



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**Comportement du béton à base de la
poudre de verre à hautes températures
Effet de l'âge**

Dirigé par :
pro: ZEGHICHLLEILA

Présenté par :
ZOUBIRI AMINA

Promotion : 2015/2016.

Avant propos

Ce mémoire rassemble un travail effectué conjointement
au niveau de la synthèse bibliographique par:

ZOUBIRI AMINA

Dont le thème de l'étude est: **comportement du béton
à base de la poudre de verre a haute température
(effet de l'âge)**

Et: **HAOUARI BELKACEM AMINE**

Dont le thème de l'étude est: **comportement du béton
à base de la poudre de verre à hautes températures
(l'effet de la cure)**

Remerciements

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

*Je remercie vivement mon encadreuse Pro :
ZEGHCHI.LEILA.*

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

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents,

A mes frères et sœurs, neveux et nièces,

*A tous ceux qui m'aiment et qui m'ont soutenue
tout au long de mon cursus.*

À mon cher mari, ainsi qu'à toute sa famille,

*A tous ceux qui voulaient assister à la soutenance
de ce modeste travail.*

الملخص:

نظرا لتركيبها الغنية بأكسيد السيلييس المتفاعل، فإن استعمال الزجاج كإضافة اسمنتية في الخرسانة يعتبر بديلا لانقأ لإعادة تأهيلها، وعملنا يندرج ضمن هذا الإطار، هو يعالج تأثير درجات الحرارة العالية على الخرسانة المشكلة أساسا من مسحوق الزجاج المحفوظ في وسط رطب لمدة 45 يوما. جاهزة الخرسانة تأثر على البنية الجزئية للخرسانة الموضوعه تحت درجات حرارة عالية. نتائج الدراسة تبين أن إضافة 10% من الزجاج يؤثر على الأداء الآلي على المدى القصير، والعينات البالغة من 3 إلى 14 يوما هي قابلة للثم: فقدان في الحجم، فقدان للمقاومة ورفع في المسامية.

كلمات مفتاحية:

مسحوق الزجاج-درجات حرارة عالية-خرسانة-سلوك آلي.

Résumé:

Vu sa composition riche en silice réactive, la valorisation de verre dans le béton semble être une bonne alternative pour son recyclage, notre travail s'inscrit dans ce contexte, il traite l'influence des hautes températures sur le béton à base de la poudre de verre conservé dans un milieu humide, pendant 45 jours.

La maturité du béton (âge) influence la microstructure du béton soumis à haute températures. Les résultats de l'étude montrent, que l'addition de 10% de verre affecté les performances mécaniques à court terme, et les éprouvettes âgées de 3 et 14 jours sont plus vulnérable : perte de masse, perte de résistance augmentation de la porosité.

Mots clés :

Poudre de verre – haute température – béton – comportement mécanique

Abstract:

Given its rich composition of reactive silica, the glass valuation in concrete seems to be a good alternative for its recycling, our work falls under this context, it treats the influence of high temperatures on the powder glass based concrete kept in a humid environment for 45 days.

The concrete maturity (age) influences the microstructure of concrete subjected to high temperatures.

The study's results shows that the addition of 10% glass affect the mechanical performance in a short-term, specimens of 3 to 14 days old are more vulnerable: weight loss, loss of strength and increase in porosity.

Keywords:

Glass powder - high temperature - concrete - mechanical behavior

Sommaire

Avant propose

Dédicace

Remerciements

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

CHAPITRE I : Composition de béton

I-1- Introduction	4
I-2- Les composants d'un béton	4
I-2-1- Pâte de ciment	5
I-2-1-1- Ciment	5
I-2-1-2- L'eau	6
I-2-1-4- Les adjuvants	7
I-2-1-5- Additions minérales	7
I-2-2- Les granulats	8
I-3 Malaxage des constituants	8
I-4- Propriétés essentielles d'un béton	9
I-4-1- Propriétés du béton frais	9
I-4-1-1 Affaissement au cône d'Abrams	9
I-4-1-2 Essai vébé.	10
I-4-1-3 Volume d'air occlus.	11
I-4-1-4 La masse volumique du béton frais.....	11
I-4-2 Propriétés du béton durci.....	12
I-4-2-1 Résistance à la compression	13
I-4-2-2 Résistance à la traction	14
I-4-2-2-1 Traction directe :	15
I-4-2-2-2 Traction par fendage : (essai brésilien)	15
I-4-2-2-3 Traction par flexion	15
I-5- Caractéristique de résistance du béton	16

I-6- Déformations physiques caractéristique.....	16
I-6-1 Retrait	16
I-6-2 Fluage	17
I-7 Méthodes de formulation des Bétons	17
I-7-1 Méthode de Bolomey	17
I-7-2 Méthode de Faury.....	17
I-7-3 Méthode de Valette	18
I-7-4 Méthode Dreux-Gorisse	18
I-7-5 Méthode de JOISEL.....	18
I-7-6 Méthode de VALETTE	19

CHAPITRE II Effets de la température sur le béton

II-1 Introduction :.....	21
II-2 Evolution des propriétés physique du béton	21
II-2-1 Dégradation de l'interface pâte-granulats.....	21
II-2-2 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie.....	21
II-2-3 Evolution de la porosité	22
II-2-4 Evolution de la masse volumique	23
II-2-5-Perte de masse.....	23
II-2-6- Evolution de la perméabilité	23
II-3 Evolution des propriétés mécaniques avec la température	24
II-3-1 Résistance en compression à haute température	24
II-3-2 Résistance en traction à haute température.....	25
II-3-3 Module d'élasticité	26
II-4- Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	27
II-4-1- La conductivité thermique	27
II-4-2- Chaleur spécifique	28
II-5 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	29
II-6- Paramètres favorisant l'instabilité thermique	30
II-7 Déformation thermique du béton à hautes températures	31
II-7-1 Différentes formes d'endommagement thermique	31
II-7-2 Déformation thermique des granulats	32

CHAPITRE III Le verre

III-1- Définition du verre	34
III-2- Définition de poudre de verre	34
III-3- Valorisation de verre dont le béton	34
III-4- Les propriétés du verre	35
III-4-1- Propriétés physiques	36
III-4-2- Propriétés thermiques	36
III-4-3- Propriétés chimiques	36
III-5- Comportement du verre dans un milieu cimentaire	37
III-6- Réaction pouzzolanique du verre	37
III-7- Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes :	38
III-8- L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane :	38
III-9- Réaction alcali-silice du verre	39
III-10- L'activité des fines et des granulats de verre	39
III-11- Étude de la pouzzolanité.....	41

CHAPITRE IV : Caractéristiques des matériaux

IV.1. Introduction	45
IV.2. SABLE D'OUED (BOUSAADA)	45
IV.2.1. Origine du sable	45
IV.2.2. Caractéristiques physiques des sables utilisés :	45
IV. 2.2.1. Masse volumique (absolue)	45
IV.2.2.2. Masse volumique apparente.....	46
IV.2.2.2.1. Masse volumique apparente à l'état lâche	46
IV.2.2.2.2. Masse volumique apparente à l'état compact :	47
IV 2.2.3. Porosité.....	47
IV. 2.2.4. Compacité	48
IV.2.2.5. L'indice des vides	48
IV.2.2.6. Equivalent de sable	48
IV.2.2.7. Teneur en eau	51
IV.2.2.8. Degré d'absorption d'eau	51

IV.2.2.9. Analyse granulométrique	52
IV.2.2.10. Module de finesse	55
IV.2.3. Les Caractéristiques chimiques du sable de Boussaâda	55
IV.4. GRAVIER	56
IV.4.1. Origine de gravier:	56
IV.4.1.1. Classes granulaires	56
IV.4.1.2. Résistance à la compression de la roche d'origine	56
IV.4. 2. Caractéristiques physiques du gravier utilisé.....	57
IV.4.2.1.Masse volumique apparente	57
IV.4. 2.2. Masse volumique absolue	58
IV.4. 2.3. Porosité, compacité et indice des vides.....	58
IV.4.2.4. Degré d'absorption d'eau	59
IV.4.2.5. Teneur en eau	60
IV.4.2.6. Analyse granulométrique	60
IV.4.3. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	62
IV.4.3.1. Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)	62
IV.5. CIMENT	64
IV.5.1. Caractéristiques du ciment CEM I 42,5 HRS1	64
IV.5.1.1. Description du produit.....	64
IV.5.1.2 Exigence normatives NT47.01 ET NT47.26	65
IV.6. Poudre de verre	66
IV.6.1 Composition chimique de la poudre de verre	66
IV.6.2 Caractéristique physique	67
IV.7 Détermination de la composition du béton	67
IV-8- Fabrication et conditionnement des éprouvettes	70
IV-9- Les essais sur les éprouvettes	70
IV-9-1- Essais de chauffage	70
IV-9-2- Perte de masse	71
IV-9-3- porosité	71
IV-9-4 Essai de compression.....	73
IV-9-5- Essai de traction	74

CHAPITRE V : Résultats et discussions

V-1- Introduction	76
V-2- Propriétés du béton à l'état frais:	77
V-2-1- Essai d'affaissement	77
V-2-2- la masse volumique	77
V-3- propriétés du béton à l'état durci	78
V-3-1- la Masse volumique	78
V-3-2- Perte de masse	79
V-3-2-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours	79
V-3-2-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours	81
V-3-2-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours	82
V-3-2-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours	83
V-3-3- Résistance à la compression	83
V-3-3-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours	84
V-3-3-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours	85
V-3-3-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours	86
V-3-3-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours	87
V-3-4- Résistance à la traction	89
V-3-4-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours	89
V-3-4-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours	90
V-3-4-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours	90
V-3-4-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours.....	91
V-3-5- Porosité	91
V-3-5-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours	92
V-3-5-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours	92
V-3-5-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours	93
V-3-5-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours.....	93
V-4- Observations des dégradations des différents bétons après le refroidissement	94
Conclusion générale	
Bibliographie	
Annexe	

Liste des tableaux

Tableau I. 1	classe de consistance.....	10
Tableau I. 2	classe de consistance vébé. De V0 à V4. De ferme à fluide	10
Tableau IV.1	Masse volumique absolue du sable de Boussaâda	46
Tableau IV .2	Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche	46
Tableau IV.3	Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact	47
Tableau IV.4	la porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable de Boussaâda... ..	48
Tableau IV.5	Equivalent du sable de Boussaâda	50
Tableau IV.6	Comparaison des résultats.....	50
Tableau IV.7	Teneur en eau du sable de Boussaâda	51
Tableau IV.8	Degré d'absorption du sable de Boussaâda	52
Tableau IV.9	Analyse granulométrique du sable d'oued (Oued Maitre)	54
Tableau IV.10	Analyse chimique du sable de BOUSAADA.....	55
Tableau IV.11	Masse volumique apparent du gravier	57
Tableau IV.12	Porosité, Compacité Et Indice Des Vides	58
Tableau IV.14	Degré d'absorption d'eau du gravier	59
Tableau IV.15	Teneur en eau du gravier.....	59
Tableau IV.16	Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	60
Tableau IV.17	analyse granulométrique du gravier 8/16.....	60
Tableau IV.18	Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé	61
Tableau IV.19	Classification des roche en fonction du coefficient	63
Tableau IV.20	Analyse chimique de la pierre concassée.....	63
Tableau IV .21	Caractéristiques duHRS1	64
Tableau IV .22	Composition chimique de Ciment (CRS)	65
Tableau IV .23	Composition chimique de la poudre de verre.....	65
Tableau IV .24	valeur du terme correcteur (k)	66
Tableau IV.25	Représentation des compositions	68
Tableau V.1	les valeurs d'affaissement, rapport E/C et la réduction d'eau	77
Tableau V.2	les valeurs de la masse volumique à l'état frais.....	77
Tableau V.3	les valeurs de la masse volumique à l'état durci	78

Liste des figures

Figure I- 1- pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	4
Figure I. 2: pâte de ciment.....	5
Figure I.3 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé.....	6
Figure I. 4: cycle de malaxage.....	9
Figure I. 5: Essai d'affaissement	10
Figure I. 6: aéromètre à béton de 5 litres de capacité.....	11
Figure I.7: Béton frais	12
Figure I.9: traction directe Figure I. 8: machine d'essai de compression	14
Figure I. 10: traction par fendage	14
Figure 11. Essai de traction par flexion.....	15
Figure II.1 Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.....	22
Figure II.2 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.....	23
Figure II.3 : Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température.....	24
Figure II.4 Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP.....	25
Figure.II.5 : Comportement du béton en traction (contrainte -ouverture de fissure) à différentes températures.	26
Figure II.6 : Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température.....	27
Figure II.7 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température	28
Figure II.8 : Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons	29
Figure II.9 : Illustration du mécanisme d'éclatement.....	30
Figure II.10 : Expansion thermique des granulats.....	32
Figure III.1 Représentation schématique plane d'un réseau vitreux	34
Figure.III.2. Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes	38
Figure III.3: Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey.....	40

Figure III.4 : Particule de verre fissurée (classe C2)remplie de gel de RAS (cure 60°C- 100%HR)	40
Figure III.5: Résistances en compression des mortiers conservés à 20°C contenant jusqu'à 40% de verre de différentes finesses	42
Figure IV.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5)	54
Figure IV.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16.)	61
Figure IV.4 : Appareil de l'essai Los Angeles	62
Figure.IV.5. poudre de verre	66
Figure.IV.6.Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E.....	67
Figure.IV.7.La courbe granulométrique de (sable, gravier 3/8, gravier 8/16)	69
Figure.IV.8.Disposition des éprouvettes dans les fours	71
Figure.IV.9. Essai de porosité	72
Figure.IV.9. échantillons utilisée pour la mesure de la porosité	73
Figure.IV.11. Dispositif d'essai de traction par flexion.....	74
Figure V.1. Évolution de la masse volumique à l'état frais des différents bétons	78
Figure V.2. Évolution de la masse volumique à l'état durci des différents bétons	79
Figure V.3. Évolution de la perte de masse des bétons à 3 jours en fonction de la température	80
Figure V.4. Évolution de la perte de masse des bétons a 14 jours en fonction de la température	81
Figure V.5. Évolution de la perte de masse des bétons à 28 jours en fonction de la température	82
Figure V.6. Évolution de la perte de masse des bétons à 45 jours en fonction de la température	83
Figure V.7. Évolution de la résistance en compression des bétons à 3 jours en fonction de la température.....	84
Figure V.8. Évolution de la résistance en compression des bétons à 14 jours en fonction de la température.....	85
Figure V.9. Évolution de la résistance en compression des bétons à 28 jours en fonction de la temperature.....	86
Figure V.10. Évolution de la résistance en compression a 45 jours des bétons en fonction de la température.....	87
Figure V.11. Évolution de la résistance en compression par les jours des bétons témoin en fonction de la température	88
Figure V.12. Évolution de la résistance en compression par les jours des bétons (10% de poudre de verre) en fonction de la température.....	88

Figure V.13. Évolution de la résistance en traction des bétons à 3 jours en fonction de la température.....	89
Figure V.14. Évolution de la résistance en traction des bétons à 14 jours en fonction de la température.....	90
Figure V.15. Évolution de la résistance en traction des bétons à 28 jours en fonction de la température.....	90
Figure V.16. Évolution de la résistance en traction des bétons à 45 jours en fonction de la température.....	91
Figure V.17. Évolution de la porosité des bétons à 3 jours en fonction de la température.....	92
Figure V.18. Évolution de la porosité des bétons à 14 jours en fonction de la température.....	92
Figure V.19. Évolution de la porosité des bétons à 28 jours en fonction de la température.....	93
Figure V.20. Évolution de la porosité des bétons à 45 jours en fonction de la température.....	93
Figure V.21. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (T .10%V) après les cycles de chauffage de 600°C.....	95
Figure V.22. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (T .10%V) après les cycles de chauffage de 800°C.....	96

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un des matériaux très utilisé pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil. En situation d'incendie, malgré son meilleur comportement à la température ambiante, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. Les incendies de tunnels sous la Manche (1996 et 2008) en France, Tauern (1999) en Autriche ou Saint-Gothard (2001) en Suisse sont les exemples illustrant l'endommagement du béton soumis à une température élevée.

Les travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température ont permis de lier cette instabilité thermique à la formation de pression (phénomène thermo-hydrigue) et de contraintes qui se développent dans le matériau chauffé (phénomène thermo-mécanique). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine de l'instabilité thermique du béton : le type de béton (béton ordinaire, béton à hautes et très hautes performances), l'état hydrigue, la nature des granulats, le type de sollicitation thermique, le chargement mécanique...

Soumis à un incendie, le béton se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus de dégradation conduit à la dégradation des propriétés physique, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et compromettre l'évacuation des personnes et la sécurité des secours. De plus, une réparation et une rénovation coûteuses de la structure endommagée par un incendie doivent souvent être effectuées.

Les sous-produits de l'industrie tel que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes trouvent une large utilisation comme ajouts cimentaires dans les bétons. Leur utilisation permet d'améliorer pour le mieux les caractéristiques des bétons jusqu'à leur fournir les qualités d'un béton de haute performances. A cet effet, en utilisant ces ultrafines comme ajouts cimentaires, le béton à haute performance ouvre le champ à une nouvelle vision de voir le recyclage des déchets industriels.

Retenus essentiellement pour leur pouvoir pouzzolanique du à leur teneur en agents réactif tel que la silice ou l'alumine, les ajouts cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de la portlandite (Ca(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.

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99,99% de silice, le verre se place comme un matériau digne de terme « pouzzolanique ».

Le verre a été un matériau indispensable à l'homme pour plusieurs propriétés comme la possibilité à prendre des différentes formes facilement, la clarté de la surface, la résistance à l'abrasion, sécurité et durabilité.

Comme la demande et l'utilisation du verre s'accroît, les déchets de verre aussi. Ce qui explique la recherche d'autres débouchés que le stockage vu sa composition riche en silice réactive le valorisation du verre dans le béton semble être une bonne alternative pour son recyclage.

Objectif

Notre travail s'inscrit dans le domaine général de la recherche il vise à valoriser les déchets de verre dans la confection des bétons, et à caractériser la poudre de verre comme ajout au ciment et d'étudier son effet sur le comportement physique et mécanique du béton.

L'influence des hautes températures (300°C-600°C et 800°C) sur les caractéristique du béton à base de la poudre de verre 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 : 3 jours- 14 jours- 28jours et 45 jours de durcissement dans un milieu humide.

Ce mémoire est reparti en 5 chapitres comme suit :

- Le premier chapitre renferme des généralités sur la composition de béton
- Le deuxième chapitre est une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température.
- Le troisième chapitre définit le verre et présente le comportement du verre dans un milieu cimentaire.
- Le quatrième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations des différents bétons d'étude.
- Le cinquième chapitre résume les essais et les résultats des expériences réalisées durant notre étude.

Avant propos

Ce mémoire rassemble un travail effectué conjointement au niveau de la synthèse bibliographique par:

ZOUBIRI AMINA

Dont le thème de l'étude est: **comportement du béton à base de la poudre de verre a haute température (effet de l'âge)**

Et: **HAOUARI BELKACEM AMINE**

Dont le thème de l'étude est: **comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures (l'effet de la cure)**

CHAPTER I

CHAPITRE I:Composition de béton

I- Composition de béton

I-1-Introduction

De nos jours le béton est devenu le matériau le plus utilisé au monde dans le domaine du génie civil. A ce jour, On estime que 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments administratifs, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore. Ce 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 en chaque région du globe.

I-2- Les composants d'un béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et le plus souvent, adjuvants (figure I.1) qui constituent un ensemble plus ou moins homogène.

Les composants sont très différents : les masses volumiques dans les bétons courants varient de 1 t/m³ (pour l'eau) à 3 t/m³ (pour ciment); les dimensions de leurs grains varient de 0.5 µm (grains du ciment) à 25 mm (gravillons).[1]

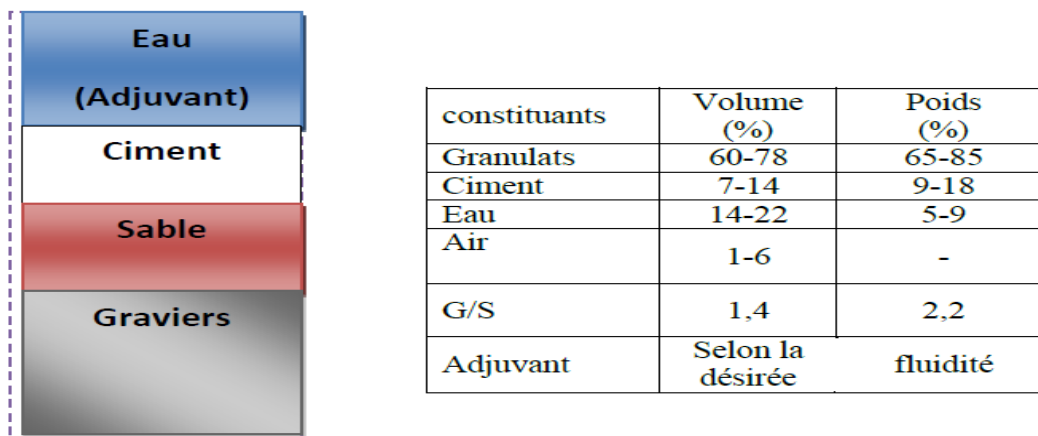


Figure I- 1- pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [1]

I-2-1- Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses propriétés macroscopiques.[4]

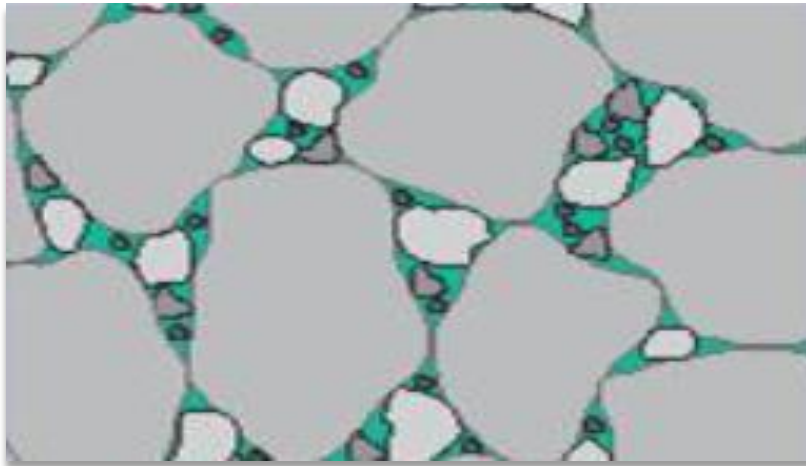


Figure I. 2: pâte de ciment [1]

I-2-1-1- Ciment

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 1 gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm²/g. La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50 μ.

Obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange homogène de calcaire et d'argile, dans la proportion 80%/20 %, c'est un produit complexe constitué essentiellement de silicate tricalcique 3 CaO, SiO₂ , de silicate bicalcique 2CaO, SiO₂ , d'aluminate tricalcique 3CaO, Al₂O₃ et de ferro-aluminate tétracalcique 4CaO, Al₂O₃ , Fe₂O₃ . Ce sont principalement les silicates tricalcique et bicalcique qui confèrent au béton sa résistance ; selon leur nature, les ciments contiennent entre 40 et 70 % de silicate tricalcique et entre 10 et 30 % de silicate bicalcique.[3]

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. [1]

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La

somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.[1]

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. [4]

I-2-1-2- L'eau

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.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [Afnor, 2002], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.[4]

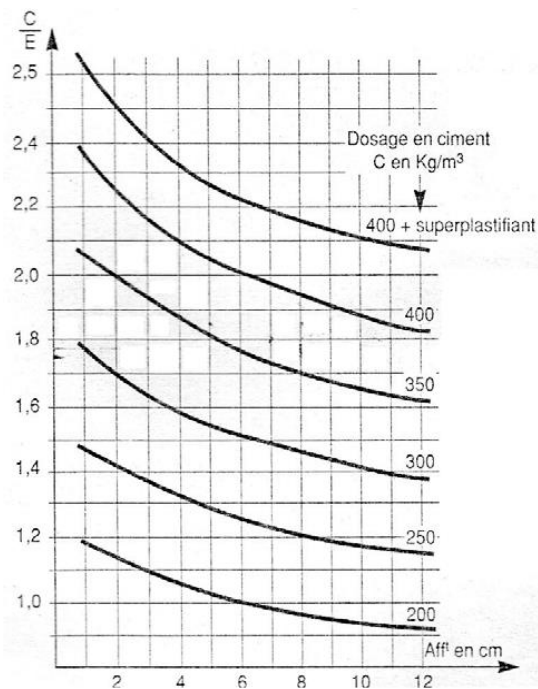


Figure I.3 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé [4]

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure I.3 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

I-2-1-4- Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés en faibles quantités au béton frais afin d'améliorer certaines propriétés. Ils représentent entre 1 et 3 % 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.

Les principaux adjuvants sont :

- les plastifiants et fluidifiants réducteurs d'eau, qui remplissent deux fonctions : ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance fluide et même liquide ; à maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton frais. Ce sont des résines mélamines ou des naphthalènes sulfonates. Leur action s'exerce par défloculation et dispersion par répulsion électrostatique des grains de ciment en solution dans l'eau, et leur durée d'activité n'excède pas 1 ou 2 heures.

- les retardateurs de prise du ciment, qui prolongent la durée pratique d'utilisation du béton frais. Ce sont généralement des sucres ou des lignosulfonates. Ils sont utiles pour le transport du béton sur de grandes distances ou pour sa mise en place par pompage, particulièrement par temps chaud.

- les accélérateurs de prise et de durcissement, qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et, pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance du béton durci.

- les entraîneurs d'air, 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.

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.[3]

I-2-1-5- Additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci.

Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulo-métrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique.

D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.[1]

I-2-2- Les granulats

Les granulats rocheux sont constitués par les sables, les gravillons et les cailloux. Ils forment le squelette du béton.

Les granulats sont d'origine détritique, sédimentaire, métamorphique ou éruptive. On distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et les granulats concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Ils sont classés en fonction des dimensions de leurs grains. La courbe granulométrique représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passant dans des tamis et passoirs de dimensions normalisées.

Par convention, on appelle sables les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm, gravillons ceux dont les dimensions sont comprises entre 5 et 25 mm et cailloux ceux dont les dimensions sont supérieures à 25 mm. Pour les ouvrages courants, les granulats n'incluent que des sables et des gravillons. [3]

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en oeuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques. [4]

I-3 Malaxage des constituants

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Ceci se fait soit avec un malaxeur à béton à train valseur qui consiste en un brassage forcé des divers constituants du béton, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par gravité en soulevant un volume de matériau et en le laissant par la suite tomber dans la masse.

Lors d'un essai en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasiment constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur, ces paramètres influent de manière significative sur la teneur en air du mélange. Suivant la norme NF P 18-305, un temps de malaxage minimal de 35 et 55 secondes est respectivement exigé pour les bétons ne comportant pas d'adjuvant ou d'additions.

La durée totale du cycle de malaxage (figure I.4) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

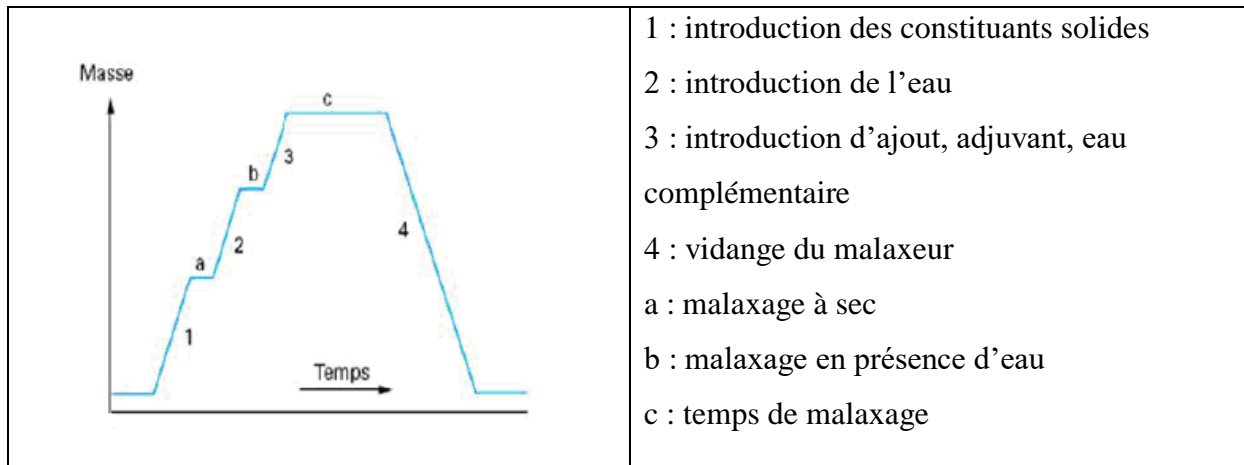


Figure I. 4: cycle de malaxage [1]

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur. [1]

I-4- Propriétés essentielles d'un béton

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. [4]

I-4-1- Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage.

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. [2]

I-4-1-1 Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.



Figure I. 5: Essai d'affaissement [1]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très plastique TP	10 à 15	3
Fluide FL	> 16	

Tableau I. 1: classe de consistance [1]

I-4-1-2 Essai vété.

Cet essai est utilisé pour tester les bétons de faible ouvrabilité, il consiste en la mesure du temps nécessaire que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l'effet d'une vibration donnée. [1]

Classe vété	V0	V1	V2	V3	V4
Temps à l'essai Vété	> 31 s	30s à 21s	20s à 11s	10s à 5s	< 5s

Tableau I. 2 : classe de consistance vété. De V0 à V4. De ferme à fluide [1]

I-4-1-3 Volume d'air occlus.

La quantité d'air occlus dans le béton frais est mesurée à l'aide d'un aéromètre. L'air occlus est le volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après la mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange de granulats, de l'ouvrabilité du béton et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). La mise en œuvre du béton frais pour la mesure du volume d'air occlus à l'aide de l'aéromètre doit être effectuée conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-443, qui consiste à comprimer le mélange étudié et à mesurer la variation du volume résultant de l'application d'une pression déterminée [1]



Figure I. 6: aéromètre à béton de 5 litres de capacité [1]

I-4-1-4 La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = m_2 - m_1 / V$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3)

m_1 : est la masse du récipient (kg).

m_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ les plus proches.[2]



Figure I.7: Béton frais [10]

I-4-2 Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.

- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
 - Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
 - Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.
- [2]

I-4-2-1 Résistance à la compression

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

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

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

$$f_c = F/A_c$$

Où :

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

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm²) près.



Figure I. 8: machine d'essai de compression [1]

I-4-2-2 Résistance à la traction

I-4-2-2-1 Traction directe :

C'est un essai très délicat à réaliser car il consiste en la mise en traction du cylindreen béton après collage des têtes de traction sur les deux faces. La difficulté rencontréeest le centrage de ces têtes. L'opération doit être réalisée sans efforts de flexion [1]

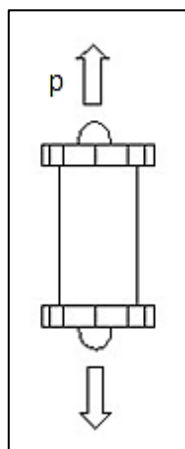


Figure I.9: traction directe [1]

I-4-2-2-2 Traction par fendage : (essai brésilien)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. Si « p » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre, « D » le diamètre nominal de l'éprouvette et « L » la longueur du cylindre, la résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante : [1]

$$f_{tj} = 2 \times \frac{p}{\pi DL}$$

M8

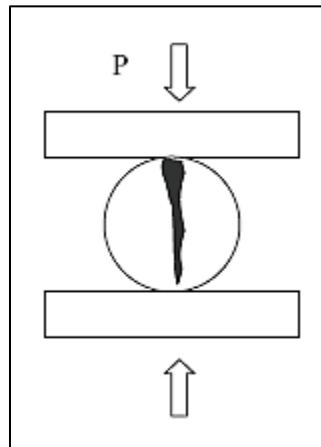


Figure I. 10: traction par fendage [1]

I-4-2-2-3 Traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance : [2]

$$f_{tj} = 1.8P / a^2$$

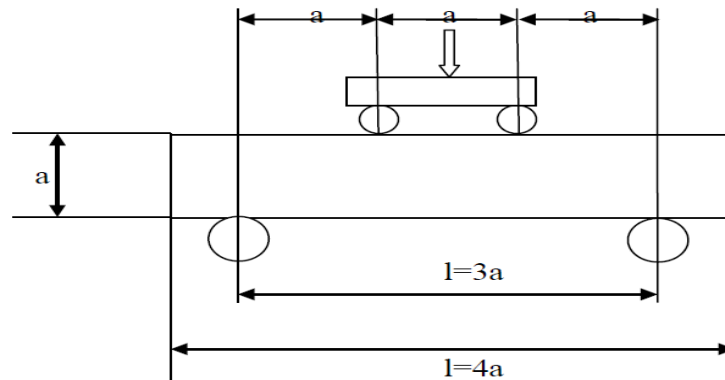


Figure 11. Essai de traction par flexion [2]

I-5- Caractéristique de résistance du béton

La résistance mécanique du béton est évolutive, elle augmente beaucoup au cours du premier mois après coulage. On considère que cette valeur est stable et quasi-maximale à 28 jours. De plus le béton subit en générale un certain nombre de traitements chimiques après son séchage selon son utilisation, les contraintes et les intempéries auxquelles il devra faire face. Ces traitements influent sur ses valeurs de résistance.

La résistance des bétons dépend en grande partie du type de sollicitation auxquels ils sont soumis. Les bétons ont de très bonnes valeurs de résistance à la compression de l'ordre en générale de 20MPa à 40MPa mais cela peut être multiplié par dix pour certain type de béton à usage bien spécialisé. La résistance en traction est plutôt une des grandes faiblesses du béton et n'est égale qu'à 10% à 15% de la résistance en compression. La résistance en flexion est usuellement définie par une valeur légèrement inférieure à la racine carrée de la résistance en compression. La résistance en torsion du béton dépend d'une autre valeur appelée le module de rupture et de la dimension de l'élément. La résistance en cisaillement du béton est d'environ 5% de la résistance en compression.

Le module de Young pour le béton standard va de 15 000 Pa à 42 000 Pa. Pour les autres types de béton, il augmente avec la valeur de la résistance à la compression.[10]

I-6- Déformations physiques caractéristique

I-6-1 Retrait

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.

I-6-2 Fluage

Le fluage est une déformation due aux contraintes auxquelles est soumis l'objet. Une partie de la déformation temporaire devient lentement permanente. Le fluage représente environ 4% à 6% de la longueur totale.[10]

I-7 Méthodes de formulation des Bétons

I-7-1 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 :

$$P=A + (100-A)\sqrt[5]{d/D}$$

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. [1]

I-7-2 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 $\sqrt[5]{d}$. 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 $\sqrt[5]{d}$. 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 : [2]

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

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-7-3 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. [2]

I-7-4 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]

I-7-5 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. [1]

I-7-6 Méthode de VALETTE

Méthode essentiellement expérimentale, elle nécessite un nombre de calculs préparatoires. Plus connue sous la désignation de « dosage des béton à compacité maximale », « dosage des béton à minimum de sable » ou « dosage des béton à granularité discontinue ». Son principe est de mesurer le volume de vide d'un sable mouillé, et le comblé par un volume égale de pâte pure de ciment. On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec l'ouvrabilité désirée. [1]

CHAPTER II

CHAPITRE II Effets de la température sur le béton**II-1 Introduction :**

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques 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... [5]

II-2 Evolution des propriétés physique du béton**II-2-1 Dégradation de l'interface pâte-granulats**

Dans le béton, l'interface pâte/granulats est la partie la plus poreuse et la plus fragile. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau adsorbée entourant les granulats, qui favorise le développement des fissures au niveau de cette zone, et à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

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. [6]

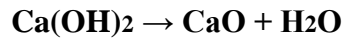
II-2-2 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie

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...). Pour notre cas, nous présentons maintenant les intervalles de température pour lesquels se produisent des changements physico-chimiques de la pâte de ciment et du béton ordinaire.

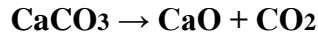
L'élévation de la température entraîne les processus suivants :

- entre 30° C et 120° C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent ,et aussi une décomposition de l'étrangéité et son élimination complète avant 100° C.
- entre 130° C et 170° C : le gypse se décompose.
- 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 :



- 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.[7]

II-2-3 Evolution de la porosité

Le béton est un matériau poreux bi phasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La Figure II.1 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par la méthode la saturation d'eau. [5]

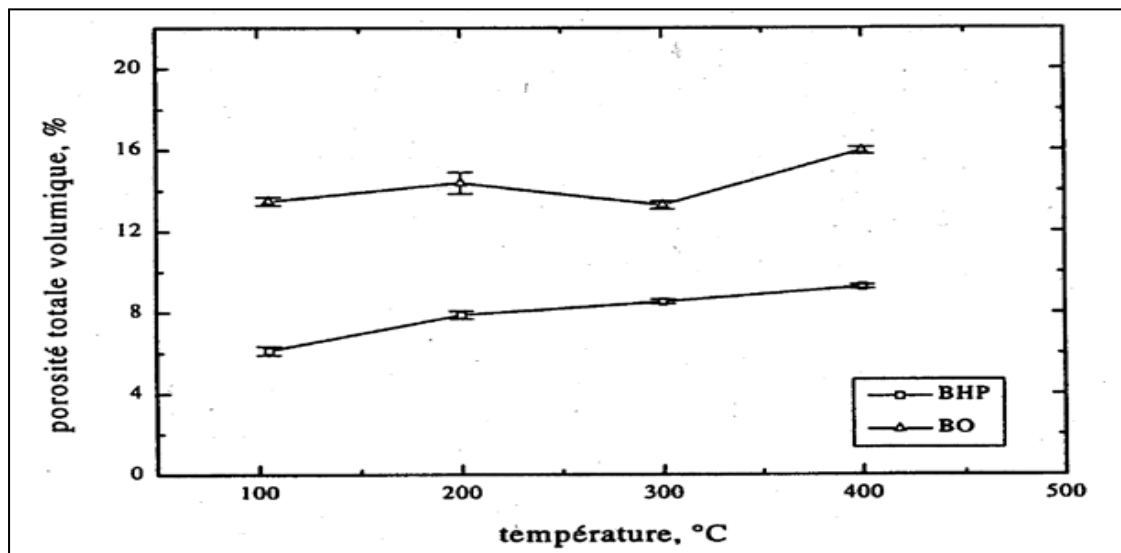


Figure II.1 Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement . [5]

II-2-4 Evolution de la masse volumique

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure II.2 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite. [5]

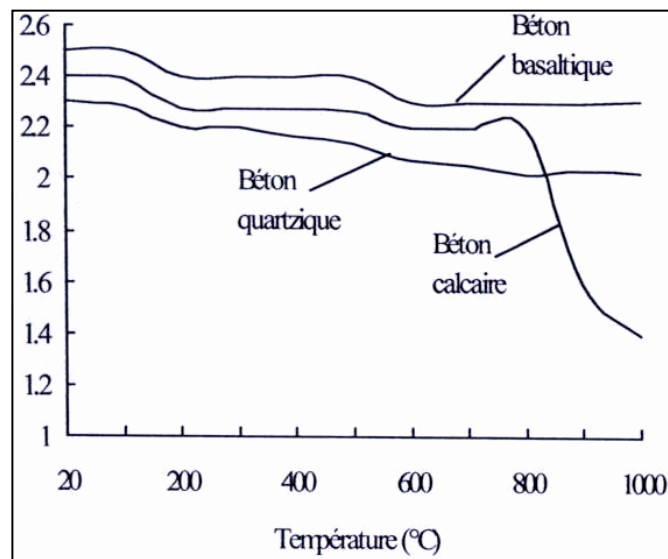


Figure II.2 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.[5]

II-2-5-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. La perte de masse commence à partir des températures supérieures à 100°C. [6]

II-2-6- Evolution de la perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. 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.

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.

La perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C. [6]

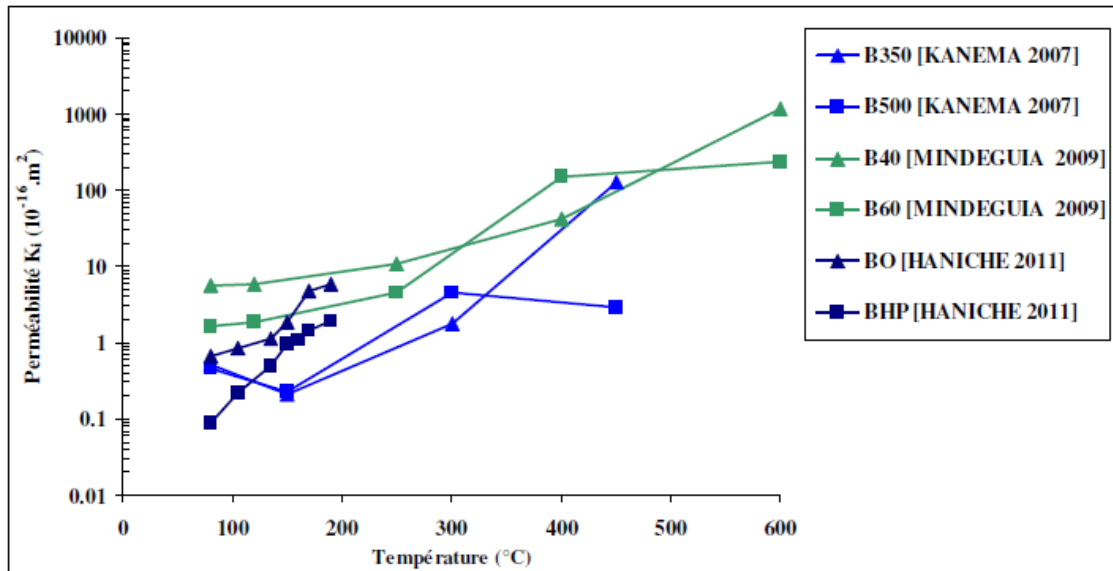


Figure II.3 : Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température [6]

II-3 Evolution des propriétés mécaniques avec la température

II-3-1 Résistance en compression à haute température

La figure II.4 montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons autoplaçants, de bétons ordinaire et à hautes performances. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température.

L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines. [8]

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

Le second domaine, au delà de la température 400°C – 800°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques.

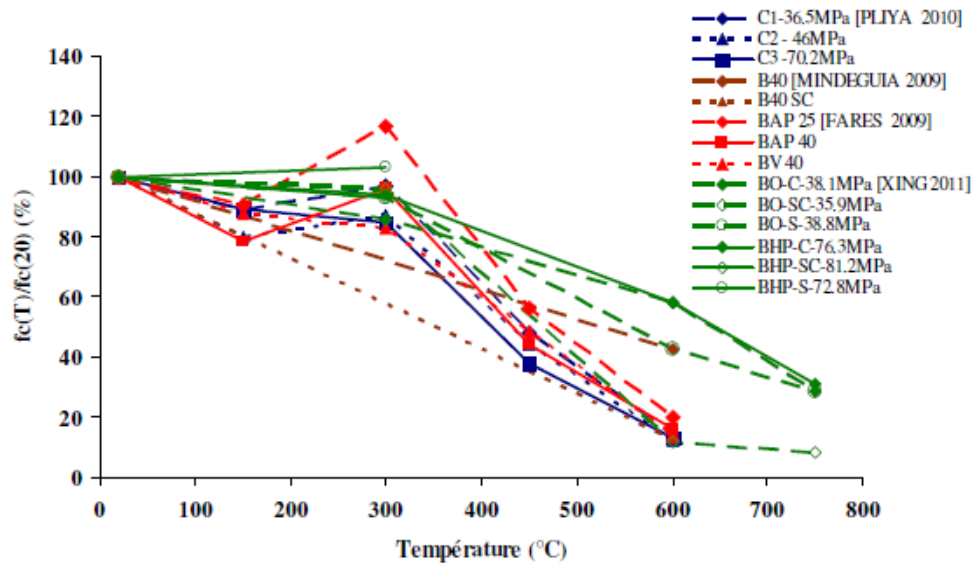


Figure II.4 Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [8]

II-3-2 Résistance en traction à haute température

Le béton résiste mieux à la compression qu'à la traction, son comportement en traction est très influencé par la température. La réalisation d'un essai en traction peut se faire selon plusieurs méthodes : flexion 3 ou 4 points, directe (uni axiale), fendage. Les essais par fendage sont les plus utilisées en pratique dans ce genre d'étude mais les résultats obtenus sont peu précis et surestiment les valeurs réelles. Les essais de traction sont très difficiles à mettre en œuvre mais donnent des résultats fiables. Ces essais permettent l'évaluation de l'énergie de fissuration G_f à haute température qui est l'un des paramètres fondamentaux (avec le module élastique et la résistance en traction) requis pour la plupart des modèles de mécanique d'endommagement ou de mécanique de la rupture du béton.

