrete"-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, Material Journal, n° 97, 2000.
- [118] **I. JAWED et J. SKALNY**. Alkalis in cement: a review: II. Effects of alkalis on hydration and performance of Portland cement, Cement and Concrete Research, vol.8, n° 1, 1978.
- [119] **Ludovic Missemmer**. Thèse de Doctorat Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV. UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 2011.
- [120] **L., Alarcon-Ruiz, C. Galle, E. Massieu**. Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température , Matériaux 2002.
- [121] **S. Y. N. G.-F. Chan, J. K. W. Peng Chan**. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature, Materials and Structures, Vol. 29, pp. 616-619, 1996.
- [122] **A. Noumowé, G. Ranc, C. Hochet**. Moisture Migration and Thermo - mechanical behaviour of Concrete at High Temperature up to 310 °C, The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, Paper # H01-3, August 17 –22, 2003.
- [123] **C. Alonso, C. Andrade, G.A. Khoury**. Porosity & Microcracking, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [124] **G. I. Hager**. Comportement à haute température des bétons à haute performance – Evolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [125] **M. Kanema, A. Noumowe, J.-L. Gallias, R. Cabrillac**. Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons, XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil – Risque & Environnement, 2005.
- [126] **L. Alarcon-Ruiz, G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlicher**. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete research, 35 :609–613, 2005.
- [127] **R. Vedalakshmi, A. Raj, S. Srinivasan, K. Babu**. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. Thermochimica Acta. 2003; 407: 49 – 60
- [128] **Y. Xu, Y.L. Wong, C.S. Poon, M. Anson**. Impact of high temperature on PFA concrete. Cement and Concrete research, Vol. 31, 2001, p.1065-1073.
- [129] **G.A. Khoury**. compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Compressive strength of concrete research, Vol. 44, 1992, p. 291 - 309.
- [130] **W.P.S. Dias, G.A. Khoury, P.J.E. Sullivan**. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C. ACI materials journal, title n°87-M18, 1990.

- [131] **C. Castillo, A.J. Durrani.** Effect of transient high temperature on high-strength concrete. ACI materials journal, title n°87-M7, 1990, p.47-53.
- [132] **I. Gaweska.** Comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de l'école nation des ponts et chaussées et de l'école polytechnique de Cracovie, 2004.
- [133] **T. Harada, J. Takeda, S. Yamane, F. Furumura.** Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. International seminar on concrete for nuclear reactors, 5 oct. 1970, Germany, Vol. 1, p. 377- 406.
- [134] **Rilem** Technical Committees 129-MHT., Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 1: Introduction, Part 2: Stress-strain relation, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions, Materials and Structures, Vol. 28, N° 181, 1995, p. 410-414.
- [135] **TC44-PHT.** Rilem Technical Committees 44-PHT - Behaviour of Concrete at high temperature. Technical Report Ed. by, U. Schneider, Dept. of Civil Engineering. Germany :122 pages, 1985.
- [136] **Eurocode2.** Calcul des structures en beton - partie 1-2 : Regles generales, calcul du comportement au feu. AFNOR, NF EN 1992-1-2, Octobre 2005.
- [137] **P. Bamonte and R. Felicetti.** On the tensile behavior of thermally-damaged concrete. Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure - FraMCoS6, Vol. 3 :8 pages, 2007.
- [138] **A. Menou.** 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'ADOUR (2004).
- [139] **H. Gross.** On high temperature creep of concrete. International Conference on Structural Mechanics in reactor Technology - 2nd SMIRT, Vol. 3, 1973.
- [140] **P. Kalifa, F.-D. Menneteau et D. Quenard.** Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", Cement and Concrete Research, vol. 30, n°12, p. 1915-1927, 2000.
- [141] **G. R. Consolazio, M. C. Mcvay et J. W. Rish.** Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature", International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997.
- [142] **D. Shindo, M. Matsuoka.** The effect of materials quality on properties of super workable concrete, Proc. JCI 14(1) p. 78 - 83, 1992.
- [143] **Poon C.S., Lam L., Wong Y.L,** Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete, J. Mater. Civ. Eng. Vol. 11 p. 197-225, 1999
- [144] **Li Yijin, Zhou Shiqiong, Yin Jian, and Gao Yingli .** The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar, and concrete Central South University, PRC, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.
- [145] **Dr. B. Krishna Rao.** Study on Marble Powder as Partial Replacement of Cement in Normal Compacting Concrete, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-

ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 13, Issue 4 Ver. III (Jul. - Aug. 2016), PP 01-05

