2016

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de Recherche la Scientifique

Université YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la Matière
Filière Génie Civil

Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
Option : structure

THEME

L'effet de la pozzolane naturelle sur la formulation des Béton a haute performances

Réalisé par :

- Mr. OTMANINE Souhil
- Mr. LAKHDAREZZINE Kheireddine

Proposé et encadré :

- Pr **BOUKENDAKDJI Otmane**

***Co-Encadré* :**

- Mr. **KESSEIR Mohamed**

Promotion : 2015/2016

Remerciements

Tous d'abord, nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos plus grands remerciements vont à notre promoteur ***Dr BOUKENDAKDJI Otmane*** *pour nous avoir guidés pour la réalisation de cette étude et le soutien scientifique et moral qu'il nous a apporté.*

Nous remercions vivement et infiniment ***Mr KESSEIR Mohamed*** *pour nous avoir aidé et prêté son attention et son disponibilité.*

Nous sommes reconnaissants à notre département et à l'ensemble des enseignants qui ont contribués à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence, et ont remercie beaucoup les personnes qui ont participés de près ou de loin à ce modeste travail.

Souhil et Kheireddine

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

A ceux que nous aimons jusqu'à la frontière de l'imagination :

Nos très cher parents, et nos Amis ,et a toute La promotion Génie Civil de l'année 2016.

A ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.

Souhil et Kheireddine

Résumé

En tant que matériau de construction révolutionnaire, le béton a hautes performances (BHP) a été largement étudie dans les deux dernières décennies afin de pouvoir répondre au exigence des construction et réalisations architecturales moderne .et cela grâce a l'ajout minérale (fumée de silice) enduite dans le béton qui le caractérise des autre béton on lui donnant de bonne performances.

Dans cette étude l'objectif principale et de déterminer le comportement mécanique d'un BHP a l'état frais et a l'état durci en remplaçons la fumée de silice par la pouzzolane naturelle qui est un matériaux locale a bas prix , et de comparé les résultats par la suite avec la fumée de silice ,et cela a était fait sur deux différent rapport E/C.

Les résultats ont montré que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle donne de bonne résultats sur les résistance a la compression et a la tracions qui sont légèrement inferieur a celle de la fumée de silice, avec 15 pourcent comme une substitution maximal pour la pouzzolane naturelle et 5% pour la fumée de silice .

Par ailleurs, l'étude a révélée aussi que l'utilisation de superplastifiant influe sur le retrait , le gonflement et l'absorption capillaire .

Mots clés : béton haute performance (BHP), fumée de silice, Pouzzolane naturelle, rapport E/C , superplastifiant, résistance .

Abstract

As a Revolutionary building material, concrete has high performance (HPC) has been widely studied in the past two decades in order to meet the requirement of modern construction and achievements architectural .and thanks to the mineral addition (silica fume) coated in concrete that him characterizes to another concrete and giving him good performance.

In this study the objective and determining the mechanical of a HPC in a fresh and hardened state by replacing silica fume by natural pozzolan which is cheap local materials, and Consequently compared the results afterwards with silica fume, and this was done on two different W / C ratio.

The results showed that the substitution of cement by natural pozzolan gives good results on the compressive strength and tracions which are slightly inferior to that of the silica fume, with 15 percent as a maximum substitution for natural pozzolan and 5% fumed silica, as we have found that over the W / C decreases ,over the resistance increases.

Moreover, the study revealed also that the use of superplasticizer affects shrinkage, swelling and capillary absorption.

Keywords: high performance concrete (HPC), silica fume, natural Pouzzolane, W / C ratio, superplasticizer, resistance .

ملخص

كمادة بناء ثورية, الخرسانة ذات الخصائص العالية قد درست على نطاق واسع في العقدين الماضيين من أجل تلبية متطلبات إنجازات البناء والهندسة المعمارية الحديثة. وبفضل إضافة المعدنية (دخان السيليكا) المغلفة في الخرسانة التي تميز الخرسانة وتعطيها أداء جيد.

في هذه الدراسة الهدف الرئيسي هو تحديد السلوك الميكانيكي للخرسانة ذات الخصائص العالية في الحالة الطازجة و الصلبة عن طريق استبدال غبار السيليكا بالخبث المحبب الناعم الطبيعي وهي المواد المحلية الرخيصة، ومقارنة النتائج في وقت لاحق مع غبار السيليكا، وذلك على نوعين مختلفين من نسبة الماء على الاسمنت.

وأظهرت النتائج أن استبدال نسبة من الاسمنت بالخبث الناعم المحبب الطبيعي يعطي نتائج جيدة على قوة الضغط و الشد والانحناء التي هي ادنى قليلا من غبار السيليكا، مع 15 في المئة كحد أقصى بديلا عن الخبث المحبب الناعم الطبيعي و 5٪ من دخان السيليكا، كما تبين أن كلما انخفضت نسبة الماء على الاسمنت. ثم زادت المقاومة.

وعلاوة على ذلك، كشفت الدراسة أيضا أن استخدام المساعد المتفوق يؤثرعلى ظاهرة التقلص, التمدد و امتصاص الخرسانة.

كلمات مفاتيح: *خرسانة ذات خصائص عالية, دخان السيليكا, الخبث الناعم المحبب الطبيعي, نسبة* **الماء على الاسمنت**.*, المساعد المتفوق, المقاومة*

Chapitre I : Revue bibliographique

		Page
Tableau I.1 :	Caractéristique de résistance et de déformation …….....	05
Tableau I.2 :	Les classes de résistance des Bétons …….	07
Tableau I.3 :	Les dimensions et les caractéristiques des granulats ……	11
Tableau 1.4 :	Qualité et activité de la roche du gisement bouhamidi ……..	33
Tableau I.5 :	Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône et C.E.S	43
Tableau I.6 :	Dimension maximale du granulat …….....	44
Tableau I.7 :	Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G)…….	45
Tableau I.8 :	Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de D max…..	47
Tableau I.9 :	Les valeurs de k ……	49
Tableau I.10 :	Valeur approximative de Coefficient de compacité (g)……	50
Tableau I.11 :	retrait de dessiccation(*) et retrait endogène (**) en fonction de fck et HR	56
Tableau I.12 :	Coefficient de fluage en fonction de fck et HR et de delai mise en charge.	57

Chapitre II : Matériaux et essais

Tableau II.1:	Caractéristiques physico-chimiques du ciment CPA CEM I 42.5…….	67
Tableau II.2 :	Analyse granulométrie de sable 0/3…….	71
Tableau II.3 :	Analyse granulométrie de gravier 8/15…….	71
Tableau II.4 :	Analyse granulométrie de gravier 15/25……	72
Tableau II.5 :	Analyse granulométrie de sable 0/5…….	72
Tableau II.6 :	Propriétés physiques d'identification des sables utilisés……..	72
Tableau II.7 :	Caractéristiques des granulats…….....	74

Tableau II.8 : Compositions de **1 m3** du béton Témoin…… 76
Tableau II.9 : Compositions d'un mélange de **20 l** du béton Témoin……. 77
77
Tableau II.10 : Compositions de **1 m3** du béton Témoin……. 77
Tableau II.11 : Compositions d'un mélange de **20L** du béton Témoin…….
Tableau II.12 : Compositions d'un **20l** de BHP a base de pouzzolane avec **E/C=0.4**..... 78
Tableau II.13 : Compositions d'un **20l** de BHP a base de pouzzolane avec **E/C=0.35**..... 78
Tableau II.14 : Compositions d'un **20l** de BHP a base de fumées de silice avec **E/C=0.4** 79
Tableau II.15 : Compositions d'un **20L** de BHP a base de fumées de silice avec **E/C=0.35** 79

Chapitre III : Analyse des résultats Et interprétation.

Tableau III.1 : Dosage du SP en different teneur de PZN…… 90
Tableau III.2 : Dosage du SP en différent teneur de FS…… 91
Tableau III.3 : Le pourcentage d'absorption âpres 24h pour chaque substitution et chaque rapport E/C…… 110
Tableau III.4 : Variation de la densité en différent teneur de PZN et différent rapport E/C. 111
Tableau III.5 : Le pourcentage d'absorption âpres 24h pour chaque substitution et chaque rapport E/C…… 129
Tableau III.6 : Variation de la densité en différent teneur de FS et différent rapport E/C.. 130

Chapitre I : Revue bibliographique

		Page
Figure I.1 :	Relation entre la résistance a la compression et le rapport E/C ……	13
Figure I.2 :	Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation……..	14
Figure I.3 :	Des charges opposes sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation……...	17
Figure I.4 :	Les superplastifiants empêchent la floculation ……	18
Figure I.5 :	Le diagramme ternaire : CaO-SIO2 –Al2O3…….....	22
Figure I.6 :	La fumées de silice ……..……	23
Figure I.7 :	Organigramme de différente catégorie de silice …….....	24
Figure I.8 :	Affaissement au cône d'Abrams……	27
Figure I.9 :	Evolution de la resistance ……..	28
Figure I.10 :	Influence de la fumée de silice sur le retrait……	29
Figure I.11 :	Pouzzolane naturelle ……	32
Figure I.12 :	pouzzolanes rouges calibrées ……	33
Figure I.13 :	Pouzzolane noire ……	33
Figure I.14 :	Gel de C-S-H ……	34
Figure I.15 :	Les réaction d'hydratation ciment et de la pouzzolane……...	35
Figure I.16 :	Effet des ajouts (la pouzzolane naturelle d'Italie) sur la chaleur d'hydratation du ciment portland.....	35
Figure I.17 :	Evolution des résistances mécanique à la compression des mortiers en fonction du temps……	38
Figure I.18 :	Evolution du retrait des éprouvettes à la pouzzolane naturelle……...	38
Figure I.19 :	Granulométrie des matières fines……	40
Figure I.20 :	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée ……..	45
Figure I.21 :	Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S. en fonction de l'affaissement……..	46
Figure I.22 :	Valeurs de K……	48
Figure I.23 :	Béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier……	52
Figure I.24:	Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés……	53

Figure I.25 : Diagramme contraintes-déformation…….. 54
Figure I.26 : Diagramme de la résistance à la compression des bétons à haute résistance Selon l'EC2 Feu…….. 59
Figure I.27 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO…… 61
Figure I.28 : Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat…… 62
Figure I.29 : Différent photo de construction a base de BHP a travers le monde…… 63

Chapitre II : Matériaux et essais

Figure II.1 : La fumées de silice …… 67
Figure II.2 : pouzzolane roche ……. 68
Figure II.3 : Pouzzolane poudre …….. 68
Figure II.4 : Sable fin de Hassi Bahbah ……..…… 69
Figure II.5 : Sable grossier de mokorno ……..…… 69
Figure II.6 : L'essai de l'équivalent de sable pour sable 0/3…… 69
Figure II.7 : Appareille de mesure d'analyse granulométrie …….. 70
Figure II.8: Courbe granulométrique du sable …….. 72
Figure II.9 : Mesure de masse volumique apparente ……. 72
Figure II.10 : Courbe granulométrique du gravier…… 73

Figure II.11 : Superplastifiant tempos 12……..…… 74
Figure II.12 : Malaxeur a béton …….. 79
Figure II.13 : Protocole de l'essai d'affaissement……..... 80
Figure II.14 : Protocole de remplissage des moules…….. 81
Figure II.15 : Presse hydraulique(2000KN)…….. 82
Figure II.16 : Protocole de l'essai de compression…….. 83
Figure II.17 : Protocole de l'essai de traction par flexion……. 84
Figure II.18 : Le réctractomètre……. 85
Figure II.19 : Protocole de l'essai de retrait et gonflement……. 86

Figure II.20 : Apres étuvage……. 87
Figure II.21 : Mise a l'eau……. 87

Figure II.22 : Formulation et caractérisation du béton étudié…… 88

Chapitre III : Analyse des résultats Et interprétation.

Figure III.1: Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de la pouzzolane naturelle , et cela en deux différent rapport E/C …… 91

Figure III.2: Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de fumée de silice , et cela en deux différent rapport E/C…….. 92

Figure III.3: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,35 par rapport a la teneur en PZN……. 93

Figure III.4: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,40 par rapport a la teneur en PZN……. 94

Figure III.5: Comparaison entre la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 56j……. 95

Figure III.6: Augmentation de la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,35 a travers le Temps…… 96

Figure III.7: Augmentation de la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,40 a travers le temps……. 96

Figure III.8: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,30 par rapport a la teneur en PZN…… 97

Figure III.9: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,40 par rapport a la teneur en PZN…… 98

Figure III.10: Comparaison entre la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,35 et E/C=0.40…. 99

Figure III.11: Augmentation de la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,35 a travers le temps. 99

Figure III.12: Augmentation de la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,40 a travers le temps. 100

Figure III.13: Diminution du retrait des éprouvette de PZN a E/C=0,35 a travers le temps…….. 101

Figure III.14: Diminution du retrait des éprouvette de PZN a E/C=0,40 a travers le temps…… 101

Figure III.15: Evolution du retrait DE LA PZN a E/C=0.35 et E/C=0.40…… 102

Figure III.16: Augmentation du gonflement des éprouvette de PZN a E/C=0,35 a travers le temps…… 103

Figure III.17: Augmentation du gonflement des éprouvette de PZN a E/C=0,40 a travers le temps…….. 103

Figure III.18: Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,35 a travers le temps…… 104
Figure III.19: Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,40 a travers le temps…….. 105
Figure III.20: Différence entre Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,35 et E/C=0,40 apres 56j…… 106
Figure III.21: Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,35 a travers le temps…… 106
Figure III.22: Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,40 a travers le temps…… 107
Figure III.23: Différence entre Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,35 et E/C=0,40 âpres 56j…… 108
Figure III.24: Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.35…….. 109
Figure III.25: Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.40…….. 109
Figure III.26: Différance de pourcentage d'absorption entre différent teneur en pouzzolane naturelle et rapport E/C…… 110
Figure III.27: Différance de densité entre différent teneur en PZN et rapport E/C.…….. 111
Figure III.28: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS…… 112
Figure III.29: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,40 par rapport a la teneur en FS…… 112
Figure III.30: Comparaison entre la Resistance a la compression de FS a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 56j…… 113
Figure III.31: Augmentation de la Resistance a la compression de FS a E/C=0,35 a travers le temps…..... 114
Figure III.32: Augmentation de la Resistance a la compression de FS a E/C=0,40 a travers le temps……... 115
Figure III.33: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS……... 116
Figure III.34: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS……... 116
Figure III.35: Comparaison entre la Resistance a la traction de FS a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 117

56j…… 118

Figure III.36: Augmentation de la Resistance a la traction de FS a E/C=0,35 a travers le temps……. 118

Figure III.37: Augmentation de la Resistance a la traction de FS a E/C=0,40 a travers le temps…….. 119

Figure III.38: Diminution du retrait des éprouvette de FS a E/C=0,35 a travers le temps. 119

Figure III.39: Diminution du retrait des éprouvette de FS a E/C=0,40 a travers le temps… 120

Figure III.40: Evolution du retrait a E/C=0.35 et E/C=0.40…… 121

Figure III.41: Augmentation du gonflement des éprouvette de FS a E/C=0,35 a travers le temps…… 121

Figure III.42: Augmentation du gonflement des éprouvette de FS a E/C=0,40 a travers le temps…… 122

Figure III.43: Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,35 a travers le temps……. 123

Figure III.44: Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,40 a travers le temp…… 124

Figure III.45: Différence entre Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,35 et E/C=0,40 apres 56j…… 124

Figure III.46: Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,35 a travers le temps……. 125

Figure III.47: Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,40 a travers le temps……. 126

Figure III.48: Différence entre Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,35 et E/C=0,40 âpres 56j…… 127

Figure III.49: Absorption de différente substitution de FS a travers le temps a E/C =0.35… 127

Figure III.50: Absorption de différente substitution de FS a travers le temps a E/C =0.35… 128

Figure III.51: Différence de pourcentage d'absorption entre différent teneur en fumée de silice et rapport E/C…..... 129

Figure III.52: Différence de densité entre différent teneur en FS et rapport E/C……

Figure III.53: Comparaison entre la résistance a la compression a E/C=0.35 de la PZN et la FS…….. 130

Figure III.54: Comparaison entre la résistance a la compression a E/C=0.40 de la PZN et la FS…… 130
Figure III.55: Comparaison entre la résistance a la traction a E/C=0.35 de la PZN et la FS…… 131
Figure III.56: comparaison entre la résistance a la traction a E/C=0.40 de la PZN et la FS…….. 131
Figure III.57: Comparaison entre le retrait a E/C=0.35 de la PZN et la FS…… 132
Figure III.58: Comparaison entre le retrait a E/C=0.40 de la PZN et la FS…… 132
Figure III.59: Comparaison entre le gonflement a E/C=0.40 de la PZN et la FS…… 133
Figure III.60: Comparaison entre le gonflement a E/C=0.35 de la PZN et la FS…… 133
Figure III.61: Comparaison entre la variation de masse due au retrait a E/C=0.35 de la PZN et la FS……. 134
Figure III.62: Comparaison entre la variation de masse due au retrait E/C=0.40 de la PZN et la FS…… 134
Figure III.63: Comparaison entre la variation de masse due au gonflement a E/C=0.35 de……. 135
Figure III.64: Comparaison entre la variation de masse due au gonflement a E/C=0.40 de la PZN et la FS……. 135
Figure III.65: Comparaison entre l'absorption a E/C=0.35 de la PZN et la FS……... 136
Figure III.66: Comparaison entre l'absorption a E/C=0.40 de la PZN et la FS…… 136

BHP	Béton a haute performance
BTHP	Béton a très haute performance

BUHP	Béton a ultra haute performance
BHP T	Béton a haute performance témoin
BHP P	Béton a haute performance avec pouzzolane
BHP FS	Béton a haute performance avec fumée de silice
PZN	Pouzzolane naturelle
CPA	Ciment Portland Artificiel.
CPJ	Ciment Portland Composé.
E/C	Rapport Eau sur Ciment.
FS/C	rapport fumée de silice sur ciment
CO_2	Dioxyde de Carbone.
D_{max}	Diamètre maximal des granulats.
G/S	Rapport Gravillon sur Sable.
C_3S	Silicate tricalcique.
C_2S	Silicate bicalcique.
C_3A	Aluminate tricalcique.
C_4AF	Alumino-Ferrite- Tétracalcique.
BO	Béton ordinaire.
MPa	Méga pascal.
SiO_2	Silice
CaO	La chaux
Al_2O_3	Alumine
MgO	Oxyde de magnésiumMg2O3
C-S-H	Silicate de Calcium hydraté.
$Ca(OH)_2$	Hydroxyde de calcium ou portlandite.
Ø	Diamètre.
PZN	Pouzzolane naturelle
FS	fumée de silice
$CaCO_3$	Carbonate de Calcium ou Calcaire.
CEMI	Ciment portland.
ρ_{abs}	Masse volumique absolue.
ρ_{app}	Masse volumique apparente.
δ	La densité

abs	L'absorbation
kg/m^3	Kilogramme par mètre cube.
s	Secondes.
SSB	Surface spécifique de Blaine.
t	Temps.
Δm	Variation de masse.
Δl	Variation de longueur
L0	Longueur de base
µm/m	Micromètre par mètre.
μm	Micromètre.

Introduction Générale

Le succès du béton dans le monde d'aujourd'hui – et vraisemblablement de demain – s'explique essentiellement par un ensemble unique et inégalé de qualités tout particulière recherchées par les professionnels de la construction.

Toutefois, le béton est le cœur d'une construction ,il est utilisé plus que tout les autres matériaux réunis, sans le béton ,on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement ,d'école ,d'hôpitaux ,d'infrastructures de transport ,à la fois robuste et universel ,on peut le faire partout ,dans tous les pays .

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées, ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). « D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très et ultra hautes performances (BTHP)(BUHP), les bétons de fibres (BF) , les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants (BAP) »

Deux voix de recherche sont à l'origine du développement spectaculaire des BHP :

- L'apparition d'une nouvelle génération de superplastifiant hautement réducteur d'eau, à double action dispersion et défloculation. Cela est obtenu grâce à l'utilisation de polymères modernes (polysulfonate et polycarboxylates), qui offrent la possibilité d'une réduction sensible du dosage en eau ce qui permet de formuler des bétons avec un rapport eau/ciment inferieur à 0,4
- L'amélioration de l'étendu granulaire par l'ajout d'additions minérales sous forme de fillers qui a un double rôle : l'augmentation de la compacité par remplissage d'une partie de volume des vides et micro vides, d'une part, et d'autre part, et grâce à leur réactivité chimique, participe à la formation d'hydrate secondaire et par conséquence améliore la résistance et la durabilité **[1]**.

L'Algérie connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'Etat (1 million de logements sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs, …) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics.

Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction ne sont pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré les dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30 MPa, et qui ne dépassent les 40 MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (aciers d'armature, ciment, …) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable,

Introduction Générale

L'Algérie doit obligatoirement utiliser les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction. Parmi les bétons innovants on trouve les BHP (bétons à hautes performances), dont l'utilisation a une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferraillage. Malgré que ces nouveaux bétons sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie, reste très limité ou inexistantes.
Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances ou résistances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que les adjuvants et les additions fines.

L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions, l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des micro vides de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange et en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais, tandis que la deuxième fonction (fonction chimique) concerne la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons ordinaires **[2].**

Actuellement les BHP sont formulé à base de la fumée de silice ou d'un mélange de la fumée de silice avec un ajout pouzzolanique. Bien que certaines pouzzolanes naturelles soient toujours utilisées dans certains pays, il ne semble pas quelles aient été utilisées à grande échelle pour fabriquer des bétons à hautes performances (BHP). La plupart de ces pouzzolanes proviennent des coproduits industriels. Parmi ces pouzzolanes les plus utilisées, on trouve la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les cendres volantes et Le laitier de haut fourneau broyé qui est un ajout minéral et qui possède plusieurs qualités pouzzolanique (composition chimique voisine de celle du ciment Portland et réactivité hydraulique latente activée en présence de ciment Portland) **[3].**

Introduction Générale

L'objectif de cette étude est en plus d'exposer l'état de l'art des BHP, faire une tentative de fabrication d'un BHP avec les matériaux locaux disponibles. « Pouzzolane naturelle » et de le comparer avec un BHP à base de fumée de silice .

Notre projet consiste à rechercher une amélioration de la performance du béton local en utilisant les matériaux existants en Algérie prenant en compte les caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers.

En s'appuyant sur les aspects qui rendent les bétons semblables ou différents des bétons classiques, l'emploi des nouveaux constituants tels que les superplastifiants et des additions « pouzzolane naturelle et fumée de silice » s'avére très utile

Notre projet de fin d'étude se divise en six chapitres :

- ✓ Apres avoir donner une introduction generale, le premier chapitre de ce mémoire est d'abord consacré à une revu bibliographique portant sur l'historique des bétons à très haute résistance de même que sur les principes généraux de fabrication des BHP et les étapes de développement des BHP.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les caractéristiques Physicochimiques et minéralogiques des matériaux utilisés dans notre travail expérimental ainsi que le mode opératoire de chaque essai effectué sur ces matériaux.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à l'étude et l'interprétation des résultats obtenus lors des différents essais sur échantillons prismatiques 10x10x10 cm^3 et 7x7x28 cm^3.
- ✓ En dernier ,se suit une conclusion générale de notre projet de fin d'étude et à des recommandations pour de futurs travaux dans ce domaine et avec les moyens disponibles localement.

CHAPITRE I

Revue Bibliographique

I 1. Introduction :

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa **[4]..** Et cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes**[1]..** La notion de 'haute résistance' est dès lors très relative et, de toute évidence, évolutive. Il n'est dès lors pas étonnant que coexistent plusieurs définitions du 'béton à haute résistance'. Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton à haute résistance' à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C (Concrete qui veut dire béton en anglais) fait référence à la résistance caractéristique à la compression mesurée sur des cylindres de 320 mm de hauteur et d'un diamètre de 160 mm, et le deuxième nombre, à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté **[5]**

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est une incidence de premier ordre**[6].** Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure ,C'est ainsi que le béton auto compactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité **[7].**

TABLEAU I.1 - Caracteristique de resistance et de deformation suivant la norme EN 1992-1-1/2004**[8]**

Caracteristiques	Classe de resistance									⇨Beton a haute resistance				
f_{ck} resistance caracteristique en compression sur cylindre (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck\text{-}cube}$ resistance caracteristique en compression sur cube (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} resistance moyenne en compression (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} resistance moyenne en traction directe (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
E_{cm} module d'elasticite secant (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} deformation au pic de contrainte (‰)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.25	2.3	2.4	2.45	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8

I.2. historique de l'évolution des bétons hydraulique :

L'histoire du ciment commence en 3000 Av. J-C, où les Egyptiens ont utilisé des mortiers en gypse et des mortiers en chaux pour construire les pyramides. Puis, les Romains ont utilisé une sorte de béton pouzzoulanique: Il s'agit d'un dépôt volcanique qui se solidifie si on le mélange avec de l'eau et de la chaux (Aujourd'hui la pouzzolane est classée comme un ajout). Mais, le mot béton, lui-même, a été introduit par l'ingénieur français Belider (1697- 1761) et vient de « betun, becton, beter » qui signifie « se solidifier ». En 1824, Joseph Aspadin a inventé le ciment portland, par la calcination, à 1500 °C, d'un mélange d'argile et de craie que l'on broie ensuite finement. **[9].**

Smeaton (1756), Vicat (1818), Aspadin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé (avec des résistances en compression de 15 à 25 MPa). Puis durant un siècle, le béton resta un mélange de : granulats, ciment, et d'eau.**[8]**

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (découverte des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches sont orientées pour l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton (optimisation de l'étendu granulaire à une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) **[10].**

Le mélange de ciment et d'eau (avec éventuellement des ajouts), constitue ce que l'on appelle la pâte de ciment. En y rajoutant du sable, on obtient un mortier, l'addition de sable et de granulat donne du béton. La pâte présente à l'intérieur du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. C'est l'élément actif du béton, elle représente environ 30% du volume d'un béton. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans cette pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte due au retrait.**[10]**

Le béton est donc un matériau hétérogène mais aussi, particulièrement complexe et évolutif. Il présente une structure poreuse dont la porosité lui confère plusieurs caractéristiques, telles que sa perméabilité, sa résistance, sa durabilité et son comportement rhéologique, on distingue :

- Les pores capillaires ($0.01\mu m \leq \phi \leq 0.5\mu m$)
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ($\phi <$ 40 angströms)
- Les bulles d'air occluses ($\phi >$ 1mm) piégées à l'intérieur du béton lors du malaxage du mélange.**[10]**

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, se sont les Bétons à Hautes Performances (BHP) et à très Hautes Performances (BTHP)

I.3. Présentation des types de BHP:

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours fC28 en MPa. C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

Tableau I.2 Les classes de résistance des Bétons **[11].**

Bétons	Résistance (Mpa)
Béton ordinaire	20 -50
Béton a haute performance	50-100
Béton a très haute performance	100-150
Béton a ultra haute performance (exceptionnel)	≥150

Les **BHP** nécessitent l'emploi du ciment choisi, type HPR. Dosé à environ 400kg/m3, leur fabrication suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui permettent de maintenir

le rapport E/C à des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40 tout en garantissant une bonne maniabilité n'est pas utile d'utiliser des granulats spéciaux à condition que ceux-ci soit propres.**[12]**

Les **BTHP** sont obtenus en réduisant le rapport E/C à des valeurs de l'ordre de 0.20 à 0.35, ceci implique l'emploi de super plastifiants réducteurs d'eau à dosage élevé. Tous les composants du béton doivent être de bonne qualité. Il devient nécessaire d'utiliser des ultrafines telles que les fumées de silice, les granulats doivent être résistants de forme cubique ou sphérique, et ils présentent un module d'élasticité proche de celui de la pâte durci pour réduire les déformations différentielles entre granulats et matrice de béton. II semble préférable de retenir des granulats de 10à 12 mm de dimension maximale.**[12]**

Les **BUHP,** de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280 MPa a été obtenu dans un laboratoire avec un E/C= 0.16. **[12]**

I.4. Définition du Béton à haute performance :

Le béton de haute performance BHP est d'abord un béton de haute résistance, car ses caractéristiques mécaniques peuvent atteindre des valeurs spectaculaires. Elles sont passées de 50 à 100 MPa il y a quelques années à plus de 100 à 150 MPa, voire plus de 200 MPa pour des bétons de laboratoire **[11].**

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages des ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité **[11].**

Ils sont également plus résistants aux agents agressifs et présentent une durabilité accrue. Les bétons BHP permettent de réaliser des structures qui résistent à des contraintes élevées ou à un environnement sévère (climat, agressions marines effet gel-dégel).

Ils apportent aussi des résistances précoces élevées aux bétons, ce qui permet d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier **[11].**

La recherche de haute performance se base surtout de la réduction de la porosité du béton, c-à-d son pourcentage de vide, ainsi que le prévoit la théorie de Féret. Celle-ci établit une proportionnalité entre la résistance et l'inverse du carré du volume d'air et d'eau libre **[11].**

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- une faible teneur en eau :

La faiblesse des performances du béton a été attribuée à la porosité capillaire et à l'accès de l'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais. Une amélioration a été atteinte par diverses procédés réduisant la porosité et le rapport E/C. L'emploi des superplastifiants permet la

réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entrainant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisé par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C utilisés de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de teneur en eau emplis de 30%) **[10].**

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

La suppression de seuil de cisaillement dans la pate de ciment à l'état frais par ajout de superplastifiant conduit à un béton s'écoulant aisément, bien qu'ayant un aspect visqueux et collants la mise en place, le pompage sont des opérations particulièrement facilité. Sur un autre plan, et d'après les résultats des études précises relatives au fluage de BHP chargés au jeune âge, l'obtention de très haute résistance dès les premières heures les premiers jours permettent un gain de temps énormes sur les opérations de décoffrage, mise en précontrainte etc… au niveau d'un chantier de construction ou une aire de préfabrication **[10].**

Il en découle des économies et des simplifications très importantes. Dans certain cas spécifique, il peut être intéressant de retarder la prise de plusieurs dizaines d'heures sans dommages du fait de la très forte thixotropie de la pate évitant dans le même temps, toute ségrégation.

En revanche, l'absence d'eau de ressuage conduit à une dessiccation de surface précoce et intense qui rend indispensable la réalisation d'une cure soignée, seul moyen d'éviter les fissurations de surface dues au retrait plastique.

- une granulométrie comportant des éléments fins en quantités suffisantes pour remplir les espaces entre les plus grands granulats **[10].**

On peut atteindre une résistance de 60 - 90 MPa sans ajout des ultras fines seulement avec une réduction de E/C et un ajout de fluidifiant

I.5. Avantages du Béton à haute performance :

Le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel car il présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel tel que :

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques,
- Une fluidité très élevée à l'état frais,
- Résistance accrue au jeune âge,
- Une résistance finale accrue après durcissement,

- Un module d'élasticité supérieur,
- Un retrait total réduit,
- Permet la réalisation de constructions plus élancées,
- L'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées.**[13]**

I.6. Composition du beton haute performance :

Un BHP est presque un béton ordinaire adjuventé qui se compose de : ciment , gravier, sable , l'eau et l'adjuvent, mais ce qui le différencie c'est l'ajout des addition : fumée de silice , la pouzzolane naturelle, cendres volantes et Les laitiers de haut fourneau ……etc

I.6.1. Ciments :

Le ciment pur (ou clinker) est obtenue par la cuisson entre 1400et1500 °C d'un mélange de calcaire (CaCO3) et d'argile .après un ajout de 5% de gypse, le clinker est broyés afin d'obtenir le ciment que nous cronissant.

Le mode de fabrication du ciment génère des quantités importante de dioxyde de carbone (CO_2). tout d'abord par l'énergie nécessaire à la cuisson indispensable à la fabrication des matériaux, ensuite, parce que, dans le processus de fabrication , la décarbonatation de calcaire est fatalement source de CO_2, cette part étant incompressible les fabricants de ciments, contraints par la nécessité (coût de l'énergie , quotas de CO_2) mais aussi par une conscience environnementale, ont entamés une politique de diminution importante des émissions par tonne de ciment notamment on optimisant les processus(récupération de chaleur). Les cimenteries brûlent également des déchets dans leur fours (pneus déchiquetés, huiles usagées, boues de station d'épuration). Enfin, les cimentiers incluent de plus en plus dans les ciments des additions qui peuvent remplacer une partie de clinker.**[12]**

I.6.2 Les granulats (sable, gravillons) :

Constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extrait de ballastières (ou sablières) naturelles ou dragués en rivière ou en mer et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.**[12]**

On utilise en général, pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par du sable et des gravillons. On emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matière minérales, comme les argiles, les schistes (argiles expansées) et les silicates (vermiculite et perlite). Les premières permettent la fabrication de bétons de structure légers, dont la résistance peut atteindre de 40 à 50 Mpa.**[12]**

Les seconds servent à la fabrication de parois en béton très léger, à fort pouvoir d'isolation thermique. Le poids volumique apparent de ces granulats varie d'environ 0.6 à 8 KN/m3. Malgré leur intérêt technique, leur coût énergétique de fabrication est réduit l'emploi à des applications particulières. Les granulats lourds sont soit des riblons ou de la grenaille de fer, soit des minéraux naturels comme la magnétite, la limonite ou la barytine. Ils sont utilisés dans les bétons destinés à assurer une protection contre les rayonnements atomiques. Leur poids volumique apparent varie de 30 à 50 KN/m3. **[12]**

Tableau I.3.les dimensions et les caractéristique des granulat **[14]**

Les granulats les plus utilisés		
Familles	***Dimensions***	***Caractéristiques***
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm

- **Rôle et importance des granulats dans le béton :**

Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et ces propriétés rhéologiques et mécaniques a intéressé les chercheurs. Le rapport E/C est une notion de base dans la technologie du béton, mais il n'est pas suffisamment précis pour une maitrise complète de la qualité du béton frais et durci. Plusieurs études ont montré que les granulats qui constituent le squelette, et qui représentent dans les cas usuels plus de deux tiers du volume total du béton ont des influences claires sur les performances du béton selon leurs qualités, leurs formes et leurs tailles (dimensions) et aussi le volume qu'ils occupent. **[8]**

Il n'est pas nécessaire de choisir un granulat particulièrement résistant pour produire un béton usuel, par contre dans le cas des BHP ou la pate de ciment hydraté et la zone de transition sont suffisamment fortes, les granulats peuvent devenir le maillon faible du béton. Tout le sable naturel utilisé pour fabriquer un BHP doit contenir le moins possible de particules supérieures à 5 mm, lorsque ces particules sont plutôt friables, car elles constituent alors le maillon faible du BHP. Le remplacement partiel d'un sable naturel par un sable concassé peut présenter quelques avantages surtout si le sable concassé a été fabriqué en utilisant une roche très résistante .**[8]**

La forme des particules des gros granulats et aussi importante de point de vue rhéologique. Il faut essayer d'utiliser autant que possible des particules arrondis ou cubique plutôt que des particules plates et allongées. Ce dernier type de particule n'est pas recommandé, car ces particules sont mécaniquement faibles et influence négativement la maniabilité des bétons ce qui nécessite une augmentation du dosage en superplastifiant pour obtenir la maniabilité visée. Les granulats ont aussi une grande influence sur la compacité du béton qui est le facteur principale pour l'obtention des BHP..**[8]**

I.6.3 L'eau :

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraintes**. [12]**

- **Effet de l'eau excédentaire**

Durant des années, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais l'ouvrabilité nécessaire. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau (pour un rapport eau/ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage) reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit la résistance du béton **[15].**

Un lien direct sera observé entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou – formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau/ciment (E/C). En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas nouveau. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique **[16].**

L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en oeuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme il est illustré par la figure **I.1.**

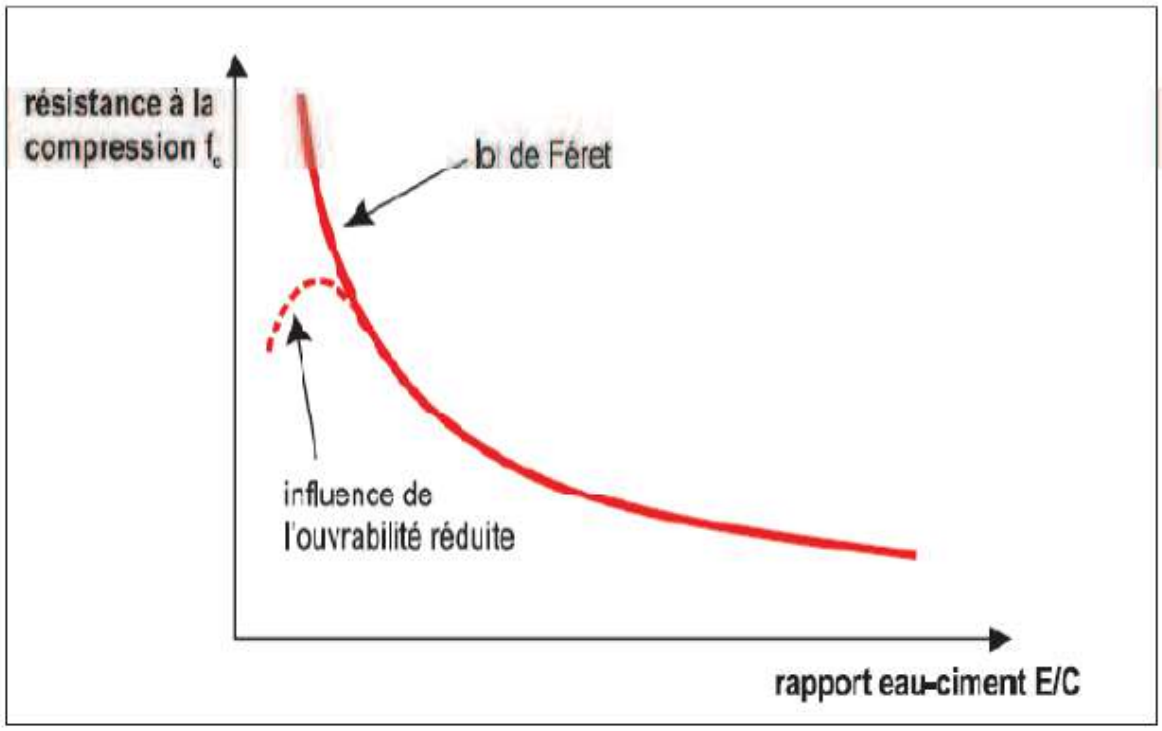


Figure I.1 Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau-ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10–9 à 10–8 m (pores de gel) sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Cependant il y à aussi des pores de plus grandes dimensions dit capillaires dont le diamètre varie de 10–7 à 10–5 m. Leur quote part dépend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue. La figure **I.2** montre

comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation **[15]**. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible. Mais la question qui se pose dans ce cas là est l'ouvrabilité, et par la suite comment concilier deux exigences contradictoires : réduire la quantité d'eau pour obtenir une résistance et une durabilité accrues, et ajouter de l'eau pour faciliter l'ouvrabilité ? De nombreuses années ont été consacrées à la recherche d'une réponse à cette question**.[8]**

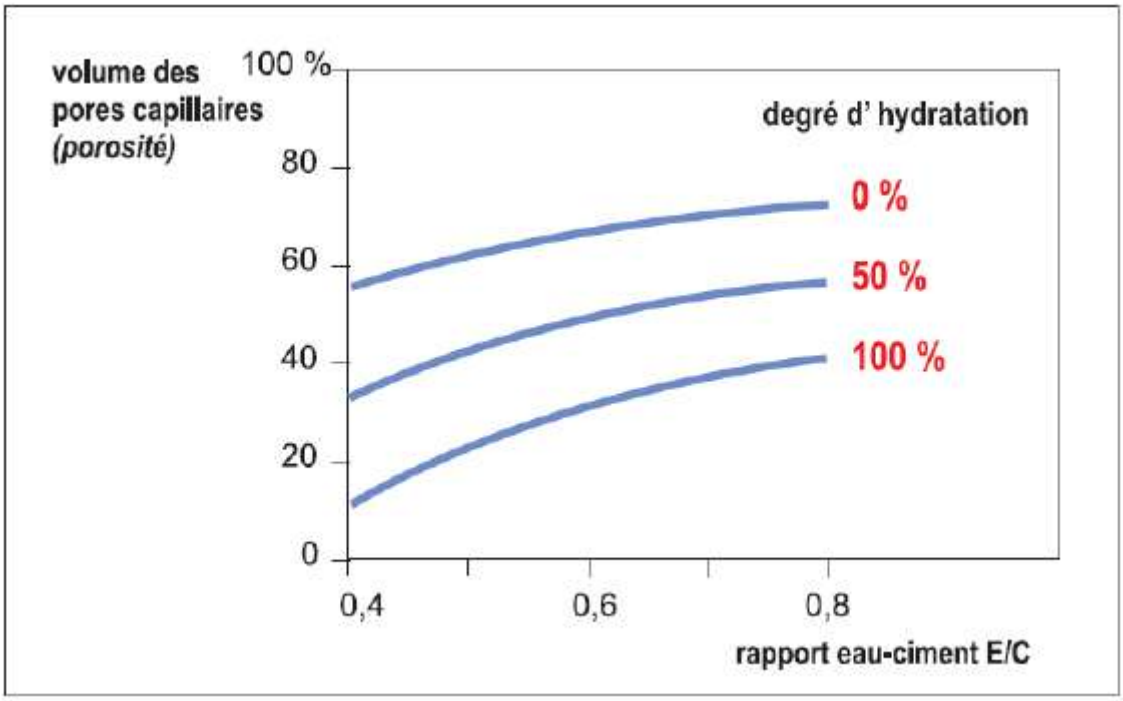


Figure I.2 Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation

- **l'influence du rapport E/C sur la porosité capillaire :**

A) Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles.

B) Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire. La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées**.[12]**

I.6.4 Les adjuvants

Ajoutés en faible qualité (moins de 5% de la masse des ciments), les adjuvants sont devient des ingrédients courant de la fabrication des bétons. Les normes de la série NF EN 934 définissent :

I.6.4.1. Les entraîneurs d'air :

Augmentent la quantité d'air occlus dans le béton, il améliorent la durabilité des bétons situés dans les zones où les hivers sont froids et donc soumis à des cycles de gel-dégel ou aux sels déverglaçage, le réseau de bulles d'air occlus autorise les mouvements d'eau qui ont lieu dans le béton en cas du gel.

- **Teneur en air du béton frais** : ≥ 2,5 % en volume au dessus du béton témoin ; teneur en air totale entre 4% et 6%.
- **Caractéristiques de vide d'air dans le béton durci** : facteur d'espacement dans le béton adjuvanté ≤ 0,200 mm.
- **Résistance à la compression** : à 28 jours ≥ 75% du béton témoin**.[12]**

I.6.4.2 .Les accélérateurs de prise :

Diminution de temps de prise avec une grande résistance à courte terme

- **Temps de début de prise** : à 20°C ≥ 30 minutes ; à 5°C ≤ 60% du mortier témoin.
- **Résistance à la compression** : à 28 jours ≥ 80% du béton témoin ; à 90 jours ≥ à la résistance à 28 jours**.[12]**

I.6.4.3.Les superplastifiants :

En défloculant les grains de ciment, ils améliorent de façon spectaculaire le comportement du béton frais et de sa maniabilité tout en diminuons la qualité d'eau utilisée, c'est la clé pour obtenir des résistances élevées.

- **Augmentation de la consistance** affaissement ≥ 160 mm par rapport aux 30 +- 10 mm initiaux ; étalement ≥ 180 mm par rapport aux 350 +- 20 mm initiaux.