L'essai de flexion 3 points est simple à mettre en œuvre et plus stable du point de vue mécanique. Peu de résultats sont aujourd'hui disponibles à haute température.[5]

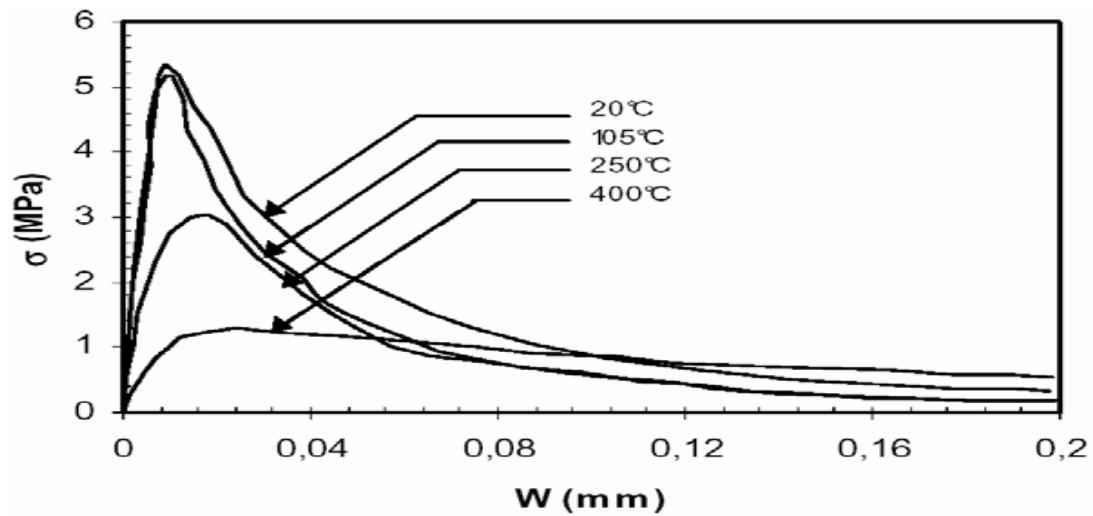


Figure.II.5 : Comportement du béton en traction (contrainte -ouverture de fissure) à différentes températures. [5]

II-3-3 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 (la vitesse de chauffage, la teneur en eau, la nature des granulats ...) [6]

La Figure II.6 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.6 montrent que le module est à peu près constant. [5]

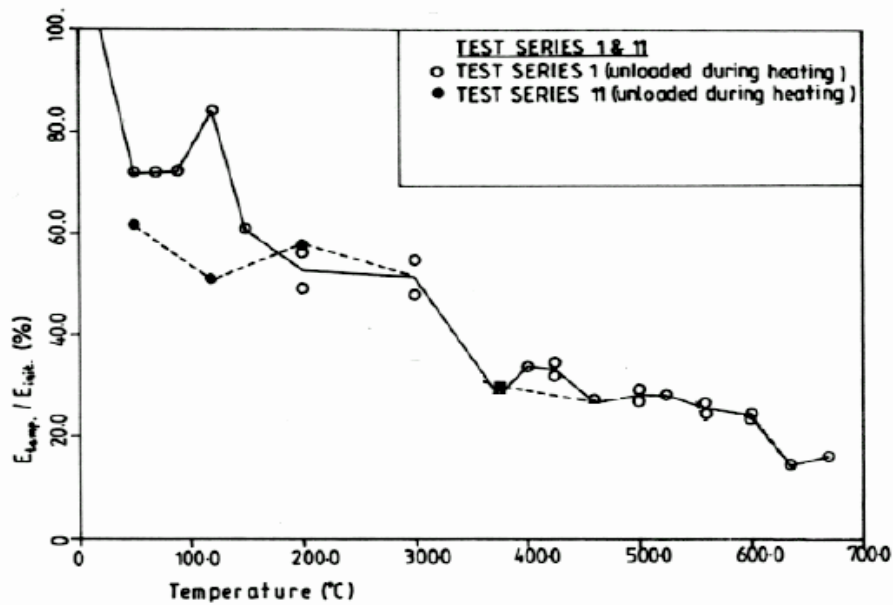


Figure II.6 : Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température [5]

II-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. [6]

II-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. [6]

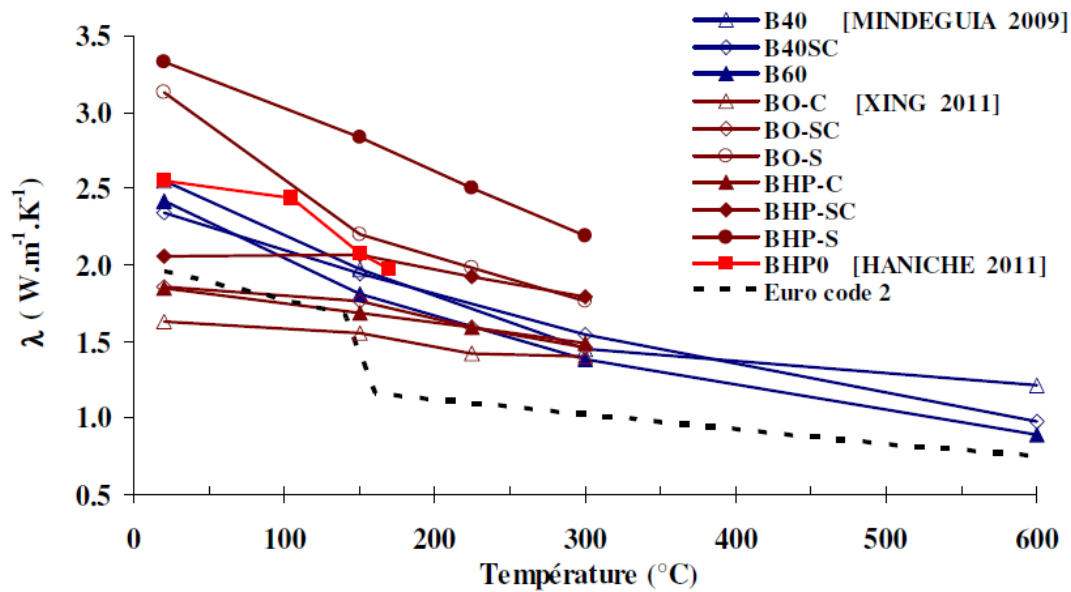


Figure II.7 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température [8]

II-4-2- Chaleur spécifique

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

L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. [5]

La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la montée de la température. Cette variation est liée aux différentes réactions endothermiques. En effet, la chaleur massique du béton à haute température est gouvernée significativement par la nature du granulat existant dans la composition du béton. Une augmentation de la chaleur massique du béton contenant les granulats siliceux se produit autour de 500°C liée à la transformation du quartzite (figure I-10-a).

L'influence des granulats calcaires sur la chaleur massique du béton est négligeable pour une température inférieure à 600°C - 800°C . Cependant, au delà de cette température, la chaleur massique du béton calcaire s'accroît immédiatement et est liée à la consommation de chaleur sous forme latente pour la décarbonatation du calcaire. La chaleur latente nécessaire pour élever la même

température du béton de granulat calcaire est dix fois plus élevée que celle du béton de granulat siliceux lorsque la température est supérieure à 600°C. [8]

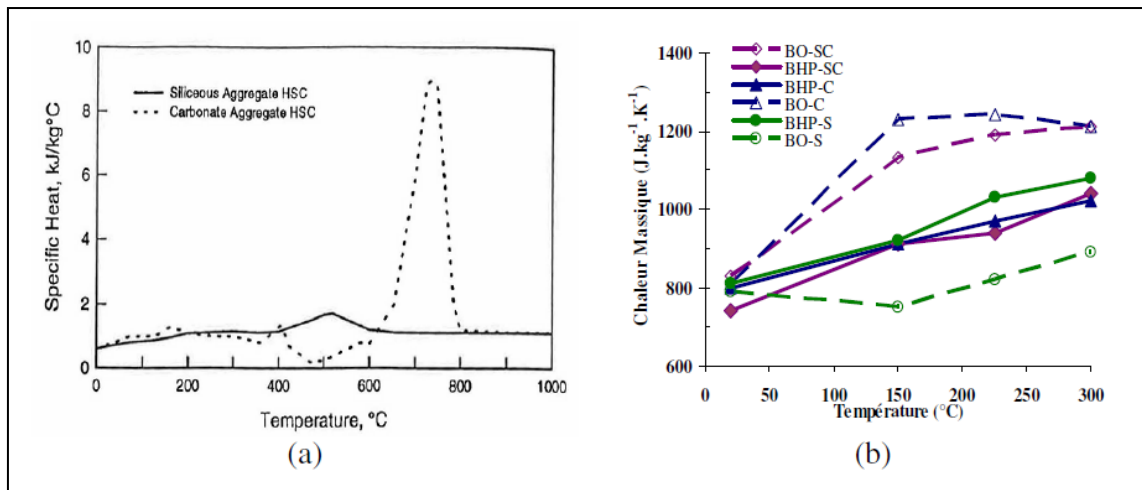


Figure II.8 : Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons [8]

II-5 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrrique.

– 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-hydrrique : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure II.9 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.[8]

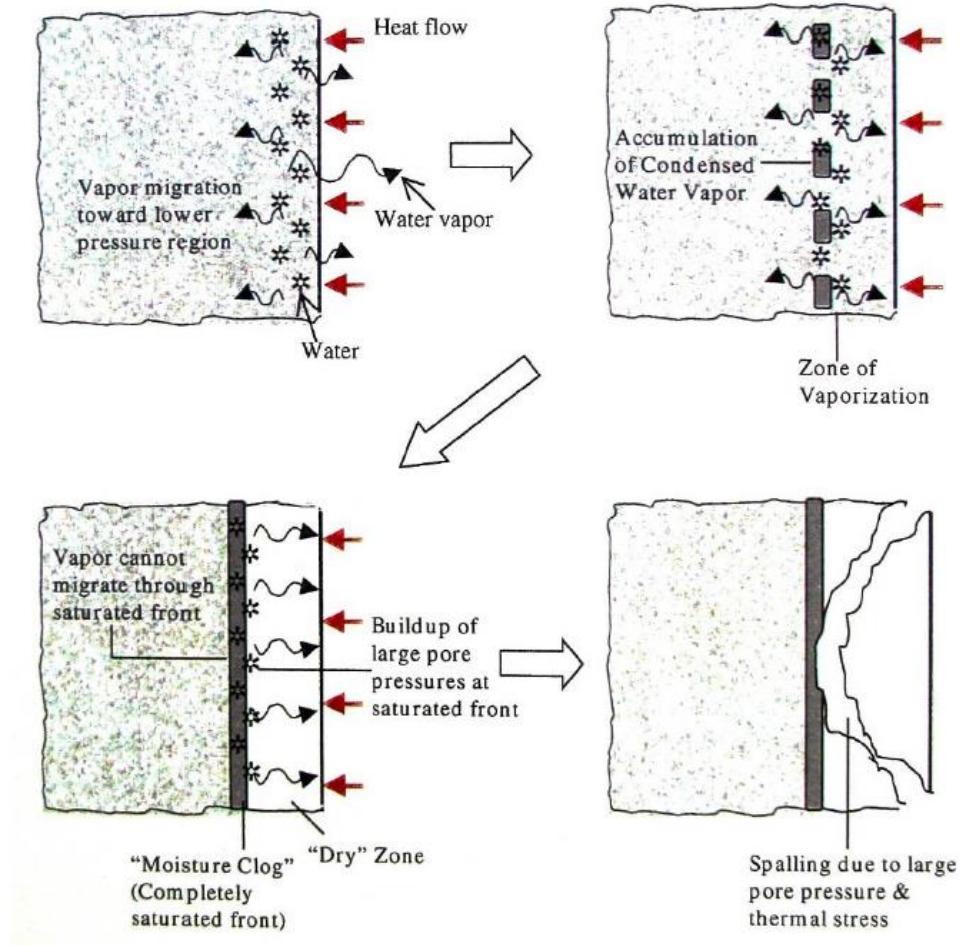


Figure II.9 : Illustration du mécanisme d'éclatement[8]

II-6- 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°C/min, des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont éclaté à une température du surface voisine de 300 – 350°C. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté. 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 des granulats calcaires. [8]

II-7 Déformation thermique du béton à hautes températures

II-7-1 Différentes formes d'endommagement thermique

En cas d'incendie de bâtiments, de tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes :

- **Eclatement explosif**: ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.
- **Eclatement de surface**: couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.

- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.[8]

II-7-2 Déformation thermique des granulats

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. Au cours du chauffage, les granulats se dilatent. Cette expansion thermique dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le granulat calcaire a un coefficient d'expansion thermique plus faible que celui du granulat de nature siliceuse mais plus haute que le granulat de basalte.

La figure II.10 présente les évolutions de l'expansion thermique de différents granulats (des granulats contenant principalement des minéraux quartzites : gneiss, granite, granodiorite ; granulat de basalte). Tous les granulats se dilatent avec la montée de la température. Durant la phase de refroidissement, leur expansion thermique est irréversible. Les granulats contenant principalement des minéraux quartzites présentent une accélération rapide d'expansion thermique après 570°C.[8]

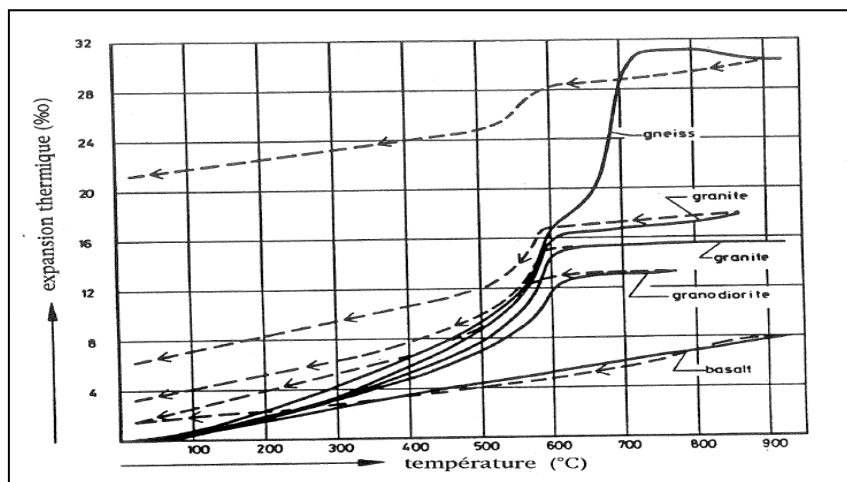


Figure II.10 : Expansion thermique des granulats [8]

CHAPTER III

CHAPITRE III : Le verre

III-1- Définition du verre

Il n'existe pas une, mais plusieurs définitions du verre. Ainsi, on peut le définir différemment suivant que l'on considère:

- Les objets que l'on peut fabriquer à partir de cette matière (aspect fonctionnel) : par analogie avec le verre utilisé pour boire ou le verre à vitre. Le verre est un matériau solide transparent, homogène et cassant. Il résiste bien au feu et au contact de pratiquement tous les liquides et solides connus.
- Que ce matériau à une structure particulière (aspect structural) le verre est un solide non cristallin (amorphe). Il ne présente pas comme pour les structures cristallines d'ordre à longue distance (ordonnancement des atomes et existence d'une maille cristalline). C'est un état particulier de la matière : l'état vitreux.
- Que c'est un état particulier de la matière (aspect opérationnel) : le verre est un solide obtenu par trempe d'un liquide surfondu.[11]

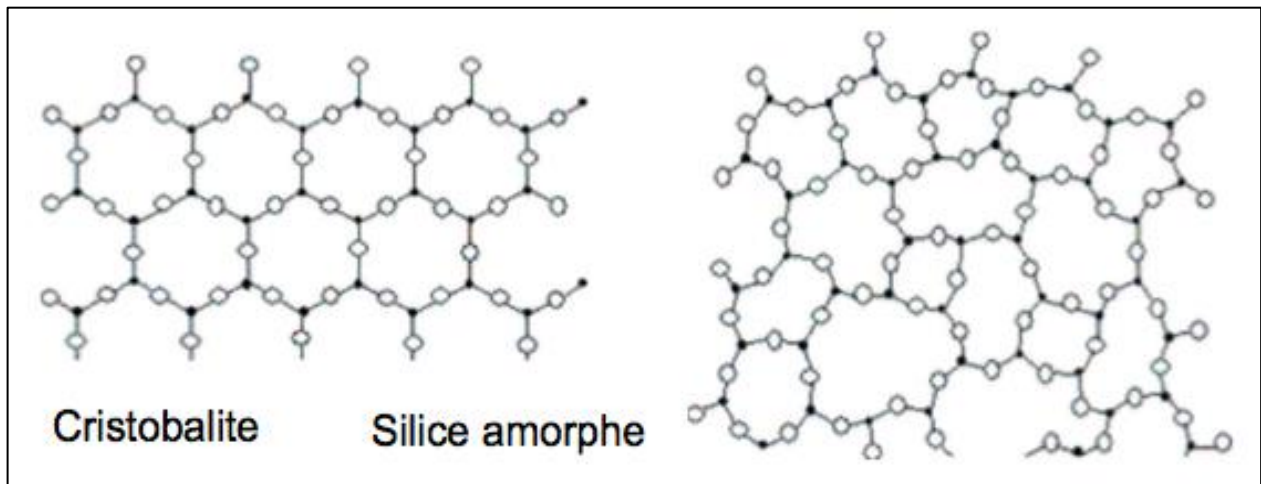


Figure III.1 Représentation schématique plane d'un réseau vitreux [11]

III-2- Définition de poudre de verre

La poudre de verre est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré. Lorsqu'il est incorporé au béton en remplacement d'une portion de ciment, le verre ainsi réduit en poussière se lie avec les éléments de chaud en vertu de ses propriétés pouzzolaniques.

III-3- Valorisation de verre dont le béton

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recycle plusieurs fois. Cependant, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective soit préalablement séparé en fonction de la

couleur pour être transformé en calcaire pour être de nouveau utilisé dans la fabrication d'emballages en verre. La plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas-ci, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales...) ou stocké en décharge.

Des travaux ont montré que l'utilisation du verre dans les bétons semble être une piste prometteuse pour un recyclage massif :

- En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Qualifiée de "cancer des bétons", la réaction alcali-silice (RAS) est le résultat de la réaction de la silice amorphe d'un granulats avec les ions hydroxydes et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction.

- Un broyage prononcé laisse envisager une utilisation en tant que liant. Dans ce cas-ci, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant des composés dotés de propriétés liantes: c'est la réaction pouzzolanique. En considérant la pathologie qu'entraînent les granulats de verre, il est vraisemblable que la valorisation du verre ne soit possible qu'à travers un broyage accentué. Cependant, le coût qu'engendre une telle opération peut freiner cette voie de valorisation. Pour freiner la RAS, des études ont proposé la combinaison du verre à des pouzzolanes tels que: les fumées de silice, les cendres volantes ou le métakaolin. Il est vrai que ces pouzzolanes ont montré leur efficacité mais elles restent souvent coûteuses et ne sont pas toujours disponibles localement.

L'objectif de la présente étude est de tirer profit de la réaction pouzzolanique apportée par les fines de verre pour contrer la réaction alcali-silice provoquée par les granulats de ce même matériau dans le but d'une valorisation optimale du verre. Dans un premier temps, un diamètre de grains de verre qui provoquerait la réaction alcali-silice est établi par suivi de variations dimensionnelles d'éprouvettes de mortiers. Puis le caractère pouzzolanique sur quelques-unes des classes de verre est évalué en termes de résistance à la compression de mortiers.

Enfin, une étude est menée sur mortiers contenant à la fois des fines et des granulats de verre dans le but de montrer l'efficacité des fines de verre à réduire les expansions provoquées par les granulats définis alcali-réactifs. [13]

III-4- Les propriétés du verre

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

III-4-1- Propriétés physiques

La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.

La dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre.

La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.

La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.

L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

III-4-2- Propriétés thermiques

La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

La conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

Il est ininflammable et incombustible.

III-4-3- Propriétés chimiques

L'action de l'eau : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.

L'action de l'air : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenue dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

L'action de la lumière : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.

L'action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout.[12]

III-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 [15]

III-6- 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 (III-2) 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.[14]

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 et 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. [14]

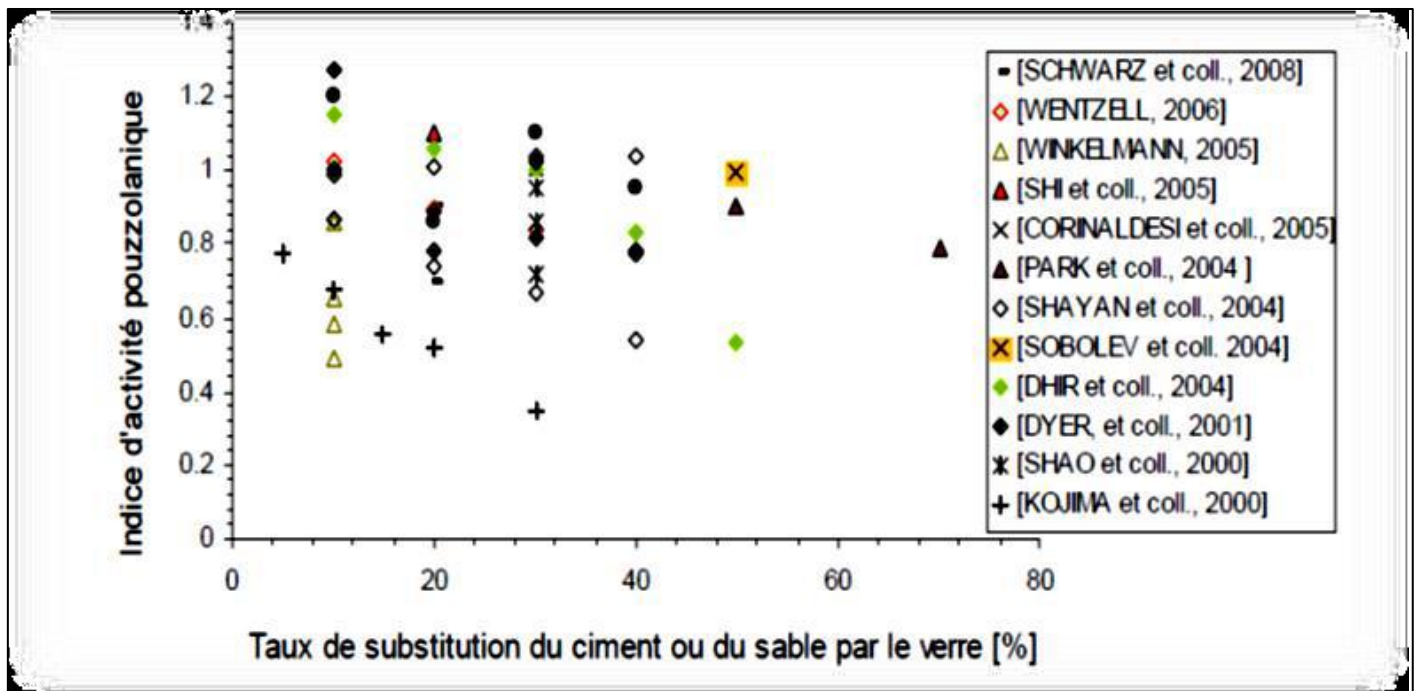


Figure.III.2. Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes[14]

III-7- 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.

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. 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.[15]

III-8- 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.[14]

III-9- Réaction alcali-silice du verre

Le remplacement partiel du granulat 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.[15]

III-10- 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 à la surface des éprouvettes contenant des particules de verre supérieures à 315µm. Des observations au microscope électronique balayage (Figure 4) 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.[13]

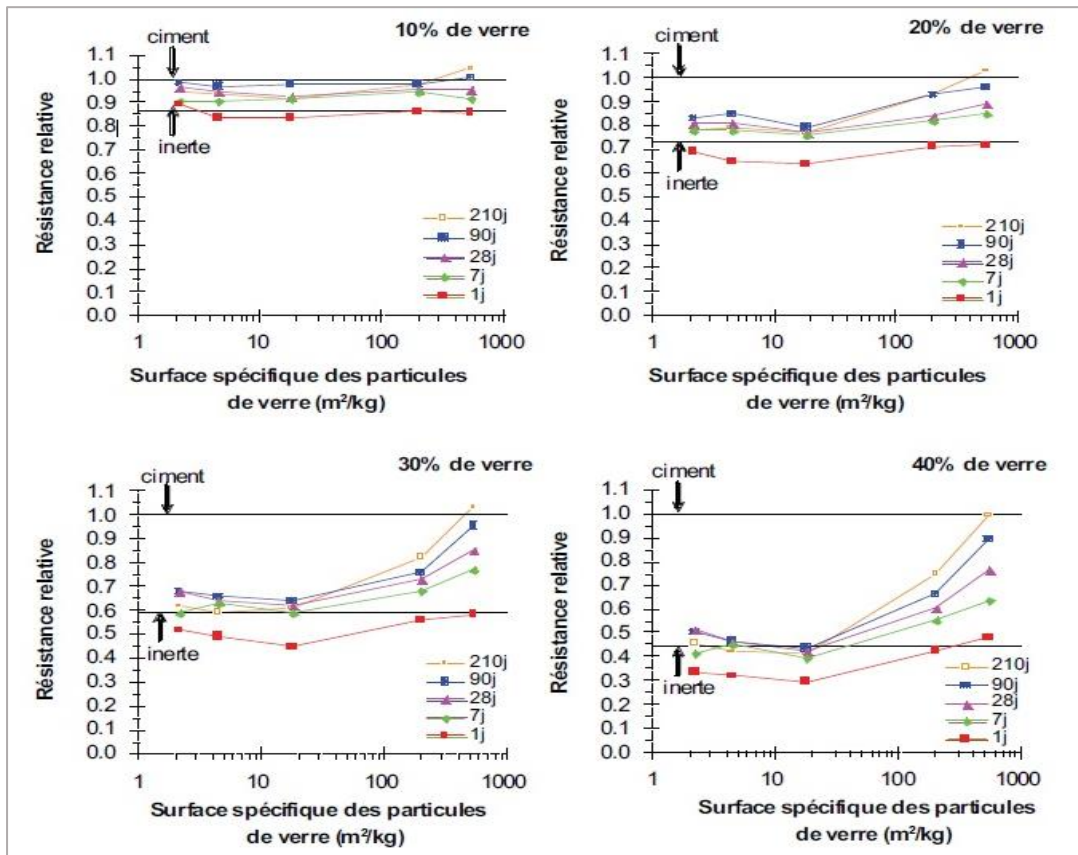


Figure III.3: Résistances relatives (%) des mortiers en fonction des finesses du verre. Comparaison avec les courbes de dilution obtenues par la loi de Bolomey. [13]

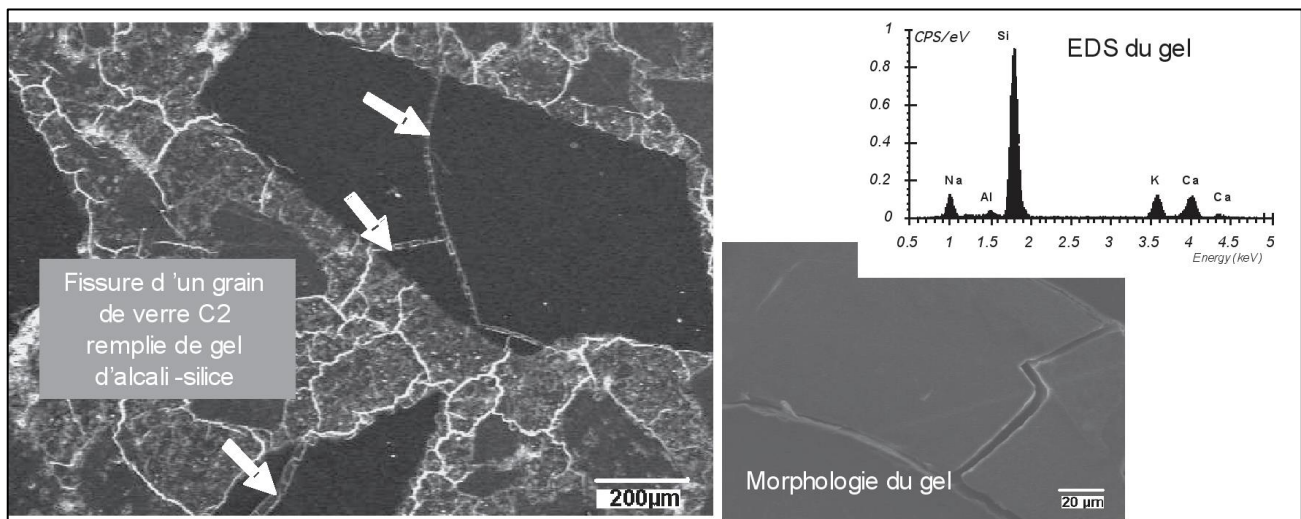


Figure III.4 : Particule de verre fissurée (classe C2)remplie de gel de RAS (cure 60°C- 100%HR) [13]

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 3). 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. [13]

III-11- Étude de la pouzzolanité

La (figure III.5) 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).

$$\sigma = K_b \left(\frac{C}{W + V} - 0.5 \right)$$

(Equation 1)

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. [13]

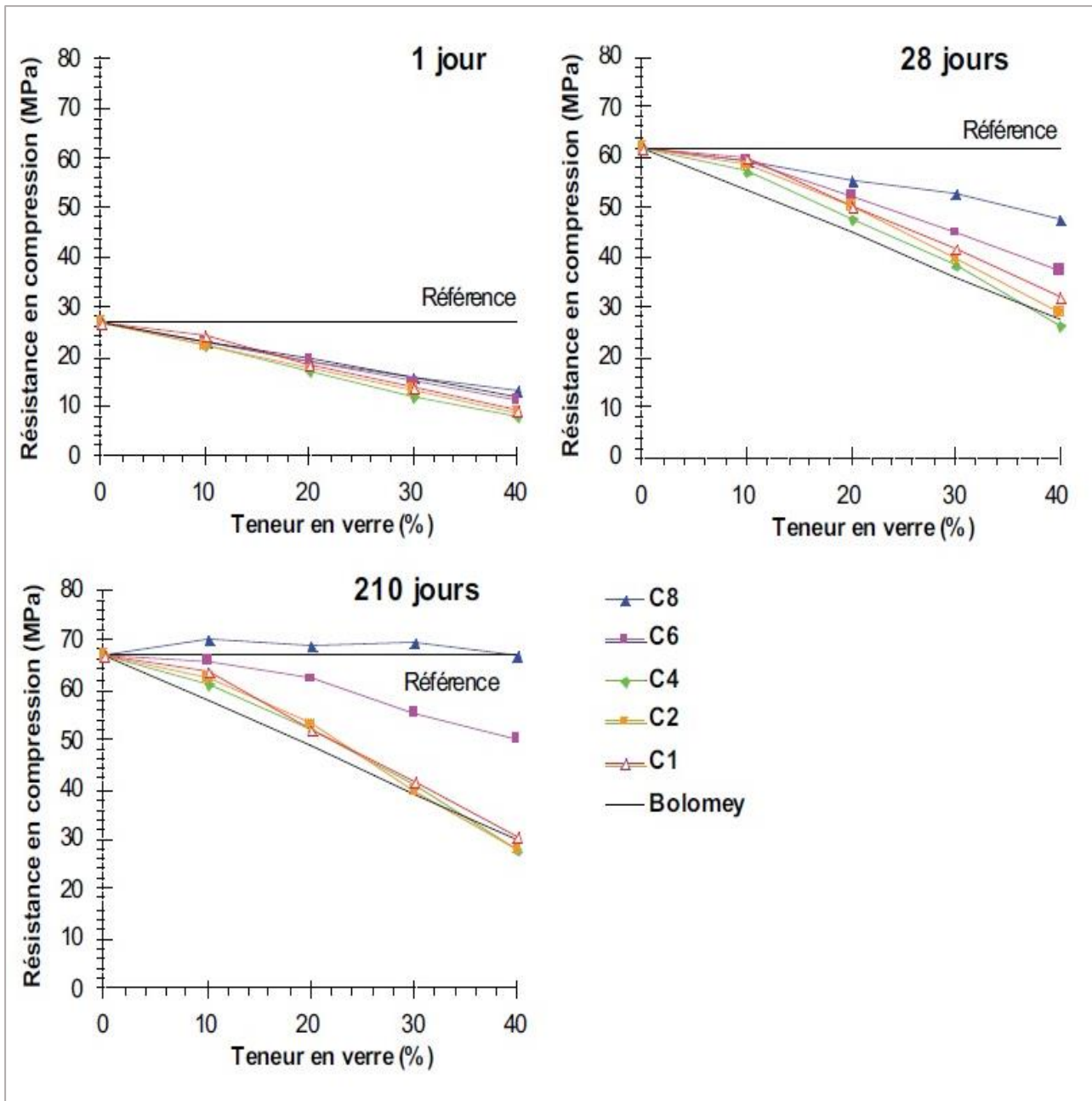


Figure III.5: Résistances en compression des mortiers conservés à 20°C contenant jusqu'à 40% de verre de différentes finesses.

Comparaison avec des courbes de dilution calculées avec la formule de Bolomey [13]

La (figure III.3) 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 limite, 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 1 pour les mortiers-C8 contenant jusqu'à 40 % de verre. [13]

Remarque

Peu d'études traitent le comportement des bétons à base de la poudre de verre exposé aux températures élevées ; à partir de votre étude on essaye d'étudier quelques caractéristiques telles que la résistance – porosité de ces bétons.

CHAPTER VI

CHAPITRE IV : Caractéristiques des matériaux

IV.1. Introduction :

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Les matériaux utilisés sont :

- ◆ Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).
- ◆ Le gravier de carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (COSIDER).
- ◆ Le ciment CRS de la cimenterie.

L'eau potable du laboratoire.

IV.2. SABLE D'OUED (BOUSAADA) :

IV.2.1. Origine du sable :

Le sable de base de notre recherche provient: des abords d'Oued MAITAR (BOUSAADA)

IV.2.2. Caractéristiques physiques des sables utilisés :

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila, suivant les normes françaises **AFNOR**.

IV. 2.2.1. Masse volumique (absolue) : NF P 18-555

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

*Mode opératoire :

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité **1000ml**. On prend **03** échantillons de masse **300g**.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité **1000 ml** et on y verse **300 ml** d'eau préparé préalablement dans **2^{ème}** récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable – eau. Soit (**V**) ce volume.

Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable : $V_1 = V - 300$ (ml).

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule : $\rho = \frac{M}{V_1}$

Avec : $M = 300\text{g}$.

Resultants obtenus :

N° d'essai	M (g)	V_e (cm ³)	V_1 (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	300	300	118	2,54	2.54
2	300	300	119	2.52	
3	300	300	116	2.57	

Tableau IV.1 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda

IV.2.2.2. Masse volumique apparente : NF P 18-554

IV.2.2.2.1. Masse volumique apparente à l'état lâche :

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

***Mode opératoire :**

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M_2 en poids.
- Volume de récipient $V_r = 900\text{cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

N° d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app \text{ moye}}$ (g/cm ³)
01	114	1526	1.56	1.563
02	114	1529	1,57	
03	114	1525	1.56	

Tableau IV .2 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.

IV.2.2.2.2. Masse volumique apparente à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient « après tassement » on soumet ce dernier à **30** secousses manuelles. On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M_2 le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_c = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Où :

M_1 : Masse du récipient à vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient.

N° d'essai	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moy}$ (g/cm ³)
01	114	1629	1,68	1,713
02	114	1673.	1,73	
03	114	1668	1.72	

Tableau IV.3 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact

IV 2.2.3. Porosité : (NF P 18-554)

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$$P (\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) \times 100 \quad \rho_L$$

$$P(\%) = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $\rho_L = 38.46\%$.
- Etat compacte : $\rho_c = 32,55\%$.

IV. 2.2.4. Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $C_L = 61,53\%$.
- Etat compacte : $C_c = 67,44\%$.

IV.2.2.5. L'indice des vides :

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = V_v / V_s = P / (100 - P).$$

Avec P en pourcent (%).

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $e = 0,608\%$
- Etat compacte : $e = 0,482\%$

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans les deux tableaux suivants :

Porosité P%		Compacité C%		Indice des vides e	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
38.46	32.56	61.53	67.44	0,608	0,482

Tableau IV.4 : la porosité, la compacité et l'indice de vide Pour le sable de Boussaâda

IV.2.2.6. Equivalent de sable : NF P 18-598

Nous essayons de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier.

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à **500 g**).
- Prendre une pesée de **120 g**.
- Remplir l'éprouvette de solution la vante jusqu'au premier repère (**10cm**).
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (**120g**) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisserreposer pendant **10** minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de **20cm** de cours horizontale en **30** secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vanteau dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisanttourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le **2^{ème}** repère. Laisserensuitereposer pendant **20** minutes.

A / Equivalent de sable visuel (ESV) :

- Après **20** minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieure du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partiesédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100 [\%]$$

Où : $h_2 < h_1$ avec : h_1 : sable propre + éléments fins.

B / Equivalent de sable visuel (ESP) :

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 [\%]$$

Où h'_2 : La hauteur du sable ($h'_2 < h_1$).

N° d'essai	h₁ (cm)	h₂ (cm)	ESV (%)	h'₂ (cm)	ESP (%)
01	8.9	9.8	90.81	8.6	87.75
02	8.9	9.7	91.75	8.7	89.69
03	8.9	9.8	90.81	8.7	88.77

Tableau IV.5 : Equivalent du sable de Boussaâda.

$$(ESV)_{\text{moy}} = 91.12\%$$

$$(ESP)_{\text{moy}} = 88.73\%$$

Donc: $ESV > 85\%$

$ESP > 80\%$.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E.S≥85	E.S>80	Sable 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.

Tableau IV.6 : Comparaison des résultats. [08]

Pour le sable de Boussaâda : C'est un Sable 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.

IV.2.2.7. Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre **20 à 25 %** de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de **0 à 3%**, on l'appelle sec.

*Mode opératoire :

- ◆ Peser un échantillon de sable humide, soit M_h son poids (**500 g**).
- ◆ Laisser l'échantillon dans une étuve à une température dans l'intervalle de **105°C à 110 °C** pendant **24heures**.
- ◆ Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids.

La teneur en eau du sable est :

$$W = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) \times 100 [\%]$$

Où :

- M_h : Poids du sable humide en (g).
- M_s : Poids du sable sec en (g).

N° d'essai	M_h (g)	M_s (g)	W (%)	W_{moy} (%)
1	500	495	1	1.2
2	500	494	1,2	
3	500	493	1,4	

Tableau IV.7 : Teneur en eau du sable de Boussaâda

IV.2.2.8. Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 [\%]$$

Où :

- M_1 : La masse du matériau sec en (g).
- M_2 : La masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec en (g).

<i>N° d'essai</i>	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
1	300	307,98	2,66	2,67
2	300	308,66	2,88	
3	300	308,86	2,95	

Tableau IV.8 : Degré d'absorption du sable de Boussaâda

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 $A_b < 5\%$. 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**.

Observation :

Exceptionnellement, pour certaines utilisations, cette valeur est abaissée à **2 %**.

IV.2.2.9. Analyse granulométrique : (NF P 18-560)

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau, elle comprend deux opérations :

1. Tamisage.
2. Sédimentation.

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau, elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes.



Figure IV.1: Les Tamis.

• En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction du sable dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant) on constate que la courbe granulométrique est un élément fondamental de classification du matériau. Les résultats de cette étude permettent de prévoir certaines propriétés du matériau comme la perméabilité, l'aptitude au compactage et l'utilisation comme filtre.

Mode opératoire :

- Prélever (1,5 kg) de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125 et éventuellement 0,08mm. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
 - Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 5 minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
 - Peser chaque tamis séparément à 1 g près. Soit M_i la masse du tamis (I) + le sable. La différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R_1 du tamis 1.
 - Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
 - Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumuler du tamis 2 ($R_2=R_1$ +Refus partiel sur tamis).
 - Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots

Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante : $T = 100 - R_c$

Où :

- T: Tamisât en %
- R_c : Refuscumulés en %

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	102	102	6.8	93.2
1.25	56	158	10.53	89.47
0.63	61	219	14.6	85.4
0.315	404	623	41.53	58.47
0.16	720	1343	89.53	10.47
0.08	145	1488	99.2	0.8
Fond	12	1500	100	0.0

Tableau IV.9 : Analyse granulométrique du sable d'oued (Oued Maitre).

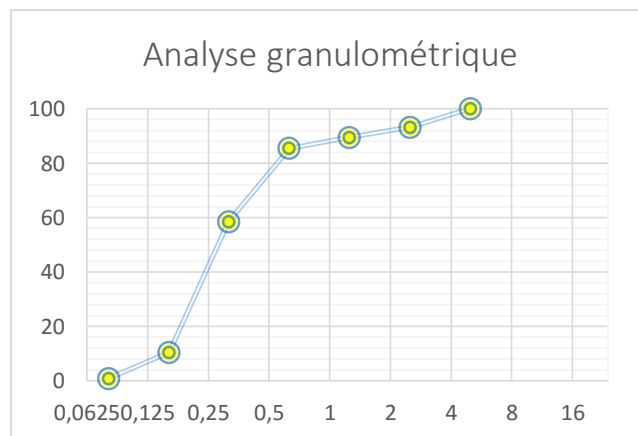


Figure IV.2 : La courbe granulométrique du sable (0/5).

Commentaire :

$ES_{may}=91,12\%$ \Rightarrow Le sable de dune (Oued Maitre) très propre.

\Rightarrow Le sable (0/5) est un sable fin.

Donc : le sable qui utilisé propre et gradué (acceptable).

Nous déduisons que c'est un sable fin et il n'est pas de bonne qualité, il n'est donc spécifié pour la fabrication des bétons du point de vue de l'analyse granulométrique.

IV.2.2.10. Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles :

[0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm)] sur **100** et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

Où : R_c : Refus cumulé.

Et le refus dont le tamis **0,16** = 89.53%

Pour le sable de Boussaâda : $M_f = \mathbf{1.62}$.

Les normes soviétiques spécifient le M_f des sables comme suit :

- Sable gros $M_f > 2.5$
- Sable moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin $1.5 < M_f < 2$
- Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:

- ✓ Pour le sable de Boussaâda : $1.5 < M_f < 2$: C'est un **sable fin**.

IV.2.3. Les Caractéristiques chimiques du sable de Boussaâda :

La composition chimique du sable de dune (OUED MAITRE) est établie en mars **2005**, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au (**Tableau IV.10.**).

<i>CONSTITUANTS</i>		
<i>Elément</i>	<i>Symbole</i>	<i>Teneur en (%)</i>
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

Tableau IV.10 : Analyse chimique du sable de BOUSAADA.

Commentaire :

Le sable de **BOUSAADA** est un sable à haute teneur en silice.

IV.4. GRAVIER :

Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques du gravier utilisé dans notre étude.

◆ Gravier concassé:**IV.4.1. Origine de gravier:**

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 **Com2SIDER**).

IV.4.1.1. Classes granulaires:

Les fractions du gravier sont :

- Fraction **3/8**.
- .Fraction **8/16**

IV.4.1.2. Résistance à la compression de la roche d'origine:

La roche d'origine, est un calcaire compact de résistance à la compression, égale à **610 g** /Cm².

IV.4. 2. Caractéristiques physiques du gravier utilisé:

IV.4.2.1. Masse volumique apparente:

Mode opératoire :

- Sécher le matériau jusqu'au poids constant.
- Peser le récipient à l'état vide (M_1).
- Poser le récipient sur une table et à l'aide d'une pelle le remplir de gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient. La distance séparant le récipient de la pelle doit être aux environs de 10cm.
- Peser de nouveau le récipient plein de gravier. Soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Où :

- V: Volume du récipient.
- M_1 : Le poids du récipient à l'état vide.
- M_2 : Le poids du récipient plein de gravier.

	N° d'essai	M (g)	M_2 (g)	V (L)	ρ_{moy} (kg/L)
3/8	1	2.291	12.815	7	1.51
	2	2.291	12.945	7	
	3	2.291	12.828	7	
8/16	1	3.489	17.662	10	1.40
	2	3.489	17.452	10	
	3	3.489	17.557	10	

Tableau IV.11: Masse volumique apparente du gravier

IV.4. 2.2. Masse volumique absolue :

Mode opératoire :

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable.

	<i>N° d'essai</i>	M (g)	Ve(cm3)	V1(g)	ρ_{moy} (g/cm3)
3/8	1	300	300	110	2.65
	2	300	300	112	
	3	300	300	117	
8/16	1	300	300	115	2.63
	2	300	300	110	
	3	300	300	117	

Tableau IV.12 : Masse volumique absolue du gravier.

IV.4. 2.3. Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554

Le mode opératoire est sembléa celui effectuée pour le sable.

On calcule la porosité selon la formule :

$$P(\%) = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

L'indice des vides est donné par la formule suivante :

$$e = \frac{P}{(100 - P)}$$

<i>Fraction de gravie</i>	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
<i>3/8</i>	43.02	56.98	0.755
<i>8/16</i>	46.76	53.23	0.878

Tableau IV.13 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides.

IV.4.2.4. Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554

<i>Graviers</i>	<i>N°d'essai</i>	M_1 (g)	M_2 (g)	A (%)	A_{moy} (%)
<i>3/8</i>	<i>01</i>	700	709,06	1,29	1.29
	<i>02</i>	700	709,77	1,39	
	<i>03</i>	700	708,53	1,21	
<i>8/16</i>	<i>01</i>	700	712	1,71	1.66
	<i>02</i>	700	711	1,57	
	<i>03</i>	700	712	1,71	

Tableau IV.14 : Degré d'absorption d'eau du gravier.

IV.4.2.5. Teneur en eau :

<i>Graviers</i>	<i>N° d'essai</i>	M_1 (g)	M_2 (g)	W (%)	W_{moy} (%)
<i>3/8</i>	<i>01</i>	<i>500</i>	<i>498</i>	<i>0,40</i>	0.53
	<i>02</i>	<i>500</i>	<i>497</i>	<i>0,60</i>	
	<i>03</i>	<i>500</i>	<i>497</i>	<i>0.60</i>	
<i>8/16</i>	<i>01</i>	<i>500</i>	<i>497</i>	<i>0.60</i>	0.53
	<i>02</i>	<i>500</i>	<i>498</i>	<i>0.40</i>	
	<i>03</i>	<i>500</i>	<i>498</i>	<i>0.60</i>	

Tableau IV.15 : Teneur en eau du gravier.

IV.4.2.6. Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

a)- Fraction 3/8 (1.5Kg)

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refuspartiel (g)</i>	<i>Refuscumulé (g)</i>	<i>Refuscumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
<i>8</i>	<i>32</i>	<i>32</i>	<i>2.13</i>	<i>97.87</i>
<i>6,3</i>	<i>411</i>	<i>443</i>	<i>29.53</i>	<i>70.47</i>
<i>5</i>	<i>420</i>	<i>863</i>	<i>57.53</i>	<i>42.47</i>
<i>4</i>	<i>465</i>	<i>1328</i>	<i>88.53</i>	<i>11.47</i>
<i>3,15</i>	<i>141</i>	<i>1469</i>	<i>97.93</i>	<i>2.07</i>
<i>2,5</i>	<i>25</i>	<i>1494</i>	<i>99.6</i>	<i>0.4</i>
<i>Fond</i>	<i>6</i>	<i>1500</i>	<i>100</i>	<i>0</i>

Tableau IV.16 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

b)- Fraction 8/16 (1.5Kg)

<i>Tamis (mm)</i>	<i>Refuspartiel (g)</i>	<i>Refuscumulé (g)</i>	<i>Refuscumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
16	43	43	2.86	97.14
12,5	359	402	26.8	73.2
10	715	1117	74.46	25.54
8	326	1443	96.2	3.8
6,3	54	1497	99.86	0.14
5	1	1498	99.86	0.14
Fond	2	1500	100	0

Tableau IV.17 : analyse granulométrique du gravier 8/16.

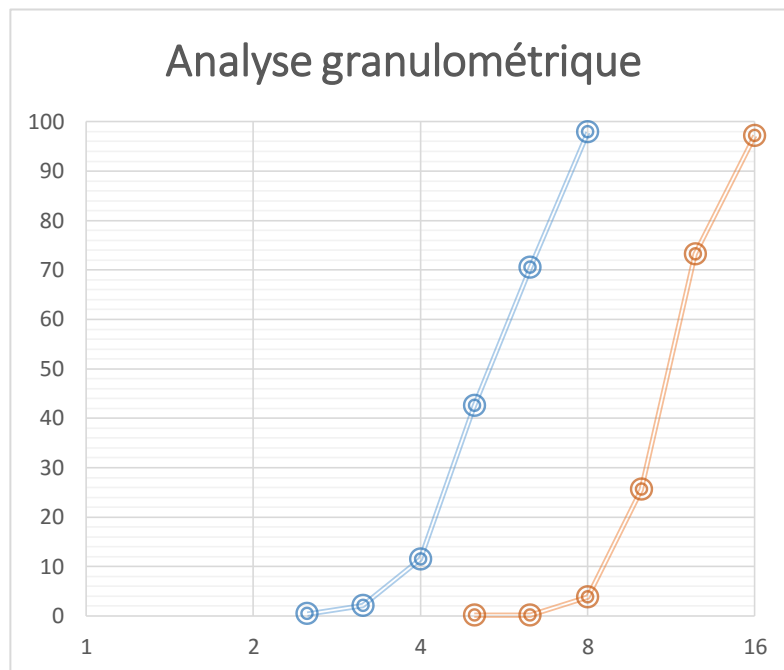


Figure IV.3 : La courbe granulométrique des graviers concassés (3/8-8/16).