- [146] **A. Talah, aF. Kharchi, R.Chaid.** Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior. 1st International Conference on Structural Integrity, Procedia Engineering 114 (2015) 685 – 690
- [147] **O. Sunny, Nwaubani1 and Konstantinos, Poutos.** The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, Volume 2, Issue 2, February 2013, ISSN 2319 - 4847
- [148] **V.V. Vargin et K.A. Yakovleva.** Effects of water and acid on vitreous sodium aluminosilicates, Journal of applied chemistry, vol. 34, p. 446-447, 1961.
- [149] **Pierre Le Parlouër et Bernard Legendre.** Les différentes techniques d'analyse thermique et de calorimétrie Revue française de métrologie 2005 ;1 : 19-26.
- [150] **Simon Haziza et Emmanuelle Deleporte.,** Introduction à la Diffraction par Rayon X; ENS Cachan Septembre 2014
- [151] **NF EN 196-3,** "Méthodes d'essais – partie 3 : détermination du temps de prise et de stabilité", 1996, 13 p.
- [152] **S. Tsivilis, E. Chaniotakis, E. Badogiannis, G. pahoulas, A. Ilias.** A Study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements". Cement and Concrete Composites, vol. 21, n° 2, 1999, pp. 107 - 116.
- [153] Standard test method for potential alkali reactivity of aggregate (Mortar bar method), Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1994.
- [154] **G.A. Khoury.** Strain components of nuclear-reactor-type concretes during first heat cycle. Nuclear Engineering and Design, 1995. n° 156, pp 313 - 321
- [155] **G.A. Khoury, B.N. GRAINGER, and G.P.E. Sullivan.** Strain of concrete during first heating to 600 °C underload. Magazine of concrete research, 1985. Vol 37, pp 195 - 215.
- [156] **U. Diederichs, U. M. Jumppanen, and V. Penttala.** Behavior of high strength concrete at elevated temperatures. Espoo 1989. Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, Report 92 p 72. 1992.
- [157] **U. Diederichs, U-M. Jumppanen, and V. Penttala.** Material properties of high strength concrete at elevated temperatures, 1988.
- [158] **P. Pimienta.** Propriétés des BHP à haute température – Etude bibliographique. Cahiers du CSTB. Cahier du CSTB – n° 3352 – Livraison 421 – Juillet Août 2001.
- [159] **S. Hachemi, A. Ounis.** Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 19, No. 7, 805-824, 2015.
- [160] **I. Miličević, N. Štirmer, I. Banjad Pečur.** Residual mechanical properties of concrete made

- with crushed clay bricks and roof tiles aggregate after exposure to high temperatures, *Materials*, doi: 10.3390/ma9040295, Vol. 9, 295, 2016.
- [161] **S. Hachemi, A. Ounis.** L'influence de la nature du sable sur les propriétés physiques et mécaniques du béton soumis à haute température, *Courrier du Savoir* – N°24, Septembre 2017, pp.151-162.
- [162] **P. Pimienta.** Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées - Résistances en compression et modules d'élasticité ». *Cahiers du CSTB* – n° 3353 – Livraison [159] 421 – Juillet Août 2001.
- [163] **H. Tanyildizi, M. Şahin.** Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature, *Construction and Building Materials*, Vol. 79, pp. 97-103, 2015.
- [164] **I. Messaoudene, Jauberthie, A. Nacéri .** Influence des fillers de calcite sur le comportement des mortiers au jeune âge . *Actes des 29ème Rencontre de Génie Civil*, 29-31 Mai 2011, Tlemcen-Algérie, p. 197-
- [165] **A. Noumowe, P. CLASTRES, G. DEBICKI et J.L. COSTAZ.** Thermal stresses and water vapour pressure of high performance concrete at high temperature. 4th International symposium on utilization of high-strength/high-performance concrete. Paris, France. (1996).
- [166] **H.-Y. Chu, J.-Y. Jiang, W.Sun, M. Zhang.** Thermal behavior of siliceous and ferro-siliceous sacrificial concrete subjected to elevated temperatures, *Materials and Design*, Vol. 95, pp. 470-480, 2016.
- [167] **W. Sha, EA. O'Neill, and Z. Guo.,** Differential scanning study of ordinary Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29 :1487–1489, 1999.
- [168] **JP. Persy and FX. Deloye.** Investigations sur un ouvrage en b'éton incendi'é. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chauss'ees*, Vol. 145 :108–114, 1986.
- [169] **G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, L. Taerwe, and P. Vandvelde.** Phase distribution and microstructural changes of self-compacting concrete paste at elevated temperature. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37 :978 – 987, 2007.
- [170] **A. Yahia, M. Tanimura and Y. Shimoyama.** Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 3, 2005, p.532-539.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.008>
- [171] **P. Ramanathan, I. Baskar, P. Muthupriya, R. Venkatasubramani.** Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2013; 17(2): 465-472. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>
- [172] **J-C. Mindeguia, P. Pimienta, H. Carré, C. La Borderie.** On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 16, No. 2, pp. 236-253, 2012.
- [173] **O. Elalaoui.** Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, Thèse de Doctorat, Université de Cergy- Pontoise, France et l'Université de