- **Retard de prise** : début de prise ≥ début de prise du mortier témoin + 90 minutes ; fin de prise ≤ fin de prise du mortier témoin + 360 minutes.
- **Réduction d'eau** : ≥ 12% par rapport au béton témoin.
- **Résistance à la compression** : à 24 heures ≥ 140% du béton témoin ; à 28 jours ≥ 115% du béton témoin.
- **Résistance à la compression** : à 7 jours ≥ 100% du béton témoin ; à 28 jours ≥ 115% du béton témoin.
- **Résistance à la compression** : à 28 jours ≥ 90% du béton témoin**.[12]**

I.6.4.3.1. L'action des superplastifiants

La découverte des plastifiants et plus particulièrement des superplastifiants très puissants dans les années 1970 a constitué un véritable tournant. Se sont des polyélectrolytes ou polymères hydrosolubles. Ils peuvent être classés historiquement dans les familles suivantes :

• 1ere génération : poly-naphtalène-sulfonates (PNS)
• 2eme génération : poly-mélamine-sulfonates (PMS)
• 3eme génération : polycarboxylates (PC), et hybrides avec chaînes sulfonates
• 4eme génération : poly-carboxylates-polyox (PCP) et poly-phosphonates-polyox

Aucun de ces produits n'est toxique, à la dose où on les emploie typiquement, soit 0,5 à 2% du poids de ciment **[15].**

L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable, sans ajouter d'eau [18]. La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en floculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces floculats sera toutefois emprisonnée (Figure. I.3). A partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée**.[8]**

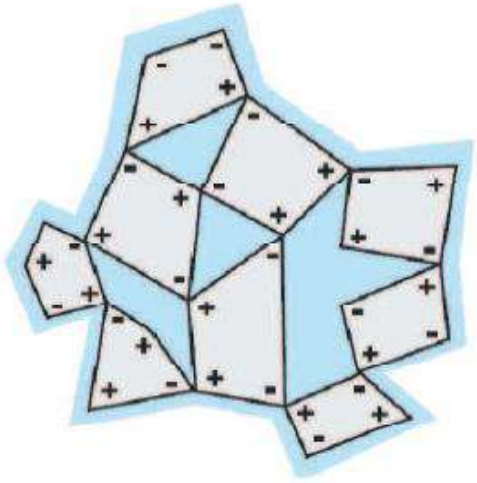
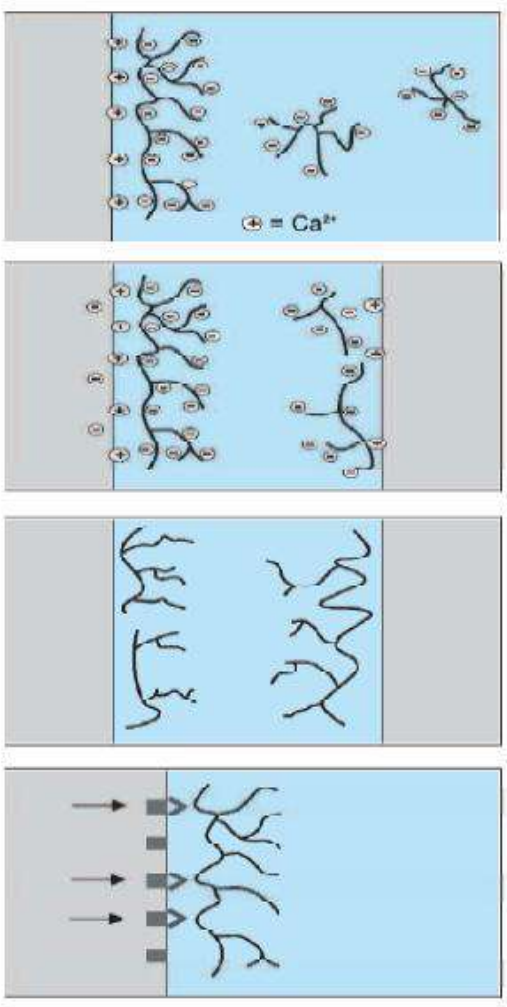


Figure I.3. Des charges opposes sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation

Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des conglomérats (Figure. I.4.). Leurs molécules se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant (sous la forme de longues chaînes) renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent leurs rapprochements réciproques. Grâce aux structures de polymères modernes 'en forme de peigne', il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un superplastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa **[19].**



A- Adsorption des molécules du plastifiant a l'interface entre le grain de ciment et l'eau.

B- Repulsion electrostatique de deux particules de ciment .

C-Encombrement stérique

D-Réaction chimiques aux sites les plus réactifs

Figure I.4.Les superplastifiants empêchent la floculation

I.6.4.3.2 Intéraction ou Compatibilité ciment-superplastifiant

À l'heure actuelle la qualité des superplastifiants s'est nettement améliorée **[16].**

Certaines combinaisons ciment/superplastifiant permettaient de fabriquer des bétons ayant un grand affaissement initial et qui est conserver dans le temps (combinaison compatible), alors que dans d'autres cas l'affaissement initial élevé obtenu avec un superplastifiant sera perdu très rapidement (combinaison incompatible). Donc une combinaison ciment/superplastifiant est dite non compatible quand un béton superplastifié perd très rapidement son affaissement initial. Dans certains cas, des bétons peuvent perdre leur affaissement initial en moins de 15 min, tandis que dans d'autres cas des bétons peuvent conserver un affaissement supérieur à 200 mm pendant 1 h ou même 1 h 30, sans phénomène de ressuage, de ségrégation et sans perte de résistance à 24 heures **[15].**

Au fur et à mesure que le potentiel technologique et économique des superplastifiants s'est affirmé, un effort de recherche est soutenu pour essayer de mieux comprendre les

mécanismes d'interaction ciment/superplastifiant de façon à développer des superplastifiants plus puissants, plus efficaces, plus économiques, qui soient compatibles avec le plus grand nombre de ciment. Cet effort de recherche a finalement abouti au développement d'une nouvelle science des adjuvants qui permet déjà de mieux contrôler les propriétés des bétons superplastifiés **[18].**

Les interactions ciment / superplastifiant sont des processus très complexes. En effet, le ciment Portland est un matériau inorganique polyphasique, composé des phases du clinker majoritaires (C3S, C2S, C3A, C4AF) et de phases minoritaires (CaSO4.xH2O, CaO, (NaK)2SO4...). Il en est de même pour les adjuvants organiques souvent constitués de plusieurs composants du fait de la nature des produits ou résultants de leurs procédés de fabrication **[19].**

I.6.4.3.3 Les polysulfonates

Plusieurs recherches ont mis en évidence l'importance cruciale de la vitesse de dissolution des différents sulfates que l'on retrouve dans un ciment Portland lorsqu'il s'agit de maintenir l'affaissement des bétons superplastifiés. Chaque fois que la solution interstitielle du béton frais présente un déficit en ions SO4-2, des molécules de polysulfonate vont neutraliser des sites actifs du C3A et c'est cette consommation de molécules de polysulfonate qui occasionne alors une perte d'affaissement.

La teneur en sulfates alcalins du clinker qui a servi à fabriquer le ciment devient donc un facteur clé dans cette compétition entre les ions SO4-2 et les terminaisons SO3– des polysulfonates lorsqu'il s'agit de neutraliser les sites actifs du C3A. En effet, les sulfates alcalins sont beaucoup plus rapidement solubles que les différentes formes de sulfate de calcium que l'on a rajouté au clinker dans les broyeurs et, en général, ils se situent très près du C3A sur les grains de ciment.

L'importance de la teneur en sulfates alcalins explique aussi pourquoi ce sont les ciments à très faible teneur en alcalins et les ciments blancs, qui contiennent très peu d'alcalins en général, qui sont les ciments les moins compatibles avec les superplastifiants à base de polysulfonates.

Dès le moment où l'on connaît une des causes principales de la perte d'affaissement de certains bétons superplastifiés, il devient très facile de corriger ces cas d'incompatibilité : il suffit de rajouter une quantité adéquate de sulfate alcalin rapidement soluble dans le béton au moment de son gâchage **[20].**

I.6.4.3.4 Les polycarboxylates

Les superplastifiants actuels sont principalement des polycarboxylates (4eme génération). Ils permettent de produire des bétons de faible rapport eau/liant. Ces matériaux présentent une grande efficacité à court terme mais, dans certains cas, la plasticité n'est pas maintenue dans le temps pour des raisons d'incompatibilité entre le superplastifiant et le liant, voire le granulat.

Les pâtes superplastifiés incompatibles, par comparaison à des pâtes compatibles, présentent soit des grandeurs rhéologiques importantes, soit des propriétés d'écoulement différentes. Ces changements d'ouvrabilité sont attribués, en présence d'une source d'ions sulfate, à une formation excessive d'ettringite (produit d'hydratation du C3A) sous forme d'aiguille à la surface des grains de ciment. Les phases anhydres impliquées dans la réaction de formation de cet hydrate interagissent avec les polycarboxylates. Les équilibres de dissolution des sulfates de calcium sont modifiés du fait de la complication des ions Ca2+ par les polymères. La variété cristallographique du C3A influence également la formation de l'ettringite. La structure orthorhombique étant plus réactive que la structure cubique, sa présence dans un ciment peut être à l'origine d'une perte rapide d'ouvrabilité en présence de superplastifiant **[21].**

I.6.4.3.5 Influence du superplastifiant

Sabah Ben Messaoud [22] montre que L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant a la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue.

BELAIDI AMINA,2014 [23] ont montré que l'affaissement est une fonction exponentielle de la Quantité de superplastifiant. et plus on ajoute le dosage des ajout (fumée de silice ,laitier ,pouzzolane naturelle) plus on augmente le pourcentage du superplastifiant.

Meyer (1979) [24] a étudié l'influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m3 de ciment à maniabilité constante, les résultats montrent que la réduction du rapport E/C va permettre d'augmenter les performances mécaniques du mélange.

M. Belouadah [25] a trouvé que Les bétons adjuvantés présentent des résistances élevées. Le rôle du super plastifiant dans la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité du béton est mis en évidence. Ou l'ajout de super plastifiant diminuait l'amplitude du retrait et réduit les dépression capillaire

I.6.5 Les additions minérales

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325} de Février 2002 définit les additions comme des « matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ».**[12]**

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de «supplementary cementitious matériels». De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pourrons distinguer trois principaux effets : .**[12]**

- un effet granulaire engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet agit essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires a l'état frais et peut influer sur le développement et l'intensité des deux autres effets des additions. .**[12]**

- un effet physico-chimique et microstructural engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires**.[12]**

- un effet chimique engendré par la capacité de certaines additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir en milieu cimentaire. Il agit sur le volume et la nature des produits hydratés formés. Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment.**[12]**

Ces matériaux sont des coproduits industriels, leur composition chimique est en général plus large que celle du ciment portland, ce qui explique la grandeur des surfaces que ces zones couvrent dans le diagramme ternaire : CaO-SIO2 –Al2O3 **[26].**

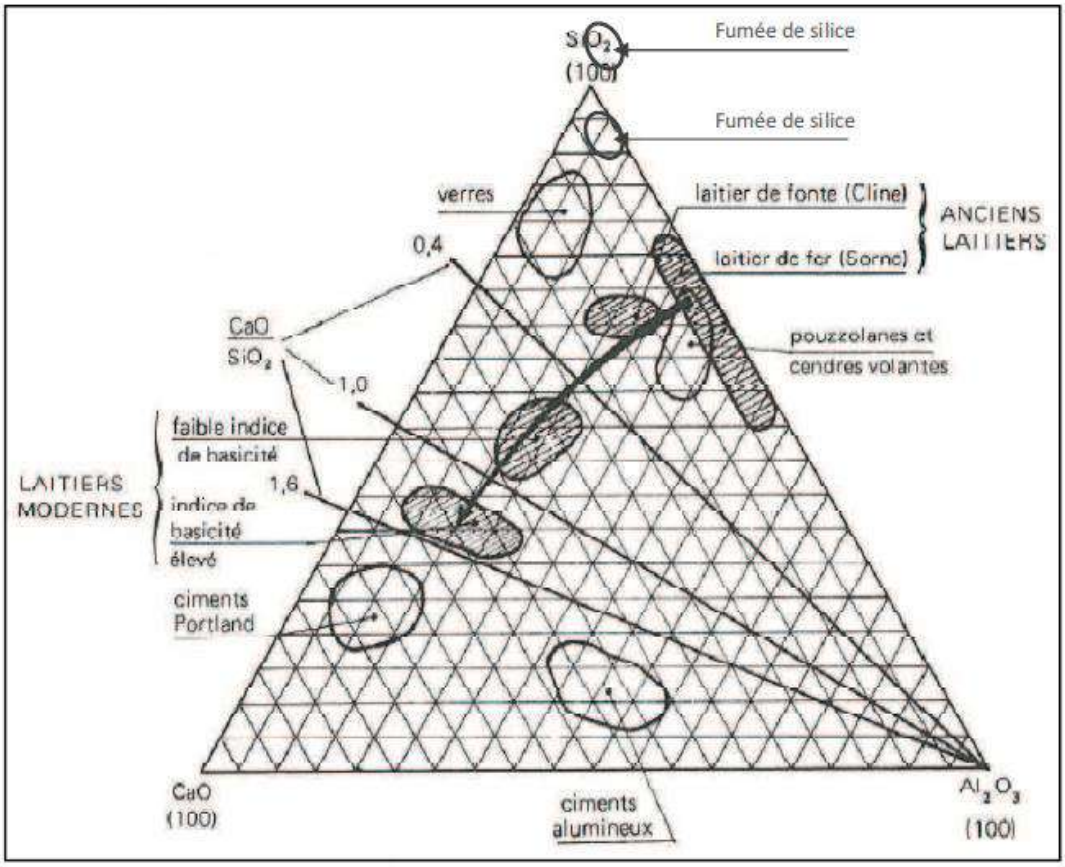


Figure I.5 le diagramme ternaire : CaO-SIO2 –Al2O3[8]

I.6.5.1 la fumées de silice (EN 13 263-1 et NF P 18-502) :

Également appelées « fumées de silice » ou «poussières de silice » ou encore « microsilice», les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrométallurgie du silicium et de ses alliages.

On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal.

L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice**.[12]**



Figure I.6 la fumées de silice

L'adjonction de fumée de silice ne se traduit par une augmentation de la résistance que pour des valeurs de FS/C inférieur à 26%**.** En effet, pour s'hydrater, la fumée de silice a besoin de la chaux dégagée par le clinker au cours de son hydratation ; plus il y a de fumée de silice et moins il y a de clinker donc moins de chaux. Si l'on mélange la fumée de silice avec un ciment qui n'est pas du CPA, mais un CPJ faiblement dosé en clinker, l'effet pouzzolaniques s'en ressentira car le dégagement de chaux sera plus faible**.[27]**

Pratiquement, l'utilisation des fumées de silice dans le but d'obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 18% ; même si l'effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l'ordre de 33%**.** Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en oeuvre. Propose un dosage optimal compris entre 6 et 10% **[27].**

En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable.[27]

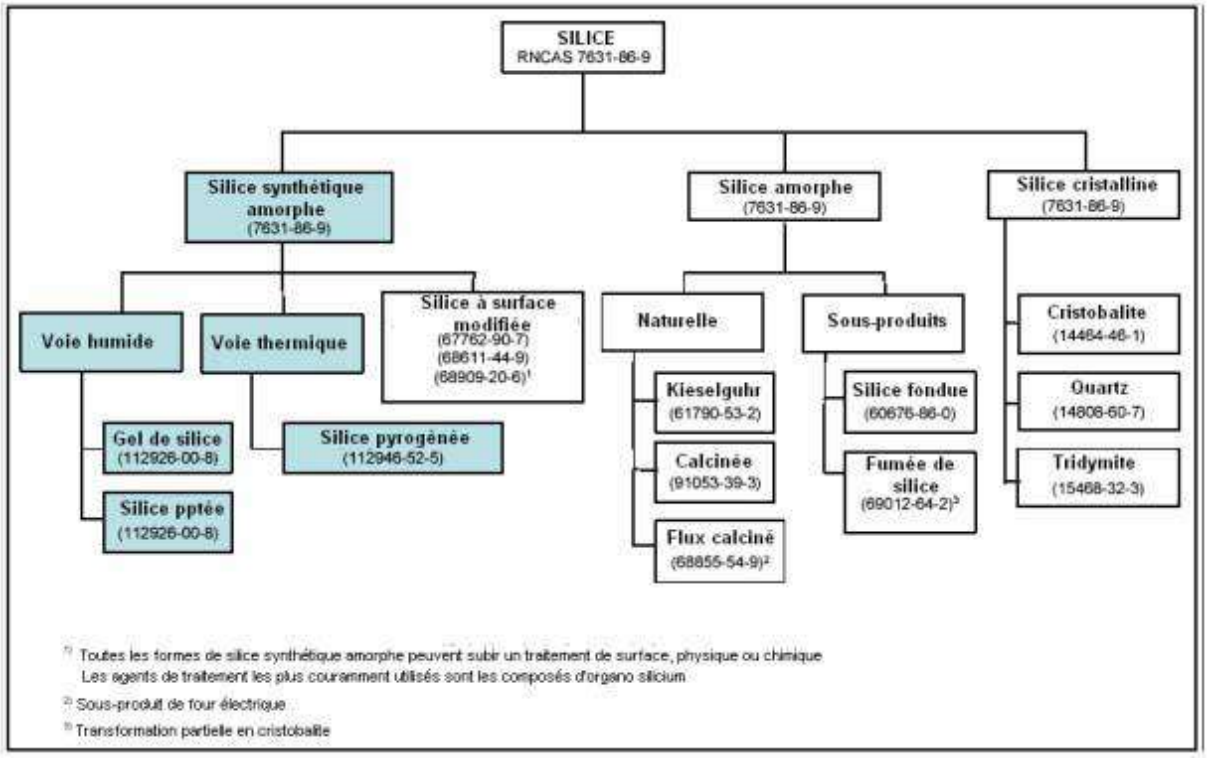


Figure I.7 organigramme de différente catégorie de silice **[27]**

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages. Les températures de travail très élevées (1500 à 3000 °C) au cours de l'élaboration du Silicium, provoquent d'importants dégagement de fumée qui sont captes en surface afin de protéger l'environnement **[6].** Suivant la composition des alliages, les produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux et les méthodes de fabrication les propriétés des fumées de silice sont assez diverses.

D'un point de vue chimique la fumée de silice est essentiellement composée de silice (plus de 90 %). Et d'un point de vue structural, elle est essentiellement composée de silice vitreuse. Et d'un point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0,1 µm et 1 ou 2 µm. la dimension moyenne des ces sphères est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen **[28].**

La densité de la fumée de silice est d'environ 2,2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse. La surface spécifique de la fumée de silice ne peut pas être mesurée de la même façon que celle du ciment portland à cause de son extrême finesse : elle doit être déterminée par adsorption d'azote dans la documentation en trouve les valeurs entre 15000 et 25000 m^2/kg, par contre 1500 m^2/kg pour un ciment portland.

Ces caractéristiques très particulières (très forte teneur en silice, état amorphe, extrême finesse) ont font de la fumée de silice une pouzzolane très réactive

Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe, mais aussi à un effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est l'effet filler. En outre, la fumée de silice à un effet non négligeable sur la germination des grains de portlandite Ca(OH)2 . **[28]**

Les fumées de silice réagissent pouzzoulaniquement avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratée (C-S-H), selon la réaction pouzzolanes suivantes **[1]:**

$$SiO2 + xCa\,(OH)2 + yH2O \longrightarrow xCaO\,SiO2\,(x+y)\,H2O$$

Cet effet réduit la taille des pores, d'où une diminution de la porosité qui améliore les propriétés mécaniques du ciment.

Les fumées de silice grâce à leur morphologie offrent en outre l'avantage du béton frais. Elles n'interfèrent pas sur l'arrangement géométrique des grains de ciment dans la suspension, les grains de silice peuvent venir se placer dans les espaces entre les grains de ciment sans modifier la disposition géométrique.

Mais en pratiqué, pour que ces deux effets (effet fillers et effet pouzzolanique) puissent se développer, il est nécessaire d'ajouter un fluidifiant au mélange.

L'ajout de fumée de silice entraine une amélioration des résistances mécaniques en compression. Le dosage optimal en fumée de silice pour l'obtention de hautes résistances se situerait aux alentours de 10% de fumée de silice par rapport au poids de ciment **[29].**

Les particules de fumée de silice peuvent avoir un effet fluidifiant sur les bétons ayant un très faible rapport E/C **[30].** Cet effet n'est pas bien expliqué par les chercheurs : certains voient que l'action des petites sphères de fumée de silice est comme celle des billes d'un roulement, d'autres pensent que les particules de fumée de silice déplacent une certaine quantité d'eau que l'on retrouverait au sein des grains de ciment floculé. La combinaison de ces deux modes d'action de la fumée de silice entraine la formation d'une microstructure tres dense et d'une très bonne adhérence entre les granulats et la pate de ciment hydratée **[1].**

Il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice. Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de

calcium *Ca+2*, libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton [**31**].

I.6.5.1.1. Les avantages de la fumée de silice:

A) Bétons à l'état frais:

- Réduction de :
- la ségrégation ;
- la chaleur d'hydratation ;
- l'exsudation.
- Amélioration de :
- l'adhésion
- la cohésion

B) Bétons à l'état durcis:

- Amélioration des résistances mécaniques (en particulier résistance en compression).
- Amélioration significative de : Réduction significative de :
- la résistance aux attaques chimiques aux sulfates et aux chlorures
- la porosité et la perméabilité
- la carbonatation
- la résistance à l'abrasion
- la corrosion des armatures
- la résistance au cycle gel/dégel **[32]**

I.6.5.1.2. Influence de la fumée de silice :

A. à l'état frais

❖ **Sur l'affaissement**

- **Sabah Ben Messaoud [22]** a trouvé dans leur étude sur formulation des bétons à hautes performances que la fluidité de béton est augmentée avec l'utilisation de la fumée de silice, en raison de leurs petites particules sphériques et de leur immense surface spécifique
- **Nanthagopalan p [33]** ont remarqué que la fumée de silice a une influence sur l'écoulement du béton parce que leur demande en eau est importante par rapport au

ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et augmenter la viscosité.

- **Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34]**remarque d'après la figure I.8, un grand affaissement au cône d'Abrams qui augmente à chaque fois qu'on ajoute de l'ajout cimentaire.

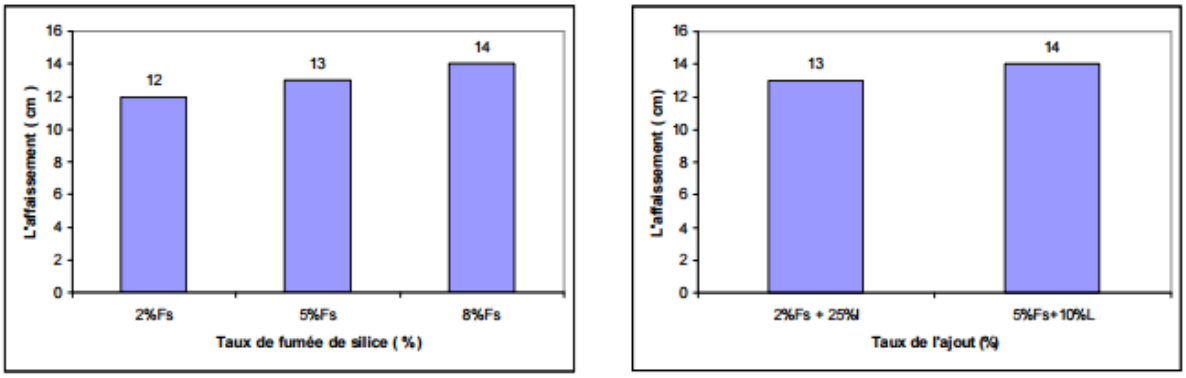
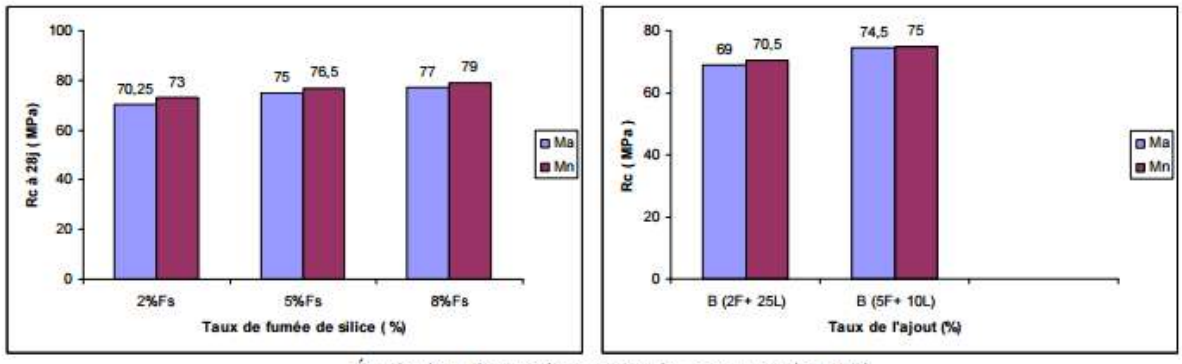


Figure I 8. Affaissement au cône d'Abrams

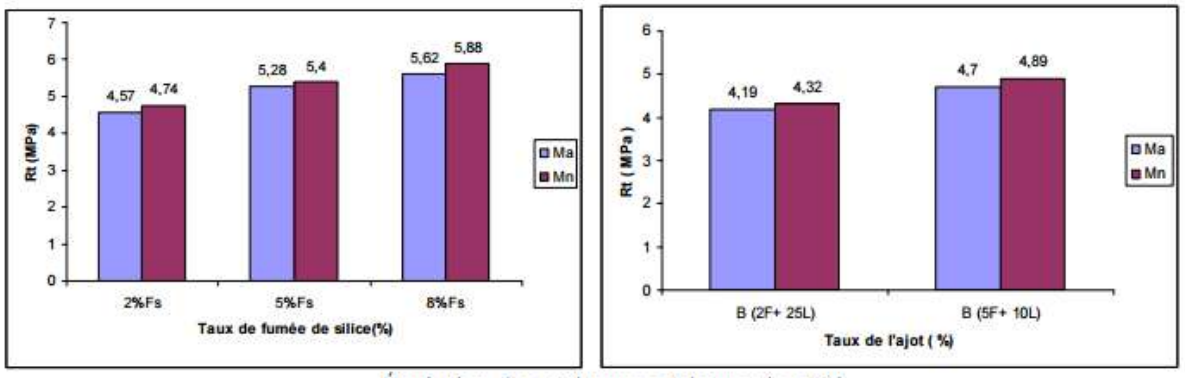
B. à l'état durci

❖ **Sur la résistance**

- **Sabah Ben Messaoud [22]** a remarqué une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de la fumée de silice par rapport à l'échantillon témoin, de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 80 MPa.



Évolution des résistances à la compression 28j
(Milieu agressif (Ma) et non agressif (Mn))



Évolution des résistances à la traction 28j
(Milieu agressif (Ma) et non agressif (Mn))

figures I.9 EVOLUTION DES RESISTANCE

- **Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34]** ont vu sur la figures I.9 présentant l'évolution des résistances mécaniques des bétons testés, on remarque une amélioration considérable de la résistance à la compression et à la traction du béton de fumée de silice. A 28j de conservation, on constate un gain de résistance en compression de l'ordre de 8 % avec l'augmentation de taux de fumée de silice ce qui augmente la résistance mécaniques .Ce résultat était prévisible connaissant le rôle bénéfique de l'utilisation simultanée de la fumée de silice et d'un superplastifiant

ils ont vu aussi que la fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.se qui engendre une diminution du gonflement et de l'absorption capillaire.

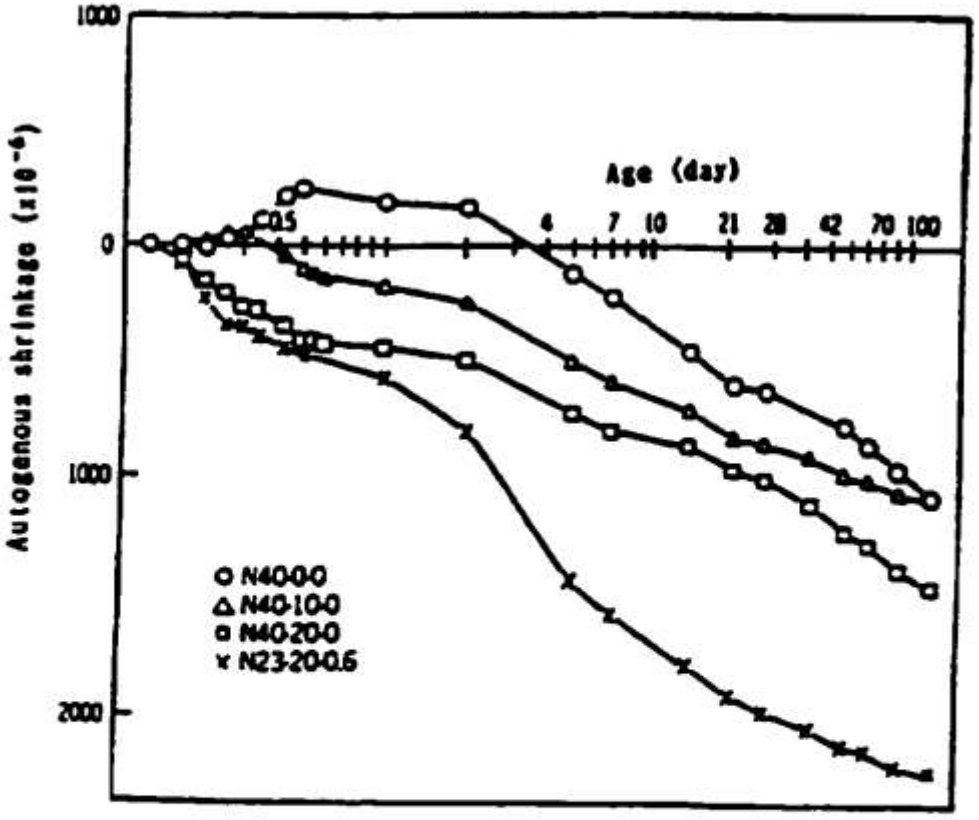


Figure 2.6 : Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène externe d'un coulis [Tazawa et al, 1995]

Nomenclature : N23-20-0.6 (type de ciment: voir tableau 2.1) (rapport E/C en pourcentage)-(Pourcentage de substitution du ciment par de la fumée de silice)-(dosage en superplastifiant)

figure I.10 influence de la fumée de silice sur le retrait

- **Aouad, Idriss [35]** a trouvé sur la figure I.10 que la substitution du ciment par la fumée de silice engendre une augmentation du retrait endogène pour les raisons que elles invoque le raffinement des pores capillaire et la densification de la microstructure la combinaison de cet effet provoque. d'impotence tensions et des dépressions capillaire plus importantes et un retrait élevé. "

I.6.5.2. Cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé divisé. Ils peuvent avoir

différentes compositions chimiques et différentes composition de phase, ils peuvent être classés en quelques grandes familles, parmi ces grandes famille en trouve :

Les cendres silico-alumineuses, les cendres silico-calciques et les cendres sulfocalcique qui on une très forte teneur en calcium et en soufre. Ce n'est pas toujours facile d'inclure une cendre volante dans une de ces classes, et pouvoir prédire son comportement pouzzolanique **[36].**

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes aux autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment portland, elles peuvent contenir des sphères creuses, comme elles peuvent contenir seulement des particules angulaires leurs dimensions pouvant descendre jusqu'à 0,15 µm, dans certains cas **[1].** L'étendue granulaire des cendres volantes varie de 0,5µm à 4 µm selon la nature du produit, la masse volumique moyenne est d'environ 1,35 m2/g.

Pour développer une réaction pouzzolanique, la cendre volante doit contenir une quantité non négligeable de matériaux vitreux, de cet effet, il faut porter beaucoup d'attention et en se basant pas sur une généralisation de leurs efficacité quand elles sont utilisées comme ajouts dans les BHP**.[8]**

I.6.5.3. Les laitiers de haut fourneau :

Selon la filière considérée, le laitier de Haut Fourneau est un co-produit découlant de la transformation, dans le Haut-Fourneau, soit des oxydes de fer en "Fonte", soit des oxydes de manganèse en alliage "Ferro-manganèse"**[29].** Ce laitier est une roche liquide (1500°C environ) composée des parties non métalliques du minerai combinées à la chaux **[30].** Dans les hauts fourneaux modernes, chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 280 à 340 kg de laitier **[36].**

Le traitement employé pour l'obtention des laitiers granulé et le refroidissement rapide ; Le procédé consiste à refroidir brutalement le laitier en fusion avec de l'eau. Le produit obtenu se présente sous la forme d'un sable 0/4 mm. Lors de cette trempe, le laitier acquiert une structure. L'évolution normale du refroidissement ayant été stoppée, le laitier conserve une énergie latente qui constitue son potentiel de prise hydraulique. Il existe deux types de granulation, en rigole et en pot. C'est le procédé utilisé pour la granulation du laitier d'ELHADJAR**.[8]**

I.6.5.4 La Pouzzolane naturelle [NF P18-308 ,1965]

la pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques, essentiellement composée de silice (SiO2), d'alumine (Al2O3) et d'oxyde ferrique (Fe2O3).

La norme [ASTM C 618-3, 2003] la décrit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

I.6.5.4.1. Types de pouzzolane :

- **Pouzzolane naturelle**

La Pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique (verre volcanique, pierre ponce, zéolite….) ou sédimentaire (terre à diatomées, trass…..), composé essentiellement de silice alumine et fer.

Elle est formée d'une phase mal cristallisée, amorphe et de grande surface spécifique, qui réagit rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux cristaux de silices et d'aluminate de calcium hydraté qui participent au développement des résistances mécaniques et chimiques. Selon la norme DE L'ASTMC 18, la pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède en lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, Ca (OH) 2 à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liantes **[37]**.



Figure I.11 : Pouzzolane naturelle

- **Pouzzolane artificielle :**

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composes de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite **[38]**.

I.6.5.4.2. La couleur des pouzzolanes :

Les oxydes de fer peuvent être retenus comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puis qu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées.

Les analyses chimiques réalisées sur les pouzzolanes de provenances très différentes (France, Italie, Madagascar, Réunion, Martinique, Guadeloupe, Zaïre et Ruanda) tendent bien à montrer que la couleur dominante de celles-ci reste étroitement liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques **[37]**.

La coloration des matériaux ne révélait que des variations du degré d'oxydation du fer présent et ne pouvait donc pas affecter la partie silicatée. De ce fait, le préjugé selon lequel les pouzzolanes noires présenteraient une qualité plus médiocre que celles des pouzzolanes rouges est actuellement dénué de tout fondement **[39].**



Figure I.12- pouzzolanes rouges calibrée



Figure I.13- Pouzzolane noire

I.6.5.4.3. Qualités des roches utiles du gisement Bou-Hamidi :

L'étude géologique faite en 1985 par l'UREG Boumerdes sur la qualité et l'activité pouzzolanique des roches utiles exploitables du gisement Bouhamidi à donner les résultats suivants:

Tableau I.4 : qualité et activité de la roche du gisement bouhamidi **[40]**

N°	Variétés lithologiques	Activité (mg/g)
01	Pierre ponce	70
02	Tuf calcaire finement poreux	82
03	Pierre ponce grise et brunâtre	77
04	Tuf basaltique finement poreux	95
05	Tuf compact	94
06	Basalte gris clair poreux	85
07	Basalte marron	84
08	Brèche tufeuse cimentée	100
09	Pierre ponce en matériau carbonaté	84
10	Pierre ponce agglutinante brune	100
11	Pierre ponce en matériau carbonaté marans claire	67
12	Tuf basaltique finement poreux, brunâtre et cimenté	71
13	Agglutiné imprégné de masse vitreuse	81
14	Tuf compact	80

I.6.5.4.4 Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique signifie formation dans la réaction de liaison. Les propriétés de la pâte qui contient les produits de réaction sont indépendantes de la réactivité pouzzolanique. L'action pouzzolanique se caractérise donc par deux aspects distincts qui sont la quantité totale de chaux (la chaux utilisée est une chaux éteinte ayant pour formule chimique Ca(OH) 2 (Portlandite ou hydroxyde de calcium)) qu'une pouzzolane est capable de fixer ; et la rapidité de fixation de la chaux par la pouzzolane (la réactivité de la pouzzolane), cette réaction est lente c'est-à-dire se manifeste après 28 jours.

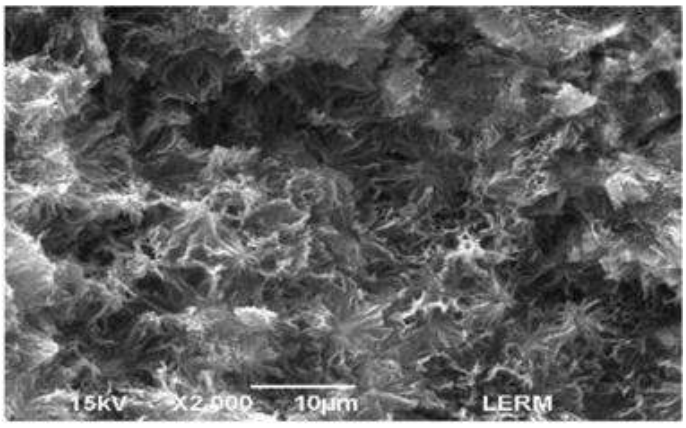


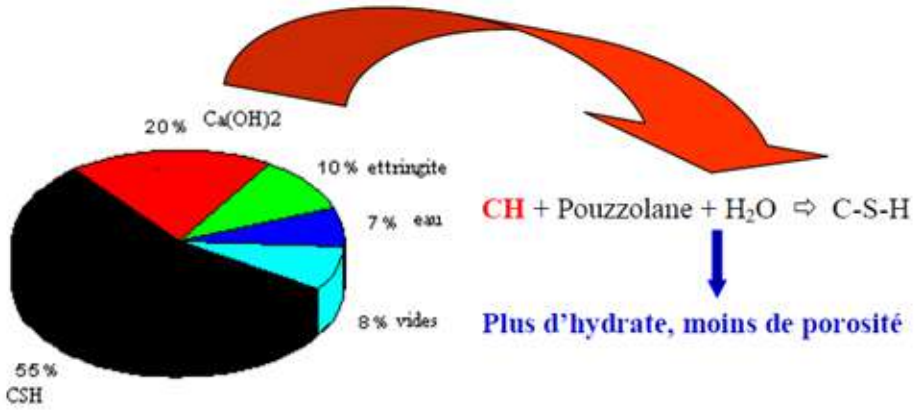
Figure I.14 gel de C-S-H

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice (SiO2) et d'alumine (Al2O3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme,

elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) (C3A. SiO2), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit : **[41] [42]**.

-- $C_3S + H_2O$ □ C-S-H + CH (Réaction rapide)
-- Pouzzolane + CH + H_2O □ C-S-H (Réaction lente)



Composition typique d'une pâte de ciment Portland durci, à peu près totalement hydratée.

Figure I.15 : les réaction d'hydratation ciment et de la pouzzolane **[43]**

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout :

a) La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.

b) Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.

c) Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) **[43]**.

I.6.5.4.5 Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton (**Fig. I.16**).

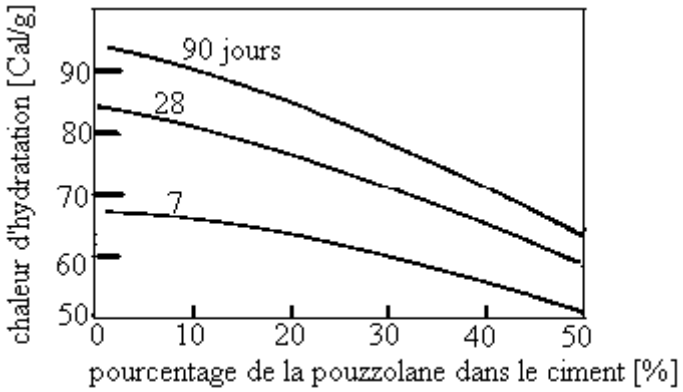


Figure I.16 Effet des ajouts (la pouzzolane naturelle d'Italie) sur la chaleur d'hydratation du ciment portland **[43]**.

La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolanique est égale à environ la moitié de celle du ciment portlands.

I.6.5.4.6. Propriété de la pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. **[44]**

A) Propriétés hydrauliques :

La pouzzolane est capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stable, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes **[44]**.

B) Propriétés physiques de remplissage :

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.**[44]**

I.6.5.4.7. L'utilisation de la pouzzolane :

La pouzzolane est utilisée essentiellement dans :

- L'hiver, elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- Dans les travaux publics elle est utilisée comme matériau de remblai léger, pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement terrains gazonnée, carrière à chevaux.
- Dans l'industrie ajoutée au ciment elle permet la confection de matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées de parpaing de béton léger très utile pour la construction de bâtiment ; elle entre dans la fabrication d'argiles à tuiles.
- Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique **[45]**.

I.6.5.4.8 Influence de la pouzzolane :

A. à l'état frais

- **Sabah Ben Messaoud [22]** a trouvé dans leur étude sur formulation des bétons à hautes performances que la fluidité de béton est augmentée avec l'utilisation de la pouzzolane
- **Sabah Ben Messaoud [22]** à remarque que la fluence de la pouzzolane favorable sur la stabilité du béton frais .et influence aussi sur la stabilité a l'etat durci along terme
- ***Melle KHERROUBI Djamila*, [46]** Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.se qui augmente la résistance mecanique**[30]**

B. à l'état durci

- **Sabah Ben Messaoud [22]** a remarqué une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de pouzzolane par rapport à l'échantillon témoin.
- **Sabah Ben Messaoud [22]** montre que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combine de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif, c'est-a-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle.
- **Melle KHERROUBI Djamila**, **[46]** Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par :

- une série d'effets très favorables pour l'absorption du beton
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces

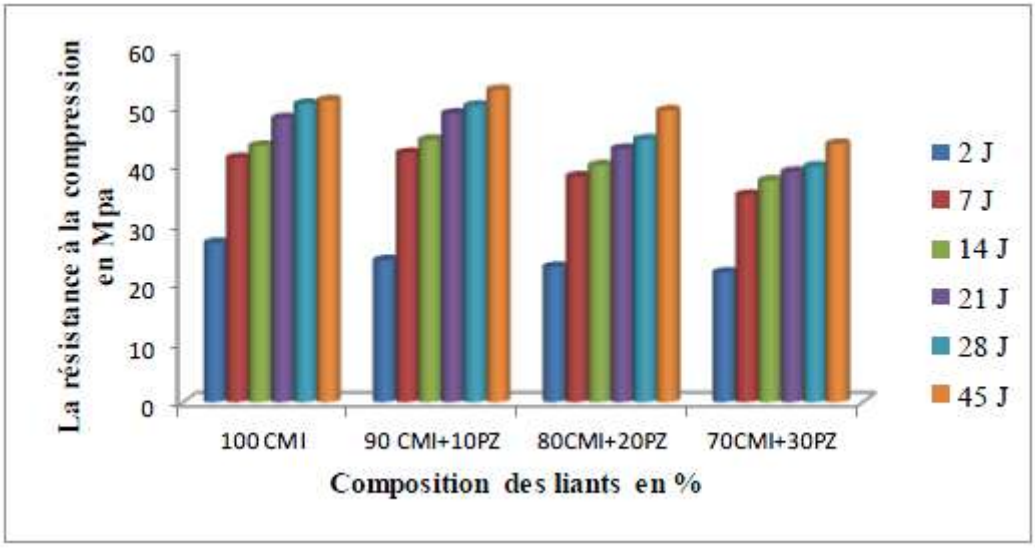


Fig. I.17. Evolution des résistances mécanique à la compression des mortiers en fonction du temps.

- **Melle KHERROUBI Djamila** A trouvé sur la figure I.17que la résistances mécaniques à la compression du mortiers à base de 10% de pouzzolane est plus grand au mortier témoin , est celui de 20% de pouzzolane sont proches de celles du mortier témoin. Plus le pourcentage de pouzzolane augmente plus de 20 % plus la résistance à la compression vas diminuer**.[46]**

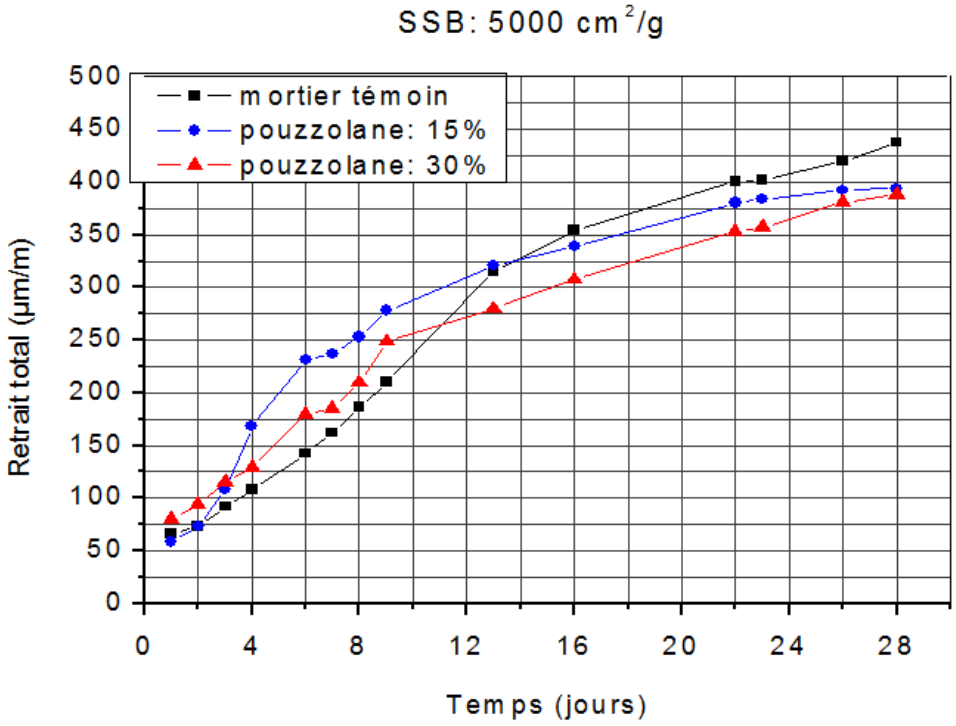


Figure I.18: Evolution du retrait des éprouvettes à la pouzzolane naturelle

- **Sihem HAMMAT a vue que** L'augmentation du retrait des éprouvettes à la pouzzolane par rapport au mortier temoin pendant les premiers jours peut être expliquée par la formation d'une porosité capillaire provoquée par la pouzzolane naturelle à courte échéance qui entraine l'apparition d'interfaces liquide-gaz engendrant ainsi une dépression du liquide (eau interstitielle) qui doit être équilibrée par une compression du solide. Cependant, la diminution du retrait (observé après environ une semaine) des mortiers élaborés avec la pouzzolane naturelle peut être attribuée à l'activité des superplastifiant qui joue le role de la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH). En conséquence, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante induisant donc un retrait moins important par rapport à celui du mortier temoin **[47]**

I.6.5.5. Rôle et importance des additions minérales :

La réduction du rapport eau/ciment par l'ajout d'un superplastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte. Cette zone est très poreuse et peu résistante. Sa largeur n'est que de 40 _m, mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton **[6].**

L'ajout de particules extrêmement fines (**Figure I.19**.) permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomérats. Parmi ces addition minérales, on trouve les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz broyé, les laitiers de haut fourneau broyés , les fumées de silice et la pouzolane naturelle. Cette dernière broyés comme les fumées de silice disposent de propriétés pouzzoulanique qui leurs permet de se combiner avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment **[48]**. Leurs dimension, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte - granulat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à la maturité et par la suite au développement de la résistance .