IV.4.3. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés:

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

IV.4.3.1. Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles L_A , et sur le principe de l'effritement par abrasion.

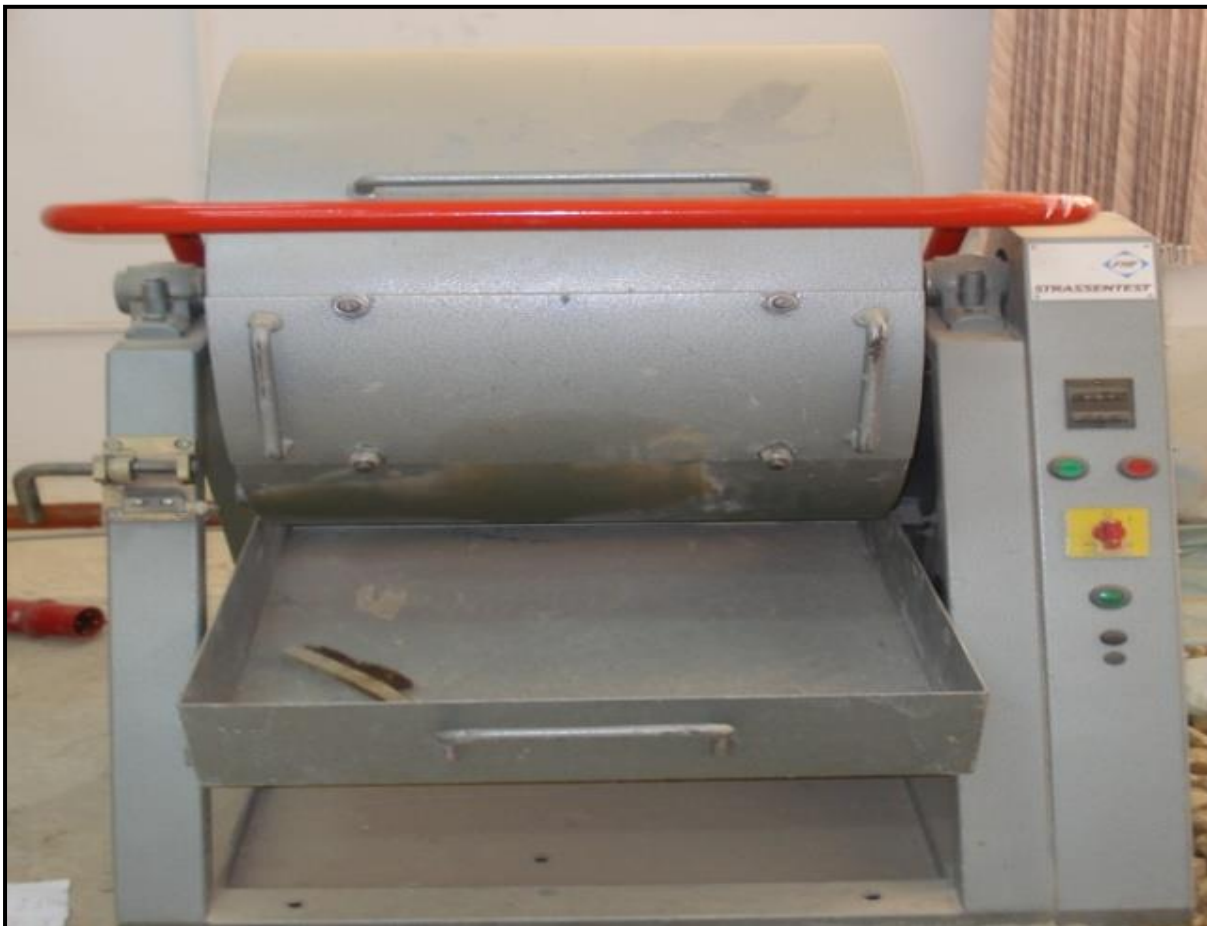


Figure IV.4 : Appareil de l'essai Los Angeles.

Principe de l'essai:

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à **1.6 mm**, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre **4** et **50 mm**) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en **500** rotations.

Formulation:

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à **1.6 mm** produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles (L_A): $L_A = (m/M) \cdot 100$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

<i>Fraction de Gravier</i>	<i>Nombre de boules</i>	M (Kg)	m (Kg)	Coef L_A %
Gravier 3/8	7	5	1.054	21.08%
Gravier 8/16	11	5	0.859	17.18%

Tableau IV.18. : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Classification : Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Coefficient L_A	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
> 50	Trèstendre

Tableau IV.19 : Classification des roche en fonction du coefficient LA

Commentaries :

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier dure (LA=21 %) / (LA entre 20 à 25),
- Le gravier (8/16) :c'est un gravier très dure (LA=17 %) / (LA < 20),

IV.4.4. Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrière COSIDER est établie en mars **2004**, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au (**Tableau IV.20**). [15]

ELEMENT	SiO_2	Al_2O_3	CAO	FE_2O_3	MGO	SO_3	K_2O	NA_2O
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

Tableau IV.20 : Analyse chimique de la pierre concassée.

IV.5. CIMENT :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment Portland à haute résistance aux sulfates CEM I 42,5 HRS1

IV.5.1. Caractéristiques du ciment CEM I 42,5 HRS1 :**IV.5.1.1. DESCRIPTIONS DU PRODUIT :**

Ciment Portland à haute résistance au sulfates conforme à NT 47.01 et NT 47.26, appartenant à la Classe de résistance 42,5 et présentant une résistance à court terme ordinaire

Constituants principaux :

Clinker : 95 – 100%

Calcaire (L) : 0 – 5%

EMPLOI

- Travaux en eaux de mer et eaux séléniteuses
- Ouvrages à taux de travail élevé n'exigeant pas des caractéristiques
- InitialesParticulièrement fortes
- Préfabrication et bétonmanufacturé
- Béton précontraint et coulis d'injection de gaine précontraint
- Béton étuvé avec un excellent comportement en cycle long
- Sans réduction sensible des résistances terminales

IV.5.1.2 EXIGENCE NORMATIVES NT 47.01 ET NT 47.26:

Exigences Chimiques	Exigences Physiques	Exigences Mécaniques
Perte au feu $\leq 3,0\%$	Temps de début de prise ≥ 60 min	Résistance à court terme (2 jours) $\geq 10,0$ MPa
Sulfate (SO ₃) $\leq 3,5\%$	Stabilité (expansion) ≤ 5 mm	Résistance courante (28 jours) $\geq 42,5$ MPa et $\leq 62,5$ MPa
Résidu insoluble $\leq 0,75\%$		
Oxyde de magnésium (MgO) $\leq 4,0\%$		
Tri calcium aluminate (C3A) $\leq 3\%$		
C4AF + 2*C3A $\leq 20\%$		
Chlorure $\leq 0,10\%$		

Tableau IV .21 . : Caractéristiques du HRS1.

Surface spécifique : 3670 cm²/g

Masse volumique absolue : 3.015 g/cm³

Masse volumique apparente : 0.997 g/cm³

Analyse chimique:

Composant de CRS	%
<i>SiO₂</i>	21.30
<i>CaO</i>	62.85
<i>Al₂O₃</i>	3.98
<i>Na₂O</i>	0.36
<i>MgO</i>	1.69
<i>K₂O</i>	0.54
<i>SO₃</i>	2.23
<i>Fe₂O₃</i>	6.14

Tableau IV .22 : Composition chimique de Ciment (CRS)

IV.6. POUDRE DE VERRE :

Obtenue par broyage des bouteilles et vitres brisés, c'est un verre incolore (blanc).



Figure.IV.5. poudre de verre

IV.6.1 Composition chimique de la poudre de verre

Composantpoudre de verre	%
<i>SiO₂</i>	70.26
<i>CaO</i>	8.92
<i>Al₂O₃</i>	0.85
<i>Na₂O</i>	5
<i>MgO</i>	1.71
<i>K₂O</i>	0.58
<i>Fe₂O₃</i>	2.03

Tableau IV .23 : Composition chimique de la poudre de verre

IV.6.2 Caractéristique physique

Surface spécifique : $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$

Masse volumique absolue: 2.44 g/cm^3

Masse volumique apparente : 1.08 g/cm^3

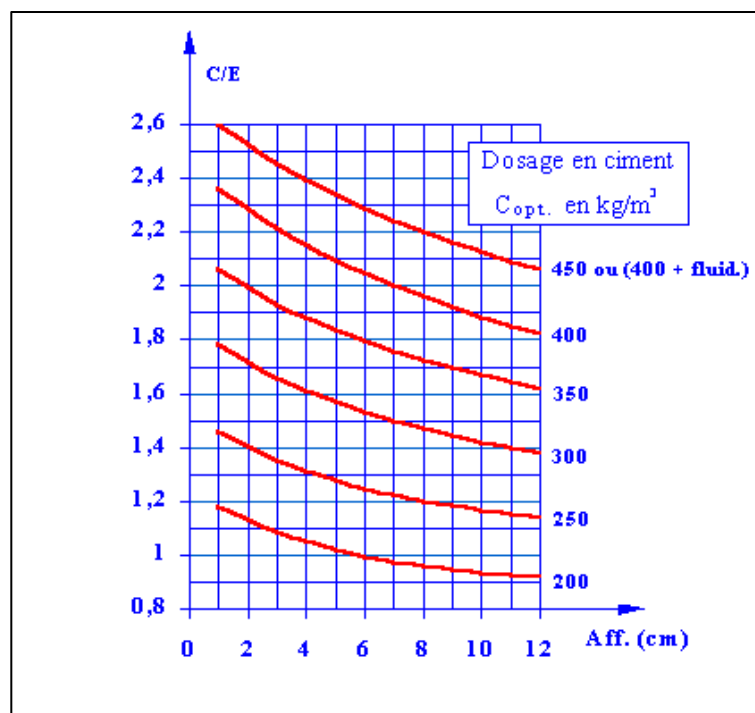
IV.7 Détermination de la composition du béton

Dans notre travail nous utiliserons la méthode pratique de **DREUX-GORISSE**

a) Données de base

Dosage en Ciment = 350 kg/m^3

Affaissement = 7



mFigure.IV.6. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E [11]

L'abaque (Figure IV.6) donne pour Aff=7 et C=350 \longrightarrow C/E = 1.73

b) Dosage en eau

$$E = 350 / 1.73 = 202$$

Donc $E = 202.31$

c) Dosage des granulats

Traçons la courbe granulaire de référence OAB (Figure.IV.5)

$D_{max} = 16\text{mm}$ le point de brisure A de la courbe granulaire de référence est à l'abscisse :

$$D/2 = 8$$

Son ordonnée est : $Y = 50 - \sqrt{D+K}$

$D = 16\text{ mm}$, $K = 0$ (tableau IV.23)

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Tableau IV .24 .valeur du terme correcteur (k) [11]

Supposons que pour réaliser ce béton, nous disposions des trois granulats S, G1 et G2 dont les courbes granulométriques ont été représentées sur la Figure (): un sable 0/5 et deux graviers 3/8 et 8/16 ; traçons les lignes de partage joignant les points à 95% et 5%, des courbes successives . Les pourcentages en volume absolu sont pour chacun des granulats :

Sable 0/5.....37%

Gravier G1 3/8.....9%

Gravier G2 8/16.....54%

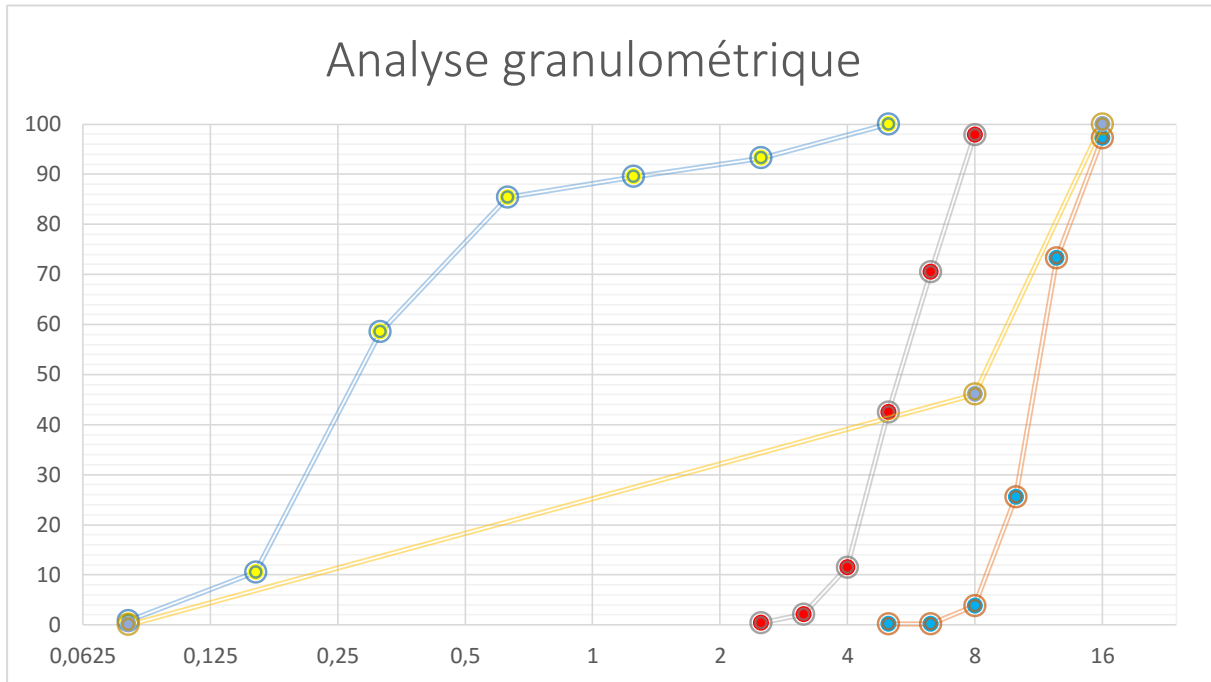


Figure.IV.7.La courbe granulométrique de (sable, gravier 3/8, gravier 8/16)

Si l'on admet un coefficient de compacité $\gamma = 0.815$

A déduire volume absolu du ciment $350/3.1 = 112.9$

Volume absolu des granulats $805 - 112.9 = 692.1$

Les masses de chacun composante dans un mètre cube seront

Sable 0/5 665.80 kg/m^3

Gravier 3/8 161.95 kg/m^3

Gravier 8/16 971.70 kg/m^3

Ciment 350 kg/m^3

Eau 202.31 kg/m^3

Les mélanges préparés

On a effectué 2 compositions de béton

TComposition de référence (béton témoin)

10%V...composition représente du béton avec 10% de poudre de verre (addition au ciment)

Composition	Ciment	Poudre de verre
T	100%	0%
10%V	90%	10%

Tableau IV.25.Représentation des compositions

IV-8- 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 10x10x10cm et des moules prismatiques de dimensions 7x7x28cm, 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-9- Les essais sur les éprouvettes**IV-9-1-Essais 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 : 300°C, 600°C, 800°C. Chaque cycle de chauffage- refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante.



Figure.IV.8.Disposition des éprouvettes dans les fours

IV-9-2- 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.

IV-9-3- porosité

Les pores jouent un rôle important pour estimer la qualité du béton.

Pour évaluer la porosité, nous allons poursuivre les étapes suivantes :

- Sécher les éprouvettes dans une étuve de 100 à 110° pendant 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante.
- Immersion les éprouvettes dans l'eau pendant 24 heures.
- Chauffer l'échantillon jusqu'à ébullition pendant 5 heures pour effectuer cette opération on utilise un réchaud à gaz butane, les éprouvettes sont réalisées pour être pesées à l'air et pesée hydraulique (dans l'eau).

A :Le poids de l'échantillon après étuvage.

C : le poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'air)

D : le poids de l'échantillon après ébullition (pesée à l'eau)

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



Figure.IV.9. Essai de porosité



Figure.IV.9. échantillons utilisée pour la mesure de la porosité

IV-9-4 Essai de compression
(voire chapitre I .page 13).



Figure.IV.10. éprouvette mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en compression

IV-9-5- Essai de traction

(Voire chapitre I page 14)



Figure.IV.11. Dispositif d'essai de traction par flexion

CHAPTER V

CHAPITRE V: Résultats et discussion

V -1- Introduction :

Le béton est un matériau composite, formé par le mélange de ciment, sable, gravillon, d'eau et éventuellement des ajouts. En raison de son hétérogénéité, le béton s'avère un matériau complexe, il subit d

Es transformations physico-chimiques et des changements des propriétés mécaniques lorsqu'il est soumis à une élévation de température.

Soumis à un incendie, le béton se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus de dégradation conduit à la dégradation des propriétés physique, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure.

Plusieurs études de recherche ont été réalisées ces dernières années sur l'analyse, la compréhension et la modélisation de l'endommagement thermique du béton.

Les bétons renfermant des additions minérales présentent des propriétés mécaniques largement supérieures à celles d'un béton sans addition exposés aux températures élevées.

Les cendres volantes, le laitier du haut fourneau ont marqué leur effet favorable comme addition au ciment destiné à la fabrication des bétons qui doivent supporter des températures élevées.

Le but de notre travail est de caractériser la poudre de verre (ajout alternatif) et d'étudier l'effet des températures élevées sur le comportement physique et mécanique des bétons renfermant cette dernière.

Deux types de béton sont étudiés :

- un béton ordinaire (témoin) et un béton à base de la poudre de verre comme addition de 10%,

L'influence de l'âge de l'éprouvette au moment de son exposition à des températures élevées (300-600-800 °C), sur les caractéristiques mécaniques des bétons sera traitée.

L'âge de l'éprouvette choisit est (3j -14j - 28j et 45j) de durcissement dans un milieu humide

Avant d'étudier l'effet de la haute température sur les bétons on présente leurs propriétés à l'état frais :

V -2- Propriétés du béton à l'état frais :**V-2-1- Essai d'affaissement :**

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Béton	T	10%V
E/C	0.57	0.57
AF	7	7
Réduction d'eau (%)	2.96	1.18

Tableau V.1: les valeurs d'affaissement, rapport E/C et la réduction d'eau

Pour un même affaissement de 7 cm, le béton à base de le poudre de verre à celle d'un béton témoin à base de C R S pour le mouillage de ces grains.

V -2-2- la Masse volumique :

La masse volumique du béton frais a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12350 – 6.

Les résultats obtenus sont représentées sur le tableau suivant :

N°:d'essais	Types du béton					
	BT			BV 10%		
	M	P	Moyenne	M	ρ	Moyenne
1	2663	2,663	2.57	2460	2,46	2.43
2	2581	2,581		2440	2,44	
3	2513	2,513		2397	2,397	

Tableau V.2: les valeurs de la masse volumique à l'état frais

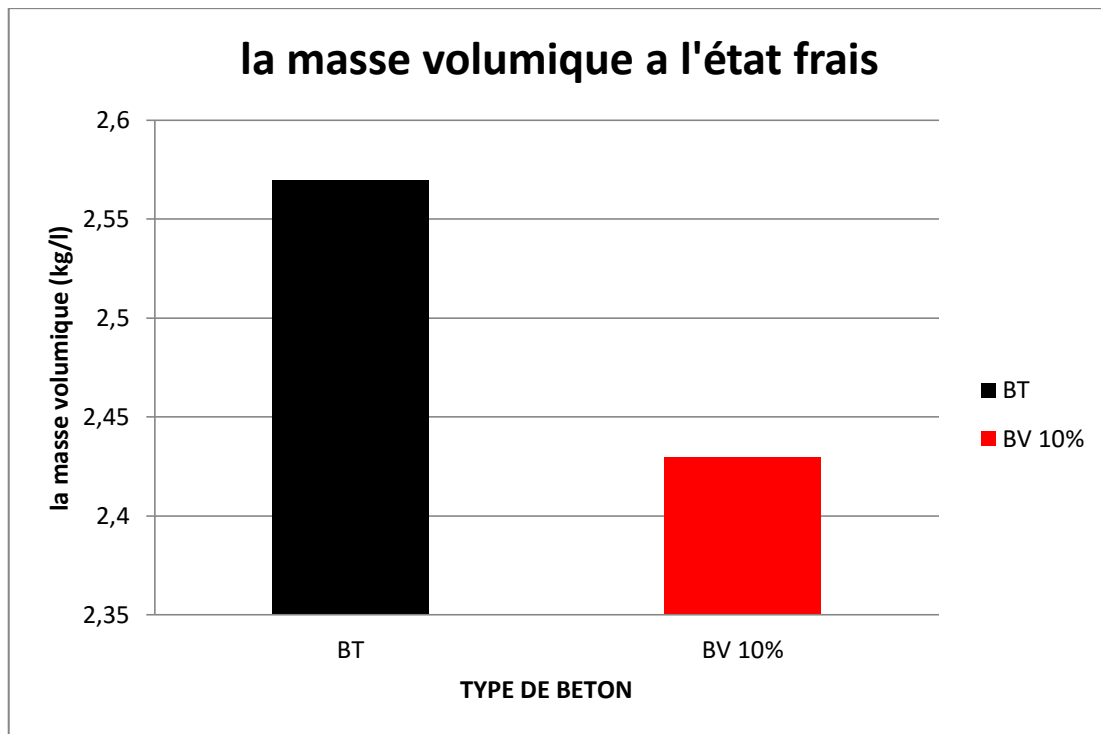


Figure V.1. Évolution de la masse volumique à l'état frais des différents bétons

On remarqué que la masse volumique à l'état frais du béton témoin est supérieure à la masse volumique du béton avec poudre de verre, ce qui peut être lié à la masse volumique absolue de la poudre de verre inférieure à celle de C R S.

V -3- propriétés du béton à l'état durci :

V-3-1- la Masse volumique :

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivants :

N°:d'essais	Types du béton					
	BT			BV 10%		
	M	ρ	Moyenne	M	ρ	Moyenne
1	2569	2,569	2.45	2384	2,384	2.237
2	2487	2,487		2380	2,380	
3	2442	2,442		2343	2,343	

Tableau V.3: les valeurs de la masse volumique à l'état durci

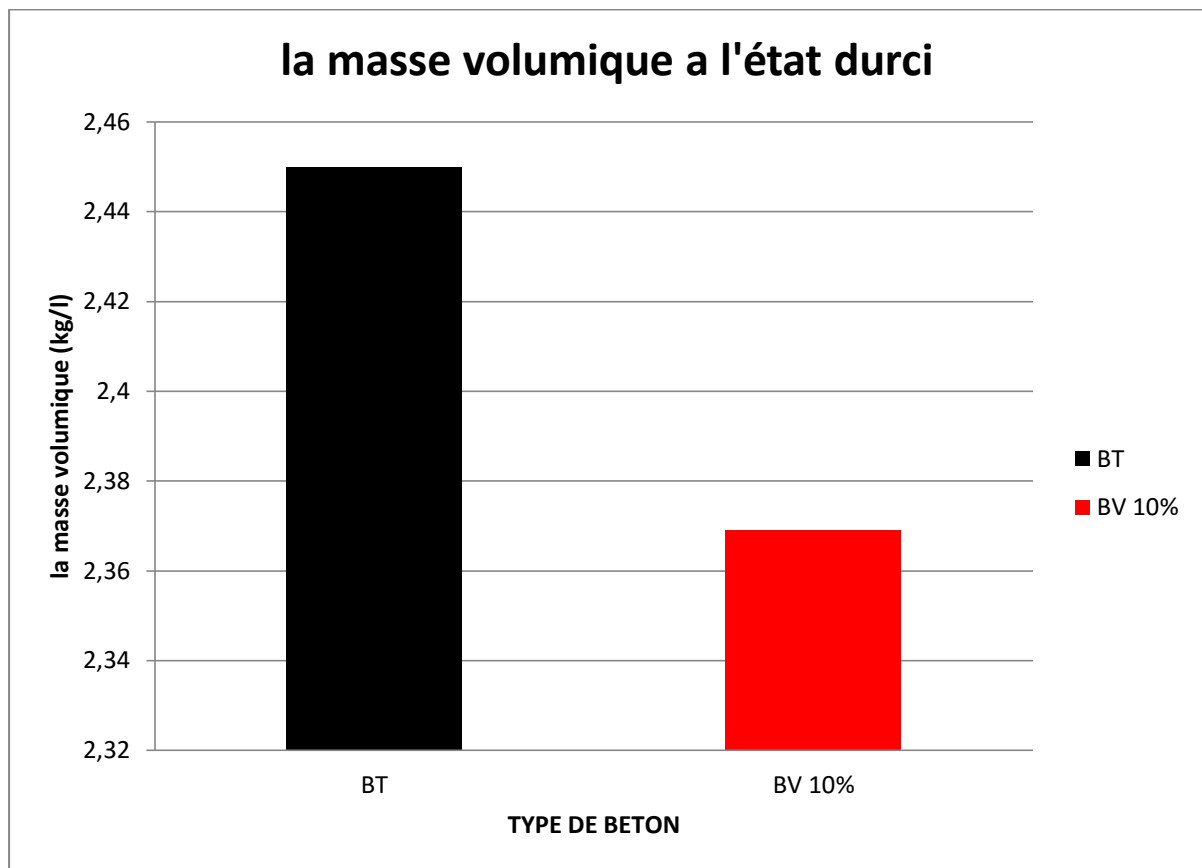


Figure V.2. Évolution de la masse volumique à l'état durci des différents bétons

Après durcissement la masse volumique des deux types de béton est presque identique

V-3-2- Perte de masse :

La masse du béton subit une perte de poids au cours de chauffage.

V-3-2-1- l'âge de l'éprouvette 3jours :

Les éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 jours, sont retirées de l'eau pendant 2 jours afin d'éliminer l'eau excédent.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

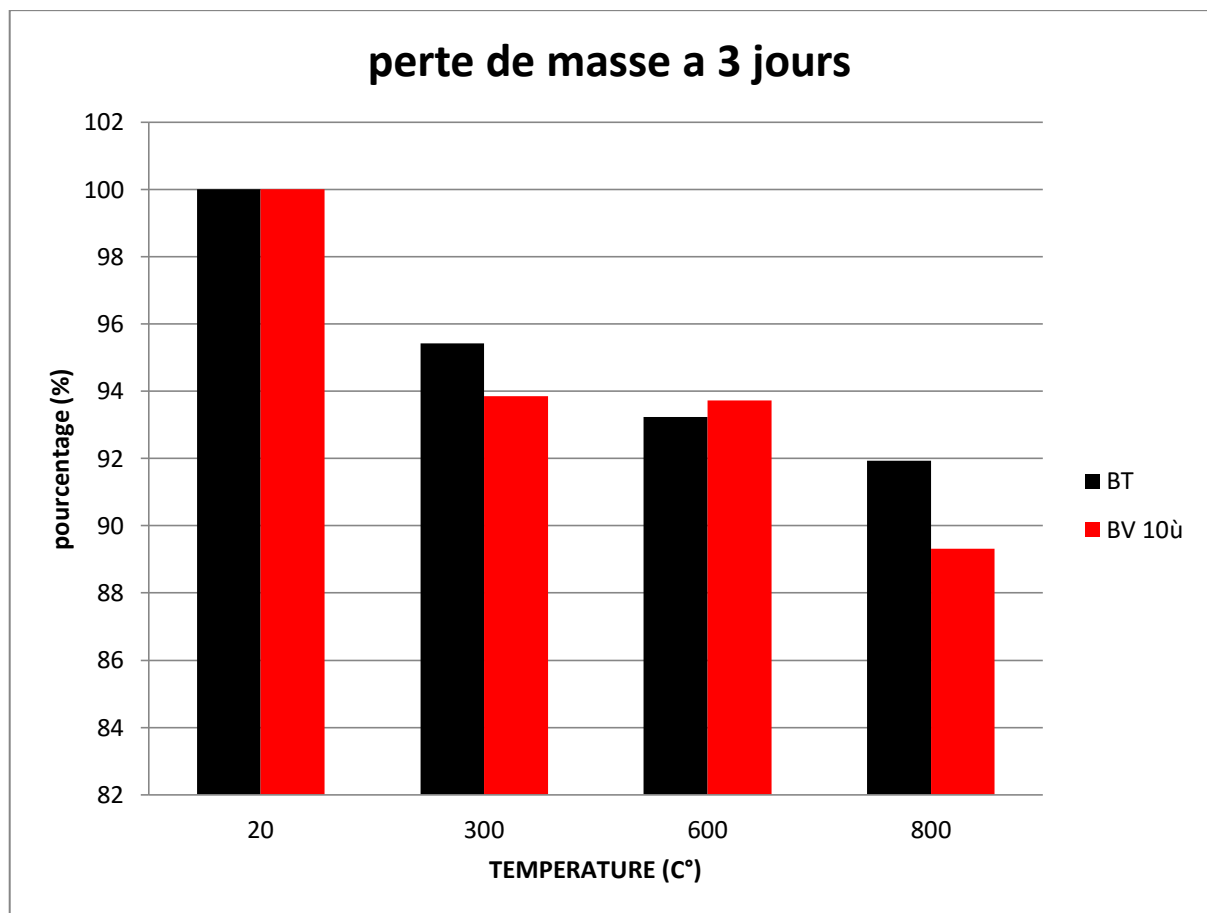


Figure V.3. Évolution de la perte de masse des bétons à 3 jours en fonction de la température.

La perte de masse des éprouvettes âgées de 3 jours augmentent avec l'augmentation de la température, les bétons à base de la poudre de verre sont plus vulnérables en comparaison avec le béton témoin.

Cette perte de masse est due d'abord à l'évaporation de l'eau ensuite de hydratation progressive des produits d'hydratation (C.S.H).elle augmente brusquement de (5%) vers 300°C et continue son augmentation.

V-3-2-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours:

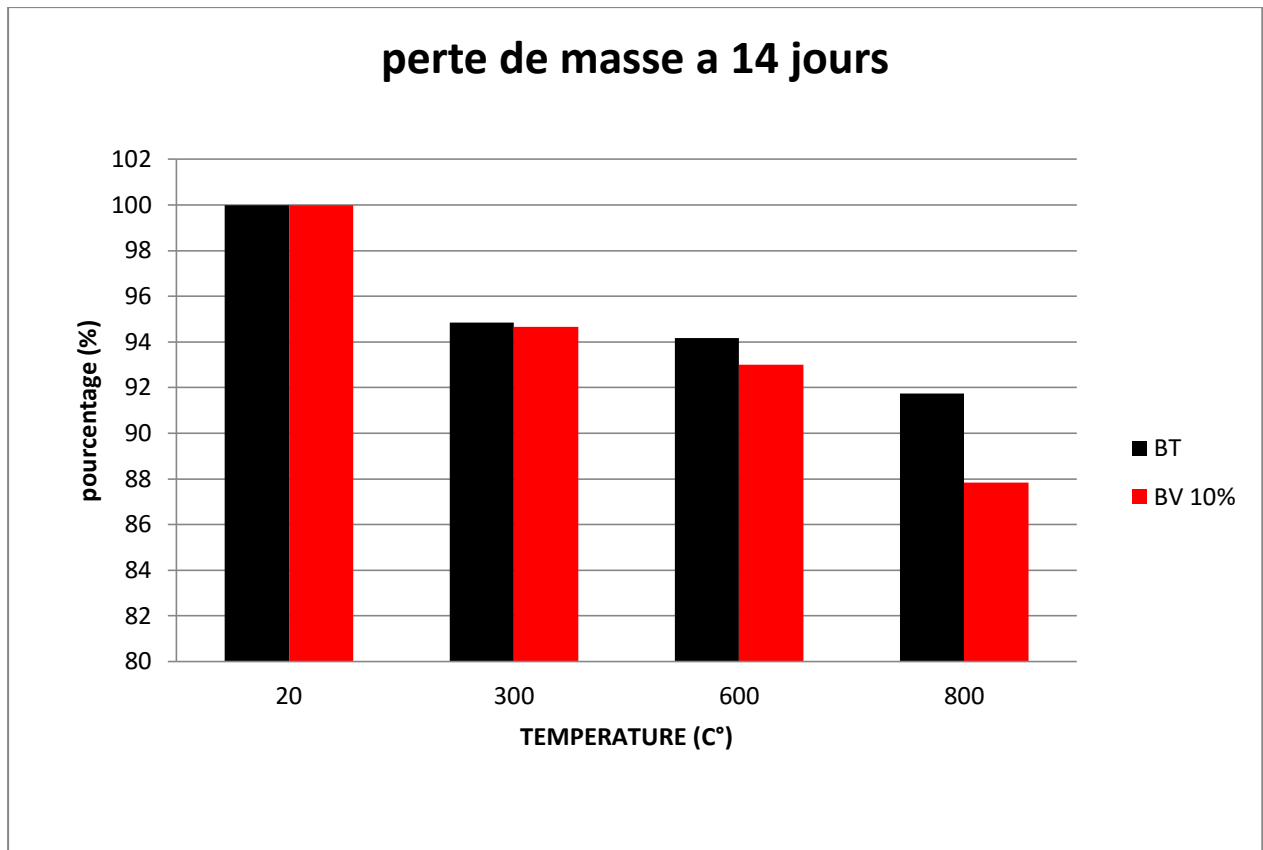


Figure V.4. Évolution de la perte de masse des bétons a 14 jours en fonction de la température

Après 14 jours de durcissement, la perte de masse dans les deux bétons est presque équivalente à 300°C et à 600°C, vers 800°C le béton à base de la poudre de verre perd environ 10% de sa masse initiale.

Le taux de diminution ne change pas en comparaison avec celui des éprouvettes testées à 3 jours.

V-3-2-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours :

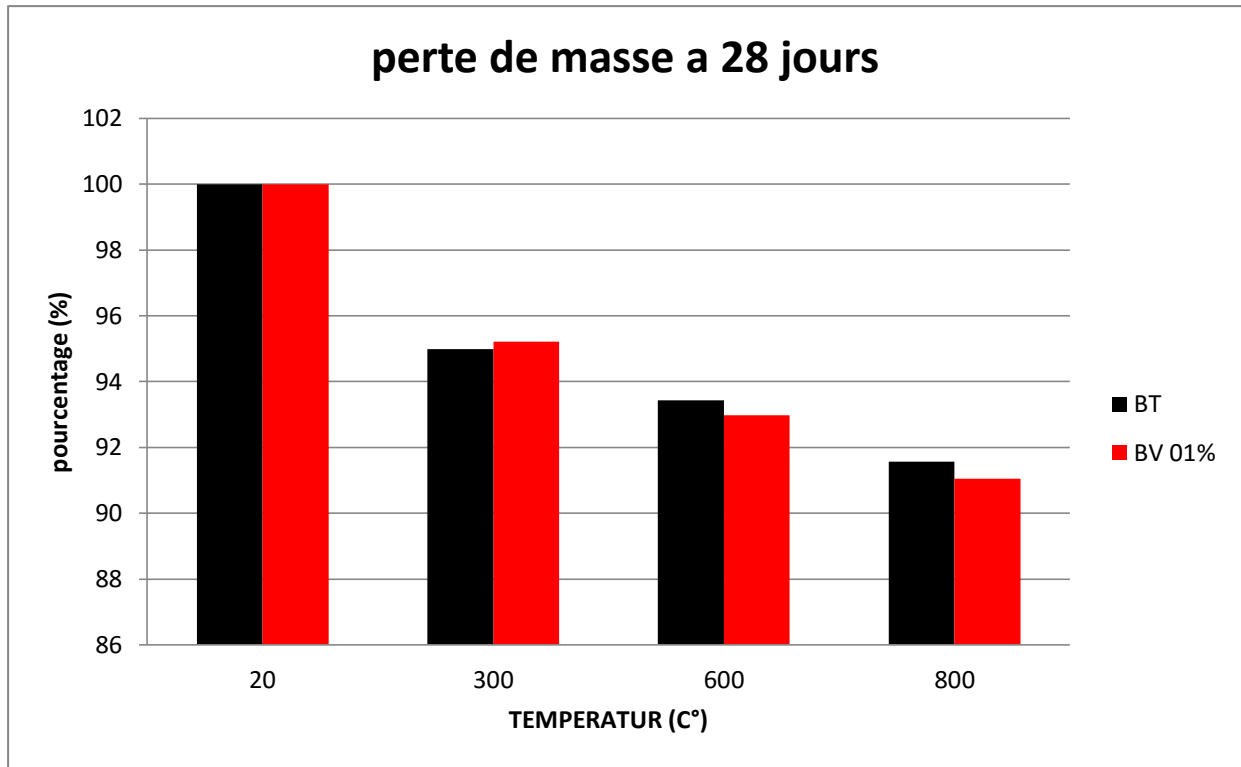


Figure V.5. Évolution de la perte de masse des bétons à 28 jours en fonction de la température

Après 28 jours de durcissement le béton acquiert ses performances mécaniques, le milieu de conservation (humide) participe à l'amélioration de la compacité, la porosité du béton est par suite sa résistance.

La perte de masse, est de l'ordre de 5% à 300°C elle augmente progressivement avec l'augmentation de la température.

V-3-2-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours:

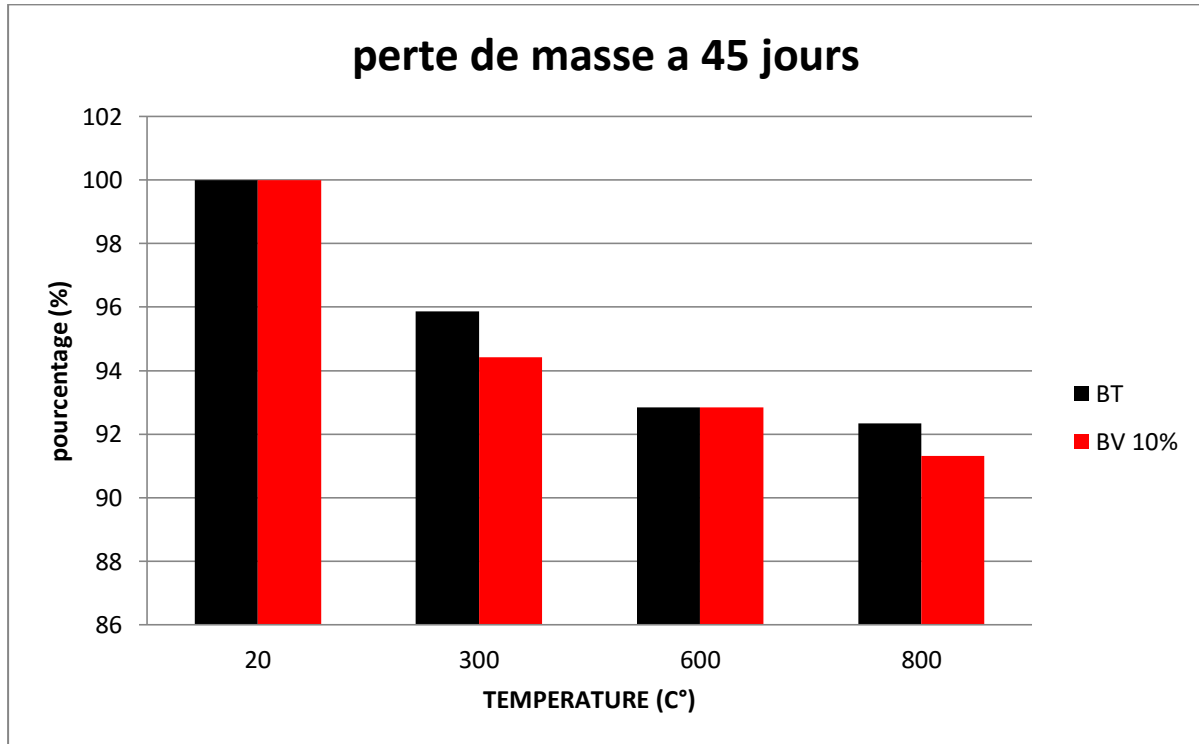


Figure V.6. Évolution de la perte de masse des bétons à 45 jours en fonction de la température

Après 45 jours de durcissement, la perte de masse est inférieure à différentes températures en comparaison avec les autres âges.

à 300°C, c'est la fin de la migration d'eau évaporable, qui reste inférieure la quantité d'eau aux âge de 3 jours et 14 jours, parce que une partie de cette dernière a réagit pour formé les produits d'hydratation.

A partir des figures précédentes, la perte de masse semble n'être pas affectée par l'âge de l'éprouvette jusque à 28 jours. Au-delà de 28 jours le taux de la de perte diminue aux différents températures.

V-3-3- la résistance a la compression :

Les éprouvettes exposées aux différentes températures sont écrasées par compression après refroidissement (résistance résiduelle) les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

V-3-3-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours :

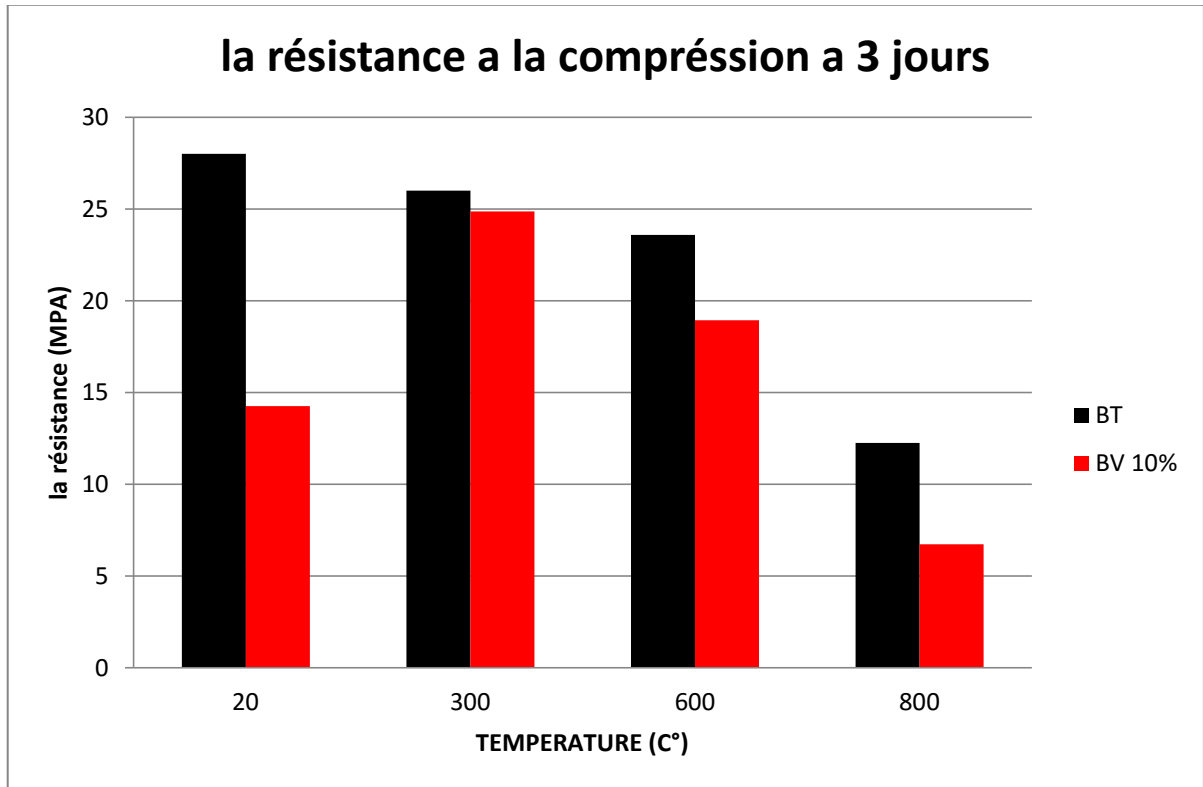


Figure V.7. Évolution de la résistance en compression des bétons à 3 jours en fonction de la température

A partir de cette figure, on remarque que l'augmentation de la température affecte la résistance en compression des bétons soit ordinaire ou à base de la poudre de verre.

La résistance du béton à base de 10% de la poudre de verre est inférieure à celle du béton témoin à base du CRS, cette diminution de résistance est liée aux réactions chimiques ralenties entre la poudre de verre et constituants du clinker pour former les produits C.S.H (par la fixation de la portlandite suite à la réaction pouzzolanique).

Cette résistance va s'améliorer en fonction de l'âge de l'éprouvette.

L'augmentation de la température à 300°C est favorable au béton de verre (il s'agit d'une accélération d'hydratation) à 600° C et 800°C la résistance chute considérablement (il perd 95% de sa résistance) le béton ordinaire perd progressivement sa résistance.

V-3-3-2- l'âge de l'éprouvette 14jours :

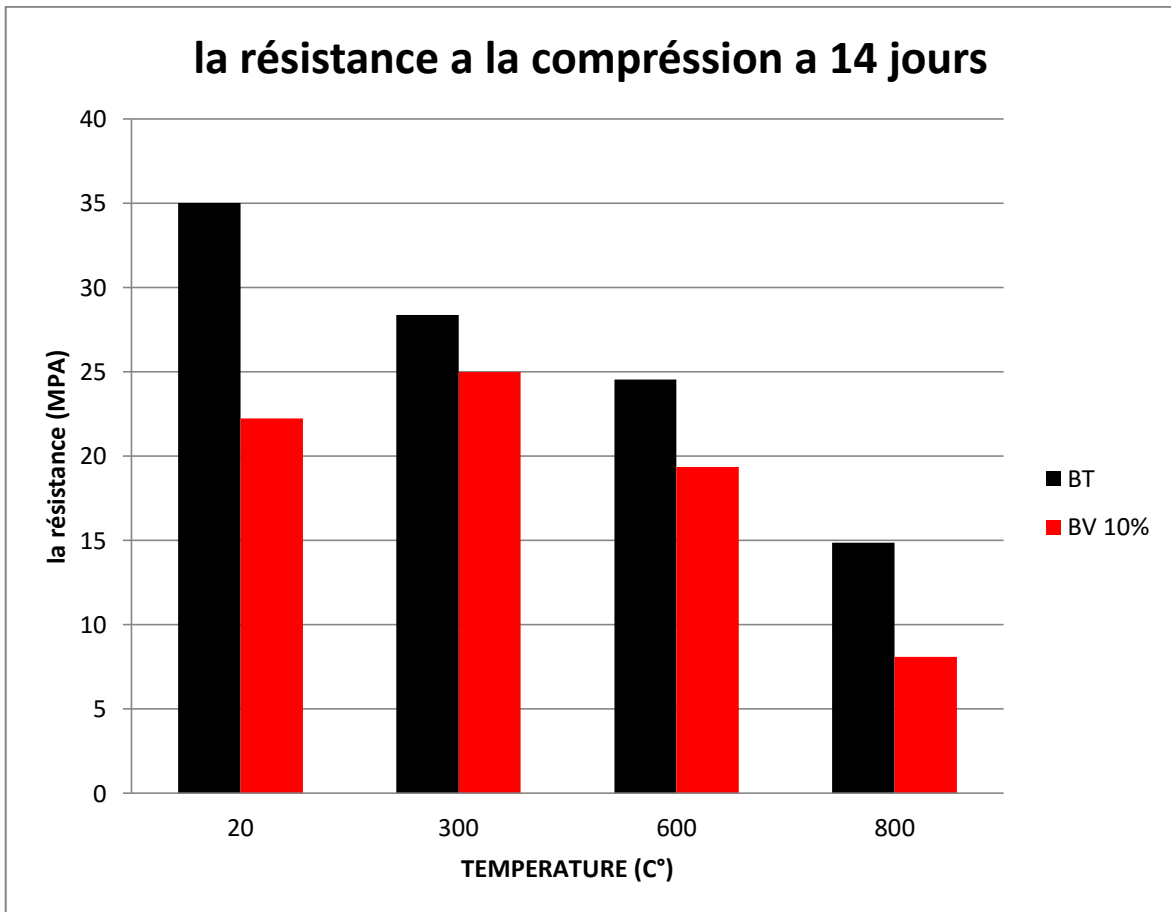


Figure V.8. Évolution de la résistance en compression des bétons à 14 jours en fonction de la température

A l'âge de 14 jours, le béton à base de la poudre de verre acquiert une certaine résistance d'où l'influence de températures semble avoir moins d'effet.

V-3-3-3- l'âge de l'éprouvette 28jours :

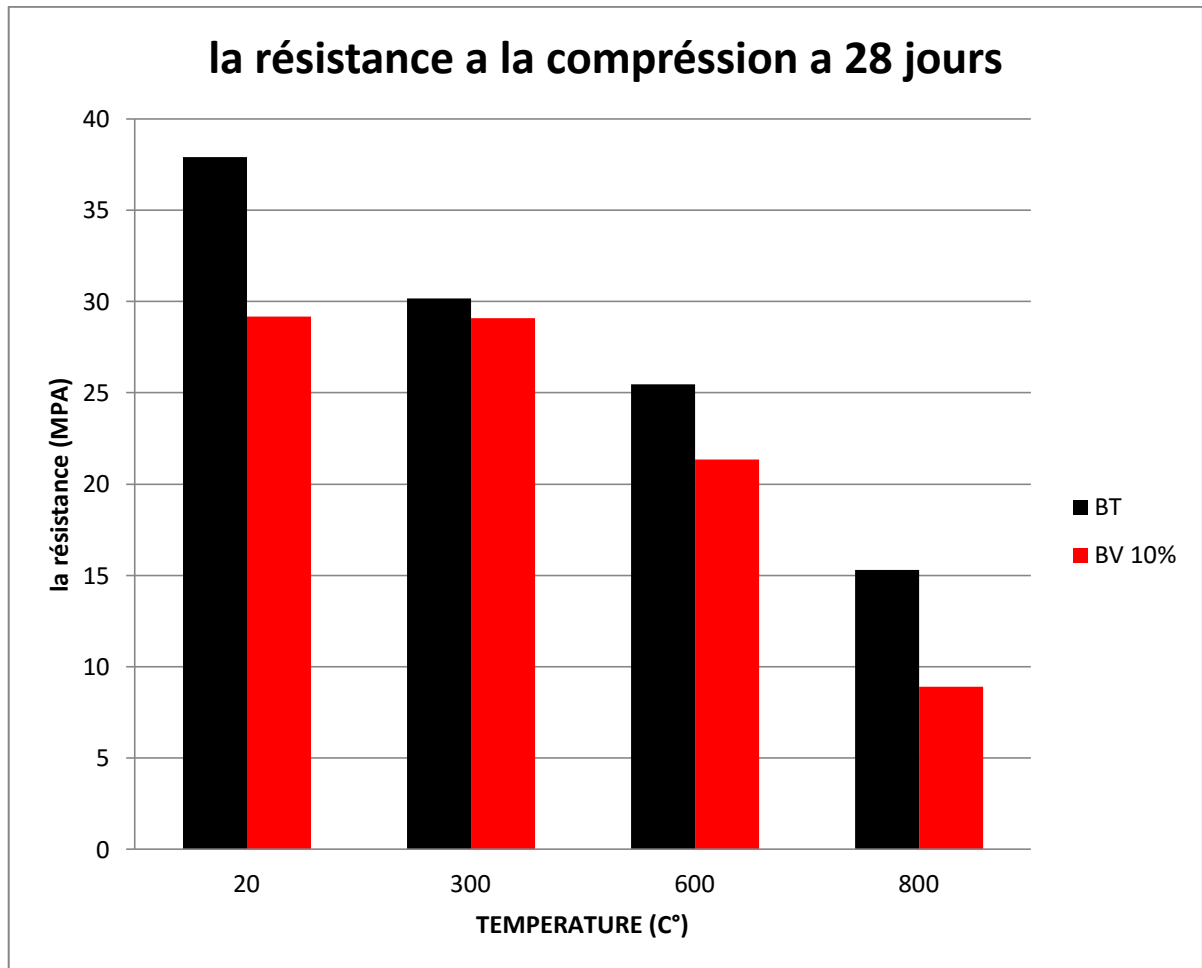


Figure V.9. Évolution de la résistance en compression des bétons à 28 jours en fonction de la température

A près 28 jours de durcissement les ont presque la même allure que celles notées à 14 jours de durcissement.

V-3-3-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours :

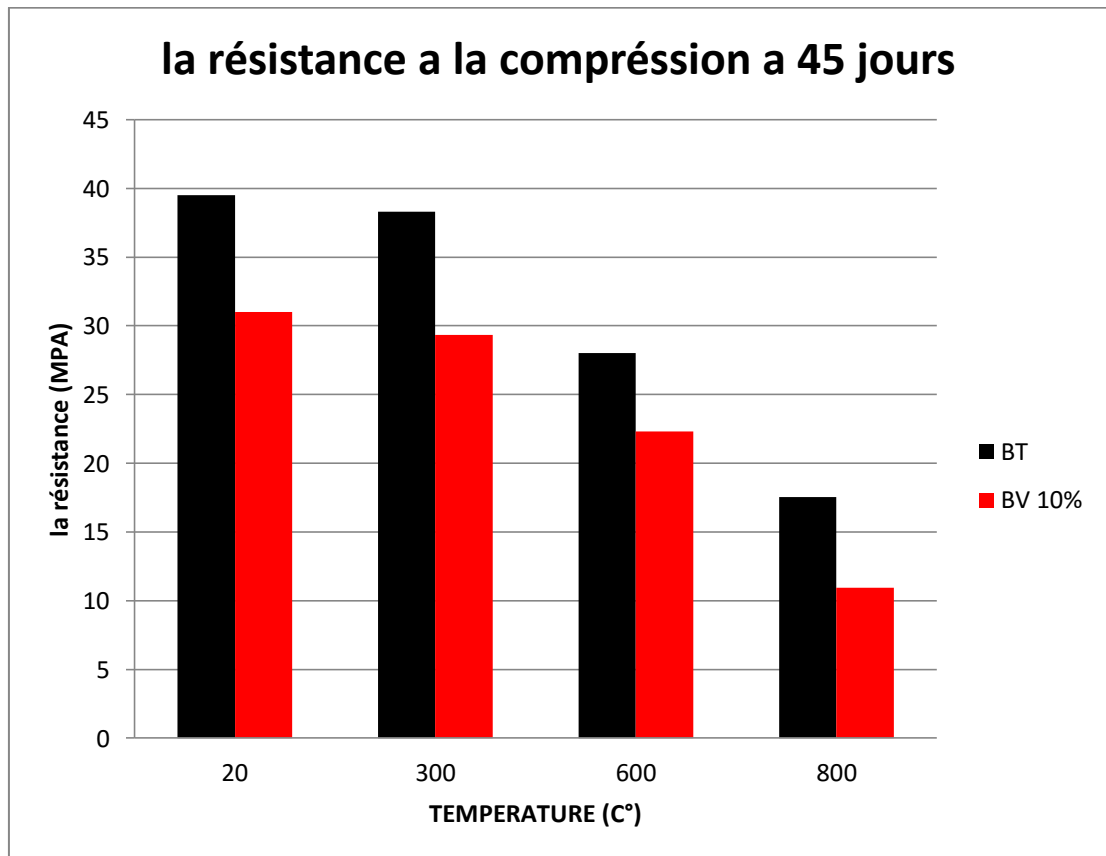


Figure V.10. Évolution de la résistance en compression a 45 jours des bétons en fonction de la température

Enfin après 45 jours de durcissement les bétons semblent être plus résistants ils gardent la même résistance à 300°C qu'un béton témoin ce qui a été confirmé par plusieurs études.

A 600°C ils commencent à perdre le 1/3 de leurs résistance et enfin le 800°C ils perdent jusqu'à 90% à cause de l'endommagement du matériau.

Les résultats de la résistance en compression obtenus précédemment sont regroupés sur les figures suivant :

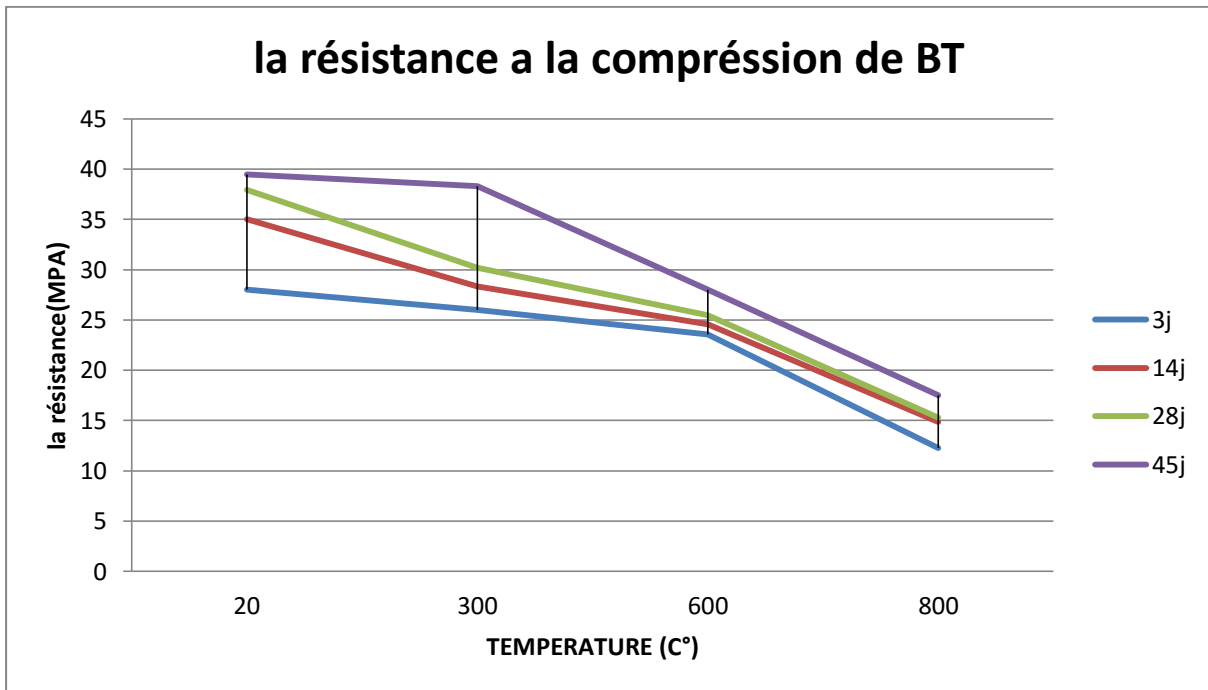


Figure V.11. Évolution de la résistance en compression par les jours des bétons témoin en fonction de la température

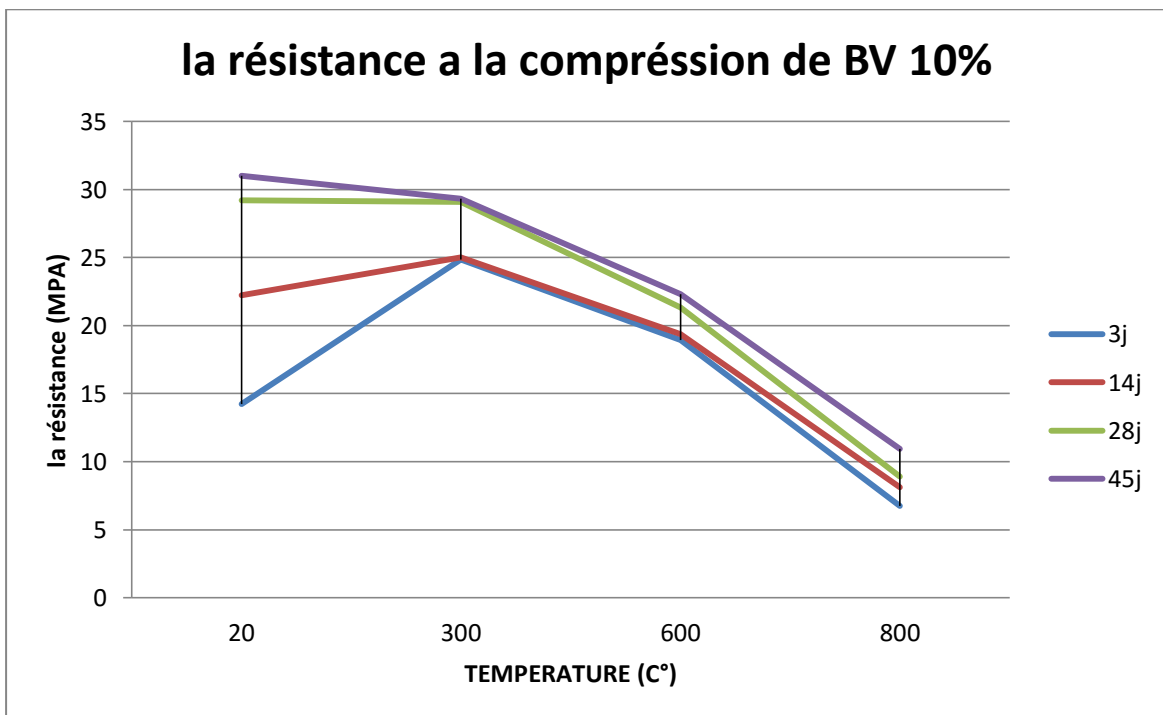


Figure V.12. Évolution de la résistance en compression par les jours des bétons (10% de poudre de verre) en fonction de la température

A partir des figures précédentes on peut conclure que l'âge influence la résistance en compression surtout à l'âge précoce à cause de la fragilité de la microstructure du béton à cet âge et en particulier le béton à base de la poudre de verre, à 14 jours est à 28 jours la même dégradation est observée. Par contre après 45 jours le béton atteint des résistances appréciables dont le taux de diminution aux différentes températures est inférieure au cas précédents.

La dégradation du béton à 600°C est attribuée à la destruction de la matrice cimentaire est ; les granulats causant à fissuration du béton (dégradation des C.S H est la décomposition de la portlandité).

V-3-4- la résistance a la traction :

Les éprouvettes sont testée à la traction par flexion, les résultats sont représentés sur les figures suivantes :

V-3-4-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours :

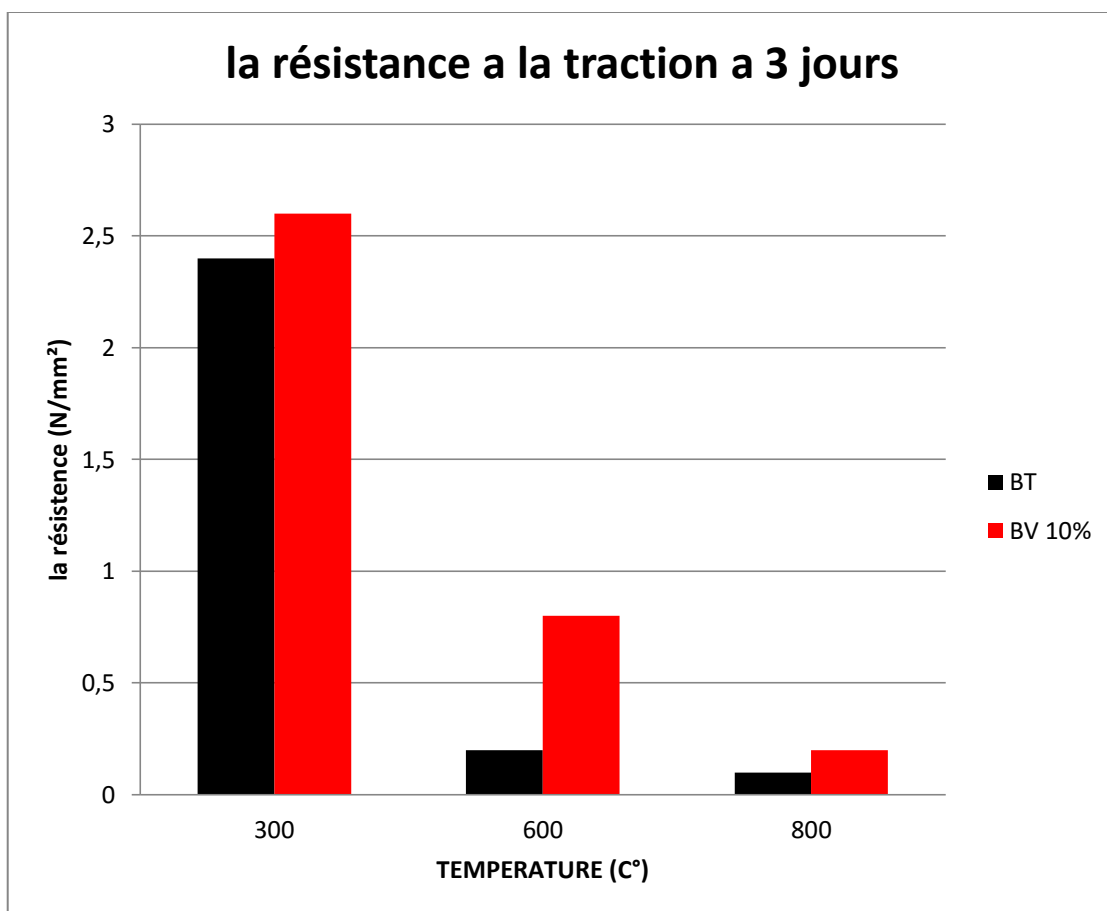


Figure V.13. Évolution de la résistance en traction des bétons à 3 jours en fonction de la température

V-3-4-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours :

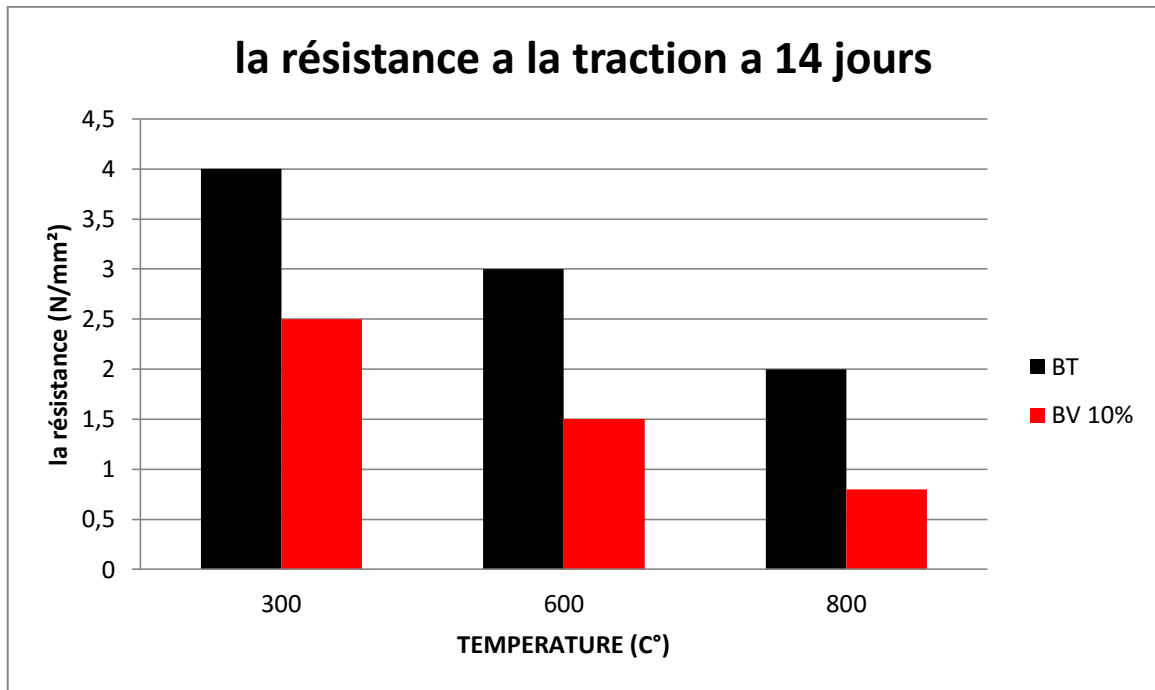


Figure V.14. Évolution de la résistance en traction des bétons à 14 jours en fonction de la température

V-3-4-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours :

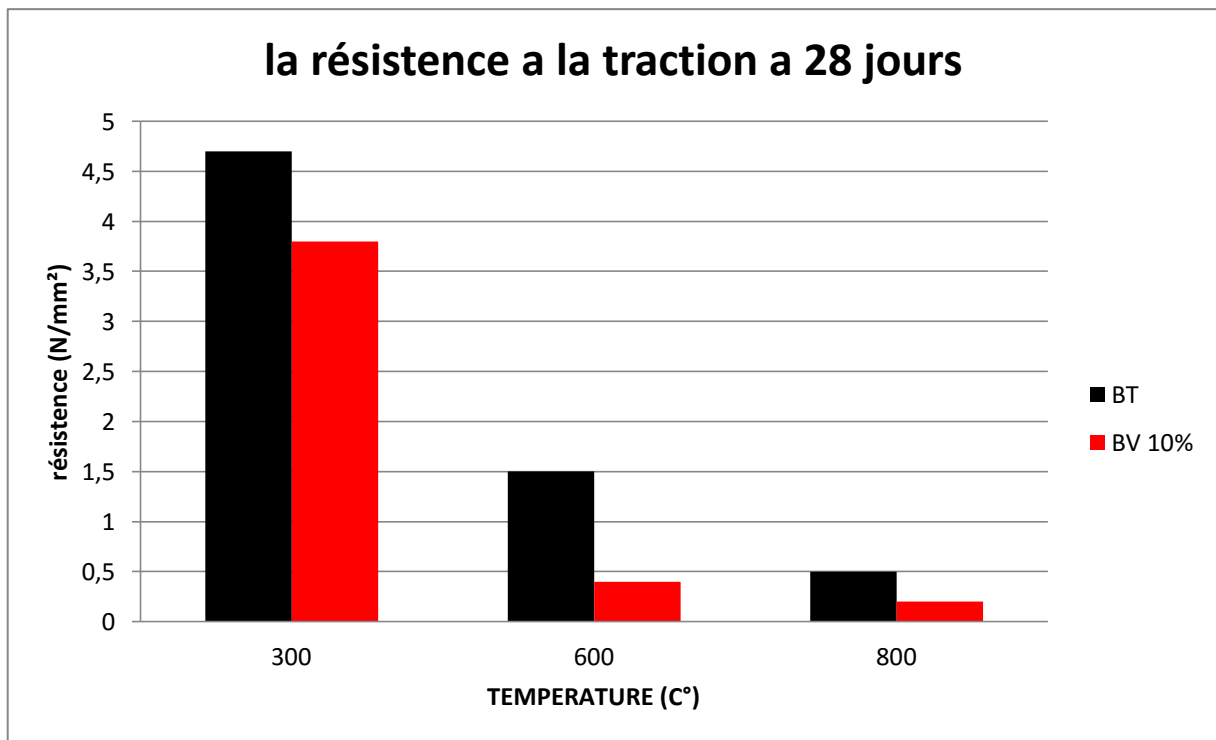


Figure V.15. Évolution de la résistance en traction des bétons à 28 jours en fonction de la température

V-3-4-4- l'âge de l'éprouvette a 45 jours :

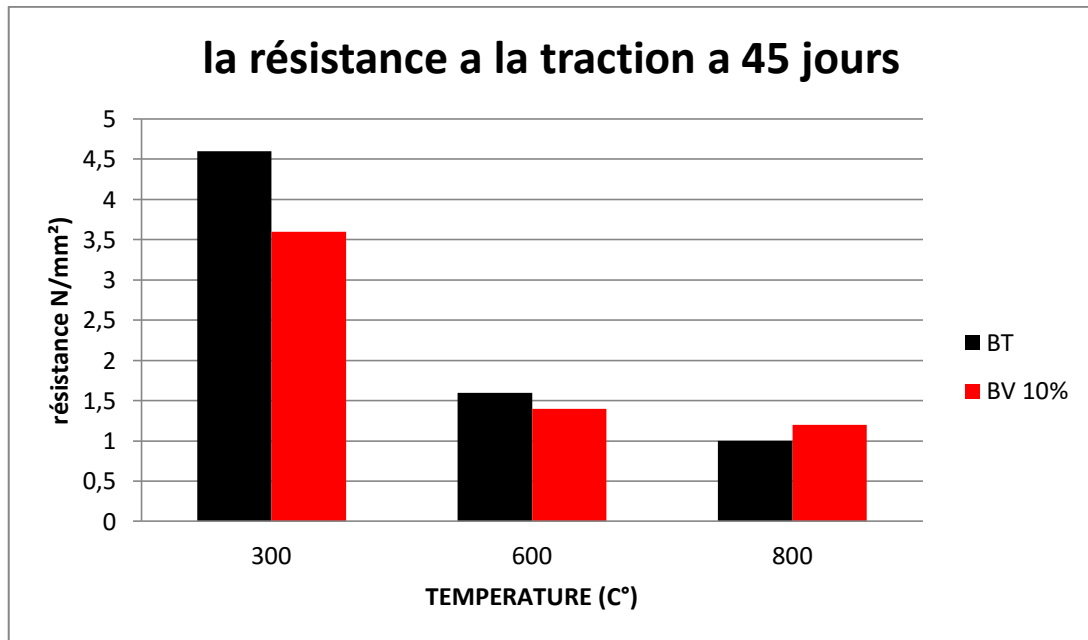


Figure V.16. Évolution de la résistance en traction des bétons à 45 jours en fonction de la température

L'analyse des résultats de la résistance en traction permis de conclure que :

A l'âge de 3 jours le béton témoin est plus vulnérable aux températures élevées en comparaison avec le béton à base la poudre de verre.