Tunis El Manar, 2012.

- [174] **Thi Bich Hau Nguyen, Maxime Nicolas, Duy Huu Pham.** Influence de microbilles de verre de forme sphérique sur les propriétés de la pâte de ciment et du mortier; Colloque International Francophone NoMaD 2012 LMDC / AUGC.
- [175] **R. chaid, hamid zeroub et damien rangeard.** Concrete durability indicaj“ors with glass powder addition in marihe environment, algerie equipement N°56 décembre 2015. <https://www.freepdfconvert.com/membershi>
- [176] **Lee S W., Kim Y M., Kim H.R., Choi S.C.,** Nano-structured biogenic calcite: A thermal and chemical approach to folia in oystershell. *Micron* :39 (2008) 380–386.
- [177] **H.Y. Li, T. Ye-Qiang, L. Zhang, Y-Z. Zhang, YH. Song, Y. Ye, MS. Xia.** Bio-filler from waste shellfish shell: Preparation, characterization, and its effect on the mechanical properties on polypropylene composites. *Journal of Hazardous Materials* : 217–218 (2012) 256–262.
- [178] **F. Robert et al.** La durabilité des bétons face aux incendies, Presses de l’ENPC, 2008.
- [179] **Z.P. Bazant, L.J. Najjar.** Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials et constructions*, Vol. 5, 1972, p. 3-20.
- [180] **N. Tebbal, Z. Rahmouni., M. Belouadah.** Valorisation du filler de marbre dans la formulation d’un béton à haute performance. *Colloque NoMaD* - 19 et 20 novembre 2012. Toulouse.
- [180] **N.M. Soliman.** Effect of using Marble Powder in Concrete Mixes on the Behavior and Strength of R.C. Slabs. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3, 1863-1870, 2013.
- [181] **Gérard Olivier.** Sciences et Techniques (LREP, Centre de Melun) 2005. Présentation des techniques de diagnostic de l’état d’un béton soumis à un incendie. www.ifsttar.fr/.../lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME62.
- [182] **A. Zidol.** Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke, 2009.
- [183] **Raid. Derabla.** Influence des additions minerales sur le comportement au jeune age et a long terme des betons autoplaçants traites thermiquement. thèse présentée en vue de l’obtention du diplôme de doctorat, 2015.
- [184] **S. Rao, K. Rahul., and A. Pradesh.** Studies on bacterial concrete exposed to elevated temperatures and thermal cycles, *Studies*, 3(1), 126-135, 2013.
- [185] **M.Tufail, K. Shahzada, B. Gencturk, and J. Wei.** Effect of elevated temperature on mechanical properties of limestone, quartzite and granite concrete, *Int. J. Concrete Struct. Mater.*, 11(1), 17-28.
- [186] **V.M. Malhotra, and P.K. Mehta.** *Advances in Concrete Technology*, Vol. 1, Pozzolanic and Cementitious Materials, 1st Edition, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 2017, 1996.