1 - *ciment*
2 - *fines calcaires*
3 - *ultrafines calcaires*
4 - *ultrafines siliceuses*
5 - *fumée de silice*

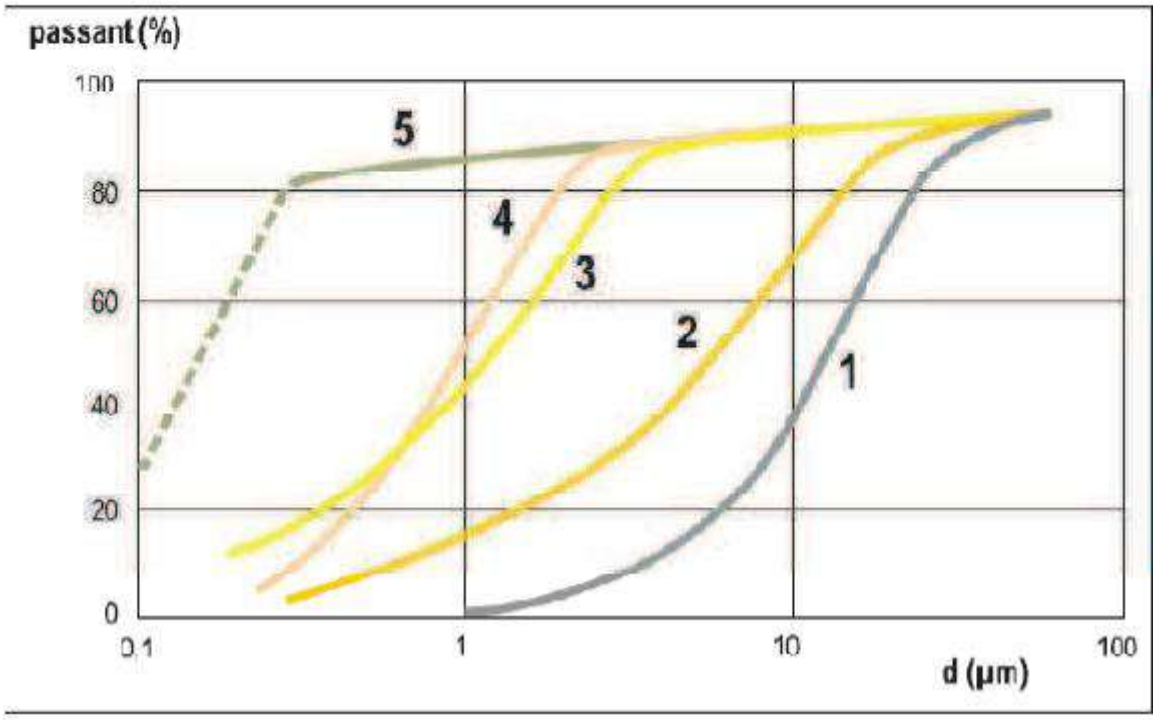


Figure I.19. Granulométrie des matières fines

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité**.[8]**

I.6.5.6. Effets des additions :

On peu résumer l'effet des additions minérales sous forme de fillers sur les propriétés des BHP comme suit **[49]**:

I.6.5.6.1. Effet fillers ou effet de remplissage :

Modification au niveau du squelette granulaire du mélange par une compensation du déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides.

I.6.5.6.2. Effet physique ou de surface :

Les hydrates du ciment nouvellement formés pourraient précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrates qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

Ce processus entraîne une apparente accélération d'hydratation. La germination hétérogène reposant sur les phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance augmente avec l'augmentation de la finesse des additions.

I.6.5.6.3. Effet chimique ou pouzzolanique :

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice, laitier de haut fourneau ou la pouzzolane naturelle , réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance au CSH secondaire. Les étapes de formation des CSH secondaires sont données si dessous **[49]**:

- formation de la portlandite :

$$2\ C_3S + 6H_2O \longrightarrow 3\ CSH + Ca(OH)2$$

$$2\ C_3S + 4H_2O \longrightarrow 2\ CSH + Ca(OH)2$$

- Réaction pouzzolanique :

$$SiO2 + x\ .Ca(OH)2 + y.H2O \longrightarrow xCaO\ SiO2\ (x+y)\ H_2O[49]$$

I.7. Méthodes de calcul de composition des bétons :

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause. Les méthodes de composition se subdivisent en deux types :

Les méthodes à « granularité continue », si la courbe sur le graphique granulométrique s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment de dimension dc ≈ 6.3.m au plus gros grain D des graviers. Toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées. Exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et deux graviers 5/20 mm et 20/50 mm.

Les méthodes à « granularité discontinue », lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'élément intermédiaire Exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50.

La granularité continus permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité , Par contre la granularité discontinus conduit à des bétons présentant en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité ; il semble toutefois que la plus part des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue.**[50]**

I.7.1. Méthode de Bolomey .

I.7.2. Méthode de Faury .

I.7.3. Méthode d'Abrams .

I.7.4. Méthode de Vallette .

I.7.5. Méthode de joisel .

I.7.6. Methodes de G. DREUX :

I.7.6.1. Données de base :

I.7.6.1.1. Nature de l'ouvrage :

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferraillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferraillées **:** distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage. **.[50]**

I.7.6.1.2. Résistance souhaité :

On demandera en général, une résistance nominale s'n à la compression à 28 jourset compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il foudra viser une résistance moyenne à 28 jours **: f'c28j = fc28j+15%*fc28j.[50]**

I.7.6.1.3. Ouvrabilité désirée :

Elle en fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massifs ou plus ou moins ferraillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc…, elle peut se définir en

général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué le tableau suivant :

Tableau I.6 : Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S. **.[50]**

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	**Vibration puissante**	0 à 2	>60
Béton ferme	**Bonne vibration**	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	**Vibration courante**	6 à 9	15 à 25
Béton mou	**Piquage**	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	**Léger piquage**	≥ 14	< 10

I.7.6.2- Dimension maximale des granulats :

La dimension maximale des granulats (Dmax) est choisie suivant les spécificité de l'ouvrage à bâtir. Le tableau suivant montre les règles à suivre, en général ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis que une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuer de 20% environ.

Tableau I.7 : Dimension maximale du granulat. **.[50]**

Caractéristiques de la pièce à béton	Dimension D des granulats	
	Roulés	Concassés
e- espacement entre armatures horizontales c- couverture entre armatures et coffrages r- rayon moyen des mailles de ferraillage r'- rayon moyen du moule (volume à remplir de béton par rapport à la surface totale des parois et armatures. hm = épaisseur minimale	D ≤ e D ≤ 0.8 c D ≤ 1.85 r D ≤ 1.2 r'	D ≤ 0.9 e D ≤ 0.7 c D ≤ 1.65 r D ≤ r'
	D ≤ 0.25 hm	

I.7.6.3- Dosage en ciment :

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée s'28 .

$$f'c28j = G*Rc28j *(\frac{C}{E} - 0.5)$$

Avec :
s**'28** : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en bars,
s**'c** : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars,
C : Dosage en ciment (en kg/m3),
E : Dosage en eau totale sur matériau secs (en litre),
G : Coefficient granulaire.

Tableau I.8 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G)

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyen (25 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 63 mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure n°1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème. **.[50]**

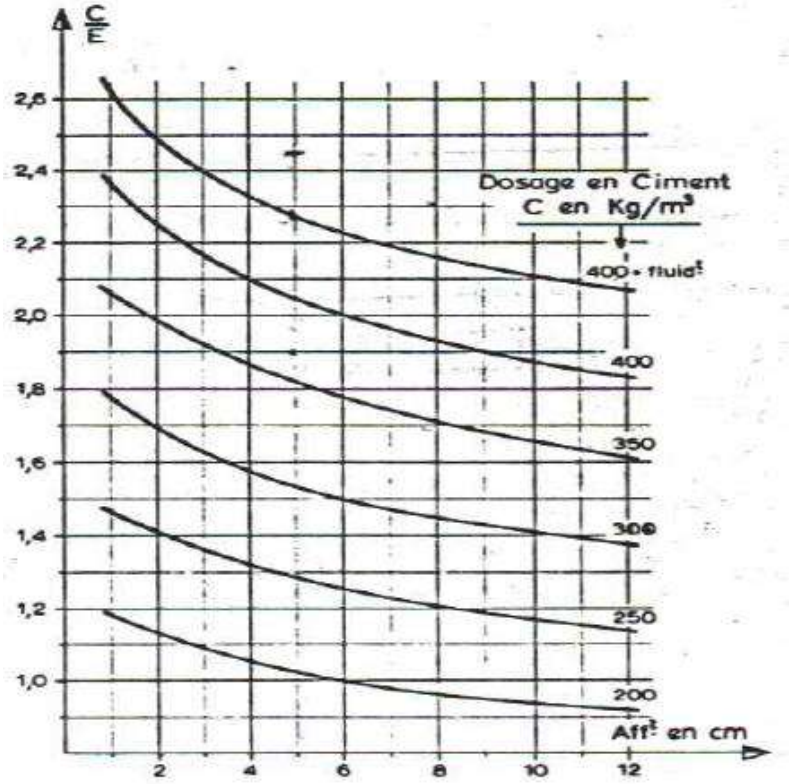


Figure I.20 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône). **.[50]**

I.7.6.4. Dosage en eau :

L'abaque de la figure (**I.21**), donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosée.

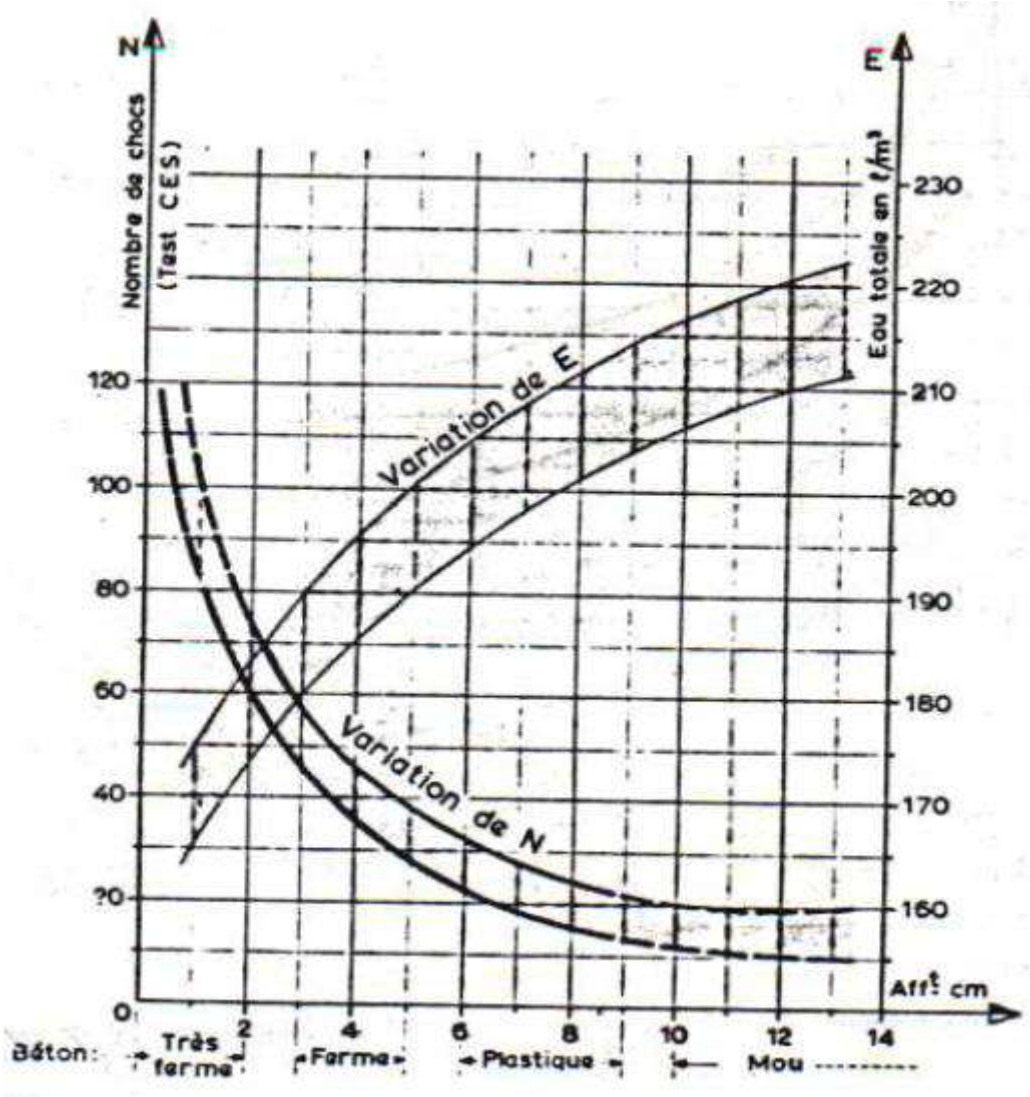


Figure I.21 Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S. en fonction de l'affaissement, dans le cas des bétons composés suivent la présente méthode (le dosage en sable augmente quand le dosage en ciment diminue). **.[50]**

-- Correction du dosage en eau en fonction de Dmax

Les données précédents sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ D = 25 mm (dimension la plus courante). Si l'on a D < 25 mm, la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité équivalente, il foudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice- versa.

La correction sur le dosage en eau correspond à D = 25 mm, peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau (**I.9**) en fonction de D.

Tableau I.9 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats.**[50]**

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction du dosage en eau (%).	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

-- **Dosage en eau réelle :**

La quantité d'eau totale (sur matériau supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, en obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats).

I.7.6.5. Analyses granulométriques des granulats :

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence OAB.

- Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulats.
- Point de brisure A à pour coordonnées :

·* En abscisse : Si D ≤ 25 mm X = D/2.
Si D ≤ 25 mm X = D/2.
Si D > 25 mm " X est située au milieu du segment limité par le Module 38 (5mm) et le module correspond à D "

* En ordonnée : **Y = 50 – (Dmax)1/2 + K.**

Avec K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable. Les valeurs de K est donnée sur le tableau (I.10) : **.[50]**

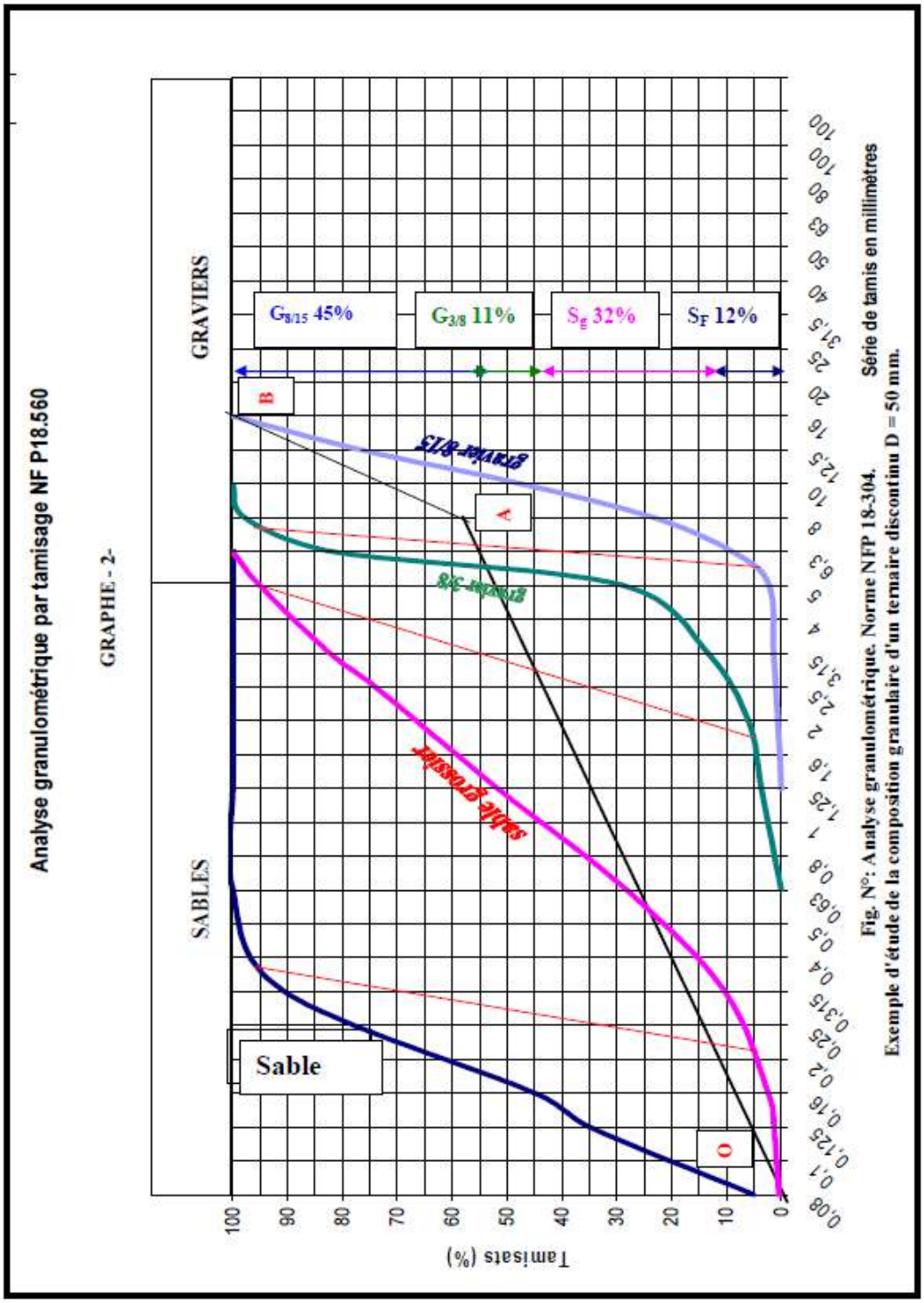


Figure I.22 : Valeurs de K.[50]

Tableau I.10

Vibration		Faible		normale		Puissante	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+fluidif	-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

Note 1 : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera effectué de façon à relever le point A, ce qui correspond à augmenter le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur Ks = 6Mf – 15.

Note 2 : Si la quantité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur Kp = +5 à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré. **.[50]**

I.7.6.6. Coefficient de compacité (g) :

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matériaux solides (ciment et granulats) réellement contenus dans un mètre cube de béton frais en oeuvre. On choisira une valeur approximative de g dans le tableau (**I.11**) :

Tableau I.11 valeur approximative de Coefficient de compacité (g)

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=16	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

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

- sable roulé et gravier concassé = **- 0.01** ;
- sable et gravier = **- 0.03**
- pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de g qui correspondant ici à des granulats denses ordinaires. **.[50]**

I.7.6.7. Dosage des granulats :

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur la même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g1, g2, g3 ,par exemple. Si C est le dosage en ciment, le volume absolue des grains de ciment est :

$$C1 = C/3.1$$

en admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment ,valeur moyenne habituellement admise).

On choisira dans le tableau **(I.6**), une valeur convenable du coefficient de compacité g en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

$$V= 1000\ g - C1$$

Si g1 , g2, g3 sont les pourcentages en volume absolu des granulats . Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$V1 = g1\ V$$

$$V2 = g2\ V$$

$$V3 = g3\ V$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont v1, v2, v3 les masses de chacun deux sont :

$$P1 = V1\ v1$$

$$P2 = V2\ v2$$

$$P3 = V3\ v3$$

$$\Sigma\ P1 + P2 + P3 = G = \text{masse totale du granulat.}$$

Apres avoir obtenu les résultats du calcul on ferra les essais d'études en préparant des gâchées d'essais et en fonctionnant des éprouvettes afin de vérifier la consistance et la résistance du béton. **.[50]**

I.8. Comportement mécanique des BHP :

I.8.1. Comportement en compression :

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage **(figure I.23).[8]**

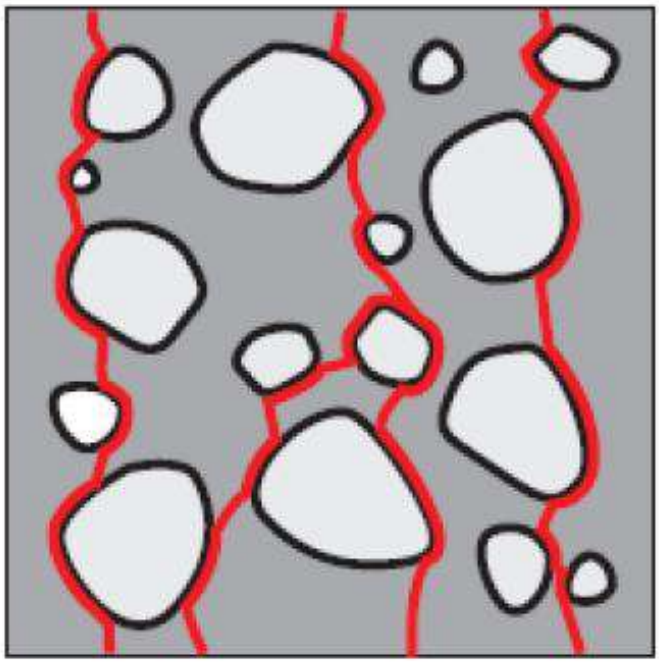


Figure I.23. Béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus. L'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats **(figure I.24). [8]**

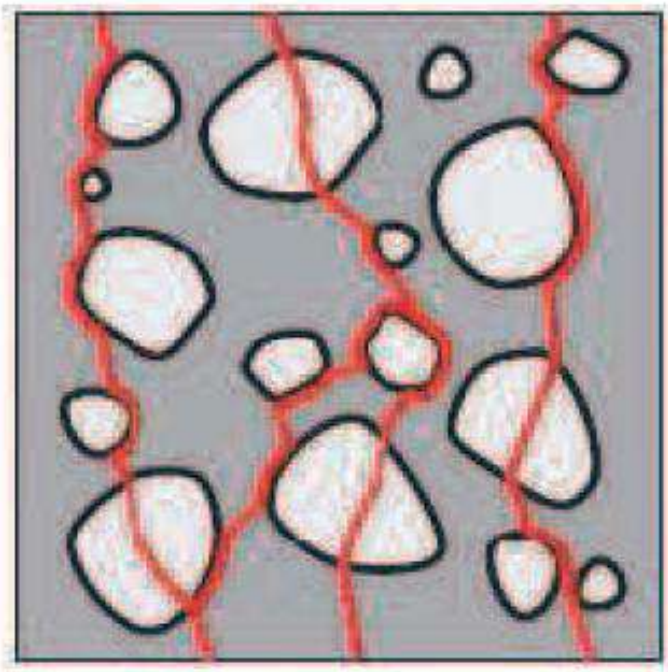


Figure I.24. – Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés .

Sur le diagramme contrainte-déformation **(figure I.25),** ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton ordinaire. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle. **[8].**

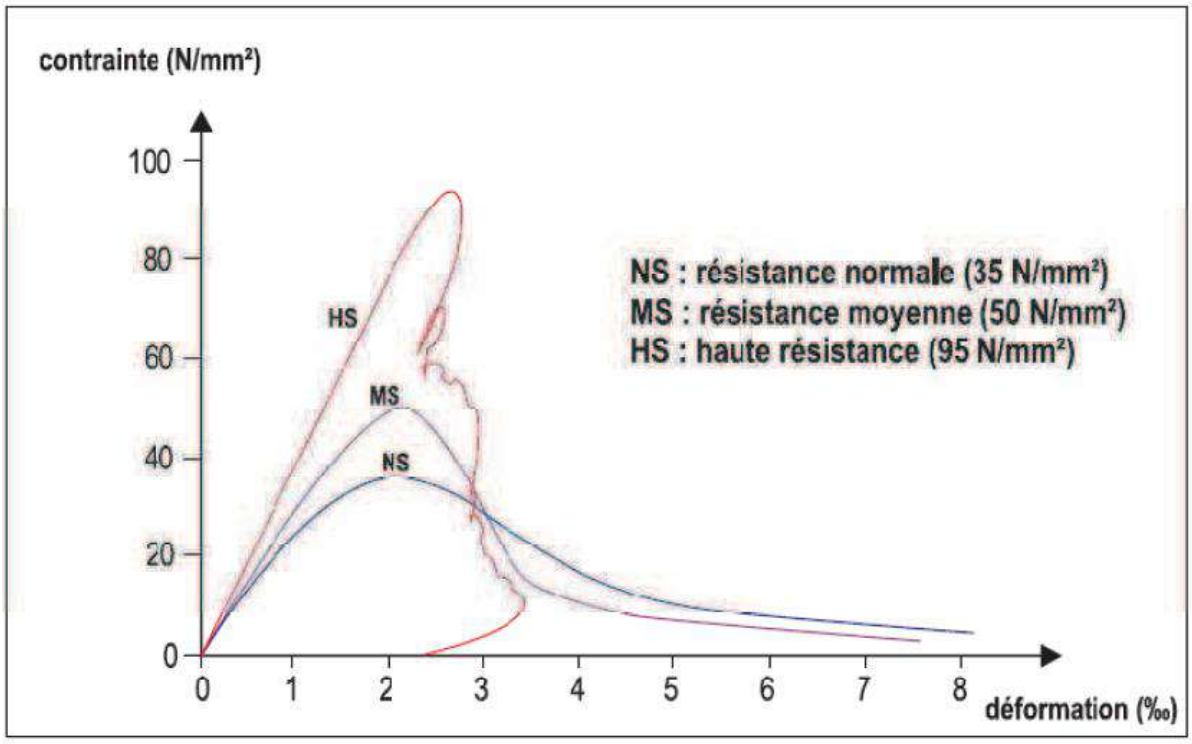


Figure I.25. Diagramme contraintes-déformation. **[8]**

I.8.2. Comportement en traction :

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton ordinaire, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton ordinaire (voir tableau I.1).**[8].**

I.8.3. Rigidité :

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression (tableau I.1).**[8].**

I.9. Déformation dimensionnelles et volumique :

I.9.1. Retrait :

Le béton à hautes performances est comme le béton ordinaire, il est soumit à un retrait plastique, à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

I.9.1.1. Retrait endogène :

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au

début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. **[8].**

Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus : un processus chimique et un processus physique. Dans un béton ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100x10-6. En ce qui concerne le béton à hautes performances, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Plusieurs valeurs sont précisées au tableau **I.12.** Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. **[8]**

Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux. De toute évidence, le retrait endogène du béton à hautes performances requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais. **[8]**

I.9.1.2. Retrait de dessiccation :

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume. Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporera pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation. **[8]**

L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton à hautes performances. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Le tableau **I.12** présente un nombre de valeurs pour

différentes humidités relatives. Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance. Le retrait d'un béton de 90 MPa dans un environnement à une humidité relative de 50 % est de moitié inférieur au retrait observé pour un béton de 30 MPa. La diminution du retrait se poursuit avec l'accroissement de l'humidité relative. **[8]**

L'addition de fumées de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus. Le retrait est aussitôt faible d'autant que la teneur en laitier des liantes est importante, ce retrait est moins important par rapport au CPA **[51]**. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

Tableau I.12 – Retrait de dessiccation(*) et retrait endogène (**) en fonction de f ck et de l'humidité relative(HR) suivant la norme EN 1992-1-1 :2004. **[8]**

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
retrait endogène (10^{-6})		25	38	50	63	75	88	100	113	125	150	175	200
HR = 50 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	746	706	668	632	598	566	536	507	480	430	385	345
	retrait total (10^{-6})	771	743	718	695	673	654	636	620	605	580	560	545
HR = 60 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	668	632	598	566	536	507	480	455	301	385	345	309
	retrait total (10^{-6})	693	670	648	629	611	595	580	567	426	535	520	509
HR = 70 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	560	530	501	475	449	425	402	381	361	323	289	259
	retrait total (10^{-6})	585	567	551	537	524	513	502	493	486	473	464	459
HR = 80 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	416	394	372	353	334	316	299	283	268	240	215	193
	retrait total (10^{-6})	441	431	422	415	409	403	399	395	393	390	390	393
HR = 90 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	231	219	207	196	185	175	166	157	149	133	119	107
	retrait total (10^{-6})	256	256	257	258	260	263	266	270	274	283	294	307

(*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme (**) à long terme

I.9.2. Le fluage :

Le fluage du béton à hautes performances est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton ordinaire. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il est de même en ce qui concerne le béton ordinaire. **[8]**

La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage ; le tableau II.5.2 mentionne quelques résultats. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %.**[8]**

Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton ordinaire. Les déformations immédiates peuvent devenir aussi importantes en fonction de la résistance à la flexion, dans le

cas d'une poutre par exemple. Ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

Tableau I.13 – Coefficient de fluage(*) en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative(HR) et du délai de mise en charge suivant la NBN EN 1992-1-1. **[8]**

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
HR = 50 %	mise en charge après 5 jours	3,91	3,60	3,21	2,82	2,52	2,27	2,08	1,91	1,77	1,55	1,38	1,25
	10 jours	3,62	3,34	2,97	2,61	2,33	2,11	1,92	1,77	1,64	1,44	1,28	1,16
	15 jours	3,44	3,17	2,82	2,48	2,21	2,00	1,83	1,68	1,56	1,36	1,22	1,10
	20 jours	3,30	3,04	2,71	2,38	2,12	1,92	1,75	1,61	1,50	1,31	1,17	1,05
	30 jours	3,10	2,85	2,54	2,23	1,99	1,80	1,64	1,51	1,40	1,23	1,09	0,99
	50 jours	2,84	2,62	2,33	2,05	1,83	1,65	1,51	1,39	1,29	1,13	1,00	0,91
HR = 80 %	mise en charge après 5 jours	2,69	2,48	2,24	2,00	1,82	1,66	1,54	1,43	1,34	1,20	1,08	0,99
	10 jours	2,50	2,30	2,07	1,86	1,68	1,54	1,43	1,33	1,25	1,11	1,00	0,92
	15 jours	2,37	2,18	1,97	1,78	1,60	1,46	1,35	1,26	1,18	1,05	0,95	0,87
	20 jours	2,27	2,09	1,89	1,69	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13	1,01	0,91	0,845
	30 jours	2,13	1,97	1,77	1,59	1,44	1,32	1,22	1,14	1,06	0,95	0,86	0,78
	50 jours	1,96	1,80	1,62	1,45	1,32	1,21	1,12	1,04	0,98	0,87	0,79	0,72

(*) *hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme*

I.10. Durabilité

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides,…etc. Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, …etc).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Une allusion au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène) est déjà faite ci-dessus. La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction. **[8]**

I.11. Résistance au feu

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton ordinaire, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à

l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C. Les renseignements à propos du facteur de réduction à appliquer figurent dans la norme NBN EN 1992-1-2 (voir également figure I.26). En raison des pressions de vapeur accumulées, il convient également d'examiner les risques potentiels d'éclatement du béton. En ce qui concerne le béton des classes de résistance C 55/67 à C 80/95, les règles inhérentes au béton conventionnel suffisent pour éviter les éclatements, pour autant que la teneur en fumées de silice soit inférieure à 6 % de la masse de ciment. En cas de teneurs supérieures en fumées de silice et en cas de classe de résistance C 90/105, il sera nécessaire de prendre des mesures particulières, telles que le mélange d'au moins 2 kg/m3 de fibres de polypropylène. En cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement. **[8]**

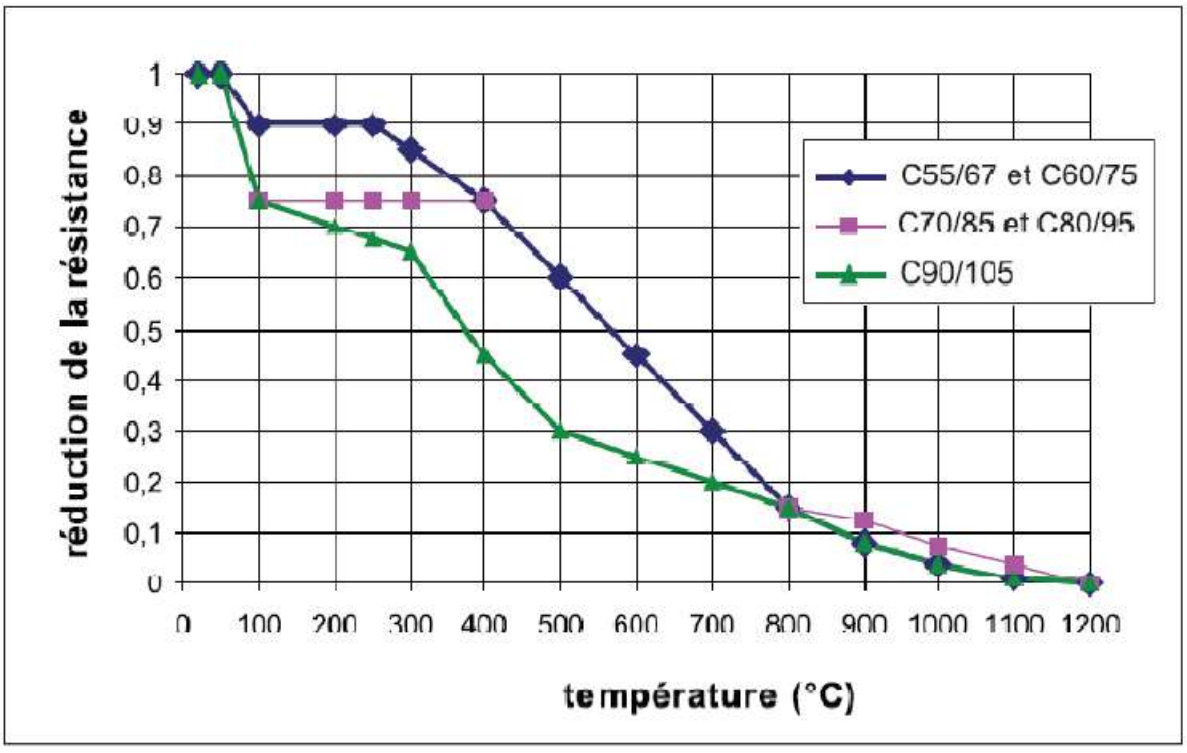


Figure I.26 – Diagramme de la résistance à la compression des bétons à haute résistance Selon l'EC2 Feu. **[8]**

I.12. Microstructure

Le béton durci est un matériau très hétérogène. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométriques des granulats mais aussi de la diversité des produits

d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative). De manière plus générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte du ciment durcie) et les granulats (gravillons et sable). [52] ainsi que la structure de l'interface pâte/granulat (appelé auréole de transition).

Les principaux composants du ciment Portland sont les suivantes :

60 à 65% - C3S = 3CaO-SiO2 - silicate tricalcique (Ca3[SiO4]O - alite)

20 à 25% - C2S = 2CaO-SiO2 - silicate bicalcique (_ Ca2[SiO4] -bélite)

8 à 12% - C3A= 3CaO-Al2O3 - aluminate tricalcique (C3[Al2O6] - célit)

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

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est–à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. Les principaux hydrates simples formés sont les suivants: silicate de calcium hydraté CSH, portlandite Ca(OH)2 (ou hydroxyde de calcium), aluminates de calcium hydraté, ettringite (3CaO_A2O3_3CaSO4_32H2O) etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée **[53]:**

C3S (et/ou C2S) + H2O _ CSH silicate de calcium hydraté + Ca(OH)2 portlandite

Si on prend pour les CSH, un rapport molaire C/S=1,5 cette équation s'écrit :

2C3S + 8H2O _ C3S2H5 + 3 Ca(OH)

Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Ca(OH)2 formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte du ciment durcie ordinaire contient 50-70% de CSH et 25-27% de Ca(OH)2. Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante. Ceci est favorable à l'augmentation de la résistance. En effet, la portlandite n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique, ses cristaux de taille importante sont susceptibles de limiter la résistance en compression du béton. De plus, la portlandite est facilement soluble dans l'eau ce qui diminue la durabilité du béton. Afin d'éliminer partiellement la portlandite, la fumée de silice ou autres adiitions minérale tel que le laitier de haut fourneau peut être additionnée. Ces additions, du fait de la taille de ses grains, inférieure à celle de grains de ciment augmentent également la compacité de la matrice. De plus par leurs réactions pouzzolanique consomme de la portlandite et forme le gel CSH. Ceci permet ainsi d'augmenter les performances (résistance, durabilité…etc) du béton **[53].**

Dans les bétons ordinaires, l'interface pate granulats, appelée aussi l'auréole de transition, est plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice. **[54]**. Autour des granulats, il y à une zone de pâte hydratée particulière. Sa première couche, plus proche de la surface des

granulats, très compacte est composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats **[55].** La deuxième couche d'épaisseur 0,5 _m, est composée de feuillets de CSH. Après cette couche se trouve la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique que la matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent à travers la matrice (figure I.27).

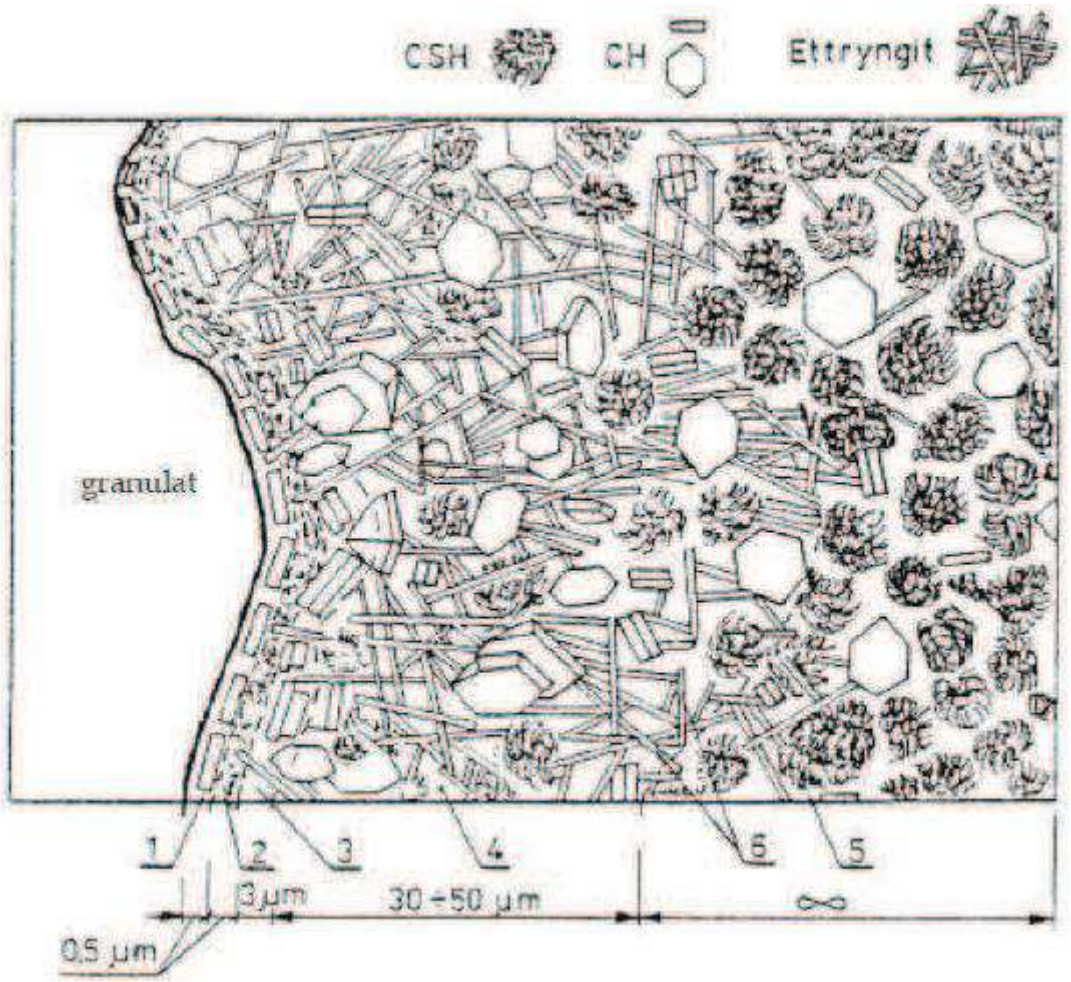


Figure I.27 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de Ca(OH)2, 2 - couche de CSH, 3 - couche de Ca(OH)2, 4 - zone poreuse, 5 – pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite, **[56]** .

La qualité de la zone de transition dépend fortement de la nature des granulats. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pate de ciment. Les granulats calcaire (reactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion **[57].** Contrairement aux granulats du type quartz, qui sont neutres par rapport à la pâte de

ciment. Par ailleurs les liaisons entre la pate et granulats concassés sont plus fortes qu'avec des granulats roulés **[9].**

Pour les bétons à hautes performances, la réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone est obtenu grâce l'ajout des additions minérales. En comparant avec le BO, où l'auréole de transition est d'environ 50 _m, son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 _m. Certaines sources signalent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (**Figure I.28**) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques **[58]**. La qualité de la zone de transition dépend aussi du rapport E/C. Lorsque E/C augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.

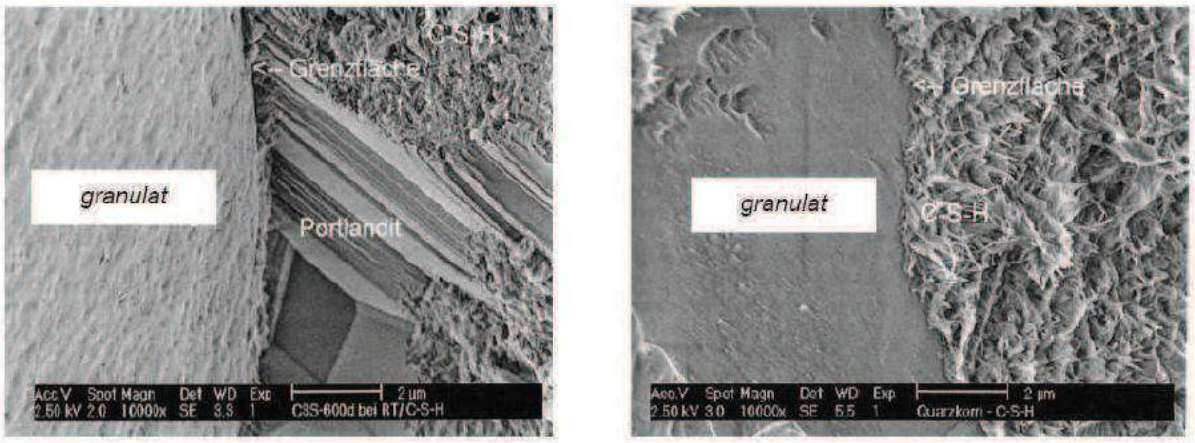


Figure I.28. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat **[53].**

a) béton sans fumée de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientes perpendiculairement aux granulats,

b) béton avec fumée de silice, absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH.

I.13. Effets de la température sur le béton en cours de durcissement :

En raison de la teneur élevée en ciment, la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Ce phénomène peut induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de 'massifs', des contraintes thermiques relativement élevées. Même si le béton à haute performance absorbe mieux les contraintes de traction, le risque de fissuration est cependant nettement supérieur. Lors de la conception et de l'exécution, il convient donc d'accorder à ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à

exclure au maximum le retrait empêché s'imposent. Les calculs des contraintes en fonction du développement calorifique escompté et des propriétés du béton en phase de durcissement sont souhaitables **[52].**

I.14. Domaines d'application des BHP:

I.14.1 Introduction :

Les bétons à hautes performances sont des bétons durables qui donnent une résistance à la compression supérieure à 60 MPa.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, les ponts, les immeubles, les tunnels et les centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en oeuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, son faible coût et d'autres qualités**.[12]**

I.14.2 Domaine d'application des BHP :



A



B



C



D



E



F



G



H

Figure I.29: différent photo de construction a base de BHP a travers le monde

I.14.2.1. Les ponts :

- Pont de Mila , Algérie (figure I.29 ,photo A)
- Le pont de Joigny ,Bourgogne, France.1989 (figure I.29 ,photo B)
- Le pont de Normandie ,Le Havre, France.2007 (figure I.29 ,photo C)

I.14.2.2. Les bâtiment :

- La Grande Arche (Paris, France 1990) (figure I.29 ,photo D)
- La Grande Mosquée Hassan II ,Casablanca, Maroc.1986 (figure I.29 ,photo E)
- La tour PB6 (Bearing Point, France.2001) (figure I.29 ,photo F)

I.14.2.3. Les ouvrages d'arts :

- Le port de Lorient, France.2007(figure I.29 ,photo G)
- Tour Petronas ,Malisie.1993(figure I.29 ,photo H)

I.15. Conclusion :

Dans cette partie de la recherche bibliographique on a présenté l'historique et les principales propriétés des BHP et son utilisation mondiale ainsi que les diverses solutions proposées pour améliorer les caractéristiques de ces matériaux. Donc on peut dire dans ce chapitre que :

** Le rapport E/C des bétons à haute performance est beaucoup plus faible (0,35 à 0,4) que celui des bétons ordinaires (0,50 à 0,70).

** Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il est très important de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit donc de trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau de gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec le fluidifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'ettringite qui se forment dés que le ciment entre en contact avec l'eau. Malheureusement il n'existe aucun moyen théorique qui permette de prédire l'un ou l'autre de ces deux comportements.

** Le gros granulat idéal pour un béton à très haute résistance doit être très résistant a l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier, de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat/mortier, qui présente une surface favorisant l'adhérence du mortier et enfin, il ne faut pas diminuer la maniabilité du béton frais.

** On peut aussi atteindre des hautes résistances en compression en substituant une certaine fraction du ciment par des matériaux cimentaires supplémentaires .En plus a intérêt économique, cette option permet un meilleur contrôle des pertes d'affaissement puisque ces matériaux cimentaires sont beaucoup moins réactifs que le ciment portland surtout durant les premières heures qui suivent le malaxage, il sera préférable d'utiliser de la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, cendre volante , laitier ....etc ,pour remplir les microvides de l'empilement des grains en améliorant ainsi la compacité.

** La résistance du béton augmente en général avec : le module d'élasticité, et la concentration des granulats. Par contre elle diminue avec l'augmentation de la taille des agrégats. L'effet de ces propriétés est généralement négligé, par contre la surface caractéristique des agrégats qui ont une grande influence sur la résistance de l'interface pâte – agrégat ainsi que la résistance en compression du béton et plus ou moins sa résistance à la flexion.

** Le futur béton sera plus durable et sera plus développé pour satisfaire les besoins socioéconomiques réels avec le moindre impact possible sur l'environnement. Le coût d'un projet dans l'avenir devra incorporer non seulement les coûts économiques actuels que nous utilisons dans nos calculs actuels, mais aussi les coûts sociaux et environnementaux qui vont de l'extraction de la matière première, à son utilisation et aussi à son élimination à la fin de la durée de vie des structures.**[12]**

Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche.

CHAPITRE II

Matériaux et essais

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisés pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.

De ce fait, ce chapitre est consacré dans une première partie à la présentation de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, à savoir : le ciment, les granulats (sable), les déchets recyclés, l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, nous décrivons les formulations adoptées et nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude

Cette étude permet la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur béton frais et sur béton durci.

Essais sur béton frais

Essai d'affaissement (cône d'abrams)

Essais sur béton durci

Essai de compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm pour 7, 28, et 56 jours

Essai de traction par flexion sur éprouvettes 07x07x28 cm pour 7,28 et 56 jours

Essai de Retrait 7x7x28 cm

Essai de Gonflement 7x7x28 cm

Essai d'absorption 7x7x28 cm

Essai de densité 7x7x28 cm

II.2. Caractérisation des matériaux :

II.2.1. Le ciment :

Le type de ciment utilisé dans cette étude est le CPA CEM I 42.5, ce ciment est un ciment Portland ordinaire sans aucun ajout d'addition, dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa., sa masse spécifique est de 3.1 g/cm3 et sa surface spécifique de Blaine (SSB) est de 3000cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 2.1

Tableau II.1 : Caractéristiques physico-chimiques du ciment CPA CEM I 42.5**(ANNEXE D)**

Composition chimique (%)									
CaO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	SO3	Na2O	K2O	PAF	RI
65.7	21.7	5.20	2.70	4,0	2,5	0.70	0.40	1.3	0.3

Composition minéralogique (%)			
C3S	C2S	C3A	C4AF
59.2	14.1	5,0	11.4

II.2.2 Les aditions :

II.2.2.1 Fumée de silice (ANNEXE D)

La fumée de silice contient 89% de silice pure ; sa densité est de 2.3, sa masse volumique apparente de 600 kg/m3 et sa surface spécifique BET de <15 cm2/g.

Le rôle de ces fumées de silice est d'optimiser la compacité par le remplissage des vides du mortier en complément des autres composants la première est appelé effet granulaire.

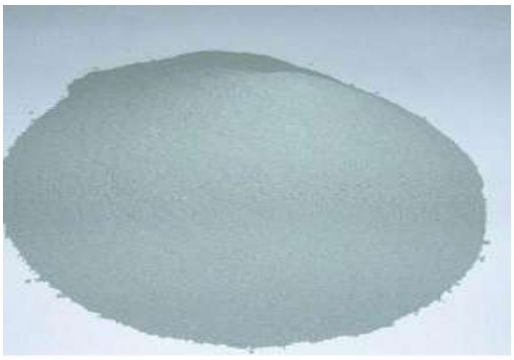


Figure II.1. Fumées de silice

La fumées de silice utilise provient de société **Granitex**

II.2.2.2 Pouzzolane

La pouzzolane a pour principale vertu écologique de pouvoir entraîner une réaction pouzzolanique. Cette réaction chimique a lieu lorsque la pouzzolane, riche en silice et en alumine, et un activateur (chaux éteinte le plus souvent) sont en présence d'eau.

Le produit de cette réaction est un liant proche du ciment.

Cette réaction est totalement écologique puisqu'elle ne nécessite **pas de cuisson** et **ne dégage pas de CO^2**

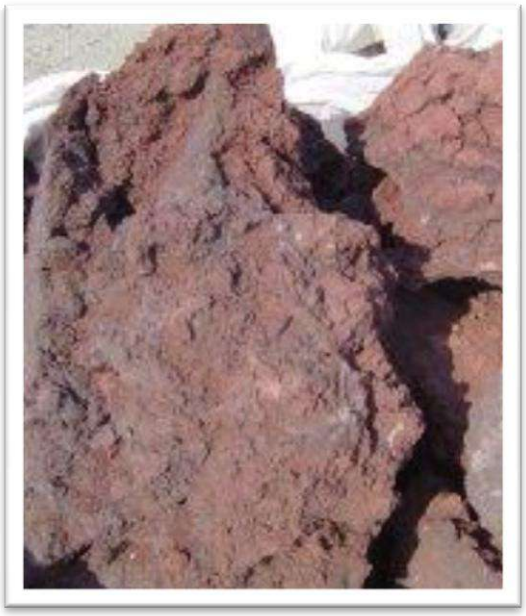


Figure II.2. Pouzzolane roche



Figure II.3. Pouzzolane poudre

II.2.3 Les granulats :

II.2.3.1 Sables :

Le sable utilisé provient de deux carrières différentes l'un de bahbah, c'est un sable ayant un module de finesse de 1.02 (NF P18-304) [59] et un équivalent de sable de 79.83 (NF P18-598) [59] et l'autre de mokorno ,c'est un gravier concassé 0/3, c'est sable est lavé ayant un module de finesse de 3.34 (NF P18-304) [59] et un équivalent de sable de 95.2 (NF P18-598) [59]

Il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats. On utilise généralement du sable de rivière ou de carrière débarrassé des impuretés, jamais de sable marin ou de sable de remblai. Ces derniers contiennent des éléments néfastes pour la qualité du béton et du mortier. Les dosages sont donnés la plupart du temps en volume de sable sec Pour que le module de finesse du sable utilisé soit environ 2,50 ; on a combiné deux types de sable: fin de Hassi Bahbah et grossier de mokorno dont les propriétés physiques d'identification sont présentées au tableau 2.3. Les figures 2.2 et 2.3 suivantes donnent un aperçu sur la nature des sables utilisés.



Figure II.4. Sable fin de Hassi Bahbah.



Figure II.5. Sable grossier de mokorno



Figure II.6 : L'essai de l'équivalent de sable pour sable 0/3



Figure II.7 : Appareille de mesure d'analyse granulométrie

Les mesures de l'analyse granulométrie dans les tableaux suivants :

Tableau II.2. Analyse granulométrie de sable 0/3

Tableau II.3. Analyse granulométrie de gravier 8/15

Tamis (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (pourcentage)	Tamisat (pourcentage)
5	4.8	4.8	0.48	99.52
2	248.1	252.9	25.29	74.71
1.25	204.4	457.3	45.73	54.27
0.63	298.4	755.7	75.57	24.43
0.315	139.2	894.9	89.49	10.51
0.16	66.9	961.8	96.18	3.82
0.08	33.5	995.3	99.53	0.47
Fond	2.8	998.1	99.81	0.19
				Mf=3.339

Tamis (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (pourcentage)	Tamisat (pourcentage)
25	0	0	0	100
20	283.6	283.6	28.36	71.64
14	673.5	957.1	95.71	4.29
10	37.7	994.8	99.48	0.52
6.3	0	994.8	99.48	0.52
Fond	0	994.8	99.48	0.52
				MF= 1.98

Tableau II.4. Analyse granulométrie de gravier 15/25

Tamis (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (pourcentage)	Tamisat (pourcentage)

0	0	0	0	100
14	242.2	242.2	24.2	75.8
10	510.9	753.1	75.31	24.69
6.3	231.1	984.2	98.42	1.58
Fond	151.5	999.35	99.935	0.065
				MF=3.2

Tableau II.5. Analyse granulométrie de sable 0/5

Tamis (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (pourcentage)	Tamisat (pourcentage)
0.63	4.1	4.1	0.41	99.59
0.315	74.5	78.6	7.86	92.14
0.2	551.1	629.7	62.97	37.03
0.16	309.2	938.9	93.89	6.11
0.1	51.9	990.8	99.08	0.92
0.08	3.1	993.9	99.39	0.61
0.063	2.9	996.8	99.68	0.32
Fond	2.2	999	99.9	0.1
				MF=1.02

Tableau II.6. Propriétés physiques d'identification des sables utilisés

Caractéristiques	Type de sable		Normes
	Roulé	Concassé	
Provenance	Hassi Bahbah	Mont Guorno	
Classe granulaire	0/5	0/3	NF EN 933-1 **[60]**
Module de finesse	1,02	3.339	
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.65	2.56	NF EN 1097-6 **[61]**
Masse volumique apparente (kg/l)	1462	1451	NF EN 1097-3 **[62]**
Equivalent de sable (%)	79.83	95.2	NF EN 933-8 **[63]**

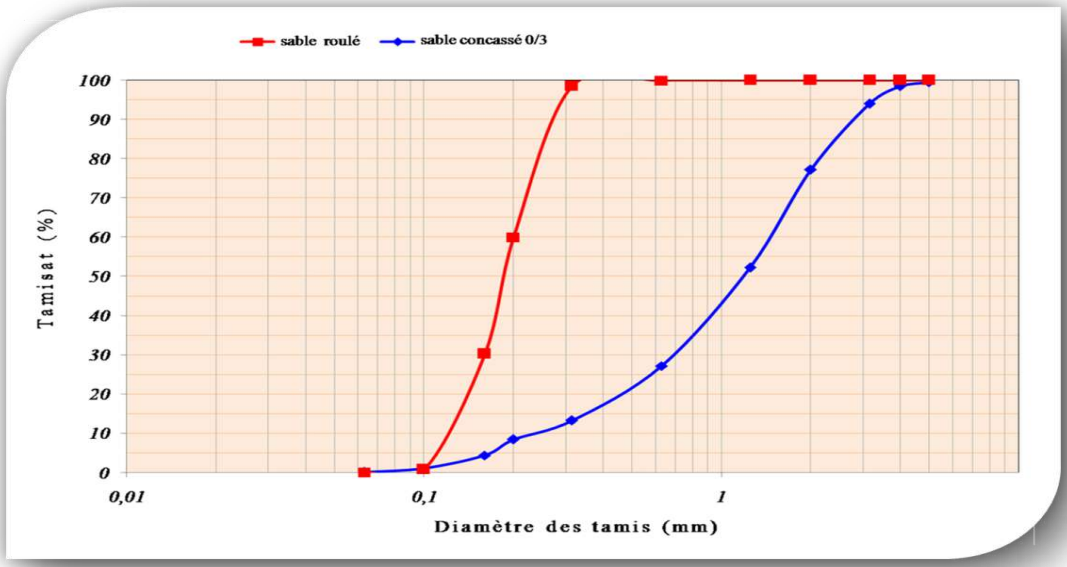


Figure II.8 courbe granulométrique du sable

II.2.3.2. Gravier :

Les granulats pour bétons sont des grains minéraux classée en fillers sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts, suivants leurs dimensions comprises entre 0 et 125mm. Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton.

Le choix d'un granulat est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité

on a utilisé deux classes granulaire 8/15 et 15/25 de carrière mokorno.



Figure II.9 Mesure de la masse volumique apparente

Les caractéristiques principales des granulats sont présentées dans le tableau II.3

Tableau II.7 : Caractéristiques des granulats

Granulats	Taille granulaire (mm)	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente (kg/l)	Coefficient d'absorption
Gravier	8/15	2.66	1199	**0.29**
	15/25	**2.67**	**1262**	**0.19**

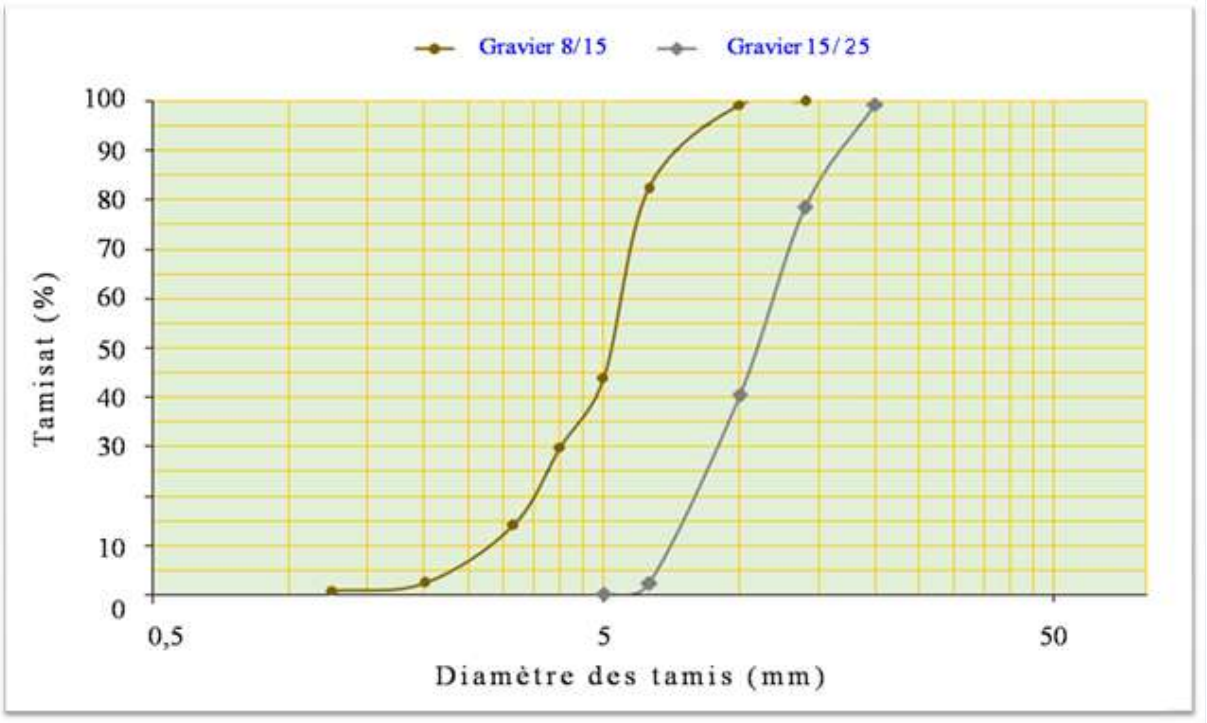


Figure II.10 courbe granulométrique du gravier

II.2.4. L'eau de gâchage :

Les conséquences d'ajouts d'eau non maîtrisés (sur chantier ou en centrale à béton) sont les suivantes :

1) diminution des performances mécaniques du béton ;

2) augmentation de sa porosité concomitante avec une augmentation de ses propriétés de transfert

3) diminution de sa durabilité ;

4) augmentation des phénomènes de retrait ;

5) diminution de la résistance aux cycles gel/dégel ;

6) risques de ségrégation et de ressuage.

II.2.5. Le superplastifiant (ANNEXE D) :

Dans notre cas on a utiliser le superplastifiant SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère poly carboxylate-polyacrylate.

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).



Figure II.11. superplastifiant tempos 12

II.3. METHODES D'ESSAIS :

II.3.1 Formulation des bétons :

Dans notre cas on a utilisé la méthode de **G. DREUX**

II.3.1.1 bétons BHP témoin :

Notre étude est focalisée sur l'influence de l'ajout des poudres (pouzzolane, fumées de silice) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton et faire une comparaison entre les deux. Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau du béton témoin (de référence), nous nous sommes basés sur la méthode de dreux gorisse pour la formulation d'un béton normal (S/C = 3 et E/C = 0,5), avec quelques modifications apportées au niveau de la détermination du rapport eau/ciment (E/C) dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du béton à l'état frais.

Tenir compte de l'absorption d'eau des granulats utilisés , l'eau de gâchage utilisé pour la réalisation des différents béton est donné par l'équation suivante :

La masse			

$E_{efficace}$ =

Eréel+(%d'Absorption d'eau des granulats)-(extrait liquide de superplastifiant) **[64]**

Les différentes compositions du béton témoin, sont présentées aux tableaux suivants.

II.3.1.1.a. Béton témoin avec E/C= 0.4 :

Tableau II.8. Compositions de **1 m3** du béton Témoin

La masse		**La masse volumique**		**L'absorbation**		**Volume**	
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		**193,17**
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		**199,73**
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		**209,55**
Ms (kg)	**150,00**	δs(kg/m3)	**2440**	Sabs(%)	**2,8**	Vs(l)	**61,48**
Mc (kg)	**450**	δc(kg/m3)	**3100**			Vc(l)	**145,16**
Me (kg)	**157,5**	δe(kg/m3)	**1000**			Ve(l)	**157,50**
adj (%)	**0,35**	Extr sec (%)	**30**				
						Vtot (l)	***966,58***

Tableau II.9. Compositions d'un mélange de **20 l** du béton Témoin

Ms(0/3) (g)	**9552,6**		
Ms (0/5)(g)	**3103,7**	Ms corri	**3103,7**
Mg (8/15) (g)	**10993.0**		
Mg (15/25) (g)	**11576.7**		
Mc (g)	**9311,2**		
Me (g)	**3258,9**	Me effi	**3515.0**
M adj (g)	**32.6**		

II.3.1.1.b. Béton témoin avec E/C= 0.35 :

Tableau II.10. Compositions de 1 m3 du béton Témoin

La masse		**La masse volumique**		**L'absorbtion**		**Volume**	
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		**193,17**
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		**199,73**
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		**209,55**
Ms (kg)	**150,00**	δs(kg/m3)	**2440**	Sabs(%)	**2,8**	Vs(l)	**61,48**
Mc (kg)	**450**	δc(kg/m3)	**3100**			Vc(l)	**145,16**
Me (kg)	**157,5**	δe(kg/m3)	**1000**			Ve(l)	**157,50**
adj (%)	**0.45**	Extr sec (%)	**30**				
						Vtot (l)	**966,58**

Tableau II.11. Compositions d'un mélange de **20L** du béton Témoin

La masse			
Ms (0/3) (g)	**9552,6**		
Ms (0/5)(g)	**3103,7**	Ms corri	**3103,7**
Mg (8/15) (g)	**10993,0**		
Mg (15/25) (g)	**11576,7**		
Mc (g)	**9311,2**		
Me (g)	**3258,9**	Me effi	**3508.5**
M adj (g)	**41.9**		

II.3.1.2. Bétons de haute performance (BHP) :

Dans ce projet on va étudier deux types de Béton haute performance BHPet ensuite on va les comparer entre eux À l'état frais et à l'État durcit

II.3.1.2.a. BHP avec l'ajout de pouzzolane "BHP (P)"

Faisant substituer une partie du poids de ciment par un volume similaire en poudre de pouzzolane avec deux rapport **E/C (0.4 ; 0.35).** Les taux de remplacement des pouzzolanes sont choisis de 0 à 20 % avec une marge de 5%.

Les différentes compositions utilisées sont résumées dans le tableau 2.8 et 2.9 suivant.

Tableau II.12. Compositions d'un **20l** de BHP a base de pouzzolane avec **E/C=0.4**

Composant	Ciment (g)	Pouzzolane		Sable (g)		Graviers		Eau (g)	Adj (g)
		%	(g)	Roulé	(0/3)	8/15	15/25		
BHP(P) (5%)	8833.9	5%	464.9	3099.6	9539.94	10978.4	11561.3	3508.4	35.3
BHP(P) (10%)	8357.8	10%	928.6	3095.5	9527.27	10963.8	11545.9	3500.9	39.3
BHP(P) (15%)	7883.0	15%	1391.1	3091.4	9514.63	10949.2	11530.6	3495.1	41.0
BHP(P) (20%)	7409.5	20%	1852.4	3087.3	9502.03	10934.7	11515.3	3486.9	45.9

Tableau II.13. Compositions d'un **20l** de BHP a base de pouzzolane avec **E/C=0.35**

Composant	Ciment (g)	Pouzzolane		Sable (g)		Graviers		Eau (g)	Adj (g)
		%	(g)	Roulé	0/3	8/15	15/25		
BHP(P) (5%)	8833.9	5%	464.9	3099.6	9539.94	10978.4	11561.3	3489.8	61.8
BHP(P) (10%)	8357.8	10%	928.6	3095.5	9527.27	10963.8	11545.9	3481.6	66.9
BHP(P) (15%)	7883.0	15%	1391.1	3091.4	9514.63	10949.2	11530.6	3478	65.4
BHP(P) (20%)	7409.5	20%	1852.4	3087.3	9502.03	10934.7	11515.3	3471.9	67.4

II.3.1.2.b. BHP avec l'ajout de fumés de silice "BHP (FS)"

Faisant substituer une partie du poids de ciment par un volume similaire en poudre de fumées de silice avec deux rapport **E/C (0.4 ; 0.35)** . Les taux de remplacement des fumées de silice sont choisis de 0 à 15 % avec une marge de 5%.

Les différentes compositions utilisées sont résumées dans le tableau 2.14 et 2.15 suivant.

Tableau II.14. Compositions d'un **20l** de BHP a base de fumées de silice avec **E/C=0.4**

Composant	Ciment (g)	Fumées de silice		Sable (g)		Graviers		Eau (g)	Adj (g)
		%	(g)	Roulé	Concassé	8/15	15/25		
BHP(FS) (5%)	8833.9	5%	464.9	3099.6	9539.94	10978.4	11561.3	3479.3	76.9
BHP(FS) (10%)	8357.8	10%	928.6	3095.5	9527.27	10963.8	11545.9	3471.1	81.9
BHP(FS) (15%)	7883.0	15%	1391.1	3091.4	9514.63	10949.2	11530.6	3462.5	87.5

Tableau II.15. Compositions d'un **20L** de BHP a base de fumée de silice avec **E/C=0.35**

Composant	Ciment (g)	Fumées de silice		Sable (g)		Graviers		Eau (g)	Adj (g)
		%	(g)	Roulé	Concassé	8/15	15/25		
BHP(FS) (5%)	8833.9	5%	464.9	3099.6	9539.94	10978.4	11561.3	3473.2	85.7
BHP(FS) (10%)	8357.8	10%	928.6	3095.5	9527.27	10963.8	11545.9	3464.1	91.9
BHP(FS) (15%)	7883.0	15%	1391.1	3091.4	9514.63	10949.2	11530.6	3449.3	106.4

II.3.2. Protocol expérimental :

---Préparation des mélanges :

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres.

Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs Séquences.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la figure 2.7, elle suit les étapes Suivantes :

- Calculer la quantité d'eau effective que l'on va mettre dans la bétonnière. Ce Calcul permet de prendre en compte l'eau contenue dans les gros granulats et le sable tout en connaissant le coefficient d'absorption de chacun
- Calculer les proportions du ciment, ajout, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant
- Malaxer le sable, ciment, ajout (pouzzolane ou fumées de silice) et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange
- Ajouter pendant 30 seconde la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau)
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau)
- Malaxer pendant 3 minutes avant d'Arrêter le malaxeur

La séquence de malaxage suivie est la même pour tous les mélanges.



Figure II.12. Malaxeur a béton

II. 3.3. Essais sur béton frais :

Les essais de caractérisation sur béton frais sont :

II.3.3.1. Essai d'affaissement (cône d'abrams) la norme NF EN 12350-2**(65) :**

Cet essai consiste à déterminer l'affaissement du béton à se déformer sous son propre poids C'est l'essai type pour évaluer l'ouvrabilité du béton (affaissement de BHP varie entre 16 et 20).

Le cône d'Abrams nous a servie à déterminer l'affaissement de chacun de nos bétons frais directement après leur fabrication

A. Matériel nécessaire :

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 30 cm de côté
- Slump Flow (cône) avec entonnoir
- Mètre ou règle de 30cm

B. Mode opératoire :

- Placer le Slump Flow sur la plaque et équiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir
- Prélever un échantillon de béton représentatif
- Remplir le cône et piqué 25 coût chaque fois, jusqu'à l'arase supérieure du cône
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire à l'aide d'une truelle
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées
- Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque, mesurer l'hauteur a l'aide d'une règle ou

mètres.



Figure II.13. Protocole de l'essai d'affaissement

II.3.3.3. Remplissage des moules :

D'après faire les essais de béton a l'état frais on doit remplir les moules pour la conservation

des éprouvettes pour les essais a l'état durci, pour ca on a besoin de :

- moules 10x10x10 cm pour l'essai de compression
- moules 7x7x28 cm pour les essais de retrait, gonflement et traction par flexion

A raison de deux (02) éprouvettes par essai, trois (03) âges (essais mécaniques), deux types d'ajout et deux (02) cures différentes pour le retrait et gonflement, les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 224 éprouvettes, réparties selon l'âge (7, 28 et 56 jours) et les autres variables d'étude.



Figure II.14. Protocole de remplissage des moules

II.3.4. Essais sur Béton durci :

II.3.4.1 Résistance à la compression :

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubique normalisées de 10 cm d'arrête **[66][67]**

La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 2000 KN conforme à la norme NF P 18-412**.**

[59](Figure. II.15)



Figure II.15. Presse hydraulique (2000 kN)

Les éprouvettes sont conservées sans être déplacée pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante :

L'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de 0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 10x10x10 cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN /s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

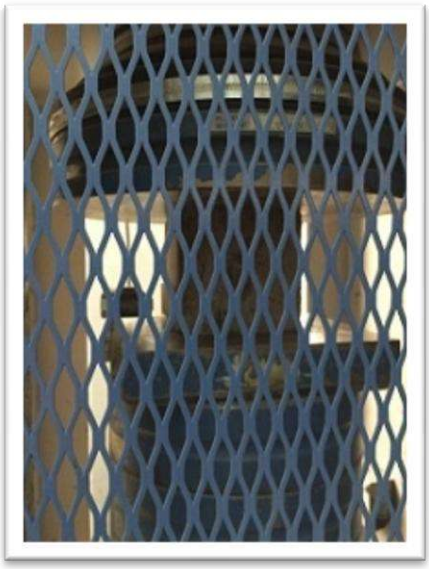


Figure II.16. Protocole de l'essai de compression

II.3.4.2. Résistance à la traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques, 7 par 7 par 28 cm, ont été coulés pour chaque mélange de béton pour essais de flexion 3 points, selon la norme EN 12390-1**[66].** Ces échantillons ont été

coulées dans des moules en acier, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20 ° C (EN 12390-2)**[66].**La résistance à la flexion a été évaluée selon

la norme EN 12390-5**[66]** sur des éprouvettes prismatiques par le calcul de la contrainte de traction maximale atteinte au fond de la section transversale du milieu de l'échantillon testé. Le module de rupture (MOR) a été obtenu comme suit:

$$Mor = \frac{3}{2}\frac{L.d}{e^3}$$

Où L est la charge maximale appliquée (N), d est la distance entre les supports (250 mm), et «e» est la dimension de la section carrée (70 mm)

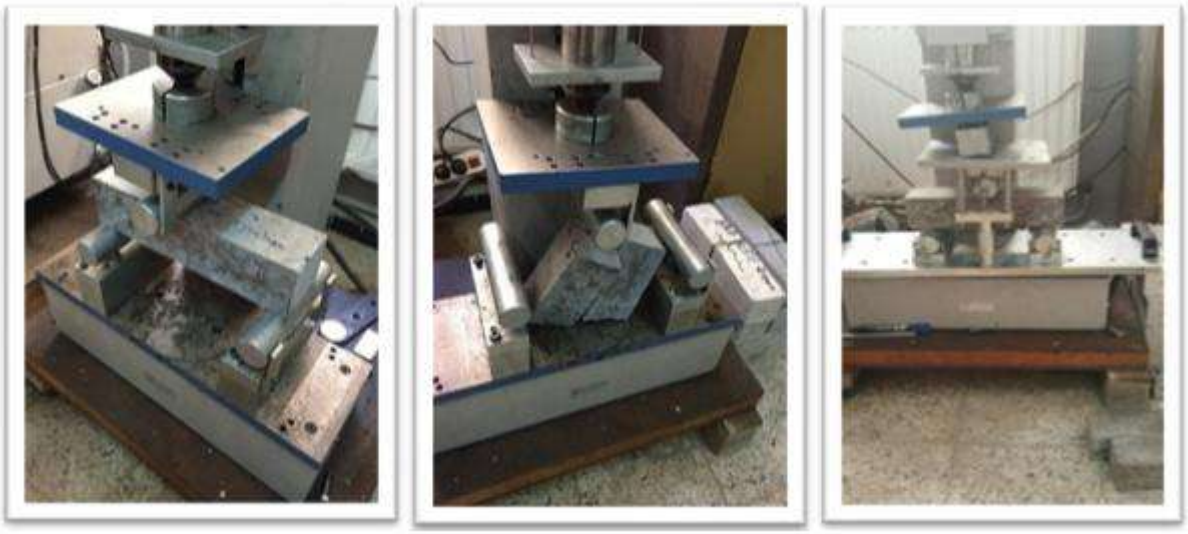


Figure II.17. Protocole de l'essai de traction par flexion

II.3.4.3. Retrait et gonflement :

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) conformément à la norme NF P 15-404**.[59]**

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (**Figure. 2.18**) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (de 1j jusqu'à 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C, et le gonflement la conservation des éprouvettes est faite à un bac d'eau de température de 25 à 30°C.



Figure II.18. Le réctractomètre

A. Mesure des variations de longueur :

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots, etc.).Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 280 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar ou protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations.) même métal que l'appareil

B. Mesure des variations de masse :

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g prés l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.

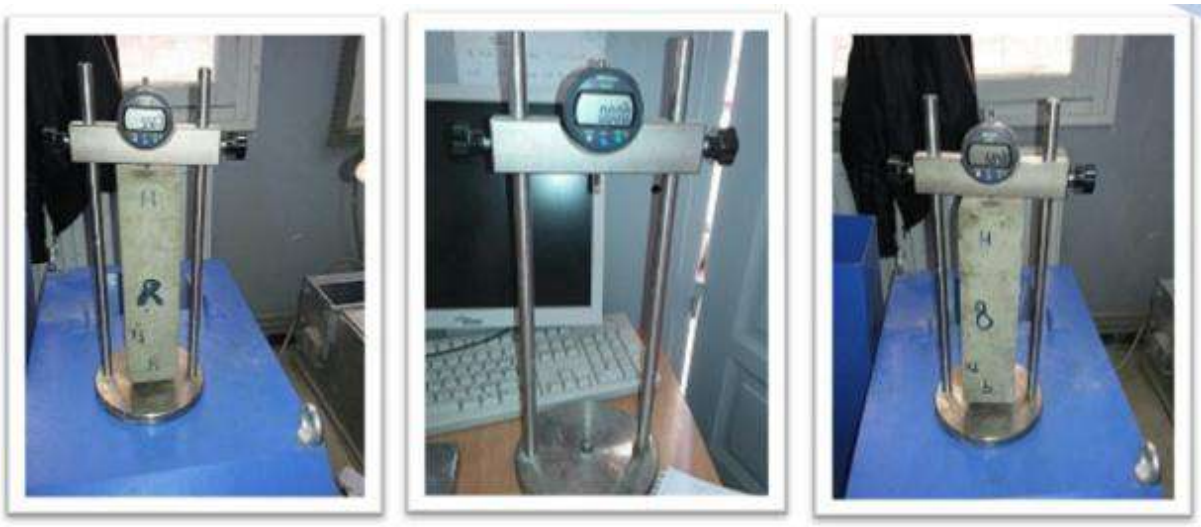


Figure II.19. Protocole de l'essai de retrait et gonflement

C. Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL: Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage, masse l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse)

D. Conduite de l'essai :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 280 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l\ t = l\ t - l\ t = dl\ t - d$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \Delta l\ t / L = (dl\ t - dl\ t_o)/L$$

Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette.

Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement).

II.3.3.4 Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher a l'étuve a 105° et pesé avec masse initial (m0), après on paient avec de la résine ou de la lac la tour de la base de l'éprouvette pour empêcher l'eau de pénétré par les cote ,ensuit on les introduit dans un bac d'eau remplir jusqu'au trait de 0.5cm de hauteur d'eau pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h,) on remesure la masse des éprouvette (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mi- m0)

(NE 13057) **[68]**.



Figure II.20. âpres étuvage



Figure II.21. mise a l'eau

II.3.3.5 Densités de béton

Dans cet essai de mesure de la densité de béton on prend les éprouvettes de chaque mélange de béton déjà sécher et on le pesé, après en calcule la densité c'est la masse sur le volume.

II.3.4. Variables étudiées :

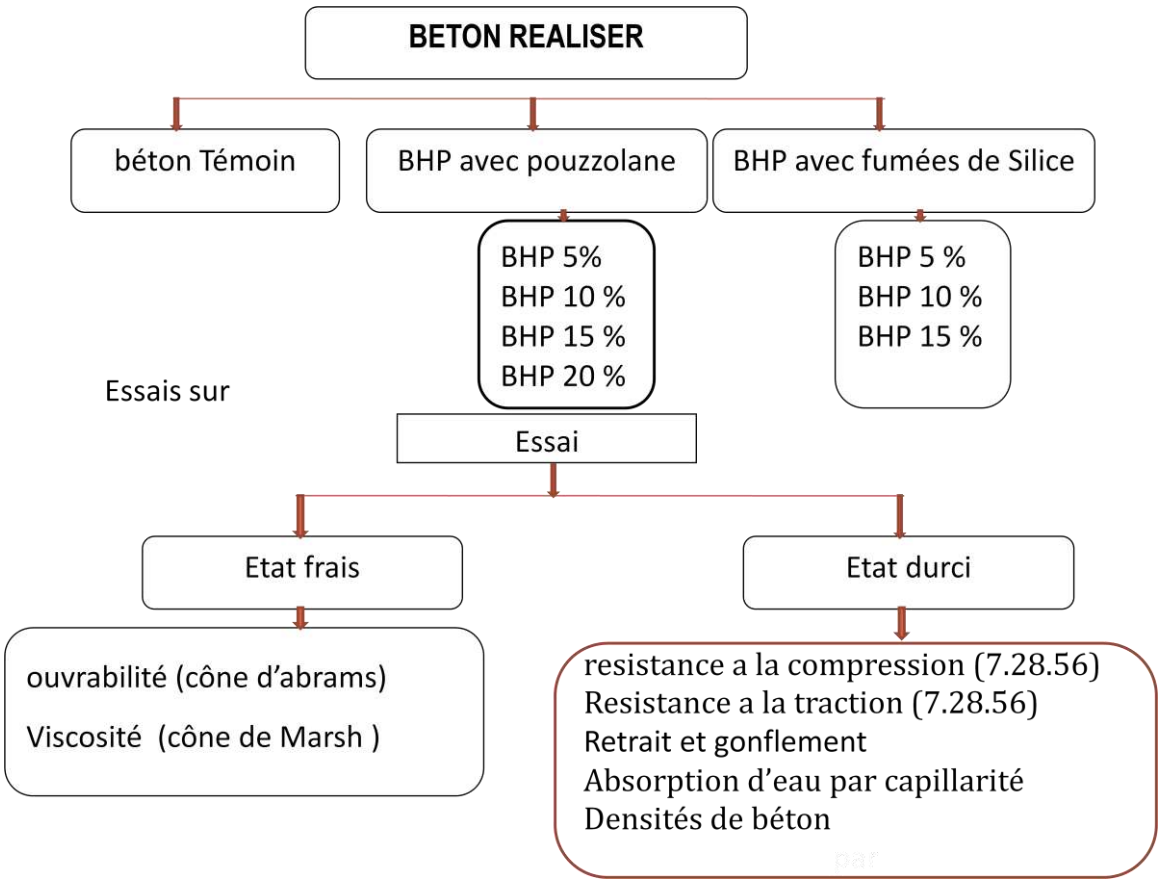


Figure II.22. Formulation et caractérisation du béton étudié

II.4.Conclusion

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment portland. Cependant,

l'addition d'un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de Vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et surtout du point de vue résistance La fumée de silice est le matériau le plus souvent utilisé pour formuler Les BHP, mais il y à aussi d'autres ajouts cimentaire qui présentes des propriétés pouzzolanique semblable à celle des fumées de silice tel que les fillers de laitier de haut fourneaux. Leurs dimension, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte granulat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à maturité et par la suite le développement de la résistance.

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice est pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus. L'augmentation de la résistance à la compression des BHP s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc

CHAPITRE III

Analyse des résultats Et interprétation

CHAPITRE III : Résultats et interpretation

III.1. Introduction

L'étude expérimentale a pour objet, d`étudier l'effet de deux types d'ajout dans la fabrication de béton à haute performance, tel que la fumée de silice et la pouzzolane sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton à haute performance à base des matériaux locaux.

A cet effet, nous visons à tester les différents béton réalisés par l'essai d'ouvrabilité (cône d'abrams) à l'état frais. Ainsi la caractérisation du différent béton à l'état durci à travers l'essai de traction par flexion, l'essai de compression, l'absorption d'eau par capillarité, la variation dimensionnelle (retrait et gonflement) et la variation massique des éprouvettes d'essai en fonction de type et pourcentage d'ajout, et l'âge du béton. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude sont présentés et discutés ci-après.

III.3. Interprétation des résultats:

III.3.1. A l'état frai :

- **Affaissement (cône d'abrams):**

Dans notre projet on a décidé de fixé l'affaissement a **18cm ± 1cm** pour facilité l'étude des résultats , et pour cela on a varier le dosage de superplastifiant afin de gardé un affaissement constant .comme on a aussi fait cette essai sur deux différent rapport E/C, les résultats sont sur le tableau suivant :

A. Avec la pouzzolane naturelle:

Tableau III.1: Dosage du SP en different teneur de PZN

	BHP T	BHP P 5%	BHP P 10%	BHP P 15%	BHP P 20%
E/C = 0,35	0,45	0,7	0,8	0,83	0,91
E/C = 0,40	0,35	0,4	0,47	0,52	0,62

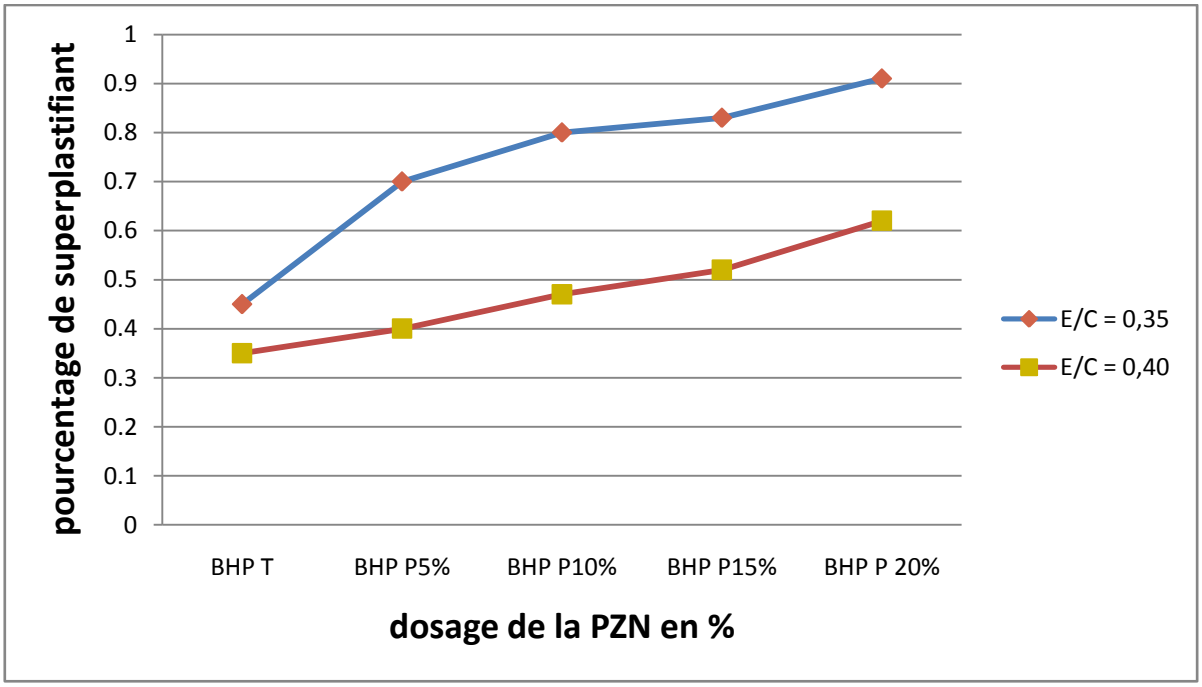


Figure III.1: Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de la pouzzolane naturelle , et cela en deux différent rapport E/C

On remarque de la **Figure III.1** que le dosage de superplastifiant augmente avec l'augmentation de substitution de la pouzzolane naturelle , exemple :le dosage de superplastifiant du BHP P5% de E/C=0.35 a augmenter de 55.55% par rapport au BHP T.

se qui confirme l'etude de **BELAIDI AMINA [23]** qui a trouvé que plus on ajoute le dosage des ajouts (fumée de silice ,laitier ,pouzzolane naturelle) plus on augmente le pourcentage du superplastifiant.

On peux voir aussi que plus le rapport E/C diminue , plus le dosage de superplastifiant augmente car plus la quantité d'eau diminue plus elle sera remplacé par un certain pourcentage de superplastifiant , exemple : le dosage de superplastifiant du BHP P10% avec E/C = 0.35 et plus grand de 70.2% du dosage du BHP P 10% avec E/C=0.40.

B. Avec la fumée de silice:

Tableau III.2: Dosage du SP en différent teneur de FS

	BHP T	BHP FS 5%	BHP FS 10%	BHP FS 15%
E/C = 0,35	0,45	0,95	1,1	1,35
E/C =0,40	0,35	0,87	0,98	1,11

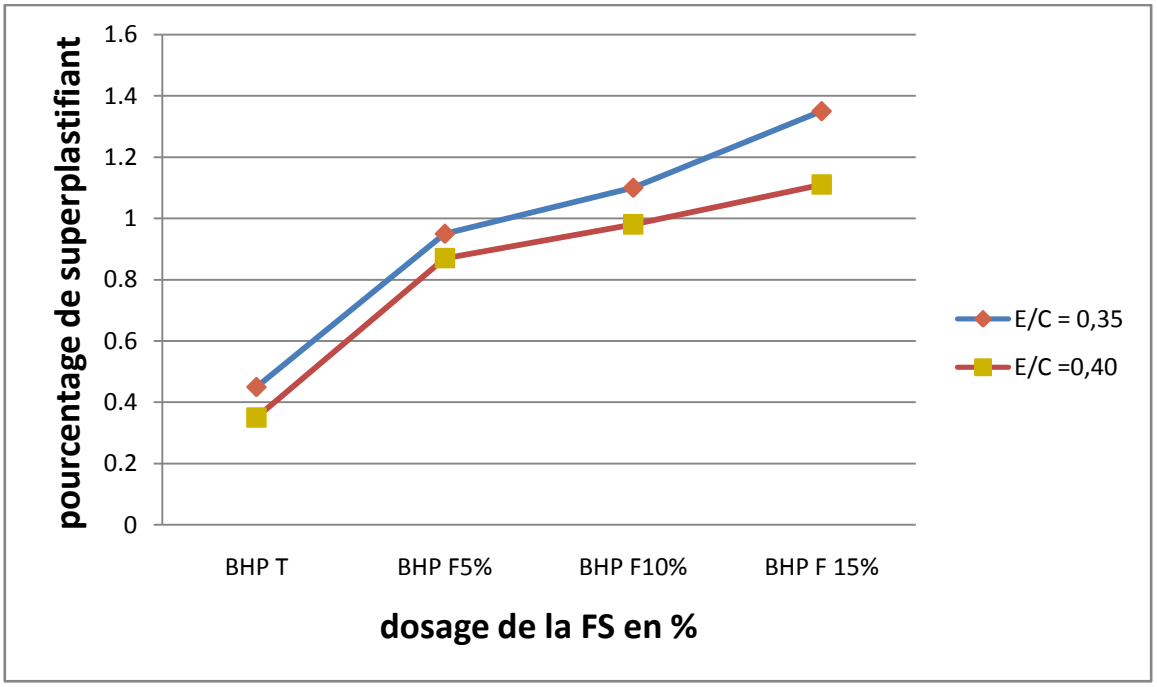


Figure III.2: Rapport du dosage de superplastifiant avec la variation de substitution de fumée de silice , et cela en deux différent rapport E/C

D'âpres la **Figure III.2** que le dosage de superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur de la fumée de silice, exemple :le dosage de superplastifiant du BHP FS 10% de E/C =0.40 a augmenter de 12.64% par rapport au BHP FS 5% de E/C= 0.40. se qui donne la même interprétation avec la pouzzolane naturelle

On remarque aussi que plus le rapport E/C diminue , le dosage de superplastifiant augmente , exemple : le dosage de superplastifiant du BHP FS 10% avec E/C = 0.35 et plus grand de 12.24% du dosage du BHP FS 10% avec E/C=0.40.

III.3.2. A l'état durci :

CHAPITRE III : Résultats et interpretation

Dans l'état durci ,on va procédé a cinq essais différent qui montre l'influence de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice sur un béton haute performance.

III.3.2.1. Avec la pouzzolane naturelle :

III.3.2.1.1. Essai a la compression:

Dans cette essai on procède a écraser un béton témoin et 4 béton avec substitution de ciment avec la pouzzolane naturelle de différente teneur et avec variation du rapport E/C.

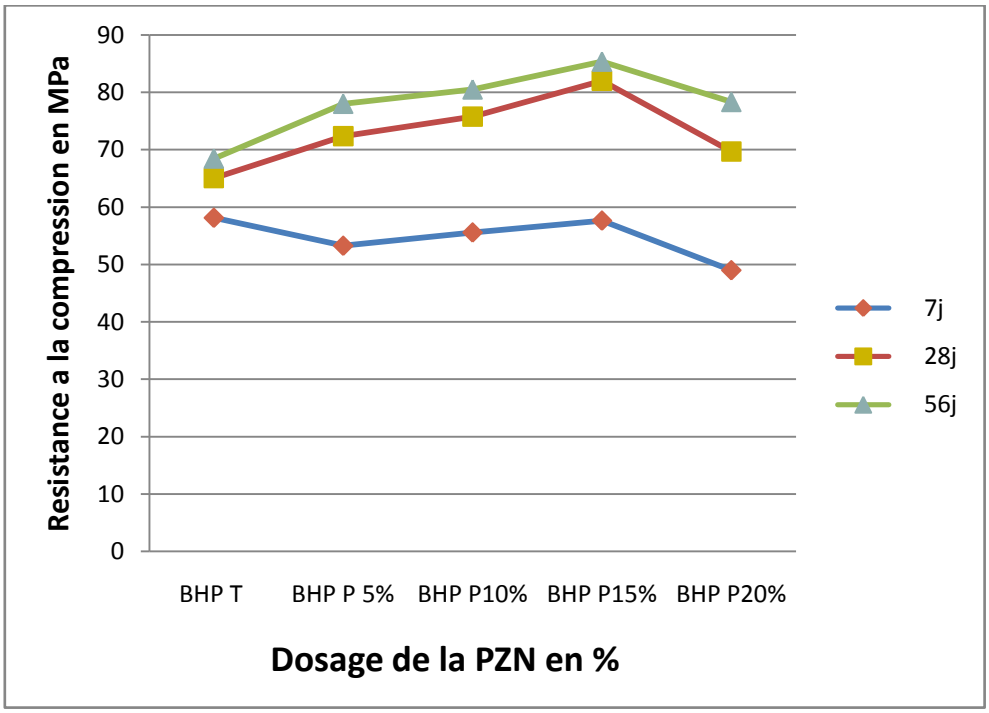


Figure III.3: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,35 par rapport a la teneur en PZN

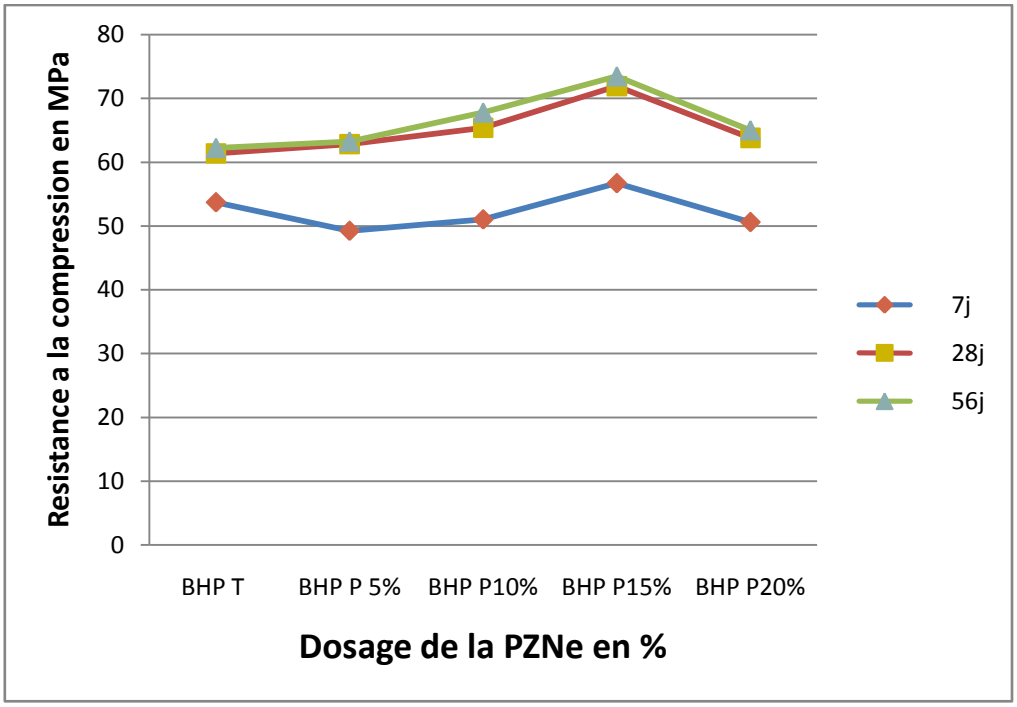


Figure III.4: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,40 par rapport a la teneur en PZN

On remarque dans **Figure III.3 et III.4** que la résistance augmente progressivement a travers l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle avec la même cinétique jusqu'a un optimum de 15% de substitution ensuit une décente de résistance se suit et cela est du a les réactions pouzzolanique de la pouzzolane naturelle qui améliore la compacité du béton et qui donne une meilleur résistance**[46]**

exemple : a la **figure III.3** a(28j), un BHP P15% a une résistance supérieur de 8,26% a celui du BHP P10% et de 17.72% a celui du BHP P20% et de 13.32 a celui du BHP T .

Se qui confirme les résultats de **Sabah Ben Messaoud [22]** que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combine de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif, c'est-a-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle.

les résultats de **Melle KHERROUBI Djamila[46].**confirme aussi nos résultats ,que la résistances mécaniques à la compression du mortiers à base de 10% de pouzzolane est plus grand au mortier témoin , est celui de 20% de pouzzolane sont proches de celles du mortier témoin. Plus le pourcentage de pouzzolane augmente plus de 20 % plus la résistance à la compression vas diminuer.

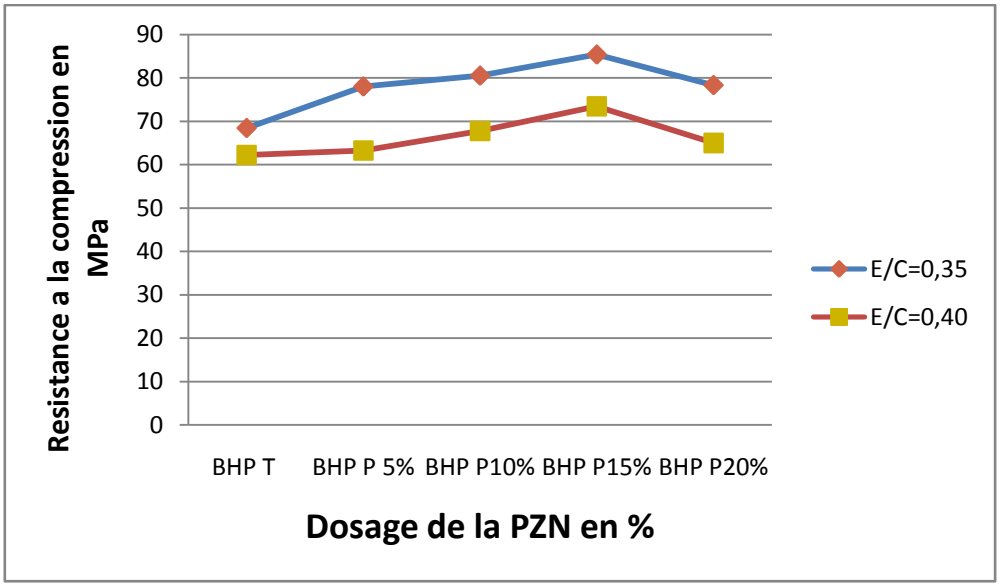


Figure III.5: Comparaison entre la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 56j

On voix clairement dans la **Figure III.5** que la résistance a la compression avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.40, est cela s'explique essentiellement lors de la phase plastique de la première gamme de température au départ d'eau libre, , l'eau en plus sur le rapport E/C=0.4 provoque la destruction partielle des CSH et le début de la décomposition de la Portlandite Ca(OH)2. Le départ de l'eau se traduit par une modification considérable des propriétés mécaniques du béton ou la porosité fermée ou fine empêche l'eau de s'évaporer facilement ce qui entraine une augmentation de la pression de vapeur d'eau qui provoque la formation des fissures ou éclatements du béton se qui provoque la diminution des résistances.**[47]**

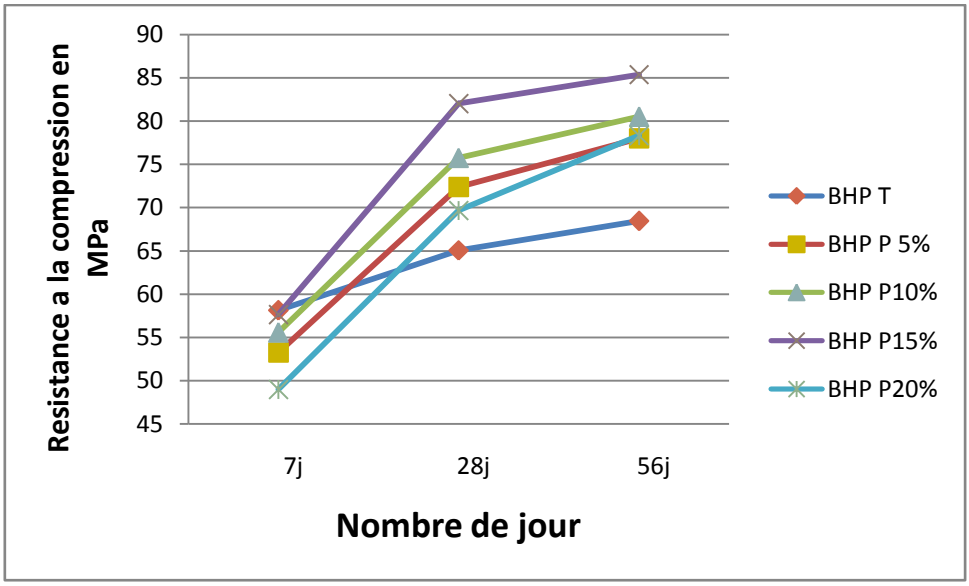


Figure III.6: Augmentation de la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,35 a travers le temps

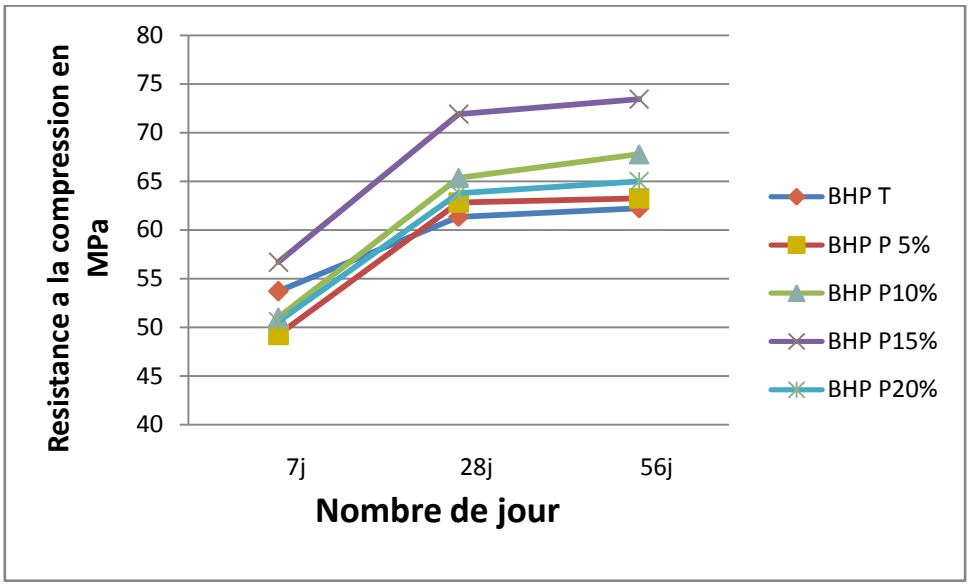


Figure III.7: Augmentation de la Resistance a la compression de PZN a E/C=0,40 a travers le temps

On aperçoit dans la **Figure III.6 et III.7** que la résistance a la compression est faible a jeune âge (7j) ,même que le BHP T est supérieur au BHP a base de PZN avec un écart moins important Ceci peut être du à l'activité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle qui est lente à cet âge de conservation. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et artificielle et le Ca (OH) 2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, puis a long terme la

résistance s'améliore et augmente rapidement a 28j et 56j surtout pour les mélange de PZN qui leur permet de surpassé le BHP T , ensuit l'augmentation ralentie et se stabilise. et la cause est attribuée à l'augmentation des hydrates (C-S-H) grâce à la l'activité de la pouzzolane naturelle qui se manifeste avec toute son ampleur sur les longues échéances conduisant ainsi à une hydratation plus intense et par conséquent de meilleures résistances**.[47]**

Sabah Ben Messaoud [22] à remarque que la fluence de la pouzzolane favorable sur la stabilité du béton frais .et influence aussi sur la stabilité a l'etat durci along terme.se qui est conforme a nos résultats.
a titre d'exemple :

-- a E/C =0.35 ,le BHP T a jeune âge a une résistance de 58MPa qui est supérieur au BHP P5% de 9.16%, puis a long terme (56j)le BHP T est inferieur au BHP P5% de 13.96%

-- a E/C =0.35 , un BHP P20% augmente de 42.25% du (7j) vers le (28j) puis il augmente juste de 12.43% du (28j) au (56j).

III.3.2.1.2. Essai a la traction par flexion:

Dans cette essai on procède aussi a écraser une béton témoin et 4 béton avec substitution de ciment avec pouzzolane naturelle de différente teneur et avec variation du rapport E/C.

Les résultats sont sur les graphes suivant :

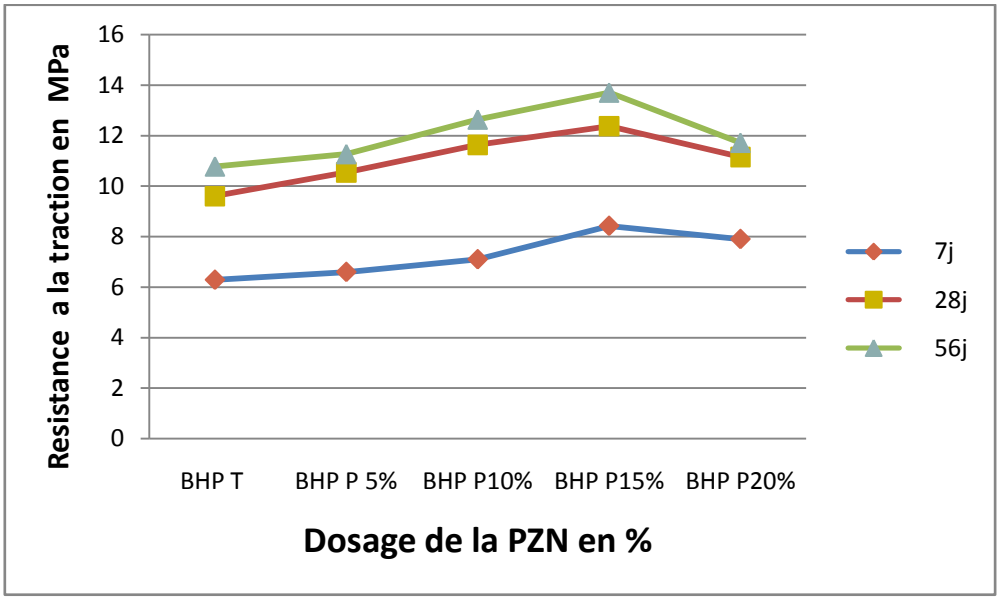


Figure III.8: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,30 par rapport a la teneur en PZN

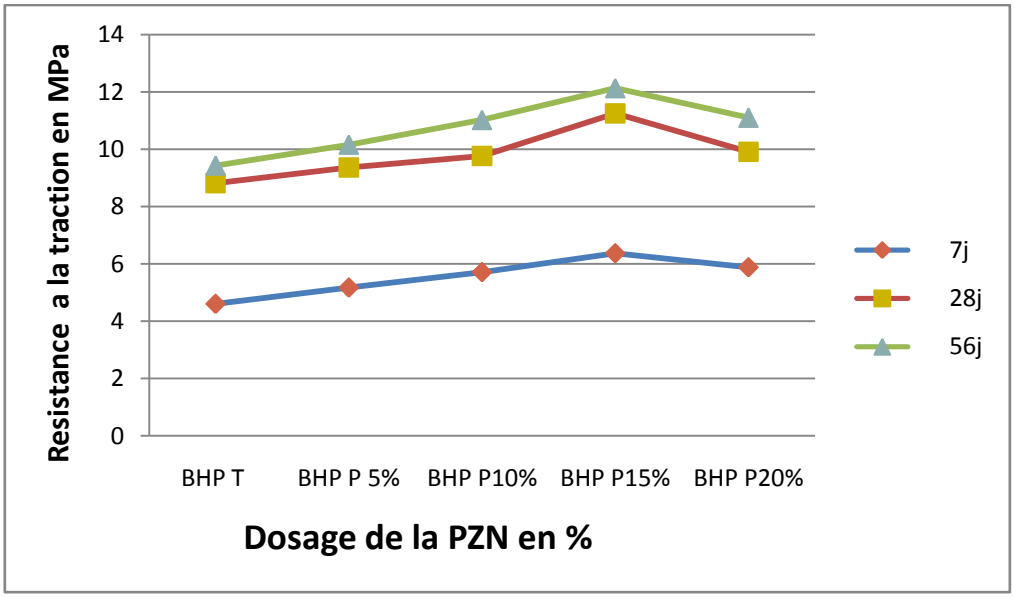


Figure III.9: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,40 par rapport a la teneur en PZN

Meme chose pour la traction en remarque dans les **Figure III.8 et III.9** que la résistance augmente progressivement de la même cinétique a travers l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle jusqu'a un optimum de 15% de substitution se qui confirme l'essai de la résistance a la compression, ensuit une décente de résistance se suit a cause de la reaction pouzzolanique . qui améliore la compacité du béton et qui donne une meilleur résistance[46]

--A titre d'exemple : a la figure III.9 a (28j), un BHP P15% a une résistance supérieur de 6.37% a celui du BHP P10% et de 10.94% a celui du BHP P20% ,comme il est supérieur aussi de 28.85% a celui du BHP T .

Se qui confirme les resulats de **Sabah Ben Messaoud** [22] que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combine de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif, c'est-a-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle.

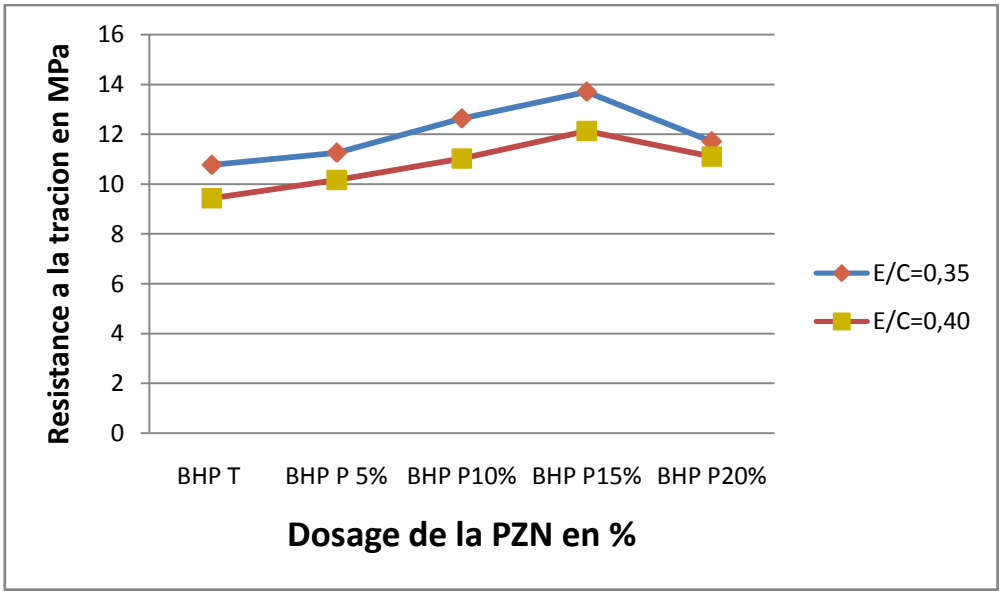


Figure III.10: Comparaison entre la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,35 et E/C=0.40

On voix clairement dans la **Figure III.10** que la résistance a la traction avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.40 , exemple :pour le BHP T la résistance a E/C =0.35 et supérieur de 14.20% a celui du BHP T a E/C =0.40.

Est cela s'explique la liaison entre la résistance à la traction du béton et la résistance à la compression

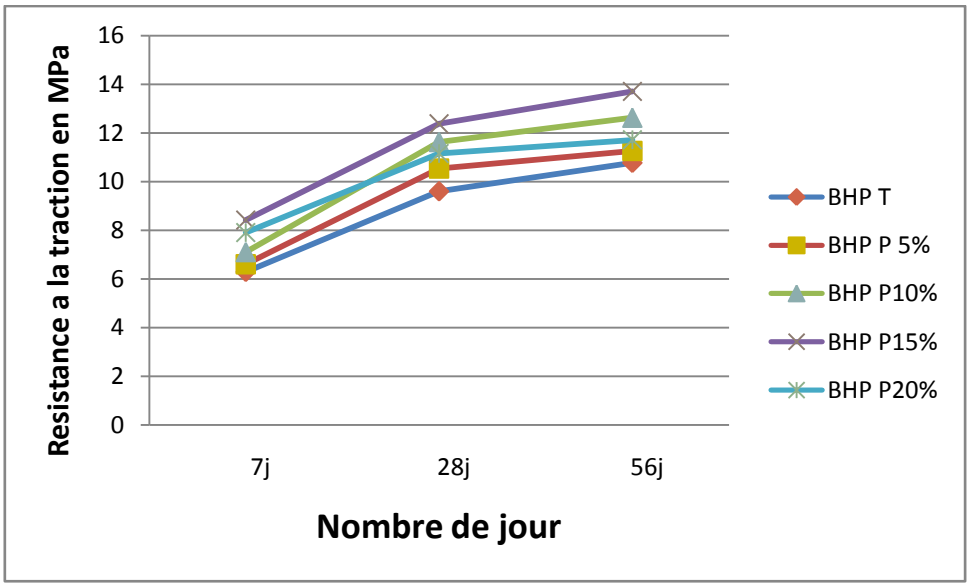


Figure III.11: Augmentation de la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,35 a travers le temps

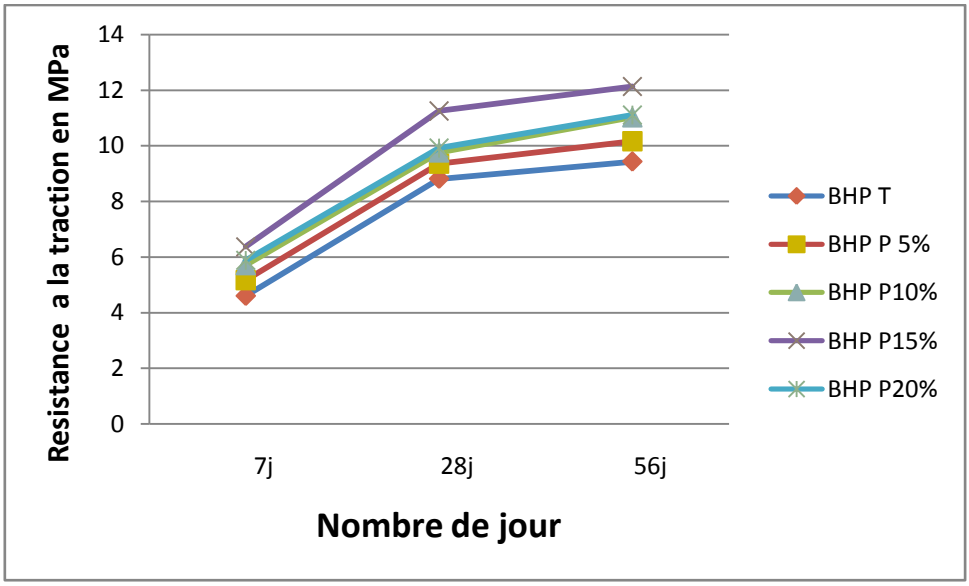


Figure III.12: Augmentation de la Resistance a la traction de PZN a E/C=0,40 a travers le temps

On aperçoit dans la **Figure III.11 et III.12** que la résistance a la traction est faible a jeune age (7j) , puis elle augmente rapidement a jusqu'au 28j , ensuit l'augmentation ralentie et se stabilise a long terme (56j). a titre d'exemple :a E/C =0.35 , un BHP P15% augmente de 46.91% du (7j) vers le (28j) puis il augmente juste de 10.75% du (28j) au (56j).

Sabah Ben Messaoud [22] a a remarqué une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de pouzzolane par rapport à l'échantillon témoin.se qui est conforme a nos résultats.

III.3.2.1.3) Essai de retrait:

Dans cette essai ,on va procédé a mesuré des éprouvette qui on été mise dans une armoire isolé thermiquement afin de gardé une température constante de 24° ± 2°.la mesure se fait selon le retrait des jour précise .les résultats sont sur les graphe suivant :

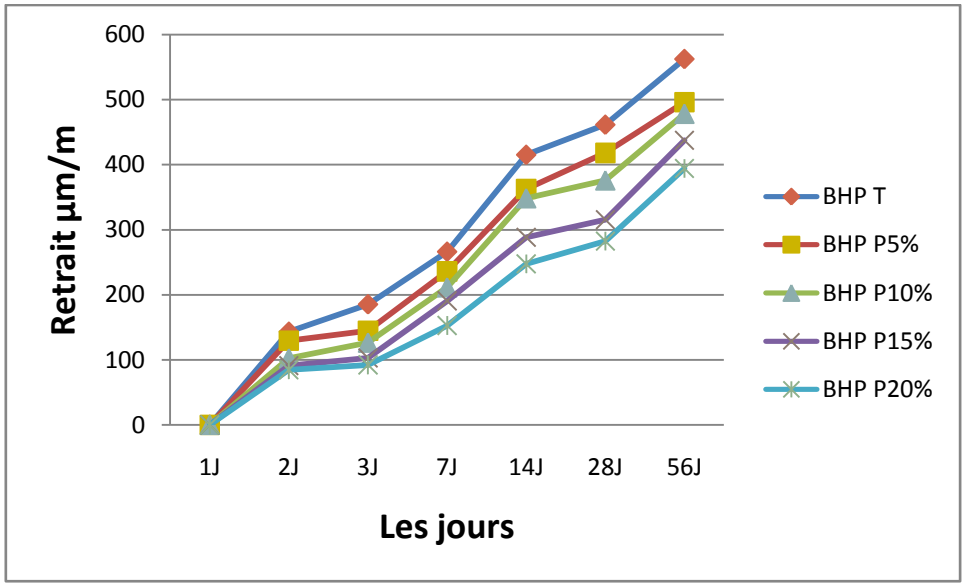


Figure III.13: Diminution du retrait des éprouvette de PZN a E/C=0,35 a travers le temps.

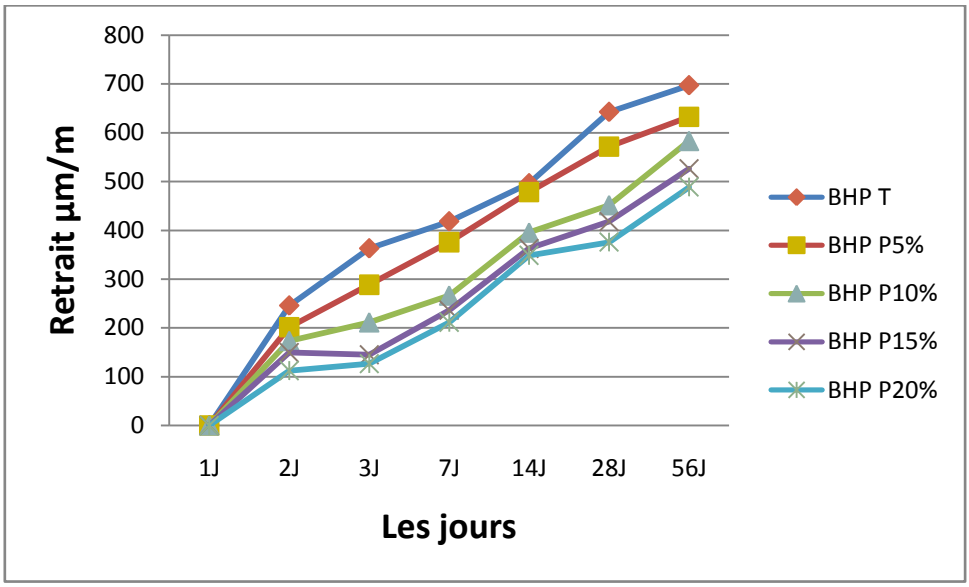


Figure III.14: Diminution du retrait des éprouvette de PZN a E/C=0,40 a travers le temps.

D'âpres les **figure III.13 et III.14** on remarque une diminution du retrait avec l'augmentation de la teneur de la pouzzolane naturelle observé pour les substitution (5%, 10%, 15% et 20%) par rapport au témoin est due à l'activité pouzzolanique qui est élevée pour les fractions les plus fines conduisant ainsi à une forte formation d'hydrates (C-S-H) donc la quantité d'eau consommée par l'hydratation augmente avec l'augmentation de la dose de la pouzzolane naturelle.se qui donne normalement une augmentation du retrait qui est le contraire de notre résultat .mais d'âpres **Sihem HAMMAT** la diminution du retrait (observé après environ une semaine) des mortiers élaborés avec la pouzzolane naturelle peut être attribuée à l'activité des superplastifiant qui joue le rôle de la distribution des grains de

ciment et l'amélioration de la compacité induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH). En conséquence, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante induisant donc un retrait moins important par rapport à celui du mortier temoin**[47]**

M. Belouadah [25] aussi a trouvé que Les bétons adjuvantés présentent des résistances élevées. Le rôle du super plastifiant dans la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité du béton est mis en évidence.ou l'ajout de super plastifiant diminuait l'amplitude du retrait et reduit les dépression capillaire

Donc notre diminution du retrait reviens a l'utilisation du super plastifiant

exemple : a E/C =0.35 ET A 28J :le retrait a diminuer de 63% du BHP T jusqu'au BHP P20% .

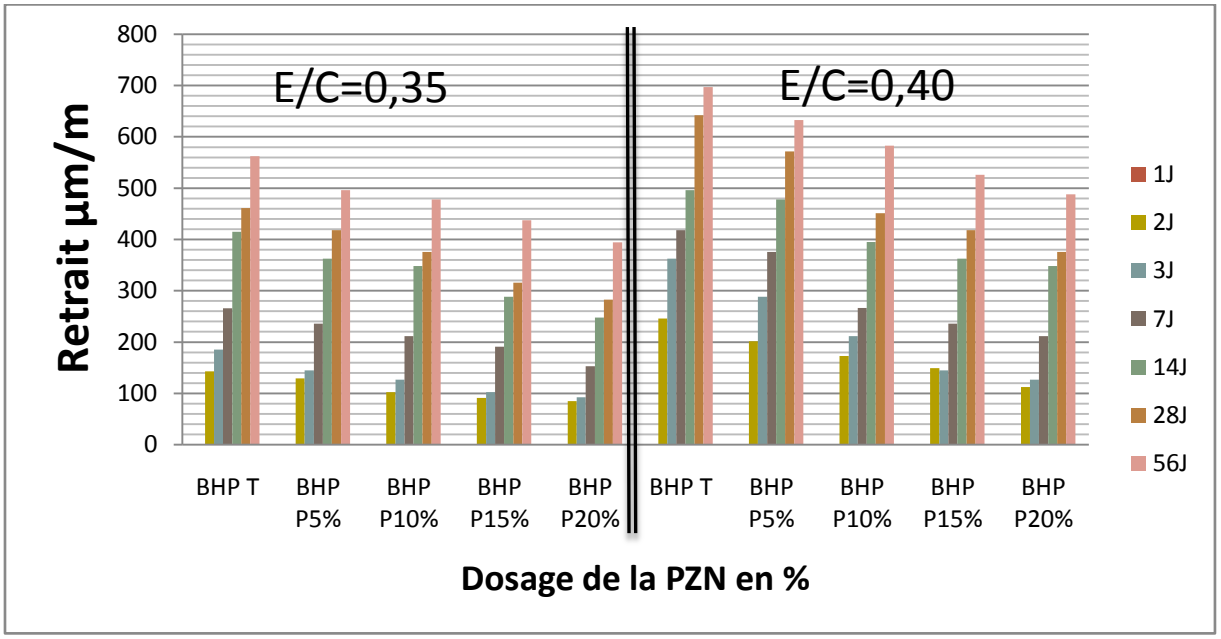


Figure III.15: Evolution du retrait DE LA PZN a E/C=0.35 et E/C=0.40

Comme on aperçoit aussi sur la **Figure III.15** que le retrait diminue avec la diminution de rapport E/C .

A titre d'exemple : pour le BHP 15% A 28J , le retrait a E/C =0.40 est de 418.123µm/m et a E/C=0.35 il est de 315,487 µm/m se qui donne une diminution de 32%.et cela est due que l'eau en plus sur le rapport E/C=0.4 qui s'évapore et donne un retrait supérieur a celui du rapport E/C =0.35.

III.3.2.1.4 . Essai de gonflement:

Pour cette essai .c'est presque la même chose que l'essai de retrait sauf que cette fois les éprouvettes sont mise sur une baquet d'eau a température constant de 25°.ensuit au fil des jours en mesure le gonflement et la variation massique, les résultats sont sur les graphes suivant:

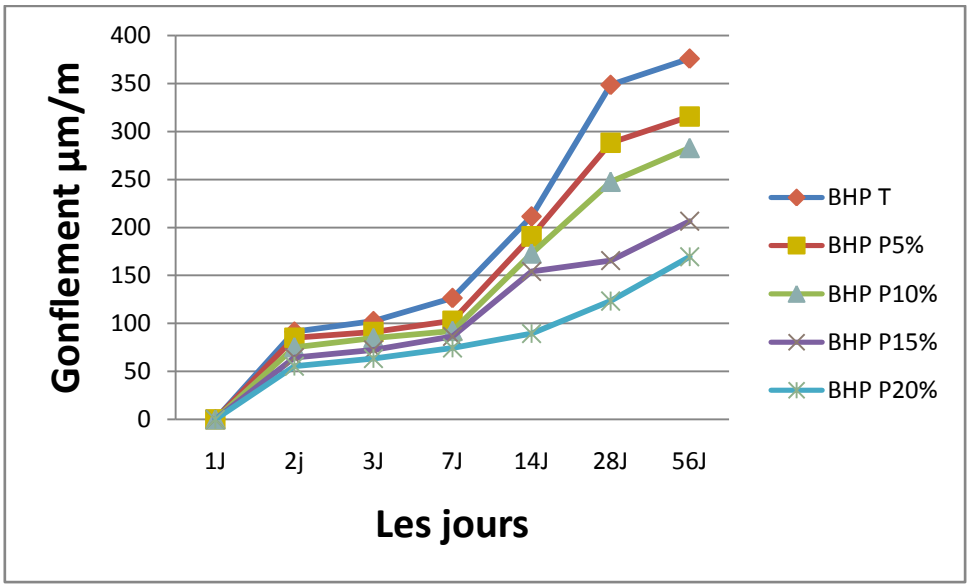


Figure III.16: Augmentation du gonflement des éprouvette de PZN a E/C=0,35 a travers le temps.

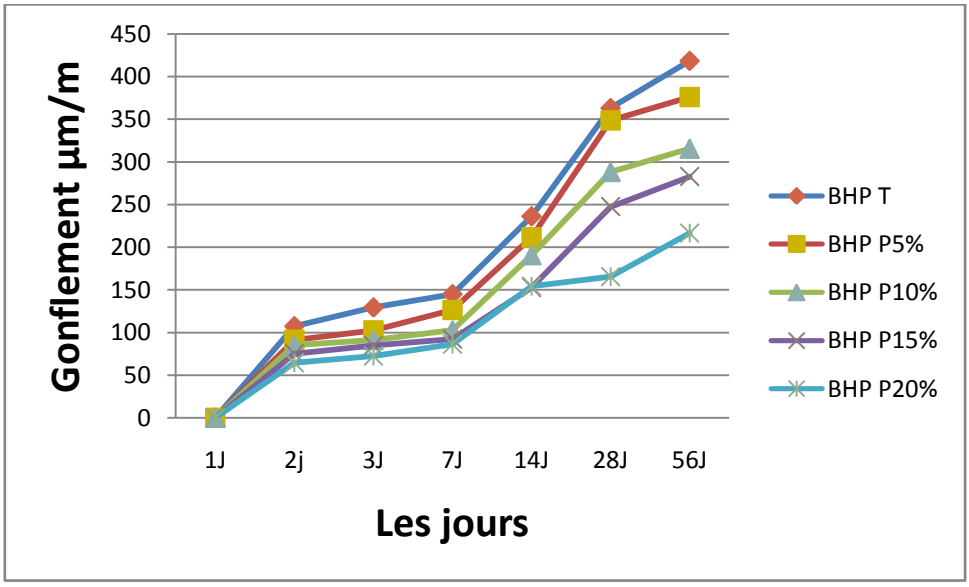


Figure III.17: Augmentation du gonflement des éprouvette de PZN a E/C=0,40 a travers le temps**.**

Sur la **figure III.16 et III.17** on peut voir que la pouzzolane naturelle a un effet bénéfique sur le gonflement des éprouvette qui diminue au fur et a mesure de l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle . et cela reviens a leur propriété de consommation d'eau pour

les réaction d'hydratation. qui permet l'amélioration de la compacité du béton qui réduit la perméabilité.se qui confirme les resultats de **LAKHAL RIDHA[8]**

prenons exemple sur la **figure III.17** . on voix que le gonflement du BHP T a 28j est de 362.852 µm/m et le BHP P10% de 288,24 µm/m ce qui se résume a une diminution de 25.8% et pour le BHP P 20% il est inferieur du BHP 10% de 74%.

III.3.2.1.5. Essai de la variation massique:

Dans cette essai on va procédé comme suit :

- pour le retrait : on va mettre des éprouvette de différente teneur en pouzzolane et avec différent rapport E/C dans une armoire isolé pour évité les variation importante de température et le changement d'humidité . ensuite en calcule la variation de la masse en fonction de jours fixé
- pour le gonflement: on va mettre des éprouvette de différente teneur en pouzzolane et avec différent rapport E/C dans un baquet d'eau a température constante 24° ,ensuite en calcule la variation de la masse en fonction de jours fixé .

les résultats sont exprimé sur les graphes suivant :

A. Variation massique due au retrait:

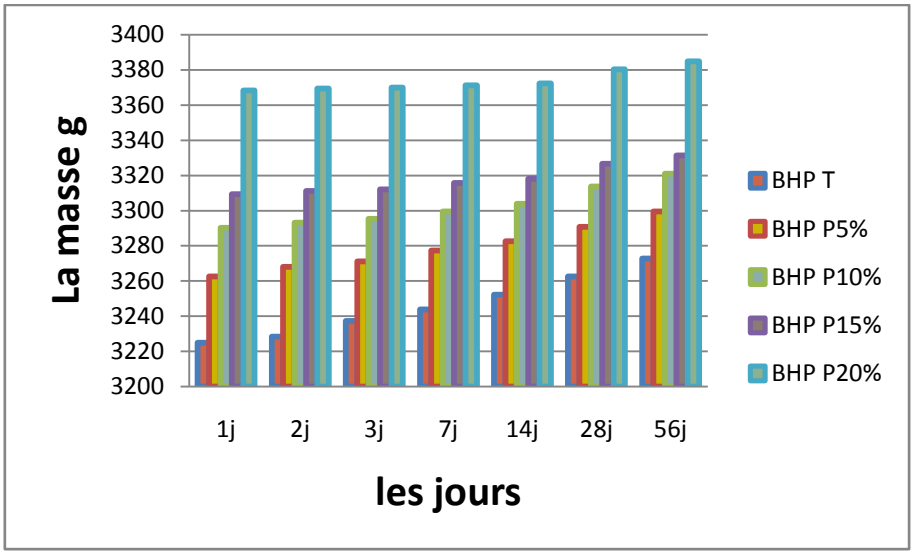


Figure III.18: Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,35 a travers le temps

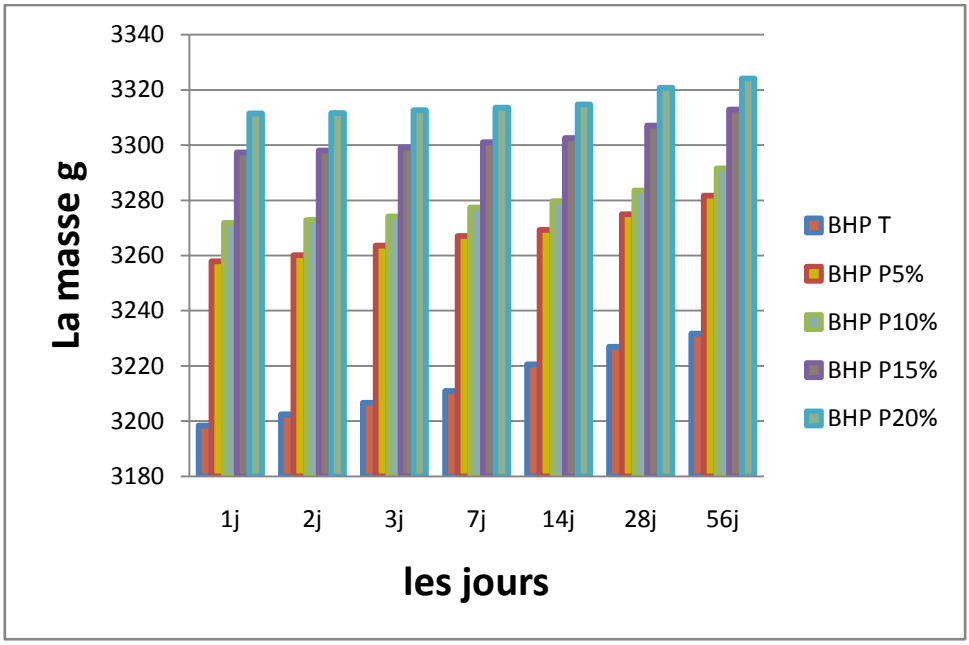


Figure III.19: Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,40 a travers le temps

Par les **figure III.18 et III.19** on voix clairement d'une part que la masse diminue avec les jours pour tout les types de béton. d'autre part plus le dosage de pouzzolane augmente plus la perte de masse de l'éprouvette diminue aussi ,et cela est due a la texture cellulaire et la porosité qui diminue a cause de l'utilisation du superplastifiant qui joue le rôle de la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH) qui engendre une perte de masse**[47]** .

exemple : de la **figure III.19** :

- La masse du BHP P5% a varié du 1j au 28j de 0.52%
- La masse du BHP P20% la masse a varié du 1j au 28j de 0.35%
- La masse du BHP T la masse a varié du 1j au 28j de 1.17%

Se qui montre que le BHP P20% a absorbé MOIN que le BHP P5%. et beaucoup moin du BHP T.

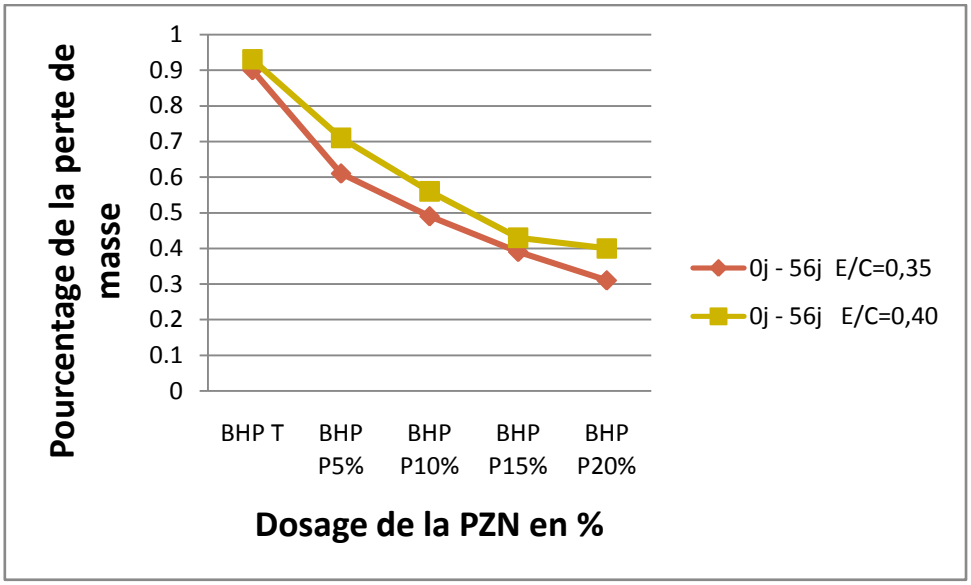


Figure III.20: Différence entre Variation massique due au retrait de différente teneur de PZN a E/C=0,35 et E/C=0,40 apres 56j

De la **Figure III.20** on observe que la perte de masse est supérieur sur le rapport E/C=0.40 a celui du E/C =0.35 , et cela est due a l'eau en plus qui ne réagit pas avec le liant sur le rapport E/C=0.4 qui s'évapore et donne une perte de masse plus importante que le rapport E/C=0.35

Exemple : le BHP 20% a une perte de masse de 0.4% a E/C =0.40 et de 0.31% a E/C=0.35

B. Variation massique due au gonflement:

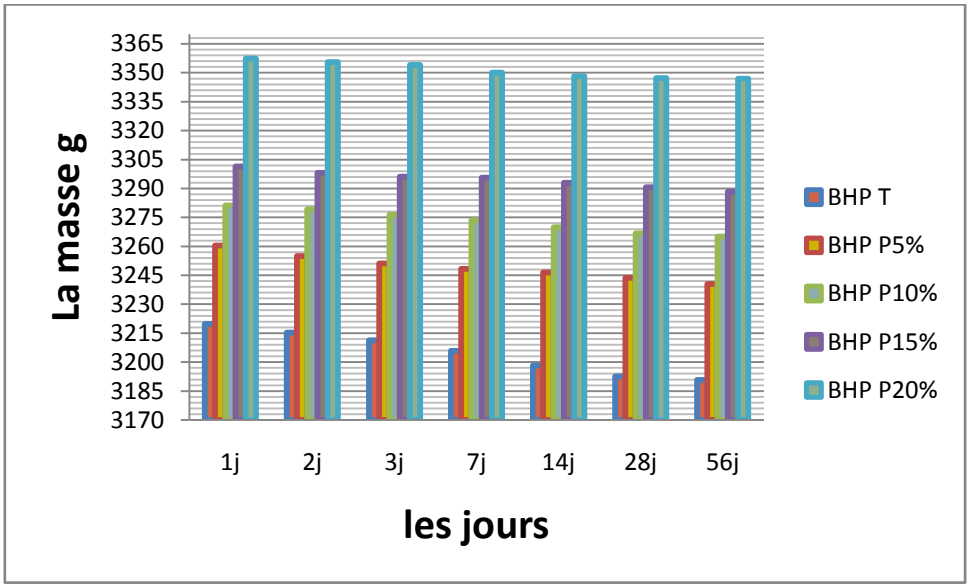


Figure III.21: Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,35 a travers le temps

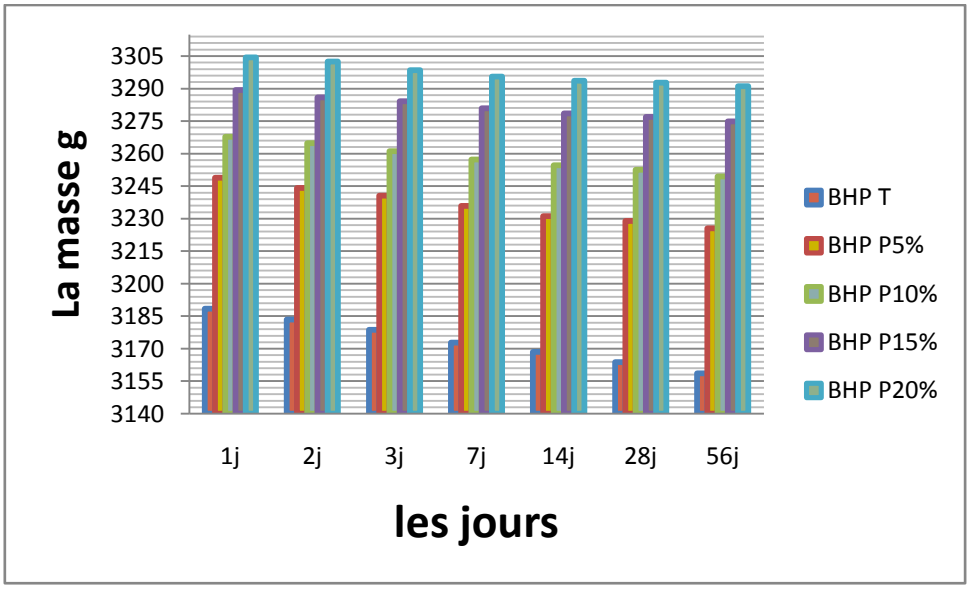


Figure III.22: Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,40 a travers le temps

On remarque sur la **figure III.21 et III.22** que l'augmentation de la masse due au gonflement diminue a travers l'augmentation du dosage en pouzzolane naturelles et cela reviens au propriété et réactions pouzzolanique de la pouzzolane qui permet l'amélioration de la compacité .d'ou le gonflement diminue .se ou **Melle KHERROUBI Djamila**, **[46]** confirme aussi que Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables pour l'absorption du béton. exmple :sue la **figure III.22** la masse du BHP T augmente de 1.48% du 1j au 56j , et pour le BHP P20% sa masse augmente juste de 0.49%

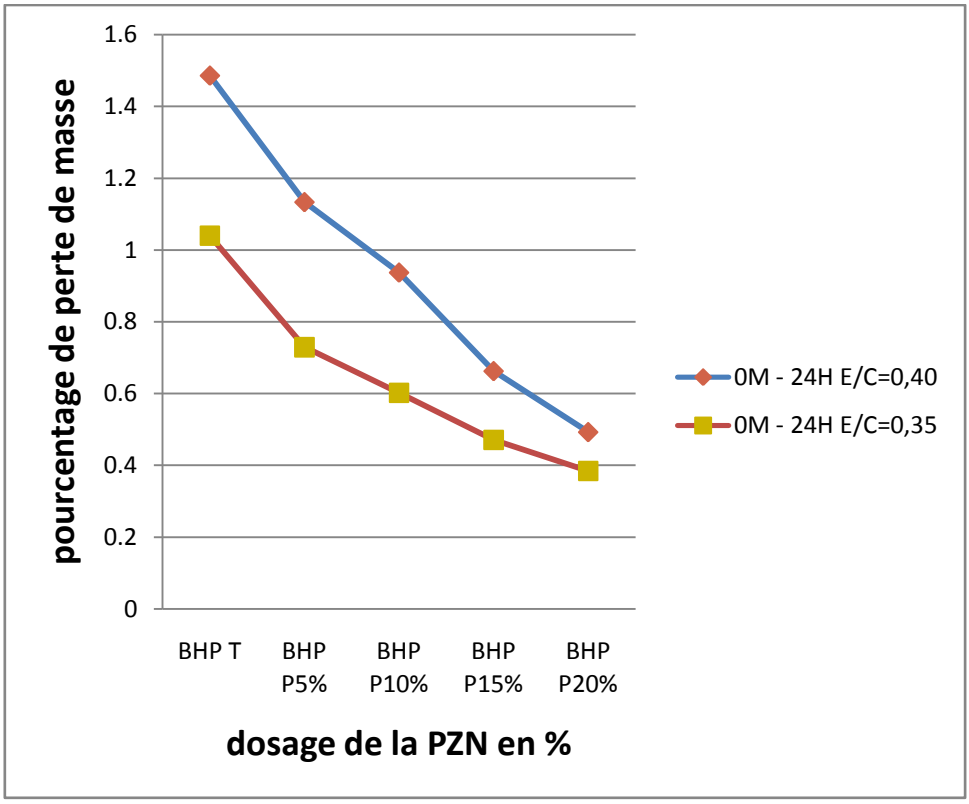


Figure III.23: Différence entre Variation massique due au gonflement de différente teneur de PZN a E/C=0,35 et E/C=0,40 âpres 56j

D'apres la figure **III.23** l'augmentation de la masse est plus grande sur le rapport E/C =0.40 car le dosage de superplastifiant est superieur sur le rapport E/C =0.35 d'ou une amelioration de la compacité et une reduction de la porosité ce qui engendre moin d'absorption d'eau et moin d'augmentation de la masse.

III.3.2.1.6. Essai d'absorption par capillarité :

Dans cette essai on procède a mesuré le taux d'absorbation d'eau de nos différent mélanges ,et cela avec la mesure de la masse a chaque temps précis .

Les résultats sont sur les graphe suivant :

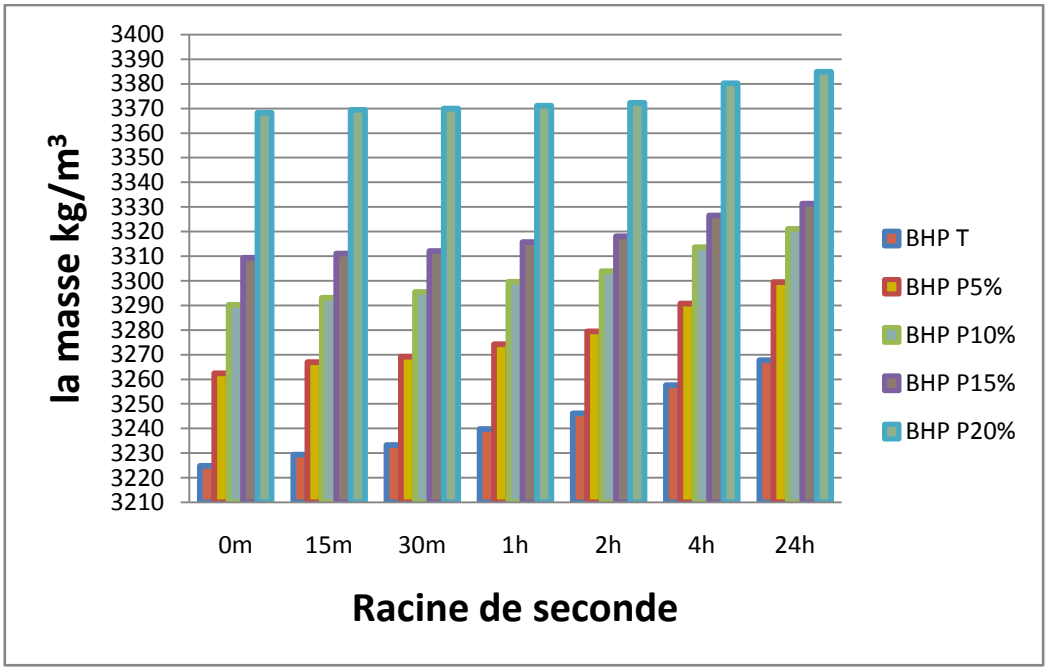


Figure III.24: Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.35

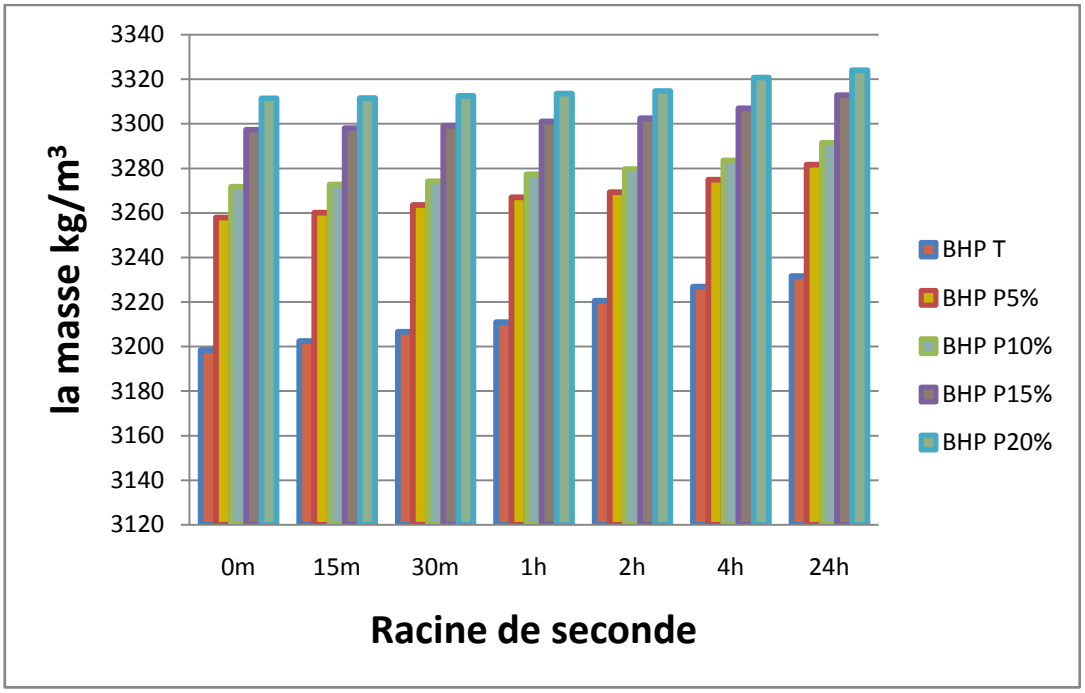


Figure III.25: Absorption de différente teneur de PZN a travers le temps a E/C =0.40

On remarque des figure **III.24** et **III.25** que l'absorption de l'eau par capillarité diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle et cela est due aux réactions pouzzolanniques de la pouzzolane qui permet l'amélioration de la compacité d'ou une diminution de l'absorption capillaire.

Melle KHERROUBI Djamila, **[46]**confirme les résultats ,elle remarque que les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables pour l'absorption du béton

* Légère diminution du retrait et du fluage.
* Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.

exemple: a E/C =0.40,l'absorption du BHP T est de 1.03% et celle du BHP P15% est de 0.47%

comme on aperçoit aussi que l'absorption augmente avec l'augmentation du rapport E/C . et pour bien montré la différence on ajoute un graphe qui montre l'absorbation de 24h entre les différente substitution et les différent rapport E/C.

Tableau III.3: Le pourcentage d'absorption âpres 24h pour chaque substitution et chaque rapport E/C.

	BHP T	BHP P5%	BHP P10%	BHP P15%	BHP P20%
0min - 24H - E/C=0,40	0,49254064	0,66236372	0,93672117	1,13288745	1,33001321
0min - 24H - E/C=0,35	0,38443071	0,4709857	0,60212425	0,72899944	1,03956279

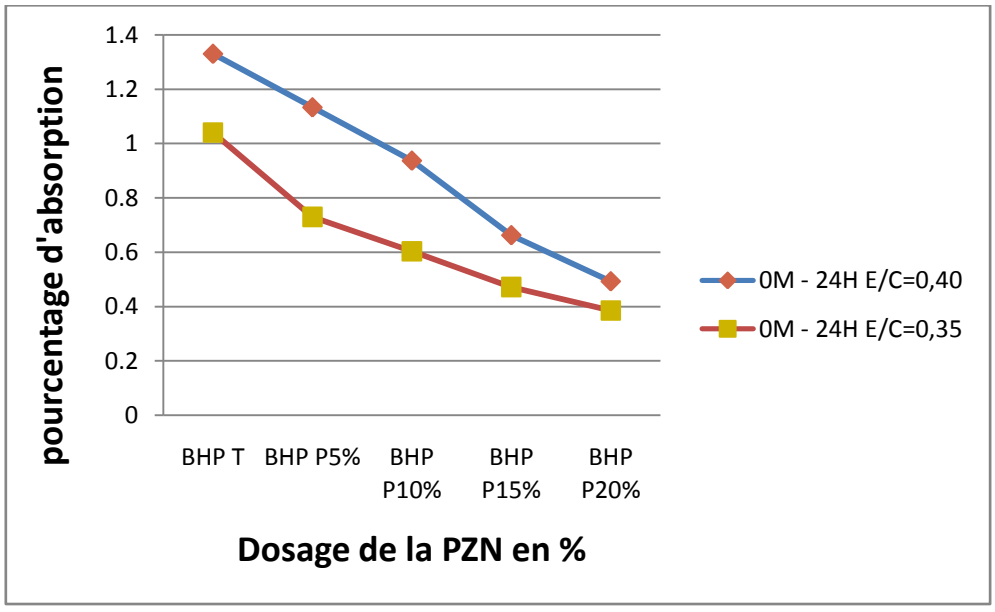


Figure III.26: Différance de pourcentage d'absorption entre différent teneur en pouzzolane naturelle et rapport E/C.

De la figure **III.26** ,on voix clairement que âpres 24h , le pourcentage d'absorbation diminue du BHP T au BHP P 20% a E/C =0.35 de 0.84% et pour E/C =0.40 la diminution du BHP T au BHP P 20% est de 0.65% . ce qui nous amène a conclure que plus le rapport E/C

est grand plus l'absorption augmente .et cela car quand le rapport E/C est grand le dosage du superplastifiant diminue est donc la porosité augmente se qui permet une augmentation de l'absorption capilaire.

III.3.2.1.7. Essai de densité :

Cette essai consiste a mesuré la masse volumique de notre béton pour chaque différente substitution de la pouzzolane naturelle et pour différent rapport E/C , est cela se traduit sur le tableau et le graphe suivant :

Tableau III.4: Variation de la densité en différent teneur de PZN et différent rapport E/C

	BHP T	BHP P 5%	BHP P 10%	BHP P 15%	BHP P 20%
Masse a E/C=0,35	3,368	3,309	3,29	3,262	3,224
Masse a E/C=0,40	3,311	3,297	3,271	3,257	3,198
VOLUME	0,001372	0,001372	0,001372	0,001372	0,001372
	BHP T	BHP P 5%	BHP P 10%	BHP P 15%	BHP P 20%
Densité a E/C=0,35	2454,8105	2411,80758	2397,95918	2377,55102	2349,85423
Densité a E/C=0,40	2413,26531	2403,06122	2384,11079	2373,90671	2330,90379

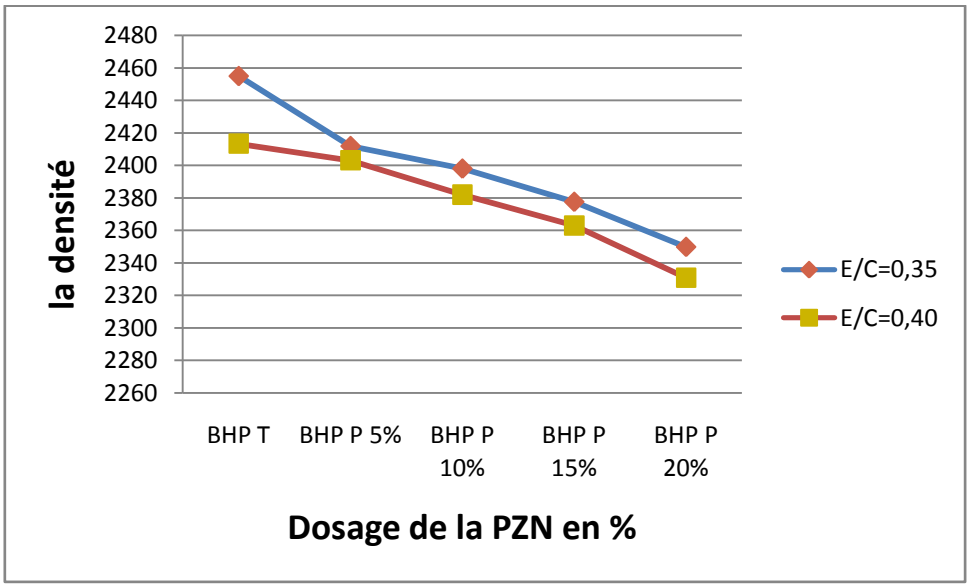


Figure III.27: Différance de densité entre différent teneur en PZN et rapport E/C.

On remarque dur la figure **III.27** que la densité diminue avec l'augmentation de la substitution en pouzzolane naturelle à cause de faible densité de pouzzolane par rapport au ciment ,exemple :a E/C =0.35 la densité du BHP T est de 2454.810 Kg/m^3 et pour le BHP P20% la densité est de 2349.854 Kg/m^3 d'ou une diminution de 4.4%.

III.3.2.2. Avec la fumée de silice :

III.3.2.2.1. Essai a la compression:

Dans cette essai on procède a écraser un béton témoin et 4 béton avec substitution de ciment avec la fumée de silice de différente teneur et avec variation du rapport E/C.

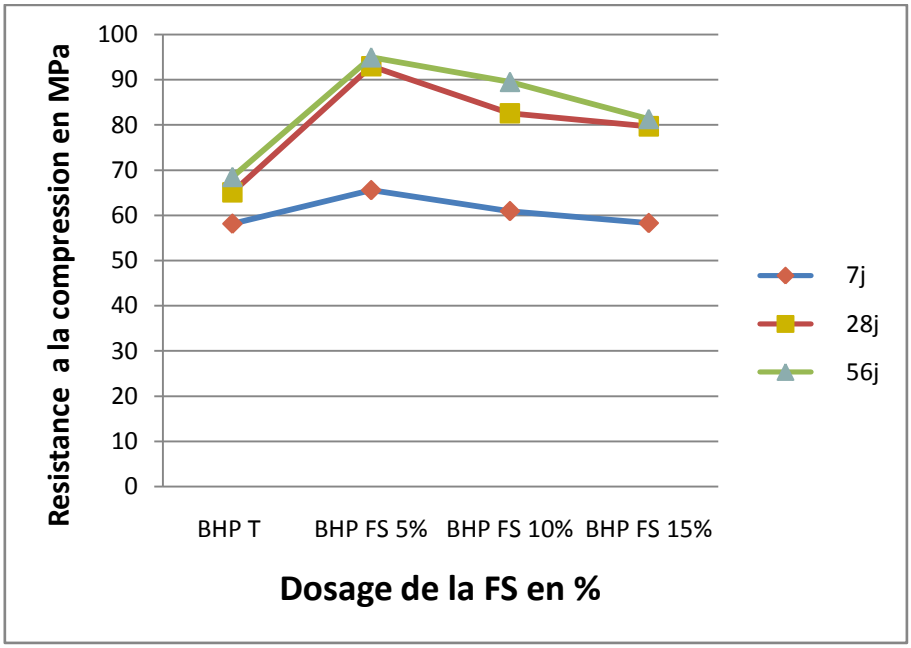


Figure III.28: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS

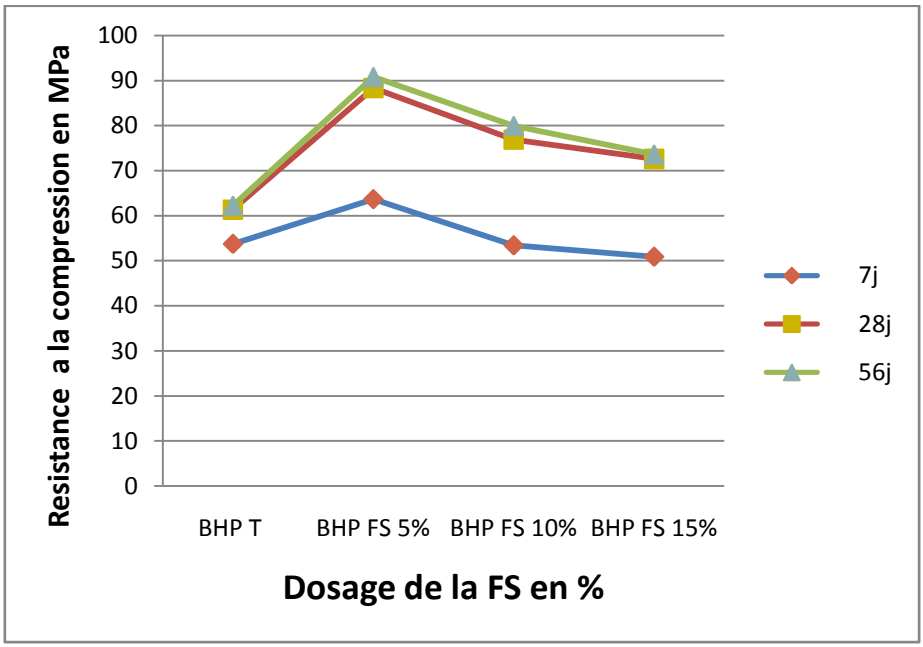


Figure III.29: Augmentation de la Resistance a la compression a E/C=0,40 par rapport a la teneur en FS

On remarque dans **Figure III.28 et III.29** que la résistance augmente a travers l'augmentation de la teneur en fumée de silice jusqu'a un optimum de 5% de substitution ensuit une décente de résistance se suit avec la même cinétique et cela est du a les réactions pouzzolanique de la femée de silice qui améliore la compacité du béton et qui donne une meilleur résistance .

exemple :sue la figure **III.28** a 28j, un BHP FS5% est supérieur par rapport au BHP T de 34.40 et superieur au BHP FS10% de 12%

Se qui confirme les resulats de **Sabah Ben Messaoud [22]** que une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de la fumée de silice par rapport à l'échantillon témoin, de résistance caractéristique à 28 jours est supérieure à 80 MPa.

- **Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34]** confirme aussi sur (la figures I.9 du chapitre 1) qui présentant l'évolution des résistances mécaniques des bétons testés, on remarque une amélioration considérable de la résistance à la compression et à la traction du béton de fumée de silice. A 28j de conservation, on constate un gain de résistance en compression de l'ordre de 8 % avec l'augmentation de taux de fumée de silice ce qui augmente la résistance mécaniques .Ce résultat était prévisible connaissant le rôle bénéfique de l'utilisation simultanée de la fumée de silice et d'un superplastifiant

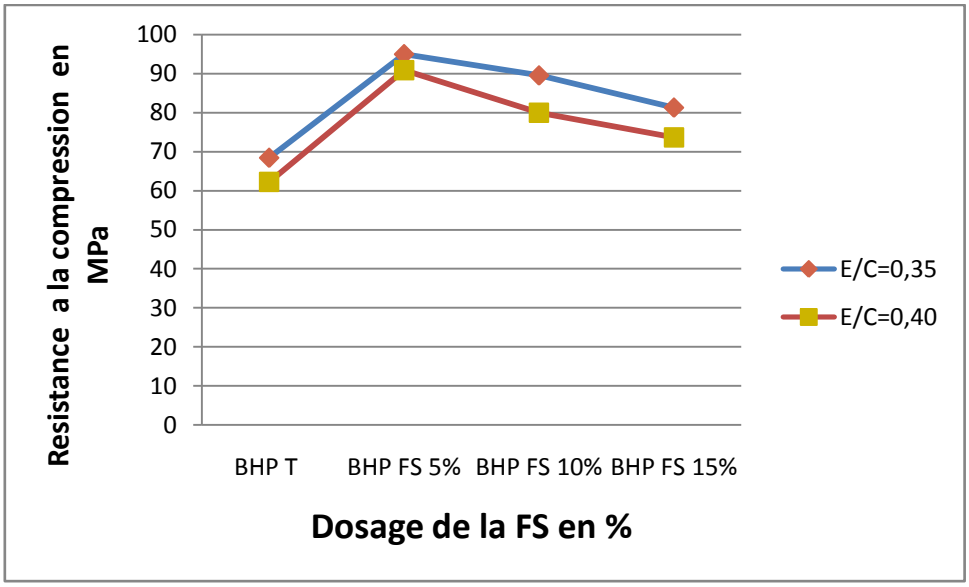


Figure III.30: Comparaison entre la Resistance a la compression de FS a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 56j

On voix clairement dans la **Figure III.30** que la résistance a la compression avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.40 , la différence est de 10% ±

2%. est cela s'explique essentiellement lors de la phase plastique de la première gamme de température au départ d'eau libre, l'eau en plus sur le rapport E/C=0.4 provoque la destruction partielle des CSH et le début de la décomposition de la Portlandite Ca(OH)2. Le départ de l'eau se traduit par une modification considérable des propriétés mécaniques du béton ou la porosité fermée ou fine empêche l'eau de s'évaporer facilement ce qui entraine une augmentation de la pression de vapeur d'eau qui provoque la formation des fissures ou éclatements du béton se qui provoque la diminution des résistance.

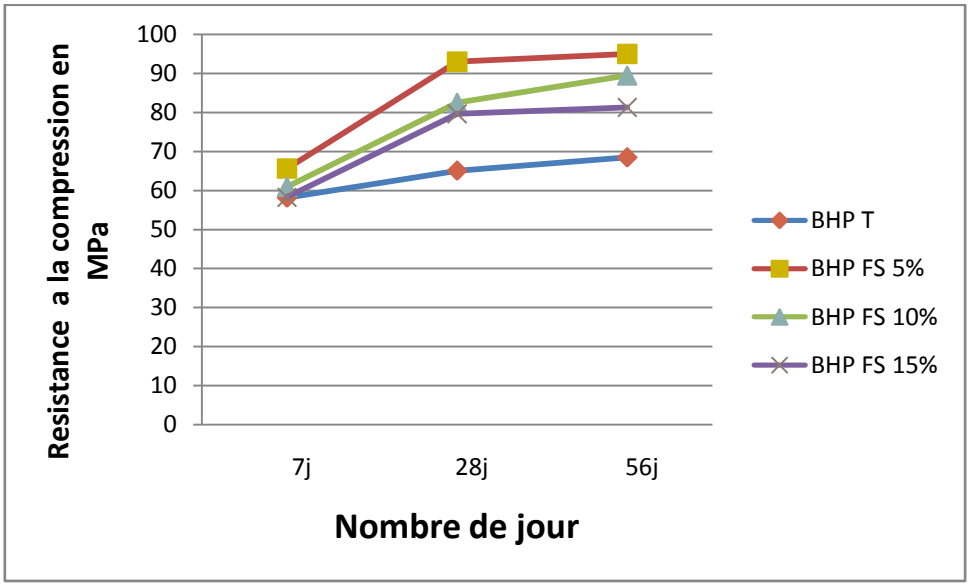


Figure III.31: Augmentation de la Resistance a la compression de FS a E/C=0,35 a travers le temps

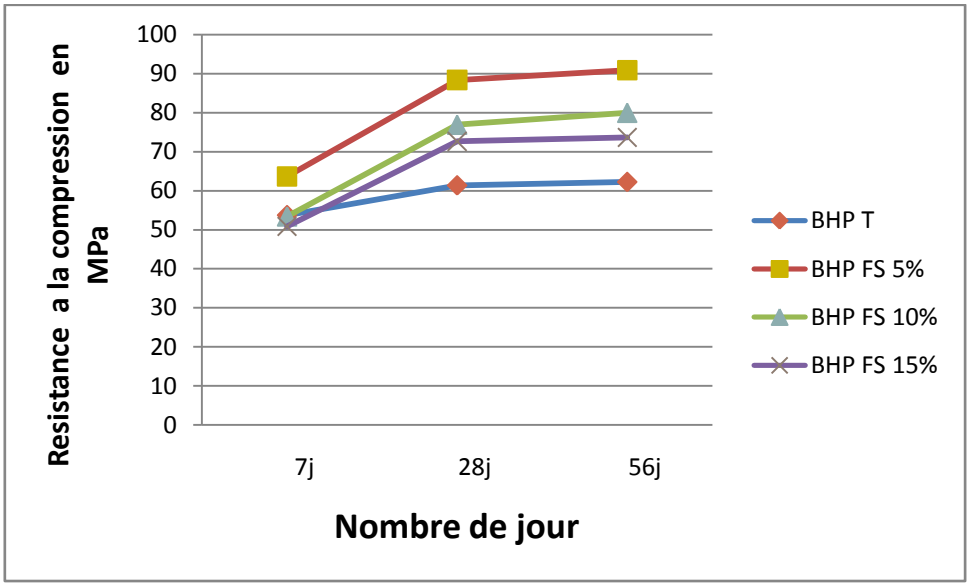


Figure III.32: Augmentation de la Resistance a la compression de FS a E/C=0,40 a travers le temps

On aperçoit dans la **Figure III.31 et III.32** que la résistance a la augmente rapidement du 7j au 28j de la même cinétique ,. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la fumée de silice et le Ca (OH) 2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, puis a long terme la résistance s'améliore et augmente rapidement a 28j et 56j surtout pour les mélange de fumé́é de silice, ensuit l'augmentation ralentie et se stabilise. et la cause est attribuée à l'augmentation des hydrates (C-S-H) grâce à la l'activité de la fumée de silice qui se manifeste avec toute son ampleur sur les longues échéances conduisant ainsi à une hydratation plus intense et par conséquent de meilleures résistances.

-- a E/C =0.35 ,le BHP T a jeune âge a une résistance de 52.12MPa qui augmente ensuit a 69.14MPa et se stabilise a 71.44MPa a 56j.

-- a E/C =0.35 ,le BHP FS 5% a jeune âge a une résistance de 63.58MPa qui augmente ensuit a 92.93MPa et se stabilise a 94.93MPa a 56j.

selon **Sabah Ben Messaoud [22]** a dit que la fumée de silice est caractérisé par une bonne augmentation rapide de résistance à la compression fcj et une résistance médiocre en traction ftj. se qui est confirmé par nos resultats.

III.3.2.2.2. Essai a la traction par flexion:

Dans cette essai on procède aussi a écraser une béton témoin et 4 béton avec substitution de ciment avec fumée de silice de différente teneur et avec variation du rapport E/C.

Les résultats sont sur les graphes suivant :

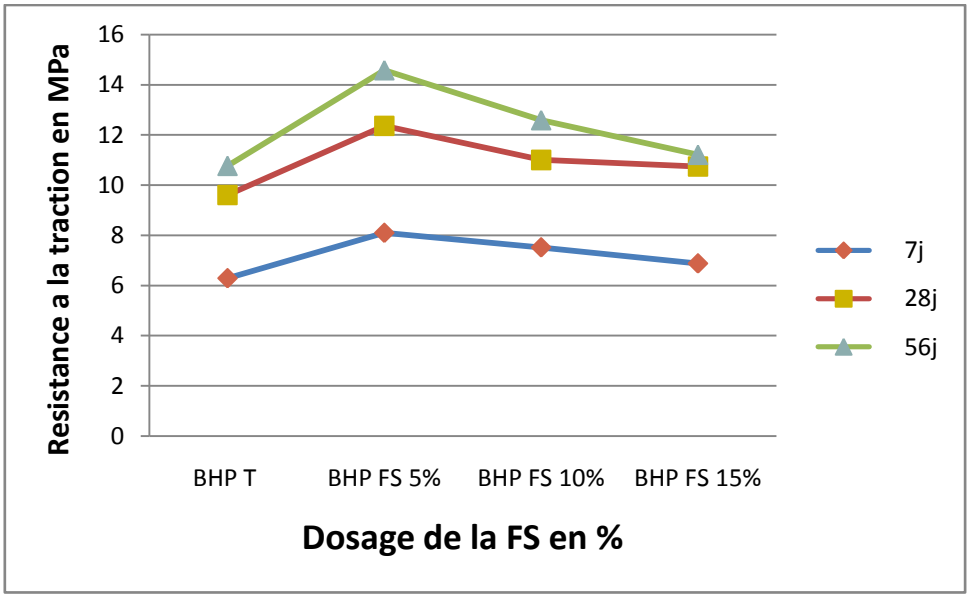


Figure III.33: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS

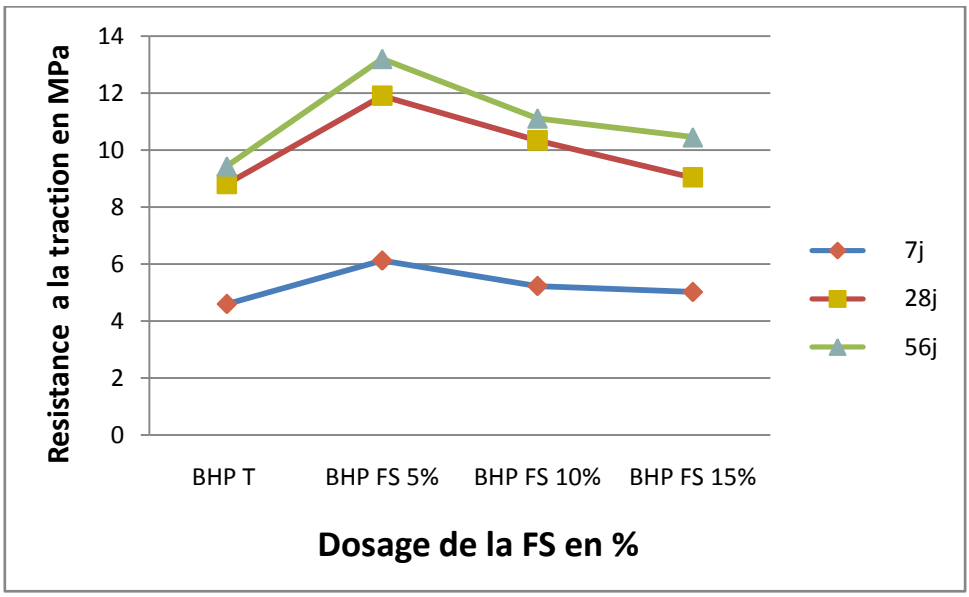


Figure III.34: Augmentation de la Resistance a la traction a E/C=0,35 par rapport a la teneur en FS

Meme chose pour la traction en remarque dans les **Figure III.33 et III.34** que la résistance augmente progressivement de la même cinétique a travers l'augmentation de la teneur en fumée de silice jusqu'a un optimum de 5% de substitution se qui confirme l'essai de la résistance a la compression, ensuit une décente de résistance se suit .

--A titre d'exemple : a la figure **III.35** a (28j), un BHP FS 5% a une résistance supérieur de 12% a celui du BHP FS10% et de 13% a celui de BHP FS 15% ,comme il est supérieur aussi de 27% a celui du BHP T .

Se qui confirme les resulats de **Sabah Ben Messaoud [22]** que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combine de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif, c'est-a-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle.

Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34] ont eu des résultats conforme a nous, ils ont vu sur la figures I.9 présentant l'évolution des résistances mécaniques des bétons testés, on remarque une amélioration considérable de la résistance à la compression et à la traction du béton de fumée de silice

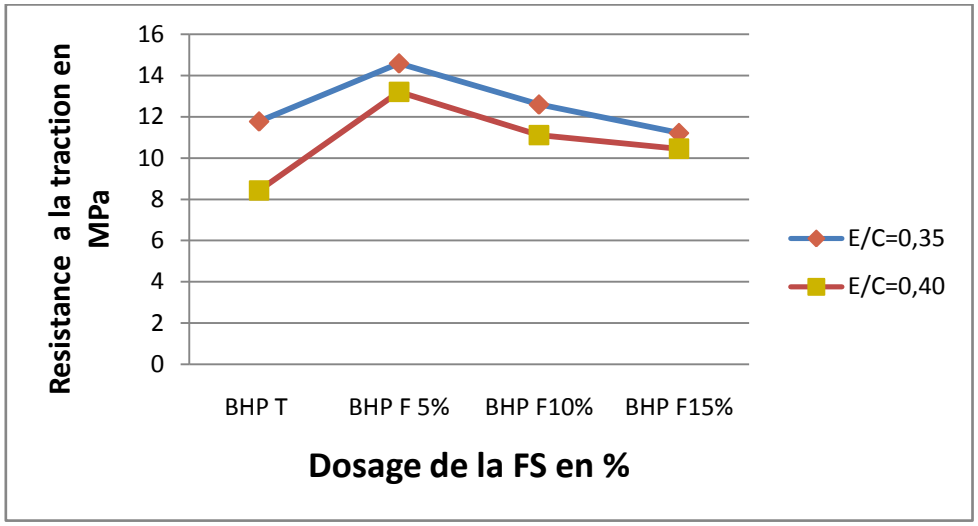


Figure III.35: Comparaison entre la Resistance a la traction de FS

a E/C=0,35 et E/C=0.40 a 56j

On voix clairement dans la **Figure III.35** que la résistance a la traction avec un rapport E/C =0.35 et plus grande que celle du rapport E/C =0.40 , exemple :pour le BHP FS10% sa résistance a E/C =0.35 et supérieur de 13% a celui du BHP FS10% a E/C =0.40.

Est cela s'explique essentiellement lors de la phase plastique de la première gamme de température au départ d'eau libre, l'eau liée provoque la destruction partielle des CSH et le début de la décomposition de la Portlandite Ca(OH)2. Le départ de l'eau se traduit par une modification considérable des propriétés mécaniques du béton ou la porosité fermée ou fine empêche l'eau de s'évaporer facilement ce qui entraine une augmentation de la pression de

vapeur d'eau qui provoque la formation des fissures ou éclatements du béton se qui provoque la diminution des résistance.

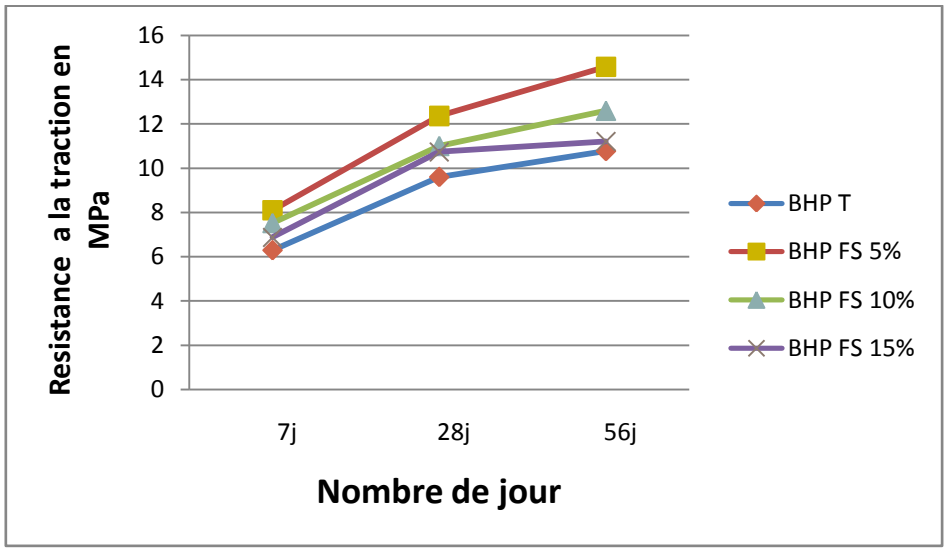


Figure III.36: Augmentation de la Resistance a la traction de FS a E/C=0,35 a travers le temps

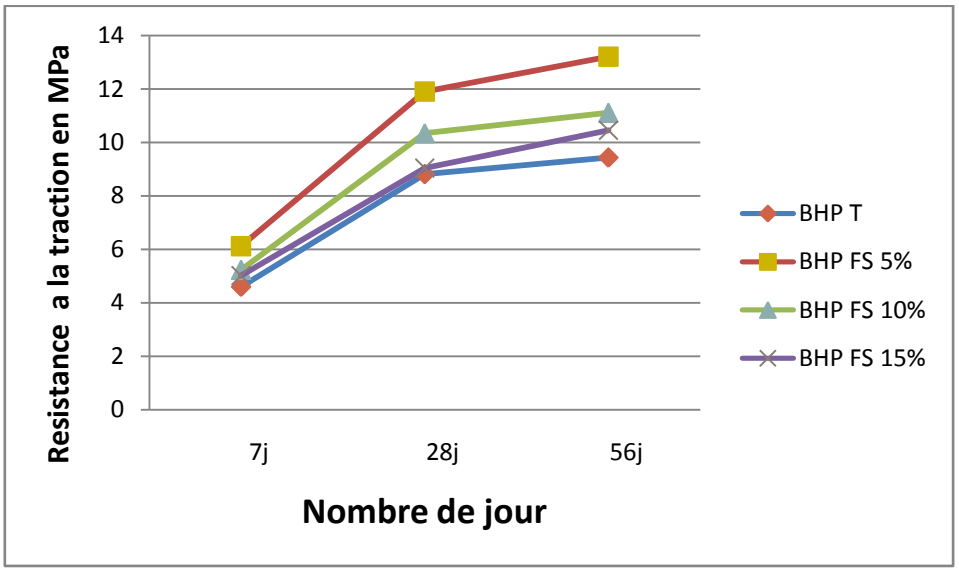


Figure III.37: Augmentation de la Resistance a la traction de FS a E/C=0,40 a travers le temps

On aperçoit dans la **Figure III.36 et III.37** que la résistance a la traction est faible a jeune age (7j) , puis elle augmente rapidement a jusqu'au 28j , ensuit l'augmentation ralentie et se stabilise a long terme (56j). a titre d'exemple :a E/C =0.35 , un BHP FS 15% augmente de

56% du (7j) vers le (28j) puis il augmente juste de 4% du (28j) au (56j).se qui confirme les résultats de la compression et de **Sabah Ben Messaoud [22]**.

III.3.2.2.3. Essai de retrait:

Dans cette essai ,on va procédé a mesuré des éprouvette qui on été mise dans une armoire isolé thermiquement afin de gardé une température constante de 24° ± 2°.la mesure se fait selon le retrait des jour précise .les résultats sont sur les graphe suivant :

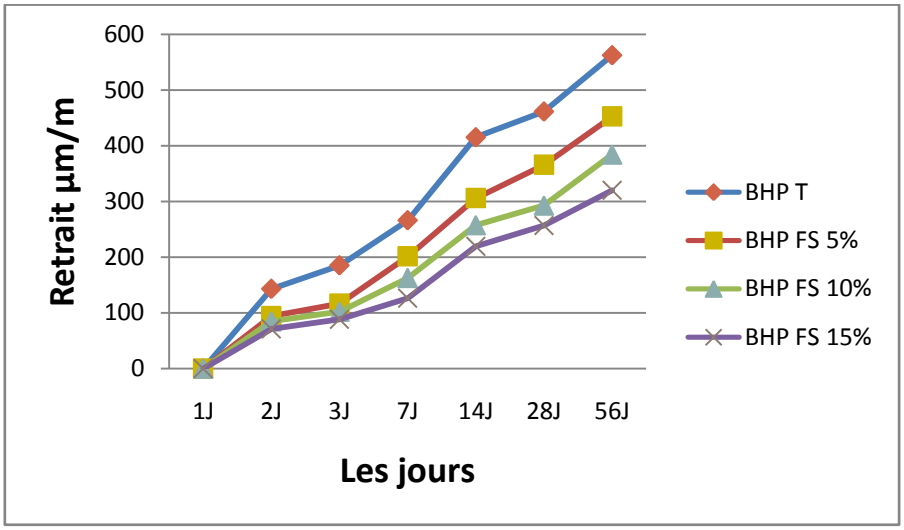


Figure III.38: Diminution du retrait des éprouvette de FS a E/C=0,35 a travers le temps.

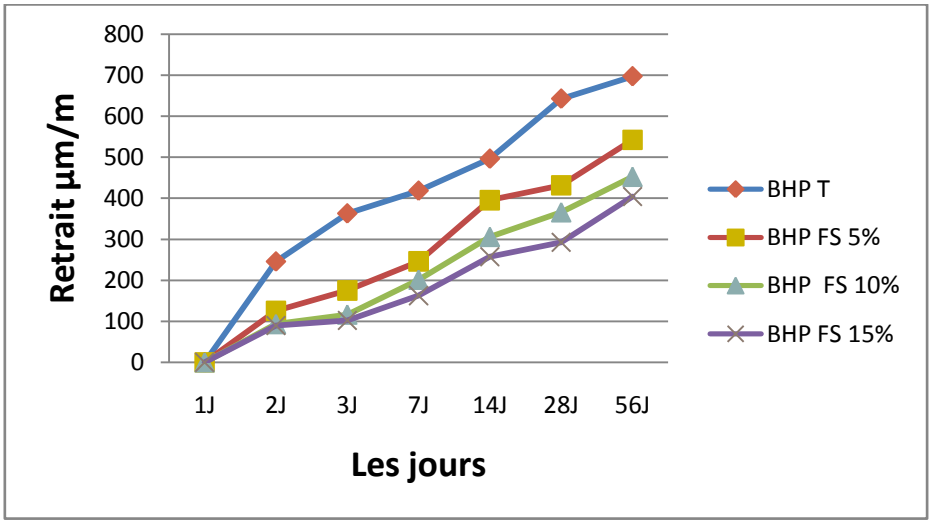


Figure III.39: Diminution du retrait des éprouvette de FS a E/C=0,40 a travers le temps.

D'âpres les figure III.38 et III.39 on remarque une diminution t du retrait avec l'augmentation de la teneur de la fumée de silice observé pour les substitution (5%, 10%et 15%) par rapport au temoin est cela est due à l'utilisation du superplastifiant selon **Sihem HAMMAT[47]**qui

dit que le superplastifiant joue le rôle de la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH). En conséquence, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante induisant donc un retrait moins important par rapport à celui du mortier témoin. selon exemple : a E/C =0.35 ET A 28J :le retrait a diminuer de 76.8% du BHP T jusqu'au BHP FS 15%

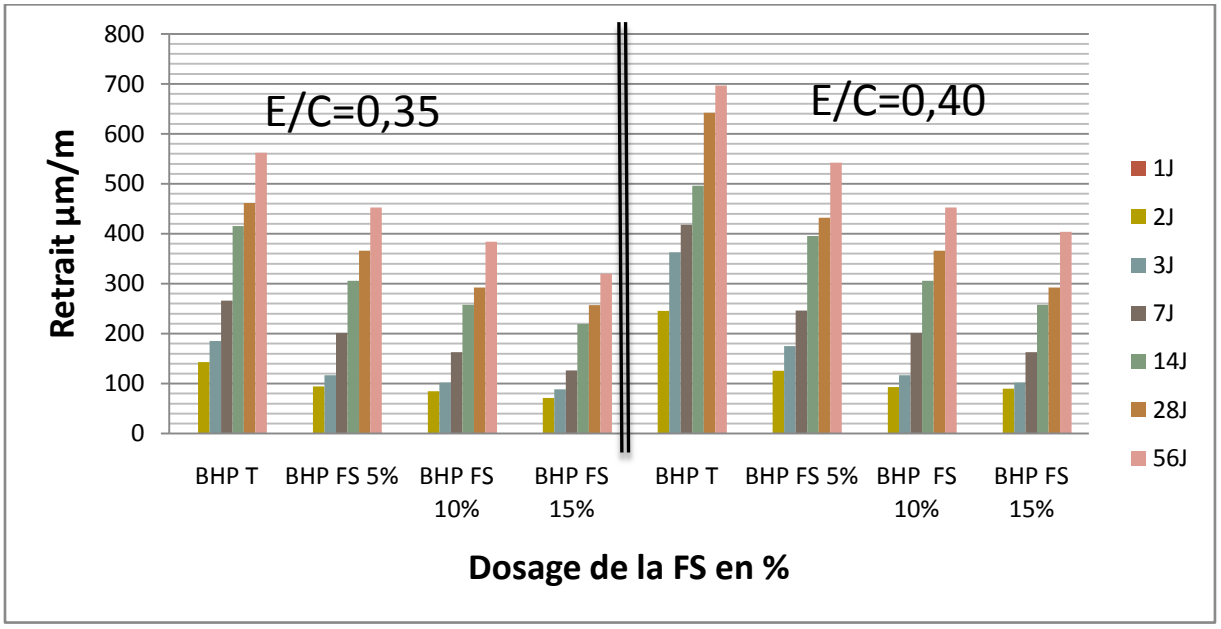


Figure III.40: Evolution du retrait a E/C=0.35 et E/C=0.40

Comme on aperçoit aussi sur la **Figure III.40** que le retrait diminue avec la diminution de rapport E/C .

A titre d'exemple : pour le BHP 15% A 28J , le retrait a E/C =0.40 est de 418.123µm/m et a E/C=0.35 il est de 315,487 µm/m se qui donne une diminution de 32%.et cela est due que l'eau en plus sur le rapport E/C=0.4 s'évapore et donne un retrait supérieur a celui du rapport E/C =0.35.

III.3.2.2.4. Essai de gonflement:

Pour cette essai .c'est presque la même chose que l'essai de retrait sauf que cette fois les éprouvettes sont mise sur une baquet d'eau a température constant de 25°.ensuit au fil des jours en mesure le gonflement et la variation massique, les résultats sont sur les graphes suivant:

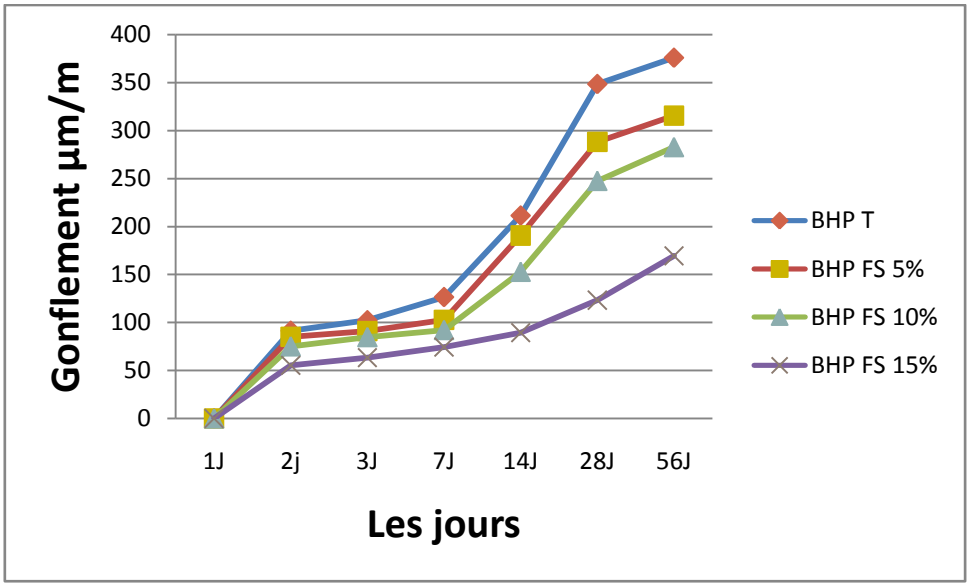


Figure III.41: Augmentation du gonflement des éprouvette de FS a E/C=0,35 a travers le temps.

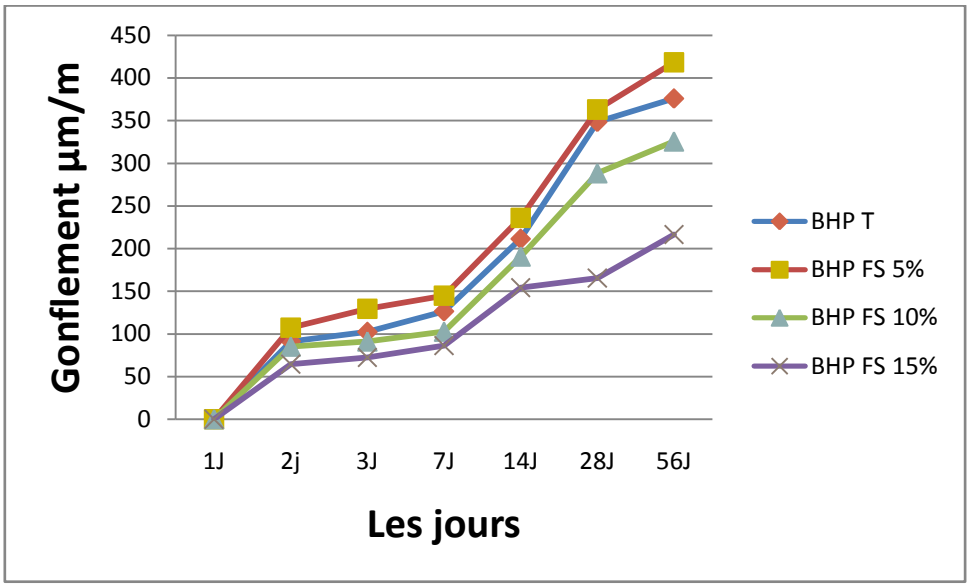


Figure III.42: Augmentation du gonflement des éprouvette de FS a E/C=0,40 a travers le temps.

Sur la **figure III.40 et III.41** on peut voir que la fumée de silice a un effet bénéfique sur le gonflement des éprouvette qui diminue au fur et a mesure de l'augmentation de la teneur en fumée de silice . et cela reviens a leur propriété de consommation d'eau pour les réaction d'hydratation. qui permet l'amélioration de la compacité du béton qui réduit la perméabilité.

Prenons exemple sur la **figure III.42** . on voix que le gonflement du BHP T a 28j est de 348,412µm/m et le BHP FS10% de 288,24 µm/m ce qui se résume a une diminution de 20% et pour le BHP FS 15% il est inferieur du BHP FS 10% de 74%.

III.3.2.2.5. Essai de la variation massique:

Dans cette essai on va procédé comme suit :

-- pour le retrait : on va mettre des éprouvette de différente teneur en fumée de silice et avec différent rapport E/C dans une armoire isolé pour évité les variation importante de température et le changement d'humidité . ensuite en calcule la variation de la masse en fonction de jours fixé

-- pour le gonflement: on va mettre des éprouvette de différente teneur en fumée de silice et avec différent rapport E/C dans un baquet d'eau a température constante 24° ,ensuite en calcule la variation de la masse en fonction de jours fixé .

les résultats sont exprimé sur les graphes suivant :

A. Variation massique due au retrait:

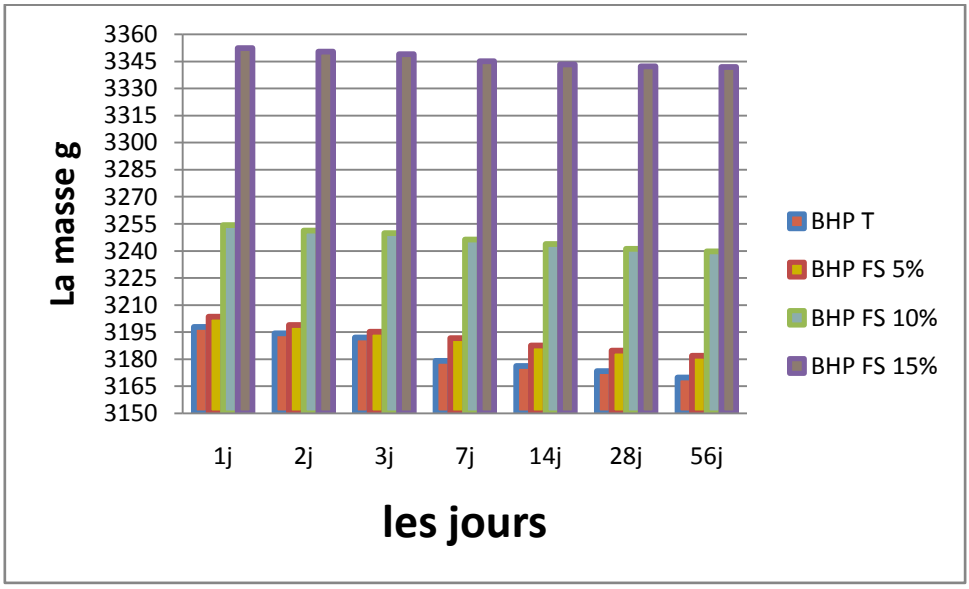


Figure III.43: Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,35 a travers le temps

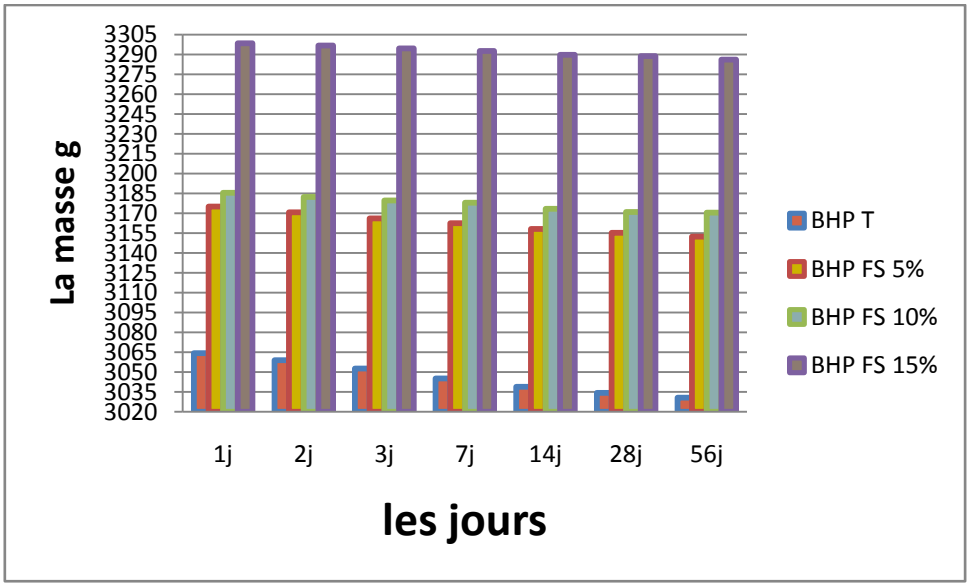


Figure III.44: Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,40 a travers le temps

Par les **figure III.43 et III.44** on voix clairement que la masse diminue avec l'augmentation de la substitution de la fumée de silice . c'est a dire plus le dosage de fumée de silice augmente plus la perte de masse de l'éprouvette diminue aussi ,et cela est due a la texture cellulaire et la porosité qui diminue a cause de l'utilisation du superplastifiant qui joue le rôle de la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH) qui engendre une perte de masse .exemple : de la **figure III.44** :

- la mase du BHP T la masse a varié du 1j au 28j de 1.10%
- la mase BHP FS 5% a varié du 1j au 28j de0.71 %
- la mase BHPFS 15% la masse a varié du 1j au 28j de 0.37%

se qui montre que le BHP FS15% a absorbé moins que le BHP FS5%. et beaucoup moins du BHP T.

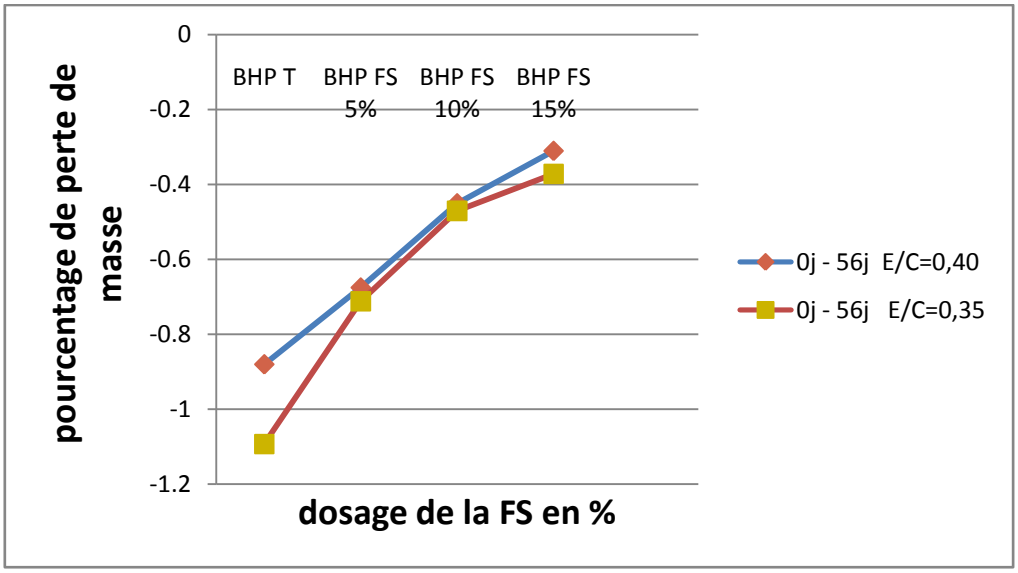


Figure III.45: Différence entre Variation massique due au retrait de différente teneur de FS a E/C=0,35 et E/C=0,40 apres 56j

De la **Figure III.45** on observe que la perte de masse est supérieur sur le rapport E/C=0.40 a celui du E/C =0.35 , et cela est due a l'eau en plus qui ne réagit pas avec le liant sur le rapport E/C=0.4 qui s'évapore et donne une perte de masse plus importante que le rapport E/C=0.35

exemple : le BHP FS 15% a une perte de masse de 0.37% a E/C =0.40 et de 0.31% a E/C=0.35

B. Variation massique due au gonflement:

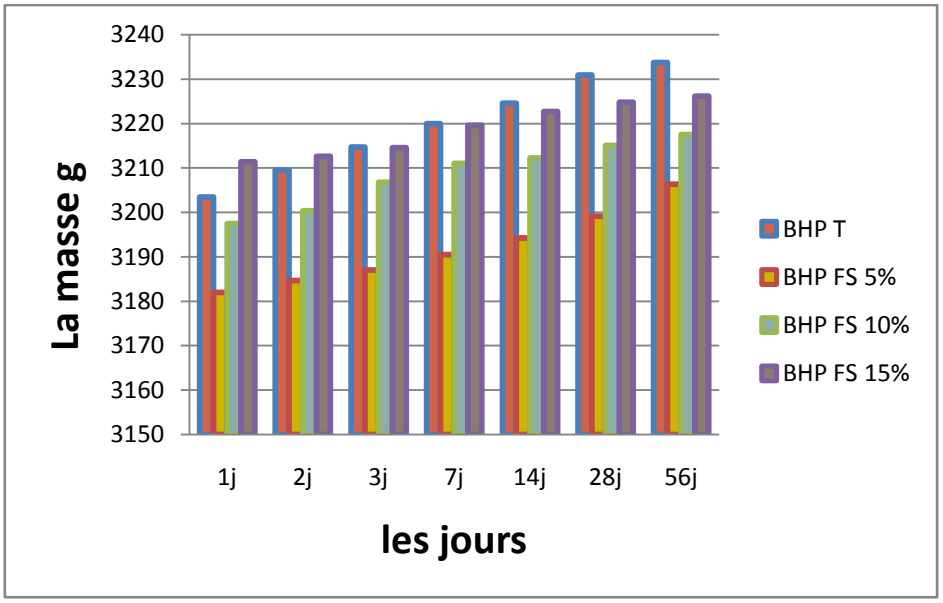


Figure III.46: Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,35 a travers le temps

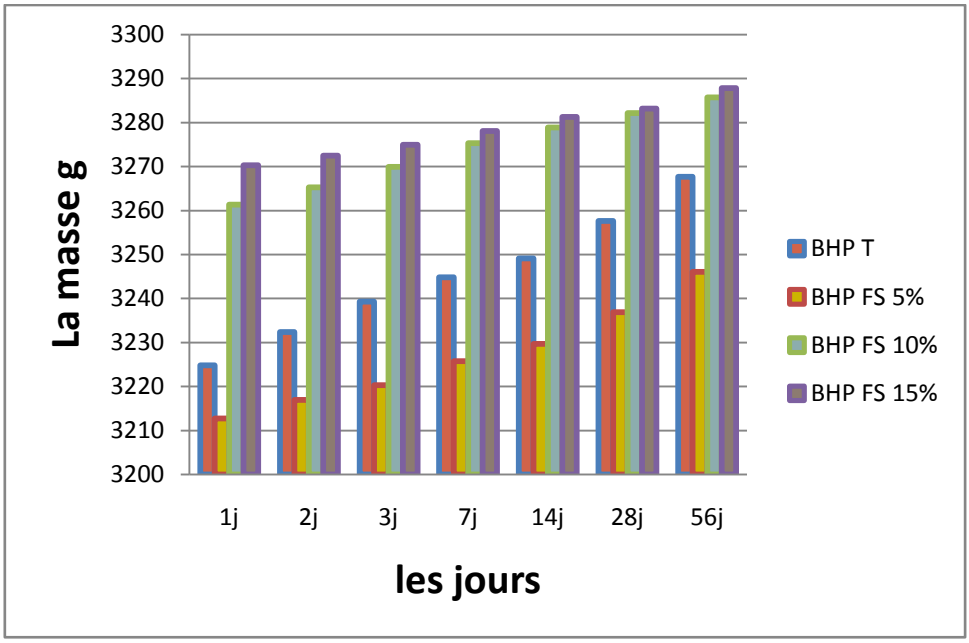


Figure III.47: Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,40 a travers le temps

On remarque sur la **figure III.46 et III.47** que l'augmentation de la masse due au gonflement diminue a travers l'augmentation du dosage en fumée de silice et cela reviens au propriété et réactions pouzzolanique de la fumée de silice qui permet l'amélioration de la compacité .d'ou le gonflement diminue .

Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34] a trouvé que la fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.se qui engendre une diminution du gonflement et de l'absorption capillaire.

exemple :sue la **figure III.47**, la masse du BHP T augmente de 1.33% du 1j au 56j , et pour le BHP FS 15% sa masse augmente juste de 0.53% .

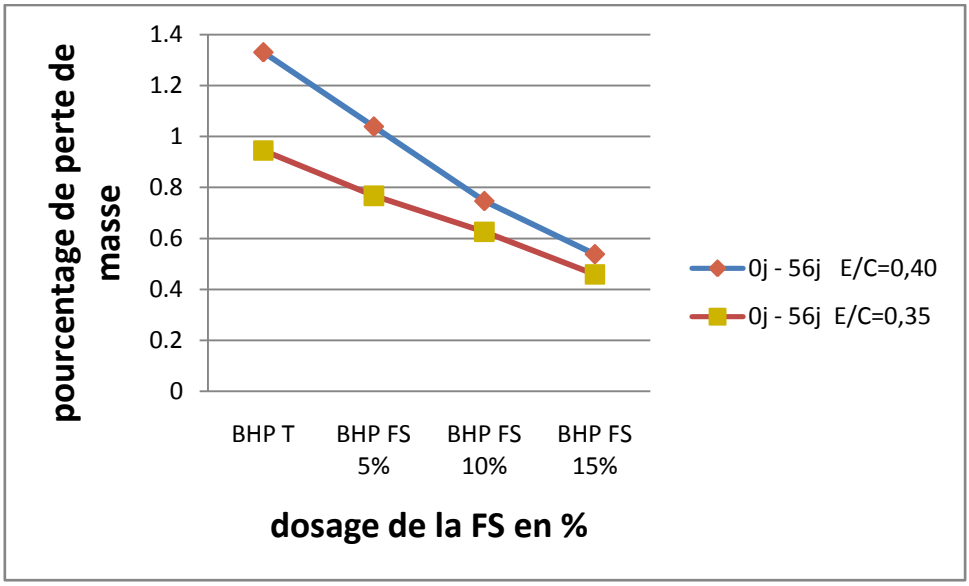


Figure III.48: Différence entre Variation massique due au gonflement de différente teneur de FS a E/C=0,35 et E/C=0,40 âpres 56j

D'apres la **figure III.48** l'augmentation de la masse est plus grande sur le rapport E/C =0.40 car il a un dosage de superplastifiant inferieur a celui du rapport E/C=0.35 qui lui permet de amélioré la compacité donc il absorbe moins d'eau que le béton a rapport E/C =0.4.

III.3.2.2.6. Essai d'absorption par capillarité :

Dans cette essai on procède a mesuré le taux d'absorbation d'eau de nos différent mélanges de fumée de silice,et cela avec la mesure de la masse a chaque temps précis .

Les résultats sont sur les graphe suivant :

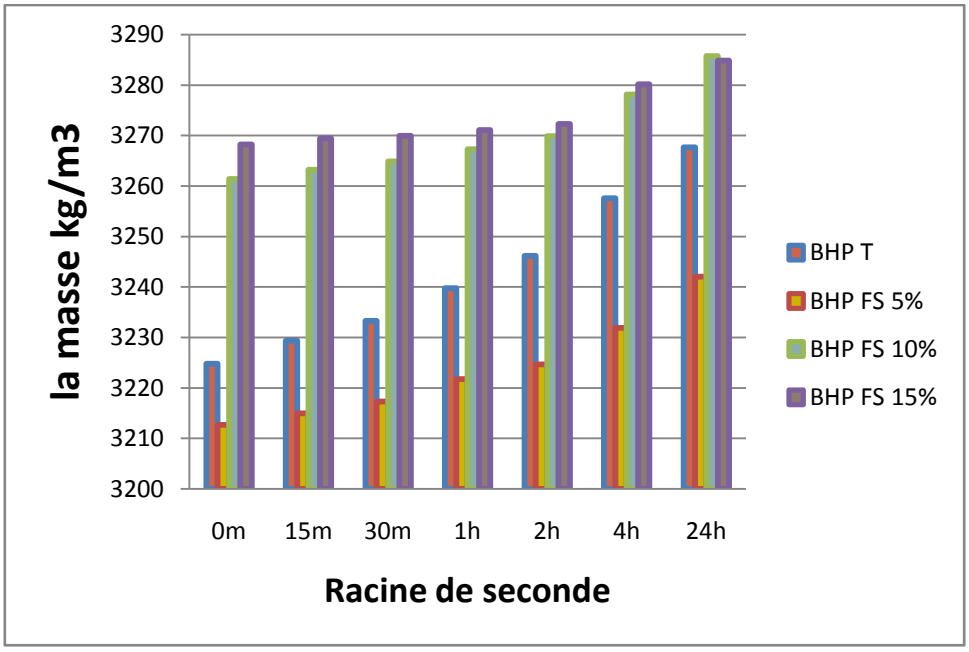


Figure III.49: Absorption de différente substitution de FS a travers le temps a E/C =0.35

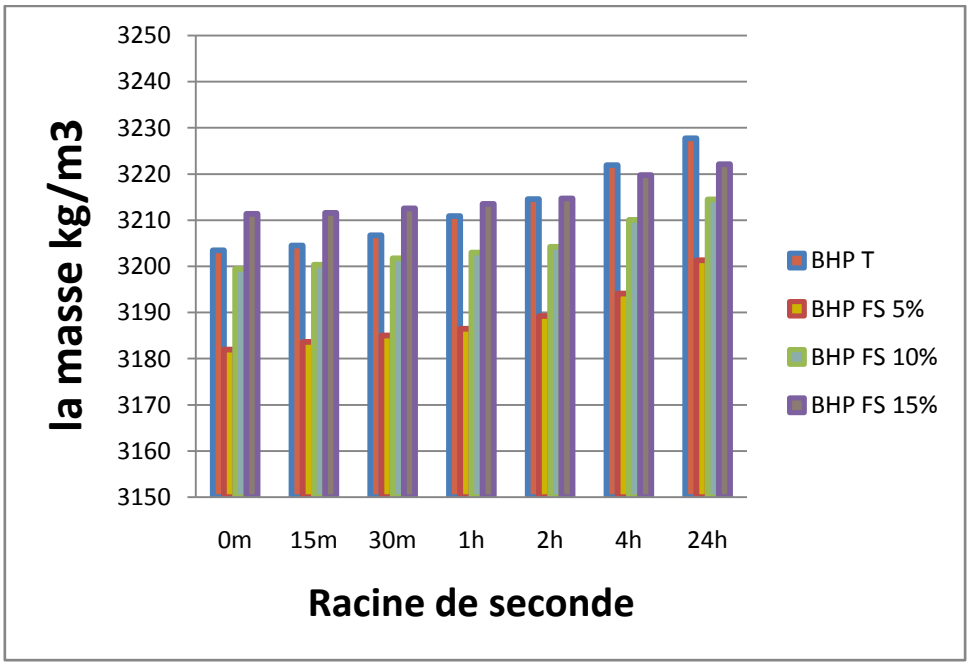


Figure III.50: Absorption de différente substitution de FS a travers le temps a E/C =0.40

On remarque des **figure III.49 et III.50** que l'absorption de l'eau par capillarité diminue avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice et cela est due aux réactions pouzzolanniques de la fumée de silice qui permet l'amélioration de la compacité d'ou une diminution de l'absorption capillaire.

Z. RAHMOUNI et TEBBAL [34] a trouvé la meme chose que nous , que la fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux

pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.se qui engendre une diminution du gonflement et de l'absorption capillaire.

exemple :a E/C =0.40,l'absorption du BHP T est de 0.75% et celle du BHP FS15% est de 0.33%

comme on aperçoit aussi que l'absorption augmente avec l'augmentation du rapport E/C . et pour bien montré la différence on ajoute un graphe qui montre l'absorbation de 24h entre les différente substitution et les différent rapport E/C.

Tableau III.5: Le pourcentage d'absorption âpres 24h pour chaque substitution et chaque rapport E/C.

	BHP T	BHP FS 5%	BHP FS 10%	BHP FS 15%
0M - 24H E/C=0,40	1,33001321	0,91419287	0,74631671	0,50761111
0M - 24H E/C=0,35	0,756994	0,60969094	0,4691402	0,33412323

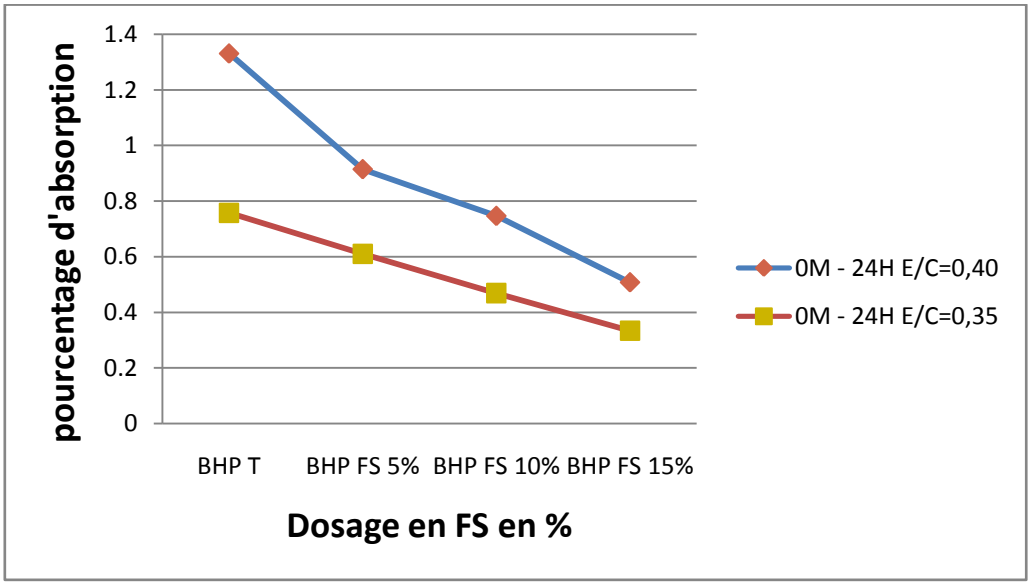


Figure III.51: Différance de pourcentage d'absorption entre différent teneur en fumée de silice et rapport E/C**.**

De la **figure III.51** ,on voix clairement que âpres 24h , le pourcentage d'absorbation diminue du BHP T au BHP FS15% a E/C =0.35 de 0.84% et pour E/C =0.40 la diminution du BHP T au BHP FS15% est de 0.65% . ce qui nous amène a conclure que plus le rapport E/C est grand plus l'absorption augmente .et cela car quand le rapport E/C est grand le dosage du superplastifiant diminue est donc la porosité augmente se qui permet une augmentation de l'absorption capilaire.

III.3.2.2.7. Essai de densité :

Cette essai consiste a mesuré la masse volumique de notre béton pour chaque différente substitution de la fumée de silice et pour différent rapport E/C , est cela se traduit sur le tableau et le graphe suivant :

Tableau III.6: Variation de la densité en différent teneur de FS et différent rapport E/C

	BHP FS 5%	BHP FS 10%	BHP FS 15%
Masse a E/C=0,35	3,261	3,212	3,208
Masse a E/C=0,40	3,199	3,181	3,072
VOLUME	0,001372	0,001372	0,001372
DENSITE	BHP FS 5%	BHP FS 10%	BHP FS 15%
E/C=0,35	2376,82216	2341,10787	2338,19242
E/C=0,40	2331,63265	2318,51312	2239,06706

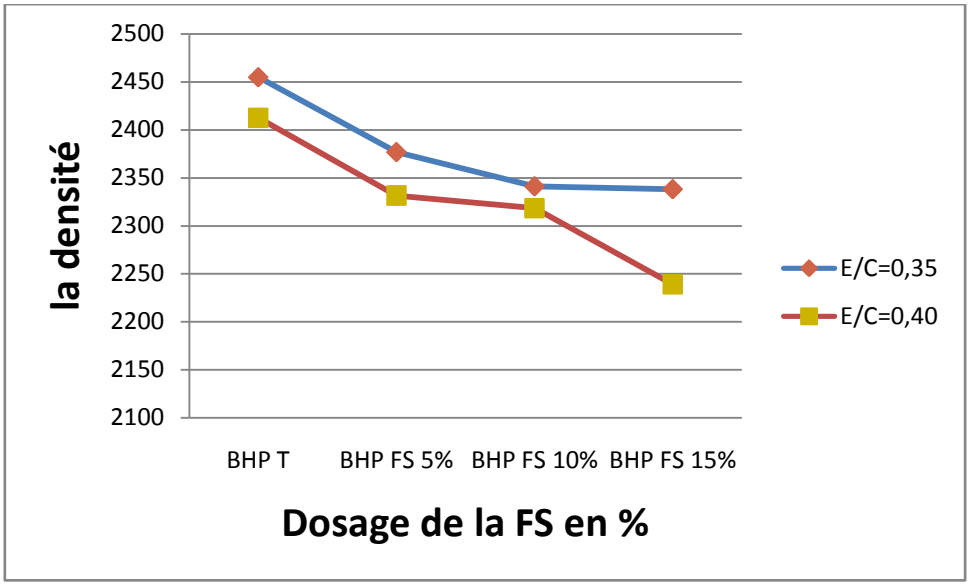


Figure III.52: Différance de densité entre différent teneur en FS et rapport E/C.

On remarque dur la **figure III.52** que la densité diminue avec l'augmentation de la substitution en fumée de silice ,exemple :a E/C =0.35 la densité du BHP T est de 2454.810 Kg/m^3 et pour le BHP FS15% la densité est de 2338.192 Kg/m^3 d'ou une diminution de 4.9%. se qui prouve que le ciment a une plus grande densité.

III.3.3. Comparaison entre la pouzzolane naturelle et la fumée de silice a l'etat durci :

Pour la comparaison entre la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, on a choisie de prndre les optimum des deux et les comparé a travers chaque essai.

III.3.3.1. Essai de résistance a la compression:

Dans les figure qui suit (Figure **III.52 et III.53**) on va comparé entre l'optimum de la PZN et la FS a E/C=0.35 ET E/C =0.40:

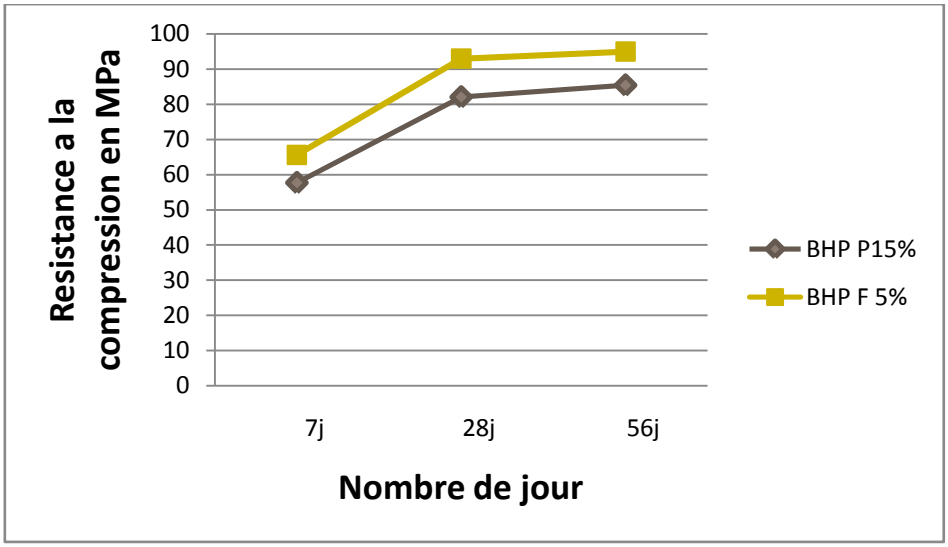


Figure III.53: Comparaison entre la résistance a la compression a E/C=0.35 de la PZN et la FS

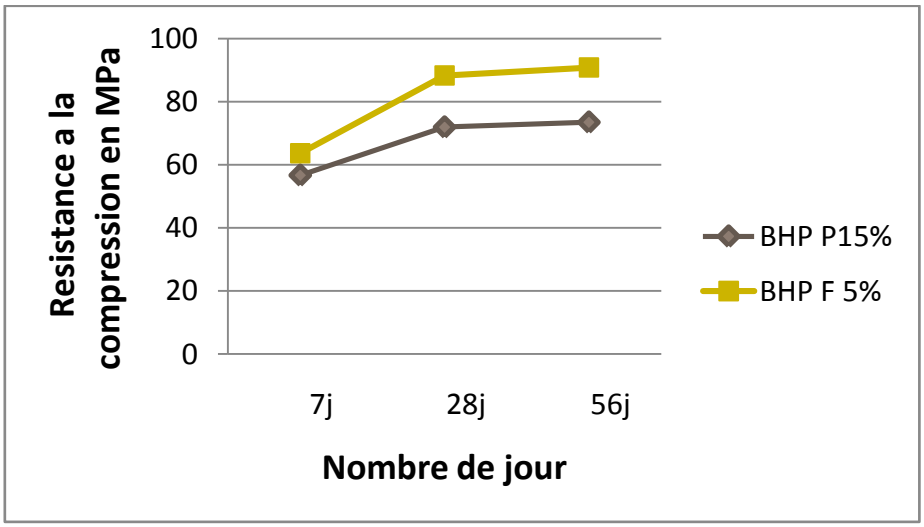


Figure III.54: Comparaison entre la résistance a la compression a E/C=0.40 de la PZN et la FS

de la **figure III.53 et III.54** on remarque que la fumée de silice un une plus grande résistance que la pouzzolane naturelle pour les deux rapport E/C.

a titre d'exemple : a E/C =0.35 a 28j ,le BHP FS 5% dépasse le BHP P15% de 11%

l'écart entre les résistance entre la FS et la PZN n'est pas énorme .se qui conclu que la pouzzolane naturelle est bénéfique pour fabriquer un béton haute performance puisque sa resistance se setue entre les norme d'un BHP (entre 60MPa et 100MPa).

III.3.3.2. Essai de résistance a la traction:

même chose que la compression , Dans les figure qui suit (Figure III.54 et III.55) on va comparé entre l'optimum de la PZN et la FS a 7j et 28j:

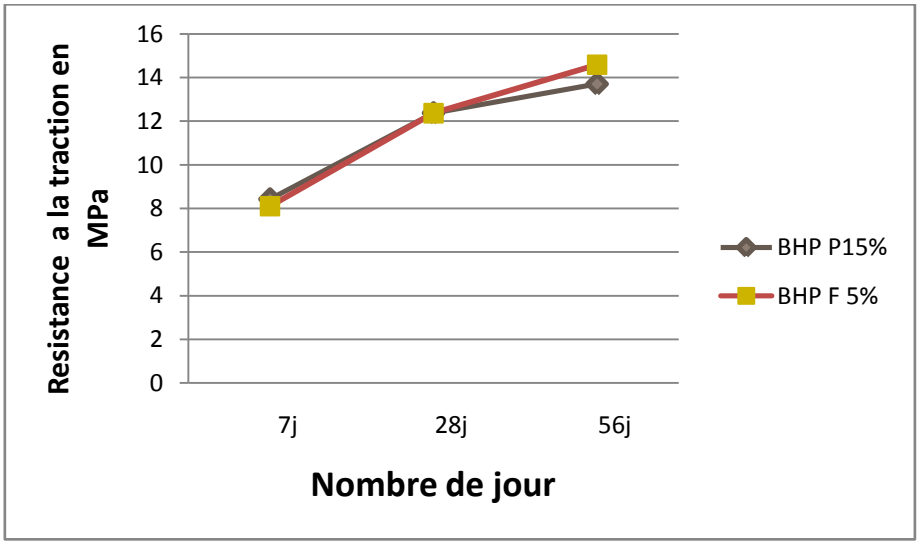


Figure III.55: Comparaison entre la résistance a la traction a E/C=0.35 de la PZN et la FS

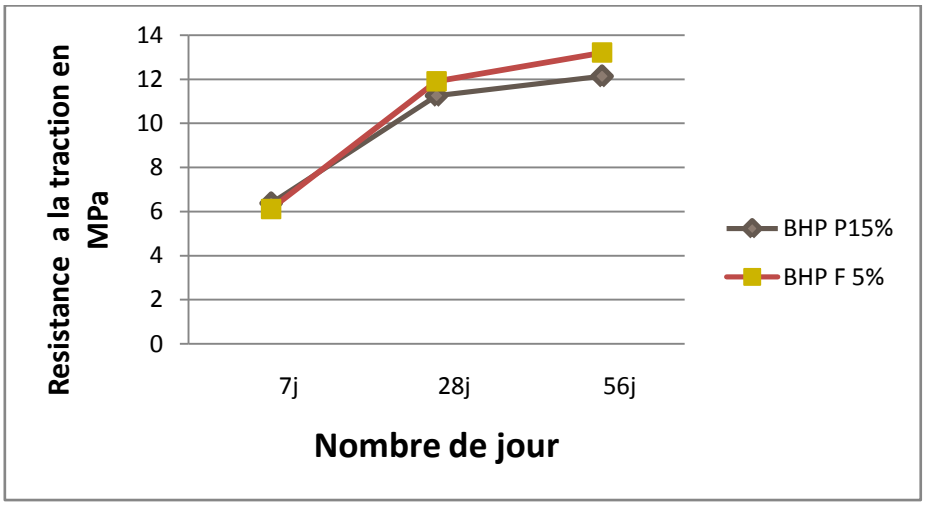


Figure III.56: Comparaison entre la résistance a la traction a E/C=0.40 de la PZN et la FS

sur la **figure III.55 et III.56** on voix que la fumée de silice un une résistance inferieur a jeune âge (7j) que la pouzzolane naturelle pour les deux rapport E/C.

a titre d'exemple :a E/C =0.35 a 7j ,le BHP P15% est plus grand que le BHP FS 5% de 3.95%.

a titre d'exemple : a E/C =0.35 a 28j ,le BHP FS 5% est plus grand que le BHP P15% de 6.4%.

III.3.3.3. Essai du retrait ambiant:

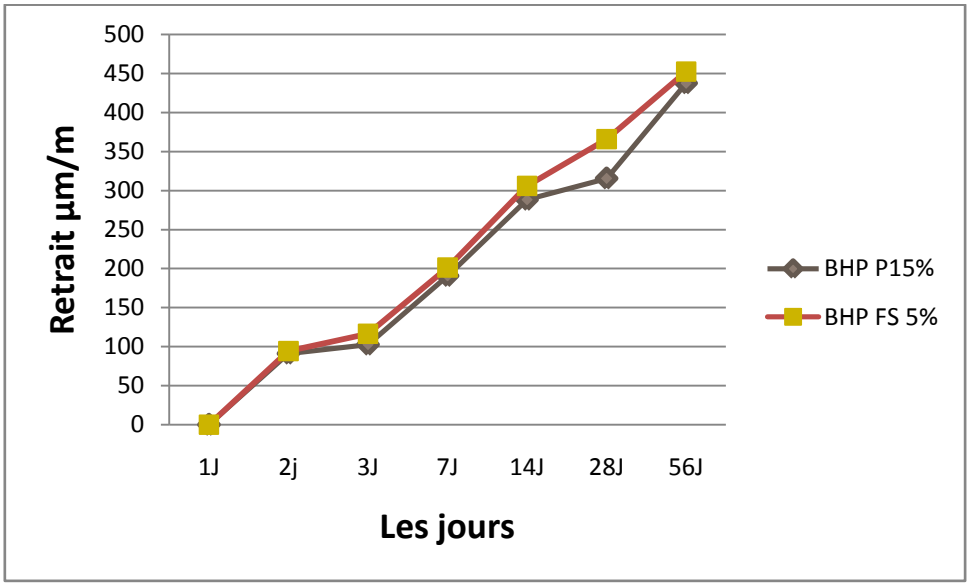


Figure III.57: Comparaison entre le retrait a E/C=0.35 de la PZN et la FS

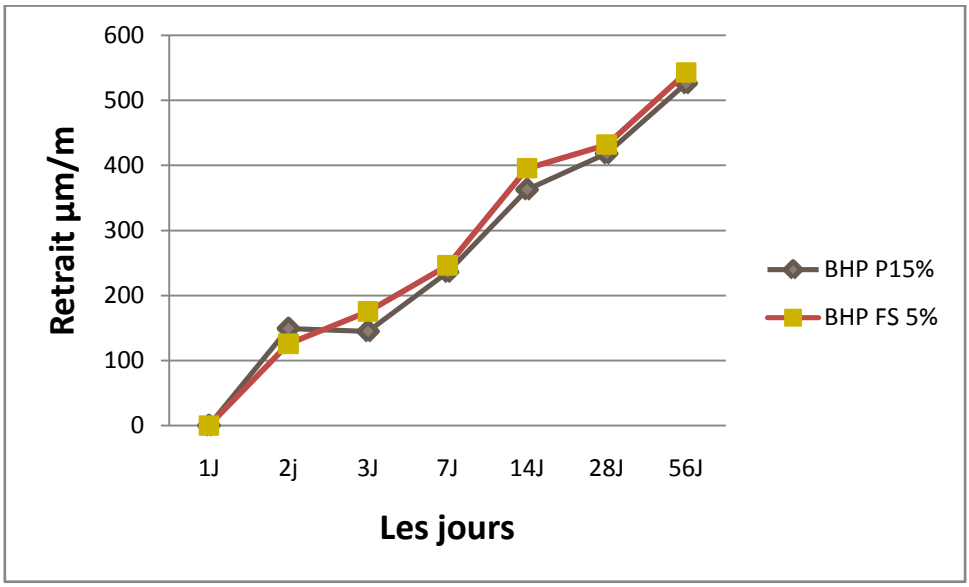


Figure III.58: Comparaison entre le retrait a E/C=0.40 de la PZN et la FS

on remarque sur les figures **III.57** et **III.58** que le taux du retrait est un peu élevé sur le mélange de la fumée de silice pour les deux rapport E/C. Cela est causé par la finesse élevé de la fumée de silice par rapport au pouzzolane

III.3.3.4. Essai du gonflement ambiant:

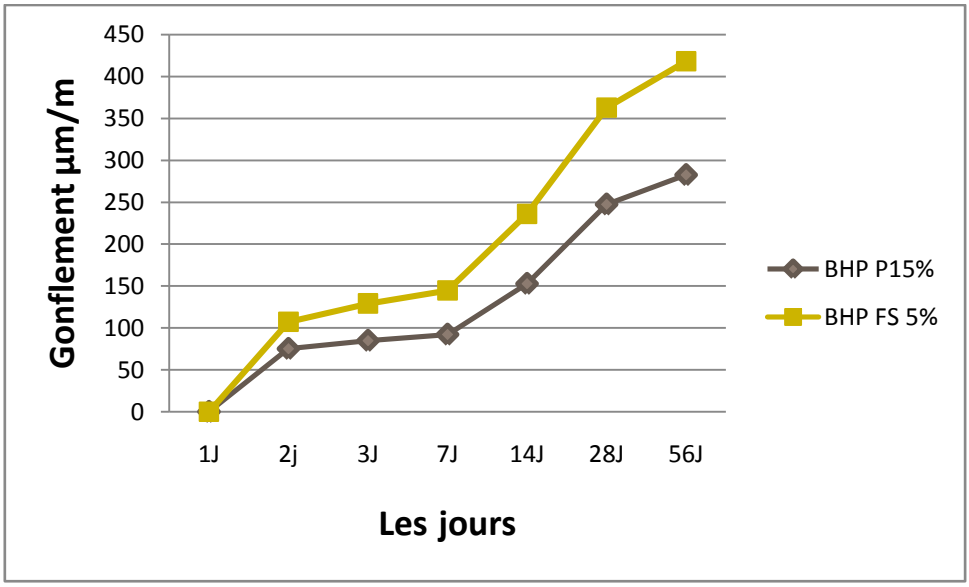


Figure III.59: Comparaison entre le gonflement a E/C=0.40 de la PZN et la FS

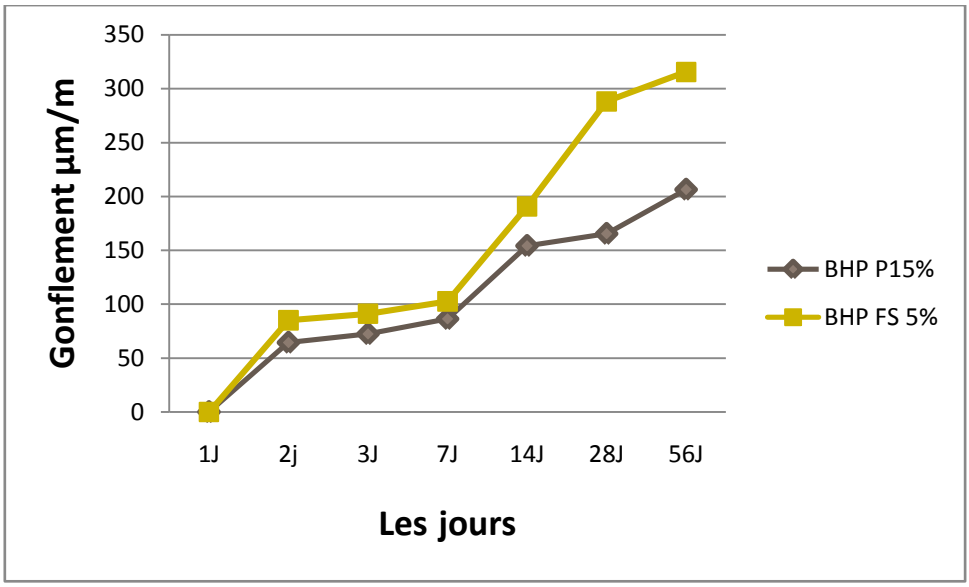


Figure III.60: Comparaison entre le gonflement a E/C=0.35 de la PZN et la FS

D'âpres les **figures III.59 et III.60** on voix clairement que le mélange de fumée de silice a le taux de gonflement plus élevé que le mélange de pouzzolane naturelle.

III.3.3.5. Essai de la variation massique :

A. Variation massique dur au retrait:

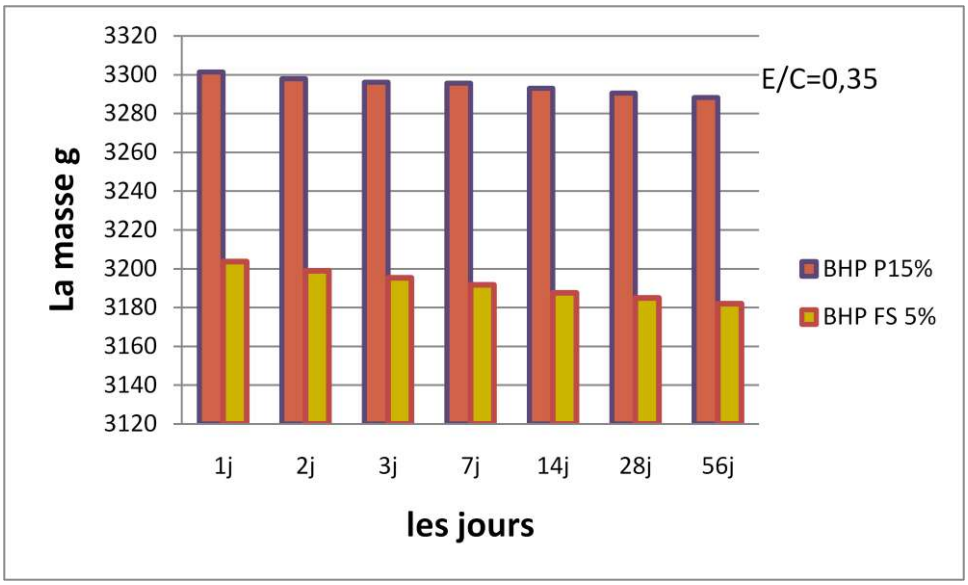


Figure III.61: Comparaison entre la variation de masse due au retrait a E/C=0.35 de la PZN et la FS

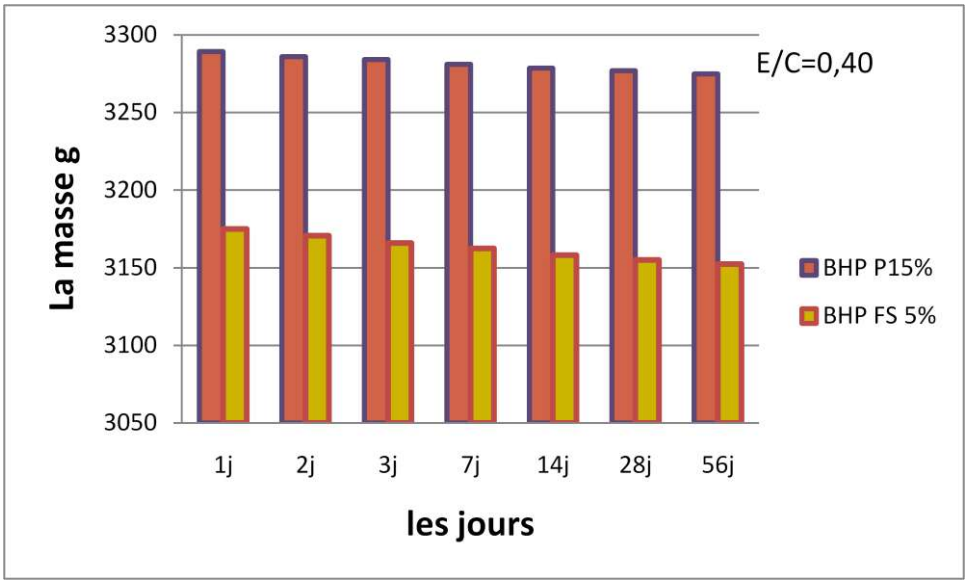


Figure III.62: Comparaison entre la variation de masse due au retrait a E/C=0.40 de la PZN et la FS

on voix pour les deux **figures III.61 et III.62** que la variation de la masse due au retrait est en baisse pour les deux mélange avec un taux presque le même .

B. Variation massique dur au gonflement:

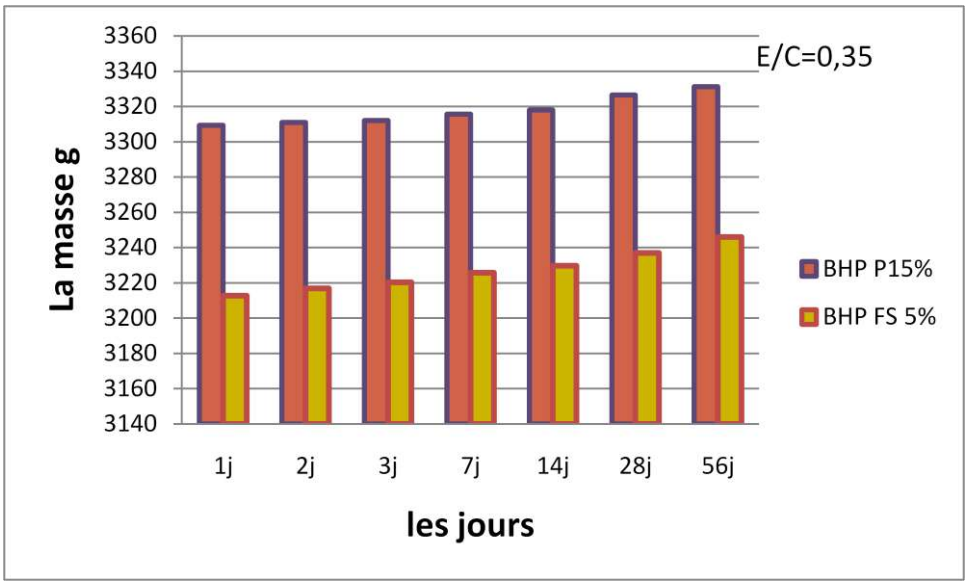


Figure III.63: Comparaison entre la variation de masse due au gonflement a E/C=0.35 de la PZN et la FS

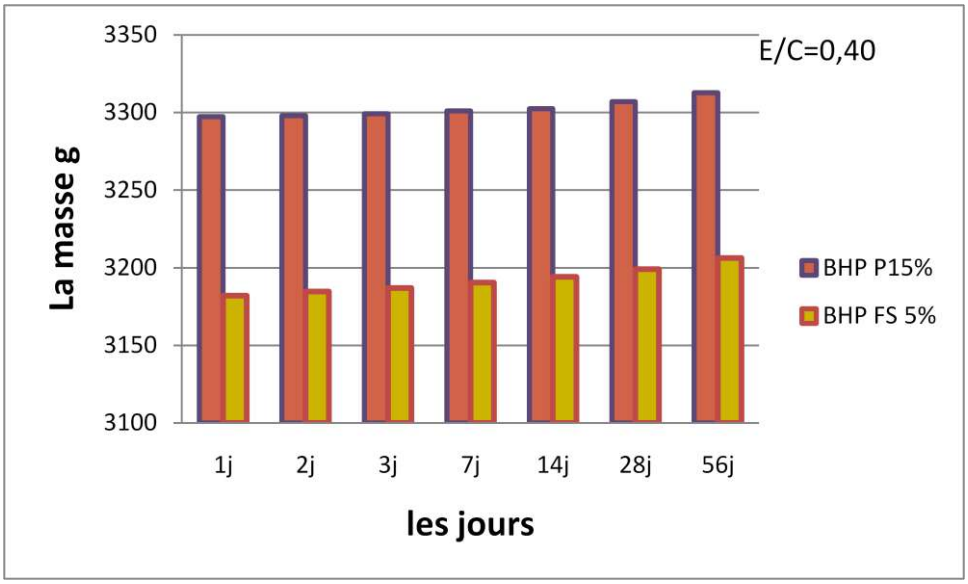


Figure III.64: Comparaison entre la variation de masse due au gonflement a E/C=0.40 de la PZN et la FS

pour la variation de la masse due au gonflement sur les figure **III.63** et **III.64** le taux d'augmentation de la masse pour le mélange de fumée de silice est légèrement plus grand a celui de la pouzzolane naturelle .

exemple :a E/C =0.4 , la variation de la masse pour le mélange BHP FS 5% est de 1.03% et pour le melange BHP P15% la variation est de 0.66% ,d'ou une difference de 0.47%

III.3.3.6. Essai de l'absorption :

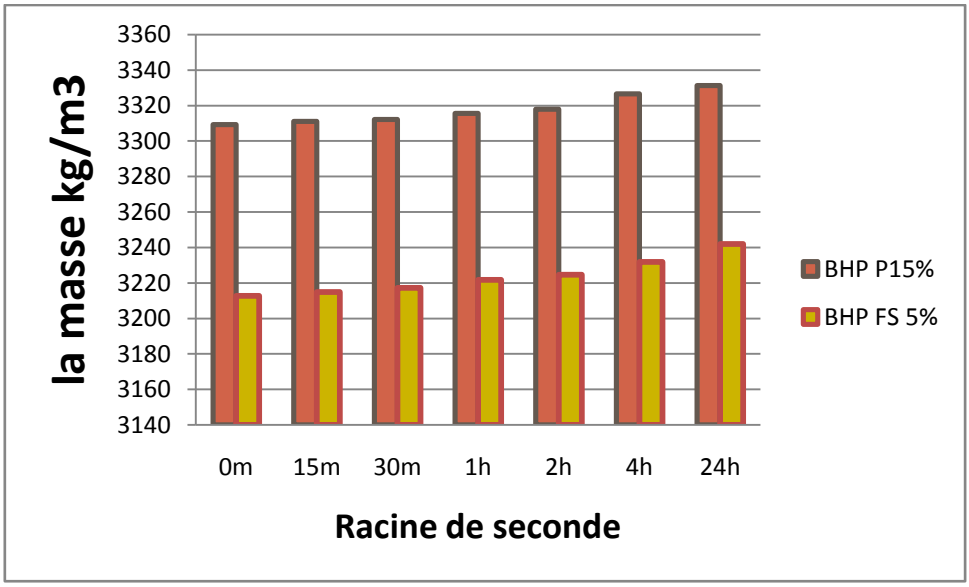


Figure III.65: Comparaison entre l'absorption a E/C=0.35 de la PZN et la FS

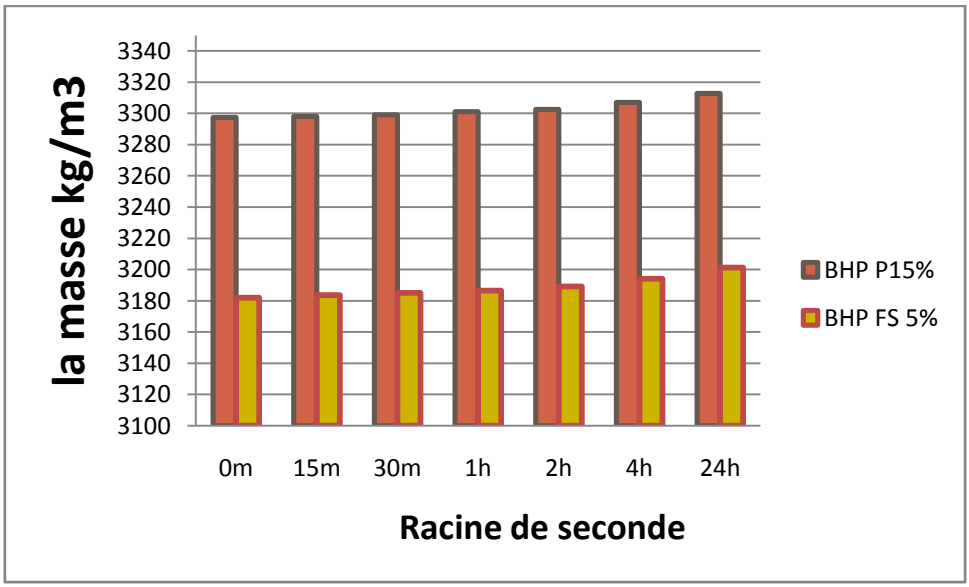


Figure III.66: Comparaison entre l'absorption a E/C=0.40 de la PZN et la FS

des figure **III.65** et **III.66** on deduit que l'absorbtion est un plus grande sue le melange de fumée de silice par rapport au pouzzolane naturelle . exemple :a E/C = 0.40 , l'absorption du bhp FS 5% est de 0.60% et pour le BHP P15% est de 0.47%.

Conclusion générale

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'obtenir une résistance a la compression plus ou moins égale a 60MPa a 28jour correspondant a un BHP avec l'utilisation d'un matériau local qui est la pouzzolane naturelle, et âpres avoir étudier et analysé les résultats des essais a l'état frais et durci ,nous avons pu arriver au conclusions suivantes :

- Le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle et par la fumée de silice
- Le dosage en superplastifiant augmente avec la diminution du rapport E/C
- La pouzzolane naturelle donne une meilleur résistance a 15% de substitution de ciment et la fumée de silice avec 5% de substitution.
- La pouzzolane naturelle et bonne pour concevoir un béton haute performance avec 82MPa a 28jour
- Le retrait et le gonflement diminue avec l'augmentation du dosage en superplastifiant
- L'absorption capillaire diminue avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice et la pouzzolane naturelle.
- Le dosage de superplastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice
- La résistance a la compression augmente avec la diminution du rapport E/C
- La pouzzolane naturelle donne moins de gonflement que la fumée de silice
- La variation massique due au retrait et au gonflement diminue avec l'augmentation de la pouzzolane naturelle ou la fumée de silice
- La variation massique diminue avec la diminution du rapport E/C
- La densité diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle ou en fumée de silice

Notre travail a ainsi donné réponse aux questions qui se posaient au départ de ce projet sur l'effet de la pouzzolane naturelle sur les BHP , cependant, de nouvelle études pourront faire suite a ce travail en envisageant de faire :

- Varier les finesses de la pouzzolane naturelle
- Diminuer encore plus le rapport E/C jusqu'à environ 0,32
- Essayer de faire une substitution de ciment avec un mélange de fumée de silice et la pouzzolane naturelle
- Envisagé d'utiliser en plus du superplastifiant des entraineur d'air
- Envisagé aussi d'essayer d'autre addition minérale

[1]. AITCIN P C. 'Developments in the application of high-performance concretes', Construction and building materials, Vol. 9, No. 1, 1995.

[2] Benmansour.M et Benhamidat.M. 2011. Influence de la teneur en fillers sur les performances des BAP. master 2 en génie civil. p. 117.

[3]. MLADENKA S C et AITCIN P C., « Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice » Can. J. Civ. Eng. Vol. 30, 2003, CNRC Canada

[4]. SHAH S.P.; AHMAD S.H. "High performance concretes and applications" Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994.

[5]. DE SHUTTER ; « le béton à hautes performances ». Bulletin publié par : FEBELCEMfédération
de l'industrie Belge – (juillet 2007)

[6]. FEVRE C. (Ed.), « Projet National BHP 2000 – Les bétons à hautes performances Guides Pratiques (3 tomes) », Paris : IREX, 2002, 2003.

[7]Aitcin.P-C. 1983. Condensed Silica Fume. Québec, Canada : Editions de l'université de Sherbrook. p. 52. ISBN 2-7622-0016-4.

[8] LAKHAL RIDHA, élaboration des bétons a hautes performances a base Des sous produit locaux Formulation et caractérisation physico-mécanique
Université BADJI MOKHTAR -ANNABA

[9]. ISMAIL, M., « avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures » (ponts, centrales nucléaires), thèse de doctorat INSA, 2006.

[10]. MALIER, Y., « les bétons à hautes performances -caractérisation, durabilité, applications », presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992.PARIS

[11]. Aitcin.P-C. 2001. beton a haute performance. paris : eyrolles.

[12] ABED M. et BENMOUSSA M. fabrication d'un BHP avec les matériaux locaux disponibles. Université Abou bekr belkaid - tlemcen
Faculté de technologie - département de génie civil

[13] MENNAAI AMOR, contribution a l'étude rhéologique
D'un béton a hautes performances (bhp) local,
Université 20 aout Skikda, faculté des sciences de l'ingénieur
Département de génie civil

[14] site web 1 : www.google.com/ béton fibré à ultra haute performance écrie par Gaston D. et col.

[15]. FERNON V. et coll., "Interaction Between Portland Cement Hydrates and Polynaphtalene sulfonates". SP 173-12. [13]. MAZLOOM M, RAMEZANIANPOUR AA, BROOKS JJ. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete". Cement and Concrete Composites 2004.

[16]. RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR S., SPIRATOS N., "Superplastici-zers: Properties and Applications in Concrete", CANMET, Ottawa,Canada, 1998.

[17] Université de Sherbrooke GCI 714 -chapitre 2- Durabilité et réparations du béton

[18]. KIM B.-G., JIANG S., JOLICOEUR C., AÏTCIN P.-C., "The Adsorption Behavior of PNS Superplasticizer and its Relation to Fluidity of Cement Paste", Cement and Concrete Research, 30, 2000.

[19] UCHIKAWA H., HANEHARA S., SAWAK D., "The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared with Organic Admixtures", Cement and Concrete Research, 27, 1, 1997. [16]A.MEBROUKI «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.

[20]. AÏTCIN P C, JIANG S, KIM B G, PÉTROV, « L'interaction ciment/superplastifiant Cas des polysulfonates ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 233 - Juillet- Aout 2001 - RÉF. 4373 - Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

[21] EDWIGE Nicolas, « Compatibilités et Incompatibilités Liants / Superplastifiant », XXVIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2008 - PRIX RENE HOUPERT.

[22] Sabah Ben Messaoud, « Formulation des bétons à hautes performances » Université de Biskra, Algérie, décembre 2011

[23] BELAIDI AMINA,2014 : '' etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les proprietesaux etats frais et durci des betons'' memoire de master universite abou bekr belkaid - tlemcen

[24] Mayer, A. 1979. Experiences with the use of superplasticizers in Germany. ACI SP-62.

[25] M. Belouadah, Influence d'un ajout sur le comportement mécanique des bétons à haute performance soumis à des températures élevées. *1 Université de M'sila, Algérie*

[26] J. ALEXANDRE, J-L. SEBILEAU. « Le laitier de haut fourneau : élaboration, traitements, propriétés, emplois ». C.T.P.L, Paris 1988.

[27] P-CLAUDE. AITCIN. « Bétons haute performance». Edition Eyrolles, Janvier 2001,INSB2-212-01323-X. Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

[28] MELOLEEPSZY J, DEJA J. "The effect of variable curing conditions on the properties of mortars with silica fume". ACI SP-132. 2; 1992.

[29] MAZLOOM M, RAMEZANIANPOUR AA, BROOKS JJ. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strengths concrete". Cement and Concrete Composites 2004

[30] AITCIN PC; LAPLANTE P, BEDARD C. "Development and experimental use of a 90MPa field concrete". High Strength Concrète (ACI SP- 87); 1985.

[31] GAHER HAIFA. «Analyse de résistance à la traction et retrait de béton à haute performance». Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 04 Décembre 2004.

[32] site web : www.infociments.fr/telecharger/SB-OA-2011-3.pdf

[33] Nanthagopalan P., Haist M., Santhanam M., Müller H.S., (2008), «Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions», Cement & Concrete Composites 30, pp. 763–768.

[34] Z. RAHMOUNI et TEBBAL, Influence d'un ajout sur le comportement mécanique des bétons à haute performance
soumis à des températures élevées.

[35] Aouad, Idriss, Étude de l'influence du rapport eau/liant, de la fumée de silice et d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de pâtes de ciment
faculté de génie civil l'Université de Sherbrooke(Québec CANADA)

[36]. AITCIN P. C., AUTFAGE F., "comparative study of de cementations properties of different fly ashes". ACI SP-91, 1986.

[37] J.M.GEOFFRAY, R.VALLADEAU : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92-nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91-94.

[38] Mohamed Boudiaf» 'influence de l ajout de la pouzzolane sur les caracteristique physico-chimique des ciments" Université des sciences et de la technologie d'Oran-

[39] R.SERSALE : Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes. Sous thème IV-1.7eme Congrès International de la chimie des ciments. Vol I. Paris, 1980.

[40] Kaid Nouria 2002.

[41] L'activité pouzzolanique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69

[42] Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, in 6th International Congress on the Chemistry of Cement, Mocow, September 1974

[43] Publication du 01-01-1974 de l'institut de recherche de la construction « CBD-140-F. Comportement thermique des murs de maçonnerie en béton sous l'action du feu » de T. Z. harmathy et l. w. allen date de publication 01-01-1974.

[44] La pratique des ciments mortier et bétons « caractéristiques des liants des bétons mise en oeuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1) Michel Vénuat 1989.

[45] Publication Internet « mailto:philippe.montel@auvergne_volcan.com » 2004.

[46] Melle KHERROUBI Djamila, Elaboration d'un éco-matériau par activation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf par la chaux: caractérisation mécaniques des mortiers 1/3, faculté de chimie département de génie des matériaux

[47] Sihem HAMMAT, influence du laitier et de la pouzzolane sur le retrait des mortiers autoplacants, universite saad dahlab de blida,Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Civil

[48]. "Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/Highperformance
concrete", ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005.

[49]. BEHIM; Cours de matériaux "structuration et hydratation des ciments", Cours du Première année Post Graduation Génie Civil Option Matériaux et durabilité, université d'Annaba 2006 / 2007.

[50] site web : http://s4.e-monsite.com/2011/04/21/98202702methode-de-composition-beton-pdf.pdf

[51]. GUETTECHE M.N., « Contribution à la valorisation des laitier de haut-fourneau d'EL HADJAR dans le domaine de la construction – caracterisation des matériaux élaborés » - thèse de doctorat, université mentori- constantine, 2002.

[52]. PIMIENTA, P. « Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées - Résistances en compression et modules d'élasticité ». Cahiers du CSTB – n° 3353 – Livraison 421 – Juillet Août 2001.

[53]. ONOFFREI M., BALLIVY G. , KHAYAT K. H. « Microstructural characteristics of HPC under different thermo-mechanical and thermo-hydraulic conditions » Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, December 1999.

[54]. GAW_SKA HAGER Izabela « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques » Thèse de doctorat à

l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie 2004.

[55]. VOINOVITCH I.A., DRON R. « Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé ». Bulletin – liaison lobo, Ponts et Chaussées, 83 mai-juin 1976.

[56]. DIAMOND, S., 'The Microstructure of Cement Paste in Concrete'. VIII International Cong. Chem.Cem., vol I, Rio de Janeiro 1986.

[57]. PHAN, L.T., LAWSON, J.R. « Effect of elevated temperature exposure on Heating Characteristic, Spalling, and Residual Proprieties of High Performance Concrete ». Materials and Structures, Vol.34, March 2001.

[58]. SLIWINSKI J., LEONARD R., TRACZ T. « Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish) », Proc. Of 2nd Conf. "Dni Betonu", Polski Cement, Wisła 2004.

[59] NF P 15-404,NF P 18-(304 -412-598) Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme,
Dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989

[60] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[61] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[62] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire », AFNOR.

[63] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[64] Dreux G.et Festa J., 1998, Nouveau guide du béton et ses constituants, 8emeédition, Eyrolles.

[65] NF EN 12350-2 Les essais de consistance - essai d'affaissement-détermination de la classe de consistance du béton

[66] NF EN 12390-1-2-3-4-5, 2003, « Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes », AFNOR

[67] NA427 ,1989 «Détermination de la résistance a la compression des éprouvettes» Norme algérienne.

[68] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d‟essai-détermination de l‟absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002

Annexes

Annexes A

A. Broyage de la pouzzolane

A.1. Définition

Le broyage consiste à fragmenter la matière jusqu'à l'obtention d'une poudre, pour favoriser les réactions des éléments chimiques. La charge d'un broyeur est constituée généralement des boulets sphériques en acier forgé dont le diamètre peut varier de 30 à 125mm selon les dimensions du produit à broyer et à la granulométrie recherchée à la sortie.

A.2. Type de broyeur

a) broyeur à meules ou broyeur à galets

Du point de vue technique, ce broyeur entre dans la catégorie des broyeurs à force extérieurs c'est-à-dire que les éléments broyeurs sont pressés positivement sur le lit de matière.
L'élément broyeur est constitué par des gales qui roulent librement dans cette auge rotative ou ils sont pressés sur la matière par l'intermédiaire d'un dispositif approprié. Les galets de broyeur, relativement grands, sont raccordés à un anneau stationnaire, de telle façon qu'il dévie vers le haut ou oscille radialement. La matière à broyer est introduite soit latéralement ou verticalement et tombe dans l'auge de mouture par le centre des anneaux. Ce type de broyeur est limité à l'utilisation du broyage de matière des caractéristiques d'humidité <20%, abrasivité 6%.

b) broyeur à boulets

Ces appareils ont pour rôle de transformer les matières grossières en poudres très fines. Les broyeurs à boulets sont nés de l'observation de l'action réciproque des galets au bord de la mer qui brassés par les vagues, réduisent en s'entrechoquant, les grains de sable en grains de plus en plus fins, en même temps que leurs usures leurs donnent une forme plus au moins sphérique.

c) broyeur aérofall

Ce broyeur est constitué d'une vérole de grand diamètre et de faible longueur montée sur deux tourillons creux, le rapport diamètre/longueur (dimension interne) est de l'ordre de 2,5 à 4,2 suivant la taille du broyeur.

A.3. Type d'installation

Il existe deux types d'installation de broyage :

- ❖ Broyage à circuit ouvert

Avantages : - procéder de broyage simple

- chaque broyage pouvant avoir le diamètre optimal

- tourner à la vitesse optimale pour l'action demandé aux corps bruyants

Inconvénients : - installation coûteuse

- débit faible

- produit fini incontrôlable

- ❖ Broyage à circuit fermé

Avantages : - Sélection plus soignée

- Augmentation sensible du débit

- Plus de production

Inconvénients : - plus chèr à l'achat

- réglage difficile

A.4. Théorie de broyage

Broyer c'est réduire un morceau ou particule en plusieurs morceaux, particules plus petites et suivant la loi de **RITTINGER** (ISO7) qui se vérifie constamment. « La puissance nécessaire pour la réduction des éléments est directement proportionnelle à la nouvelle surface obtenue)

D'après la loi de **RITTINGER**, la puissance employée pour réduire en 64 morceaux de 1cm d'arrête sera double de celle employée pour faire les morceaux de 2 cm d'arrêtes.

Donc pour obtenir un laitier ou un ciment à 6000cm^2/gr il faudra théoriquement une puissance double que pour un laitier ou ciment à 3000cm^2/gr.

A.5. Fonctionnement du broyeur

- Si la force centrifuge est égale au poids de boulet, il y a centrifugation

- Les engins broyant sont entraînés dans la rotation du broyeur à une vitesse de rotation voisine de 75% de la vitesse critique.

B.exemple de calcul de la composition de bêton témoin

B.1. LES DONNEES :

Pour un volume du bêton de **V= 20l** (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : ρ_C =3100 kg/m^3
- Sable bahbah ρ_S =2440kg/m^3
- sable mokorno $\rho_{S=}$ 2390kg/m^3
- gravier (8/15) $\rho_{S=}$2660kg/m^3
- gravier (8/15) $\rho_{S=}$2670kg/m^3
- Eau : ρ_E =1000kg/m^3

Coefficient d 'absorption du sable bahbah A_b= 2.8

Coefficient d 'absorption du sable concassé $A_{bg=}$ 0.95

Coefficient d 'absorption du gravier 8/15 $A_{g=}$ 0.5

Coefficient d 'absorption du gravier 15/25 A_g=0.4

On fixe le rapport (par poids) ***E/C*** = 0.4

Le superplastifiant (tempos 12) il est de 30% extrait (il contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : **%Sp** =0.35% du poids de ciment (ou poudres).

B.2. CALCUL DES QUANTITES DE CHAQUE CONSTITUANT :

B.2.1. Le ciment

La quantité de ciment ***C*** en **kg**:

C (kg)= (20*Mc/Vtot)

Avec :

Mc = 450kg (quantité d'un m3 de bêton)

B.2.2. Le Sable

la quantite de sable **S** en **kg :**

S(kg) = (20*Ms/Vtot)

B.2.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est ***Sp*** :

Sp(kg)=(% Sp*C)/100

B.2.4. L'eau

L'eau ajoutée au bêton (***E***) est divisée en deux partie une première partie E_1, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la

deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du bêton dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E=\left(\frac{V\times\%E_{vol}}{100}\times\frac{\rho_E}{1000}\right)-\left(\frac{Sp\times 70}{100}\right)-\left(\frac{V\times S/M\times\rho_S}{1000}\times\frac{correction}{100}\right)$$

Eau1

$$E_1 = E\times 0.70$$

Eau2

$$E_2 = E\times 0.30$$

Annexes C

C.Les tableaux de la formulation d'un 1 m3 de BHP

C.1 béton a haute performance à base de pouzzolane

C.1.1 avec E/C=0.4

Tableau C.1 préparation BHP avec 5% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***137,90***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,4***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***8,55***
add 5% (kg)	**22,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***967,87***

Tableau C.2 préparation BHP avec 10% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***130,65***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,47***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***17,09***
add 10% (kg)	**45**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***969,15***

Tableau C.3 préparation BHP avec 15% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***

MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***123,39***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,52***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***25,64***
add 15% (kg)	**67,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***970,44***

Annexes C

Tableau C.4 préparation BHP avec 20% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***116,13***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,62***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***34,18***
add 20% (kg)	**90**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***971,73***

C.1.2 avec E/C=0.35

Tableau C.5 préparation BHP avec 5% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***137,90***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,7***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***8,55***
add 5% (kg)	**22,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***967,87***

Tableau C.6 préparation BHP avec 10% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***130,65***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***

adj (%)	***0,8***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***17,09***
add 10% (kg)	**45**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***969,15***

Annexes C

Tableau C.7 préparation BHP avec 15% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***123,39***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,83***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***25,64***
add 15% (kg)	**67,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***970,44***

Tableau C.8 préparation BHP avec 20% PZN

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***116,13***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,91***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***34,18***
add 20% (kg)	**90**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***971,73***

C.2 béton a haute performance à base de fumée de silice

C.2.1 avec E/C=0.4

Tableau C.9 préparation BHP avec 5% FS

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***137,90***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,87***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***8,55***
add 5% (kg)	**22,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***967,87***

Tableau C.10 préparation BHP avec 10% FS

Annexes C

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***130,65***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,98***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***17,09***
add 10% (kg)	**45**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***969,15***

Tableau C.11 préparation BHP avec 15% FS

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***123,39***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***1,11***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***25,64***
add 15% (kg)	**67,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***970,44***

C.2.2 avec E/C=0.35

Tableau C.12 préparation BHP avec 5% FS

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***

MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***137,90***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***0,97***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***8,55***
add 5% (kg)	**22,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***967,87***

Tableau C.13 préparation BHP avec 10% FS

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***130,65***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***1,1***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***17,09***
add 10% (kg)	**45**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***969,15***

Tableau C.14 préparation BHP avec 15% FS

Donnees							
MG(0/3)(Kg)	**461,67**	δs(0/3)(kg/m3)	**2390**	(0/3)abs(%)	**0,95**		***193,17***
MG(8/15)(Kg)	**531,28**	δs(8/15)(kg/m3)	**2660**	(8/15)abs(%)	**0,5**		***199,73***
MG(15/25)(Kg)	**559,49**	δs(15/25)(kg/m3)	**2670**	(15/25)abS(%)	**0,4**		***209,55***
Ms (kg)	***150,00***	δs(kg/m3)	***2440***	Sabs(%)	***2,8***	Vs(l)	***61,48***
Mc (kg)	***450***	δc(kg/m3)	***3100***			Vc(l)	***123,39***
Me (kg)	***157,5***	δe(kg/m3)	***1000***			Ve(l)	***157,50***
adj (%)	***1,35***	Extr sec (%)	***30***			Vadd(l)	***25,64***
add 15% (kg)	**67,5**	δadd(kg/m3)	***2633***			Vtot (l)	***970,44***

Annexes C

Annexes C

Valeur de la résistance a la compression avec 5% de fumée de silice a 28 jours avec E/C=0.35



Annexes C

Valeur de la résistance a la compression avec 15% de la pouzzolane a 28 jours avec E/C=0.35

Annexes C


Sample Failed
Sample Peak Load 766.0
Sample Stress 76.60
Pace Rate 3.00
Sample Density 0.000
8/11/16

Annexes C

Fiche technique de ciment

SCIMAT SOCIETE DES CIMENTS DE AIN TOUTA FILIALE DU GROUPE GICA

SPA AU CAPITAL SOCIAL DE 2.250.000 000 DA **CERTIFIEE ISO 9001 :2008 & ISO 14001 :2004**

CIMENT POUR TRAVAUX DANS LES MILIEUX FORTEMENT AGGRESSIF

CPA-CEM I 42.5 ES

TYPE ET COMPOSITION DU CIMENT

Désignation :

Ciment pour travaux en milieux fortement agressifs.

Identification :

CPA-CEM I 42,5 ES

Composition :

Clinker : au moins 97%.

Ajouts : la proportion de constitutions secondaires est limitée à 03%.

Conditionnement :

Vrac : camion 20T / wagon 50T

Sac : de 50 Kg

Annexes C

Le ciment **CPA- CEM I 42.5 ES** de l'ERCE répond aux exigences de la norme NA 433 :2002

Caractéristiques Physiques :

Temps de début de prise mesuré sur pâte pure ≥ 60 minutes.

Retrait à 28 jours d'âge sur mortier normal ≤1000 µm / m.

Stabilité mesurée sur éprouvette de pâte pure ≤ 05 mm.

Caractéristiques Mécaniques :

Les résistances mécaniques à la compression font apparaitre une valeur moyenne des résultats à 28 jour voisine de 52,5 N / mm².

Les valeurs limitées garanties sont : ≥ 10,0 N / mm² à 02 jours.

≥ 40,0 N / mm² à 28 jours.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Ciment	**SO3 (si C3A ≤ 3%)**	**≤ 3,5%**
	SO3 (si C3A ≤ 5%)	**≤ 2,5%**
	PAF	**≤3,0%**
	Rés.Ins	**≤0,75%**
	MgO	**≤4,0%**
Clinker	**C3A**	**≤5,0%**
	C4AF+2(C3A)	**≤20,0%**

caractéristiques de fumée de silice

Aspect	***Poudre***
Densité	***0,5***
Densité absolu	***2.3 ± 0.1***

Composants	***SiO2***	***85(%)***
	SO3	***< 2,5 (%)***
	Cl-	***< 0,2 (%)***
Surface spécifique		***> 15 (m²/gr)***
Humidité par étuve à 105°C		***< 1 (%)***
Taille des particules		***< 0,1 (microns)***

Super plastifiant Tempo 12 :

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12 Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2. Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : longue rhéologie (>2h), robustesse à la ségrégation, qualité de parement.

Caractéristiques

Aspect Liquide brun clair

Stockage Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation 1 an en emballage intact

Annexes C

Données techniques

densité 1,06 ± 0,01

pH 6 ± 1

Teneur en Na2O Eq. 1 %

Extrait sec 30,2 ± 1,3 %

Agréments, essais de laboratoire PV CNERIB : DTEM : 33/2010.

2/22 SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Teneur en ions Cl Conditions d'application Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant. Mise en œuvre SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.

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

Annexes C