Les résistances à 300°C sont inférieures à celles notées soit à 14 jours, 28jours et 45 jours de durcissement.

Les résistances à 14 jours et 28 jours sont comparables au différentes températures.

La diminution de la résistance en traction à 600°C et à 800°C s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation du gel de C.S.H et la propagation des microfissures engendrées par la détérioration des liaisons créés entre les granulats et la pâte de ciment.

V-3-5- la porosité :

La porosité d'une pâte de ciment est fortement modifiée avec la température, ce qui est illustré aux figures suivantes :

V-3-5-1- l'âge de l'éprouvette 3 jours :

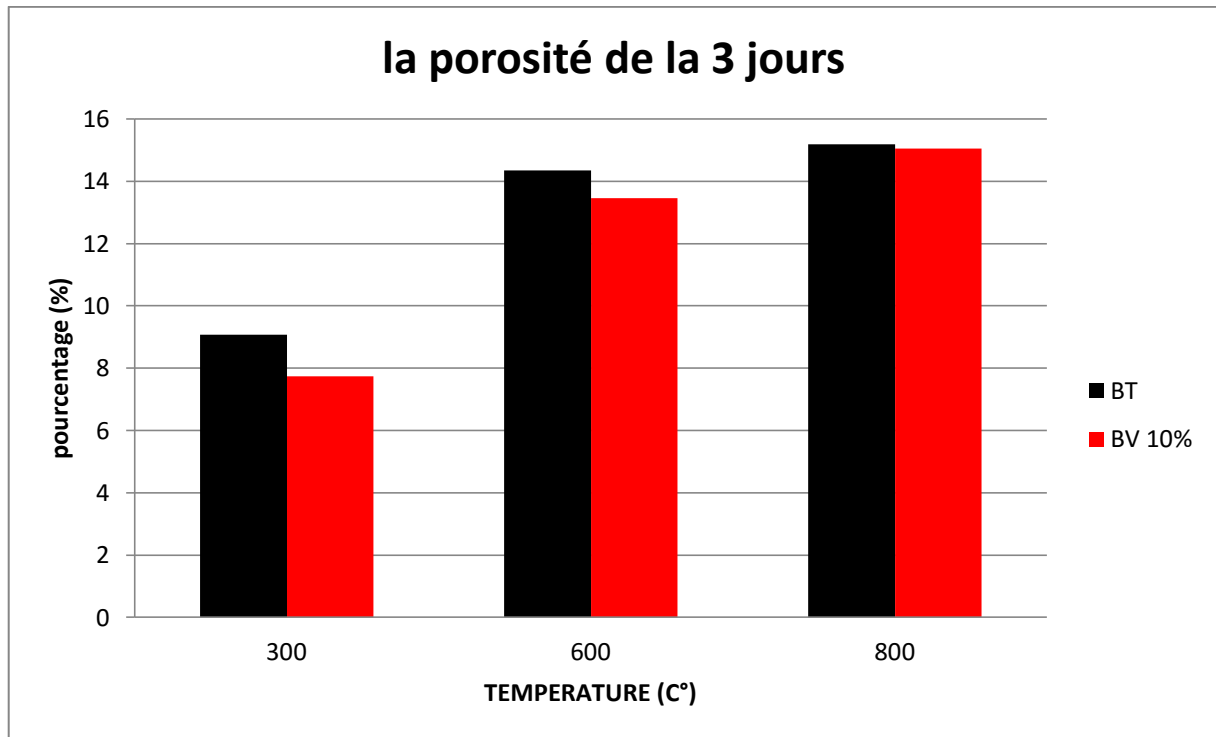


Figure V.17. Évolution de la porosité des bétons à 3 jours en fonction de la température

V-3-5-2- l'âge de l'éprouvette 14 jours :

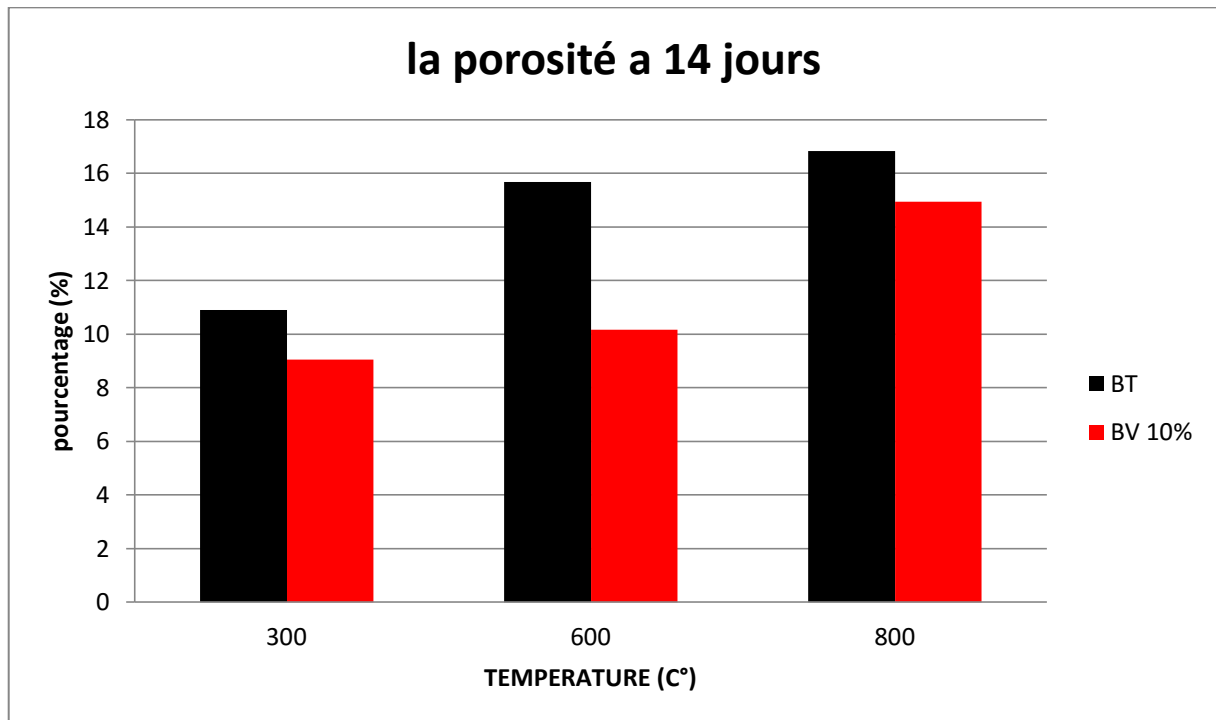


Figure V.18. Évolution de la porosité des bétons à 14 jours en fonction de la température

V-3-5-3- l'âge de l'éprouvette 28 jours :

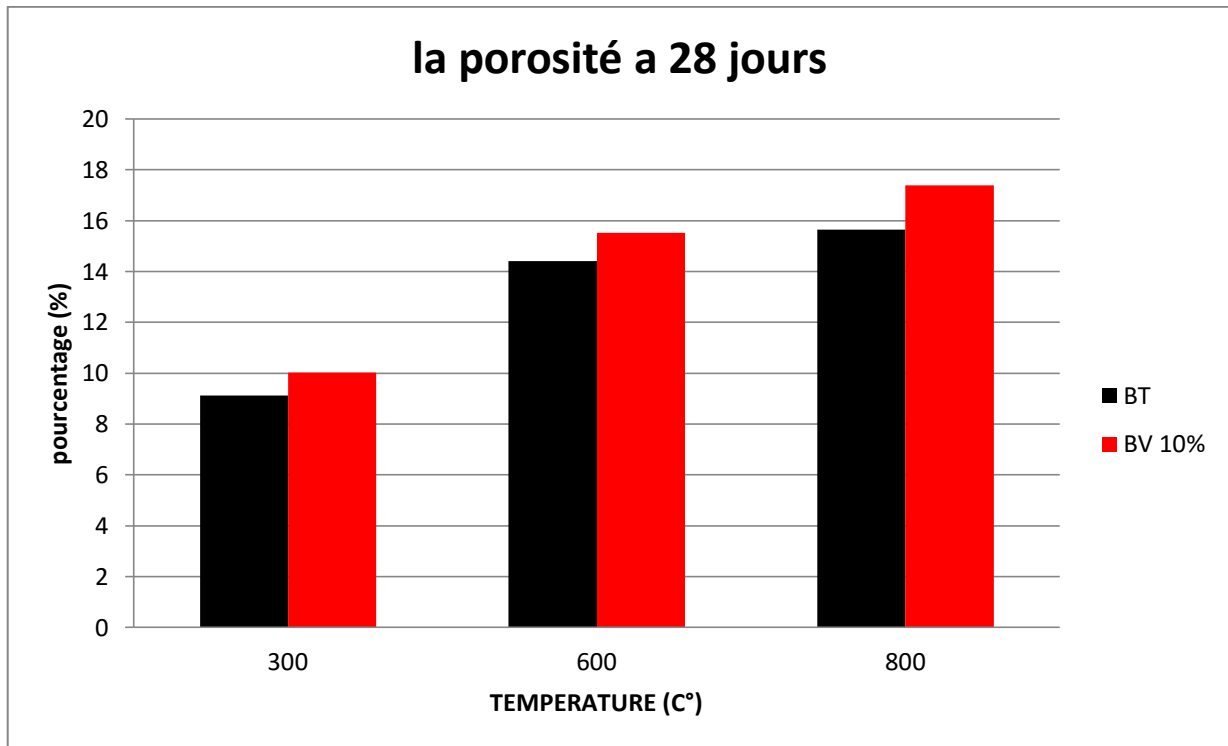


Figure V.19. Évolution de la porosité des bétons à 28 jours en fonction de la température

V-3-5-4- l'âge de l'éprouvette 45 jours :

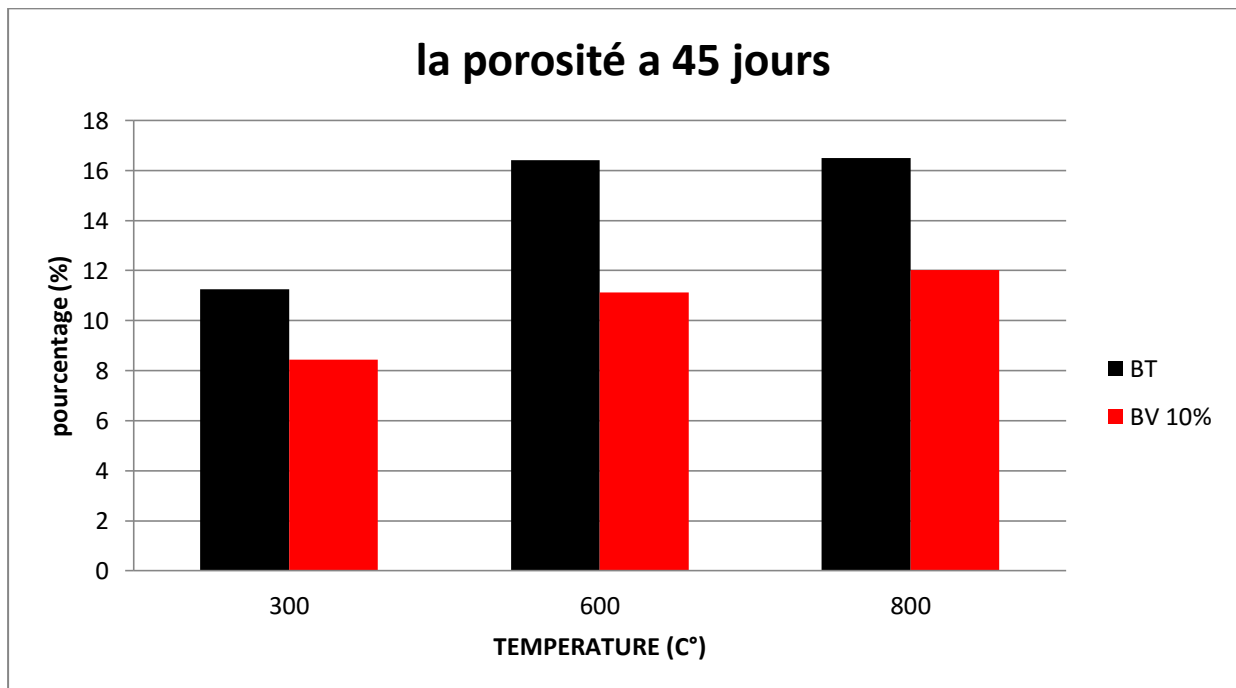


Figure V.20. Évolution de la porosité des bétons à 45 jours en fonction de la température

D'après les figures précédentes, la porosité augmente avec l'augmentation de la température pour les deux bétons elle est de l'ordre de 10% à 300° C et passe à 16% à 600°C.

L'âge de l'éprouvette n'exerce par une grande influence sur l'éprouvette.

Il reste à noter qu'après 45 jours de durcissement la porosité des bétons à base de la poudre de verre est nettement améliorée aux différentes températures.

V-4- Observations des dégradations des différents bétons après le refroidissement

Sous l'effet d'un chauffage, l'endommagement apparait dans le béton sous différentes formes.

L'une des conséquences de l'endommagement thermique du béton est l'apparition des fissures dans la matrice comme nous pouvons le voir sur la figure V.26.

Les observations ont montré que les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible à l'œil nu à la surface après le chauffage à 300°C. les premières fissuration ont été observées à l'œil nu à la surface des éprouvettes après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C sans présence d'éclatement des éprouvettes.






	600°C	
	BT	BV 10%
3jours		
14jours		
45jours		

Figure V.21. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (T .10%V) après les cycles de chauffage de 600°C.

		800C°	
		BT	BV 10%
14jours			

Figure V.22. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (T .10%V) après les cycles de chauffage de 800°C.

Après le refroidissement des éprouvettes qui ont subi l'échauffement jusqu'à 800°C, nous avons noté un endommagement très important des éprouvettes, ce qui explique les valeurs élevées de la porosité des bétons déterminée à cette température et la diminution importante de la résistance en compression. Les microfissures deviennent des macro-fissures et conduisant à la rupture du matériau.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de la présente étude était d'analyser l'influence du type du liant sur le comportement des bétons soumis à haute température.

Il s'agit d'une étude expérimentale, contribution aux nombreuses recherches entreprises pour bien comprendre l'influence de l'addition (poudre de verre de 10%) sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons conservés humides, durcis à l'air libre, étuvés et enfin chauffés

Le choix d'une teneur de 10% de la poudre de verre en substitution partielle du ciment est fait suivant les résultats obtenus précédemment (selon des études faites à l'université de M'sila).

Les remarques tirées de cette étude sont :

- La valorisation de la poudre de verre 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:
 - ✓ Une réduction sensible dans la masse aux différentes températures (300-600et 800°C)
 - ✓ Une réduction notable dans la résistance en compression de 600°C à 800°C
- Les bétons à base de la poudre de verre séchés à l'air et chauffés ensuite soumis à haute température présentent le même comportement (perte de masse – résistance)
- Une amélioration de la résistance en compression est notée dans le premier palier d'élévation de température 20°C - 300°C dans les différents bétons (ordinaire ou base de la poudre de verre) humides, durcis à l'âge.
- La maturité du béton exerce une influence considérable sur les performances mécaniques du béton, au jeune âge il est plus touché les températures élevées (perte de masse, perte de résistance) au fur est à mesure que le béton durcis (28 jours est plus) sa microstructure se développé par la condensation des C.S.H et par suit l'amélioration de sa résistance d'où l'effet de la température est moins marqué.

Bibliographie

- [1] AYAD MOHAMED BARKA YASSINE- Mémoire de Magister Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMEN.2013
- [2] BOUFEDAH BADISSI AHMED-Mémoire de Magister Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires. Université Mentouri Constantine .2011
- [4] BOUKLI HACENE- Thèse de Doctorat contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMEN.2009
- [5] Melle. KAOUANE Malika- Mémoire de Magister Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. UNIVERSITE MOULOU MAMMERI, TIZI OUZOU.2011
- [6] Hachemi Samia -Thèse de Doctorat étude du comportement du béton soumis à haute température UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA.2015
- [7] Ludovic MISSEMER- Thèse de Doctorat Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV. UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.2011
- [8] 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
- [9] http://lebeton.free.fr/resistance_materiaux.html
- [10] <http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants>
- [11] ABDELKIBIRE Messaod et BEN OUELHA Fayçal-Mémoire de fin d'études valorisation des déchets de verre comme sable dans la confection des bétons.UNIVERSIT2 MOUHAMED BOUDAIF-M'SILA.2005
- [12] <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/le-verre>
- [13] 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
- [14] H .SCHOLZE. Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980
- [15] KOJIMA, T., TAKAGI, N. et HARUTA, K. Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec. 2000.
- [16] A.SAVVA, P.MAMITA, KK.SIDERIS. (2005). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concrets prepared with limestone and siliceous aggregates. Cement & concrete composites.

ANNEXE

les valeurs de la masse volumique à l'état frais :

Types du béton						
BT				BV 10%		
N°:d'essais	M	P	Moyenne	M	ρ	Moyenne
1	2663	2,663	2.57	2460	2,46	2.43
2	2581	2,581		2440	2,44	
3	2513	2,513		2397	2,397	

les valeurs de la masse volumique à l'état durci :

Types du béton						
BT				BV 10%		
N°:d'essais	M	ρ	Moyenne	M	ρ	Moyenne
1	2569	2,569	2.45	2384	2,384	2.237
2	2487	2,487		2380	2,380	
3	2442	2,442		2343	2,343	

ANNEXE

Perte de masse :

	300°C		600°C		800°C	
	BT	BV 10%	BT	BV 10%	BT	BV 10%
3	95,42	93,85	93,24	93,72	91,94	89,32
14	94,85	94,67	94,16	93	91,74	87,84
28	94,99	95,21	93,43	92,97	91,05	91,75
45	95,86	94,42	92,84	92,85	92,34	91,31

Porosité :

	300°C		600°C		800°C	
	BT	BV 10%	BT	BV 10%	BT	BV 10%
3	9,07	7,73	14,34	13,45	15,19	15,05
14	10,9	9,05	15,67	10,17	16,84	14,94
28	9,11	10,03	14,4	15,51	15,64	17,39
45	11,26	8,43	16,4	11,13	16,5	12,03

ANNEXE

Résistance a la traction :

	300°C		600°C		800°C	
	BT	BV 10%	BT	BV 10%	BT	BV 10%
	3	2,4	2,6	0,2	0,8	0,1
14	4	2,5	3	1,5	2	0,8
28	4,7	3,8	1,5	0,4	0,5	0,2
45	4,6	3,6	1,6	1,4	1	1,2

Résistance a la compression :

	20°C		300°C		600°C		800°C	
	BT	BV 10%	BT	BV 10%	BT	BV 10%	BT	BV 10%
	3	28	14,25	26	24,86	23,58	18,94	12,24
14	35	22,22	28,36	25	24,56	19,35	14,88	8,11
28	37,92	29,19	30,18	29,09	25,48	21,34	15,3	8,9
45	39,5	31	38,3	29,32	28	22,3	17,53	10,93

الملخص:

نظرا لتركيبها الغنية بأكسيد السيلييس المتفاعل، فإن استعمال الزجاج كإضافة اسمنتية في الخرسانة يعتبر بديلا لائقا لإعادة تأهيلها، وعملنا يندرج ضمن هذا الإطار، هو يعالج تأثير درجات الحرارة العالية على الخرسانة المشكّلة أساسا من مسحوق الزجاج المحفوظ في وسط رطب لمدة 45 يوما. جاهزية الخرسانة تتأثر على البنية الجزئية للخرسانة الموضوعه تحت درجات حرارة عالية. نتائج الدراسة تبين أن إضافة 10% من الزجاج يؤثر على الأداء الأليعلى المدى القصير، والعينات البالغة من 3 إلى 14 يوما هي قابلة للثّم: فقدان في الحجم ، فقدان للمقاومة ورفع في المسامية.

كلمات مفتاحية :
مسحوق الزجاج-درجات حرارة عالية-خرسانة-سلوك آلي.

Résumé:

Vu sa composition riche en silice réactive, la valorisation de verre dans le béton semble être une bonne alternative pour son recyclage, notre travail s'inscrit dans ce contexte, il traite l'influence des hautes températures sur le béton à basse de la poudre de verre conservé dans un milieu humide, pendant 45 jours.

La maturité du béton (âge) influence la microstructure du béton soumis à haute températures. Les résultats de l'étude montrent, que l'addition de 10% de verre affecté les performances mécaniques à court terme, et les éprouvettes âgées de 3 et 14 jours sont plus vulnérable : perte de masse, perte de résistance augmentation de la porosité.

Mots clés :

Poudre de verre – haute température – béton – comportement mécanique

Abstract:

Given its rich composition of reactive silica, the glass valuation in concrete seems to be a good alternative for its recycling, our work falls under this context, it treats the influence of high temperatures on the powder glass based concrete kept in a humid environment for 45 days.

The concrete maturity (age) influences the microstructure of concrete subjected to high temperatures.

The study's results shows that the addition of 10% glass affect the mechanical performance in a short-term, specimens of 3 to 14 days old are more vulnerable: weight loss, loss of strength and increase in porosity.

Keywords:

Glass powder - high temperature - concrete - mechanical behavior