ملخص : في هذه الدراسة حاولنا تحديد قوة الخرسانة التي تحتوي على مسحوق الزجاج باستبدال جزء من الإسمنت بهذه الإضافات جزئيا في حدود 5% الى 10%. هذه الإضافات تعتمد على خصائص المادة وتأثيرها على الخواص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة. عدة نقاط اخذت بعين الاعتبار لمعرفة تأثير الإضافات المعدنية، تأثير الملدنات ونسبة الماء على الإسمنت. للحصول على تصنيع خرسانة جيدة باقل مسامية ومتانة مقبولة. الدراسة التجريبية لتأثير نوعية الإضافات المعدنية على الهيكل الحراري و الميكانيكي للخرسانة المعرضة لدرجة حرارة المرتفعة تمت دراستها من خلال هذا العمل. عدة خلطات من الخرسانة صنعت بإضافة نوعين من الإضافات المعدنية (مسحوق الزجاج و مسحوق الرخام) عرضت لدورات من التسخين و التبريد في الدرجات التالية 200 درجة مئوية، 400 درجة مئوية و 600 درجة مئوية بسرعة تسخين 10 درجة مئوية في الدقيقة و لقد تم قياس الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية من خلال تطور التشققات، المراحل البلورية باستعمال الأشعة السينية و كمية بورتلاند $(Ca(OH)_2)$ المشكل خلال 180 يوم. أظهرت النتائج تناسق بين زيادة الضياع في الكتلة بارتفاع درجة الحرارة للعينة المعرضة للتسخين و وجود مجالين لسلوك الخرسانة قبل و بعد التسخين في 400 درجة مئوية. في المجال الاول نلاحظ ارتفاع في المقاومات وبينما في المجال الثاني لوحظ انخفاض معتبر في الخصائص الميكانيكية. كما أن النتائج المحصل عليها توافق نتائج ابحاث سابقة.

كلمات المفتاحية: الخرسانة، إضافات الزجاج، إضافات الرخام، ارتفاع درجة الحرارة، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية

Abstract : In this study, we attempted to determine the strength of concrete containing glass powder and marble powder by partially replacing cement in concrete. Cement substitution by these mineral additions in the range of 5% to 10%. This approach is based on the properties of the material and its effect on the physical and mechanical properties of concrete. Several parameters are considered, namely: the effect of filler, the effect of the adjuvant and the ratio E / C , to lead to the making of a concrete based on local materials characterized by good strength, porosity minimum and acceptable durability. An experimental approach for studying the influence of the nature of the fillers on the thermomechanical behavior of concrete subjected to a high temperature was studied. Concretes formulated with two mineral additions (glass powder and marble powder) subjected to heating / cooling cycles at 200 ° C, 400 ° C and 600 ° C with a temperature rise rate of 10 ° C / min. Measurements of the physic-mechanical properties have been made. The evolution of cracking and crystalline phases is followed by X-ray diffraction and the amount of Portlandite $(Ca(OH)_2)$ formed after 180 days was determined indirectly by gravimetric and differential thermal analyzes (ATG and ATD). The experimental results show a correlation between the evolution of the mass loss and the temperature difference within the heated element. They reveal the existence of two large zones of behavior of the concretes situated before and after 400 ° C. In the first zone, there is an evolution of the compressive strengths, while in the second one a considerable decrease of the mechanical properties is observed. other parts the results obtained are in agreement with previous research

Keywords: Concrete, glass filler, Marble filler, High temperature, Mechanical properties, Physical properties.

Résumé : Dans cette étude, nous avons tenté de déterminer la résistance du béton contenant la poudre de verre et la poudre de marbre par le remplacement partiel du ciment dans le béton. La substitution de ciment par ces additions minérales dans la gamme de 5% à 10%. Cette approche est basée sur les propriétés du matériau et son effet sur les propriétés physico mécanique du béton. Plusieurs paramètres sont considérés, à savoir: L'effet de filler, l'effet de l'adjuvant et le rapport E/C , pour aboutir à la confection d'un béton à base des matériaux locaux caractérisé par une bonne résistance, une porosité minimale et une durabilité acceptable. Une approche expérimentale pour l'étude l'influence de la nature des fillers sur le comportement thermomécanique du béton soumis à une température élevée ont été étudiés. Des bétons formulés avec deux additions minérales (poudre de verre et poudre de marbre) soumis à des cycles de chauffage/refroidissement à 200 °C, 400 °C et 600 °C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min. Des mesures des propriétés physico- mécaniques ont été effectuées. L'évolution de la fissuration, des phases cristallines est suivie par diffraction X et la quantité de Portlandite $(Ca(OH)_2)$ formée après 180 jours a été déterminée de façon indirecte par analyses thermiques gravimétrique et différentielle (ATG et ATD). Les résultats expérimentaux montrent une corrélation entre l'évolution de la perte de masse et la différence de température au sein de l'élément chauffé. Ils révèlent l'existence de deux grandes zones de comportement des bétons situées avant et après 400°C. Dans la première zone, on note une évolution des résistances à la compression, tandis que dans la seconde on observe une baisse considérable des propriétés mécaniques. d'autres parts les résultats obtenues sont eu concordance avec des recherches antérieures

Mots-Clés : Béton, filler de verre, filler de Marbre, Température élevée, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques.